

**Technologiebezogene Professionalisierung angehender  
Physiklehrkräfte**  
**– Entwicklung und Evaluation eines Lehrkonzepts in der  
Astrophysik mit digitalen Medien**

Dissertation

zur Erlangung des mathematisch-naturwissenschaftlichen Doktorgrades

"Doctor rerum naturalium"

der Georg-August-Universität Göttingen

im Promotionsprogramm Physik

der Georg-August University School of Science (GAUSS)

vorgelegt von

**Ronja Langendorf**

aus Korbach

Göttingen, 2022

## **Betreuungsausschuss**

APL. PROF. DR. SUSANNE SCHNEIDER, Didaktik der Physik, Fakultät für Physik, Georg-August-Universität Göttingen

PROF. DR. STEFAN DREIZLER, Institut für Astrophysik, Fakultät für Physik, Georg-August-Universität Göttingen

PROF. DR. THOMAS WAITZ, Abteilung für Fachdidaktik Chemie, Institut für Anorganische Chemie, Georg-August-Universität Göttingen

## **Mitglieder der Prüfungskommission**

Referentin    APL. PROF. DR. SUSANNE SCHNEIDER, Didaktik der Physik, Fakultät für Physik, Georg-August-Universität Göttingen

Korreferent    PROF. DR. STEFAN DREIZLER, Institut für Astrophysik, Fakultät für Physik, Georg-August-Universität Göttingen

## **Weitere Mitglieder der Prüfungskommission**

PROF. DR. THOMAS WAITZ, Abteilung für Fachdidaktik Chemie, Institut für Anorganische Chemie, Georg-August-Universität Göttingen

PROF. DR. PASCAL KLEIN, Didaktik der Physik, Fakultät für Physik, Georg-August-Universität Göttingen

PROF. DR. WOLFRAM KOLLATSCHNY, Institut für Astrophysik, Fakultät für Physik, Georg-August-Universität Göttingen

DR. RENÉ HELLER, Max Planck Institut für Sonnensystemforschung, Göttingen

Tag der mündlichen Prüfung: 13. Juli 2022

## Danksagung

Ein besonderer Dank gilt meiner Betreuerin Prof. Dr. Susanne Schneider, denn durch sie wurde meine Promotion in der Didaktik der Physik überhaupt erst möglich. Dabei schätze ich ganz besonders den herzlichen Umgang sowie die konstruktive Zusammenarbeit. Zudem möchte ich mich für die umfassende Unterstützung während meiner Promotionszeit sehr bedanken – bei Fragen und Problemen konnte ich mich stets auf ihre Hilfe verlassen.

Außerdem möchte ich Prof. Dr. Stefan Dreizler für die produktive und freundschaftliche Teamarbeit während der Planung und Durchführung der Astrophysik-Übung danken. Die Lehre in der Astrophysik und vor allem die damit verbundenen Exkursionen werden mir in guter Erinnerung bleiben. Ich bin sehr dankbar dafür, dass ich meine Begeisterung für die Astrophysik entwickeln und im Promotionsthema aufgreifen konnte.

Daran anschließend gilt allen Mitwirkenden der Einführung in die Astrophysik und insbesondere Rick ein großer Dank für die Offenheit, das Vertrauen und die gelungene Kooperation. Die Zusammenarbeit hat mir viel Freude bereitet. Ich möchte auch den drei Studierenden danken, die meine Arbeit im Rahmen ihrer Masterarbeiten unterstützten.

Bei Prof. Dr. Pascal Klein möchte ich mich dafür bedanken, meine Promotion durch das Forschungsprojekt zum HRD auf eine spannende und aufschlussreiche Art unterstützt zu haben.

Der gesamten Arbeitsgruppe möchte ich für die gemeinsame Zeit danken. Mit Freude blicke ich auf den herzlichen Umgang zurück. Zudem empfand ich den gegenseitigen Austausch und das damit verbundene Feedback als sehr wertvoll. Bei Larissa und Johannes möchte ich mich in besonderer Weise für die zuverlässige Unterstützung bedanken.

Schließlich bedanke ich mich von ganzem Herzen bei meiner Familie und meinen Freunden für die jahrelange Begleitung, den Rückhalt und das Vertrauen. Hieraus ziehe ich viel Kraft und Energie, um die Hürden des Alltags und natürlich auch der Promotion zu meistern.

## Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit diskutiert die Entwicklung und empirische Evaluation einer universitären Lehrveranstaltung in Form einer Astrophysik-Übung, bei der das Lehren und Lernen mit digitalen Medien im Fokus steht. Gerahmt durch Design-Based Research wurde innerhalb von zwei Forschungszyklen ein innovatives Lehrkonzept zur Förderung der fachspezifischen digitalen Kompetenzen angehender Physiklehrkräfte design und mit 32 Lehramtsstudierenden erprobt. Hiermit wird den curricularen Forderungen nachgegangen, Lehramtsstudierende gezielt auf den lernförderlichen Einsatz von digitalen Medien im Klassenzimmer vorzubereiten, damit diese den Anforderungen eines modernen Physikunterrichts im Zeitalter der Digitalisierung gerecht werden können. Das Konzept setzt theoriebasierte Gestaltungsempfehlungen zur Professionalisierung praktisch um, indem z.B. das technologische Wissen mit einem astrophysikalischen Inhalt verknüpft und um eine didaktische Perspektive ergänzt wird. Zudem wird ein authentischer Praxisbezug durch den Besuch eines Lehr-Lern-Labors hergestellt. Die Wirksamkeit wurde theoriegeleitet in einem Multi-Method-Ansatz untersucht. Mit einer TPACK-Selbsteinschätzung wurde ein Zuwachs der digitalen Kompetenzen der Lehramtsstudierenden festgestellt. Sie waren zudem positiv gegenüber dem Lernen mit digitalen Medien eingestellt. Anhand von Interviews wurden im ersten Forschungszyklus zwölf wesentliche Stärken (z.B. Praxiserfahrungen) und zwei wesentliche Schwächen (z.B. Klausurvorbereitung) der Lehrveranstaltung identifiziert – letztere bildeten die Grundlage für das Re-Design im zweiten Zyklus. Darüber hinaus wurden bei der Erprobung der Astrophysik-Übung seitens der Studierenden Schwierigkeiten im Umgang mit dem Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD) beobachtet. Das HRD ist ein zentrales und gehaltvolles Werkzeug der stellaren Physik und ein Fachinhalt der Lehrveranstaltung, der in besonderem Maße für digitalgestützte Lehr-Lern-Umgebungen geeignet ist. In der Literatur wird von unterschiedlichen Lernschwierigkeiten beim Verstehen des HRDs berichtet, jedoch fehlt es bislang an einer detaillierten Untersuchung dessen, wie Lernende mit diesem Diagramm umgehen. Die vorliegende Arbeit stellt eine Studie mit 35 Physikstudierenden vor, deren Blickbewegung beim Problemlösen mit dem HRD analysiert wurde. In Interviews berichteten sie diesbezüglich von Lernschwierigkeiten (z.B. Achsenskalierung) und Strategien (z.B. genaue Achsenbetrachtung). Aus den Studienergebnissen können Empfehlungen zur Entwicklung von (digitalgestützten) Lehr-Lern-Umgebungen zum HRD abgeleitet werden, die im Rahmen dieser Arbeit zur Optimierung der entwickelten Lehrveranstaltung beitragen. Insgesamt liefert die vorliegende Arbeit ein gelungenes Beispiel für die technologiebezogene Professionalisierung angehender Physiklehrkräfte in der Astrophysik, das auch auf andere Fachinhalte und naturwissenschaftliche Disziplinen übertragen werden kann.

## Abkürzungsverzeichnis

2FB	2-Fächer Bachelor mit Profil Lehramt
CK	Content Knowledge
CLT	Cognitive Load Theory
CTML	Cognitive Theory of Multimedia Learning
DBR	Design-Based Research
DigCompEdu	European Framework for the Digital Competence of Educators
digi.kompP	digitale Kompetenzen für Pädagog:innen
DiKoLAN	Digitale Kompetenzen für das Lehramt in den Naturwissenschaften
dK	digitale Kompetenz
DO	Dokumentation
DV	Datenverarbeitung
ECL	Extraneous Load
FOL	Forschendes Lernen
GCL	Germane Load
HRD	Hertzprung–Russell–Diagramm
ICAP	Interactive, Constructive, Active, Passive
ICL	Intrinsic Load
KK	Kommunikation und Kollaboration
KMK	Kultusministerkonferenz
LLL	Lehr-Lern-Labor
M.Ed.	Master of Education
MD	Messwert- und Datenerfassung
MINT	Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften, Technik
P	Präsentation
PCK	Pedagogical Content Knowledge
PK	Pedagogical Knowledge
RB	Recherche und Bewertung
SDSS	Sloan Digital Sky SURvey
SM	Simulation und Modellierung
TAM	Technology Acceptance Model
TCK	Technological Content Knowledge
TK	Technological Knowledge
TPACK	Technological Pedagogical And Content Knowledge
TPB	Theory of Planned Behavior
TPK	Technological Pedagogical Knowledge

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Überblick</b>	<b>1</b>
1.1	Forschungsinteresse und Ziele	2
1.2	Aufbau der Arbeit	3
<b>I</b>	<b>Theoretischer Hintergrund</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Lernen mit digitalen Medien</b>	<b>6</b>
2.1	Lerntheorien	7
2.1.1	Kognitive Belastung	8
2.1.2	Multimediales Lernen	11
2.1.3	Konstruktivismus	13
2.2	Potenzial digitaler Medien für den Lernprozess	15
2.3	Gelingensbedingungen und Gestaltungsprinzipien	18
2.4	Simulationsbasiertes Lernen	21
<b>3</b>	<b>Lehren mit digitalen Medien</b>	<b>27</b>
3.1	Kompetenzrahmen	28
3.1.1	TPACK-Modell	28
3.1.2	Dagstuhl- und Frankfurt-Dreieck	33
3.1.3	Orientierungsrahmen DiKoLAN	35
3.2	Professionalisierung von Lehramtsstudierenden	38
3.3	Einstellung einer Lehrkraft	40
<b>II</b>	<b>Entwicklungsarbeit und Wirksamkeitsstudie</b>	<b>44</b>
<b>4</b>	<b>Design und Entwicklung einer Lehrveranstaltung in der Astrophysik</b>	<b>44</b>
4.1	Design-Based Research	45
4.2	Status Quo und Rahmenbedingungen an der Univ. Göttingen	47
4.2.1	Einführung in die Astrophysik und ihr Potenzial	50
4.3	Entwicklung eines Lehrkonzepts	53
4.4	Struktur der Astrophysik-Übung	58
4.5	Fachinhalt 5: Exoplaneten	64
4.5.1	Umsetzung in der Übung	67
4.5.2	Umsetzung im schulischen Kontext	72
4.6	Fachinhalt 8: HR-Diagramm und Sternentwicklung	73
4.6.1	Umsetzung in der Übung	75

<b>5 Forschungsfragen und Methoden</b>	<b>78</b>
5.1 Forschungsdesign . . . . .	78
5.2 Quantitative Erhebung und Analyse . . . . .	79
5.3 Qualitative Erhebung und Analyse . . . . .	82
5.4 Stichprobe . . . . .	83
<b>6 Ergebnisse des ersten Forschungszyklus</b>	<b>86</b>
6.1 TPACK-Selbsteinschätzung . . . . .	86
6.2 Einstellung . . . . .	87
6.3 Evaluation . . . . .	88
6.3.1 Authentizität und Feedback . . . . .	91
6.4 Manipulation Check . . . . .	91
6.5 Zusammenfassung . . . . .	92
<b>7 Zweiter Forschungszyklus</b>	<b>94</b>
7.1 Re-Design . . . . .	94
7.2 Erprobung . . . . .	95
7.3 Ergebnisse . . . . .	97
7.4 Zusammenfassung . . . . .	101
<b>III Lernende und das Hertzprung–Russell–Diagramm</b>	<b>101</b>
<b>8 Hintergrund und Motivation</b>	<b>102</b>
<b>9 Forschungsfragen und Methoden</b>	<b>104</b>
9.1 Forschungsdesign . . . . .	105
9.2 HRD- und xy-Items . . . . .	107
9.3 Quantitative Erhebung und Analyse . . . . .	111
9.4 Qualitative Erhebung und Analyse . . . . .	113
9.5 Stichprobe . . . . .	114
<b>10 Ergebnisse</b>	<b>114</b>
10.1 Lösungswahrscheinlichkeit, Itemschwierigkeit, Belastung . . . . .	115
10.2 Eye-Tracking . . . . .	117
10.3 Interviews . . . . .	123
10.4 Zusammenfassung und Einordnung . . . . .	125
<b>IV Abschluss</b>	<b>128</b>

<b>11 Diskussion</b>	<b>128</b>
11.1 Entwicklung und Wirksamkeit der Lehrveranstaltung	128
11.2 Lernende und das HRD	132
11.3 Design-Based Research	136
<b>12 Fazit</b>	<b>138</b>
<b>13 Verzeichnisse</b>	<b>141</b>
13.1 Literatur	141
13.2 Abbildungen	156
13.3 Tabellen	158
<b>V Anhang</b>	<b>159</b>
<b>A Lernziele und adressierte digitale Basiskompetenzen</b>	<b>159</b>
<b>B Exemplarische Präsenzaufgaben</b>	<b>162</b>
<b>C Quantitatives Erhebungsinstrument</b>	<b>169</b>
C.1 Einstellung	169
C.2 TPACK-Selbsteinschätzung	170
C.3 Vorerfahrungen	172
C.4 Weiteres	174
<b>D Qualitatives Erhebungsinstrument</b>	<b>179</b>
D.1 Interviewleitfaden	179
D.2 Deduktive und induktive Kategorien	180
<b>E Vorerfahrungen</b>	<b>188</b>
E.1 Zweiter Zyklus	190
<b>F Erhebungsinstrumente der HRD-Studie</b>	<b>192</b>
F.1 Interviewleitfaden	192
F.2 Induktive Kategorien	192
F.3 Fragebogen	198
F.4 Bewertungsschema der HRD-Items	206
F.5 Eye-Tracking Daten	208



# 1 Einleitung und Überblick

Das zeitgemäße Lehren und Lernen im 21. Jahrhundert ist, ebenso wie das private Leben, vom Zeitalter der Digitalisierung geprägt und das nicht erst seit Beginn der Covid-19-Pandemie. Digitale Medien verändern die Kommunikation, die Informationsbeschaffung und die Art und Weise wie wir lernen, denn deren Einsatz kann besonders interaktive, flexible, schülerorientierte und motivierende Lehr-Lern-Situationen schaffen (Girwidz, 2004), die sich positiv auf den Lernprozess auswirken (Hillmayr, Reinhold, Ziernwald & Reiss, 2017). Seit 2016 ist daher das Lernen mit und über digitale Medien für Schulen in Deutschland obligatorisch und wird im Strategiepapier „Bildung in der digitalen Welt“ der Kultusministerkonferenz (KMK) festgehalten (KMK, 2016). Darin werden sechs Kompetenzbereiche spezifiziert, die durch die allgemeinbildenden und beruflichen Schulen gezielt gefördert werden sollen und auf denen das anschließende Hochschulstudium aufbauen soll. Auch Expert:innen im Rat der Europäischen Union erkennen das Potenzial der Digitalisierung für die Bildung und für eine aktive Teilhabe in der Gesellschaft und erklären die digitale Kompetenz als eine der acht Schlüsselkompetenzen für lebenslanges Lernen (Council of the European Union, 2018). Von Schulen und insbesondere von Lehrkräften wird damit zusammenhängend erwartet, die Förderung von digitalen Kompetenzen unter ihren Schüler:innen erfolgreich umzusetzen. Hierfür ist, neben der Infrastruktur und der technischen Ausstattung der Schulen, vor allem die eigene Expertise der Lehrkraft im Umgang mit digitalen Medien die zentrale Voraussetzung (Hillmayr et al., 2017; Schmid, Goertz, Radomski, Thom & Behrens, 2017) – genau hier liegt aber ein Problem. In der Studie *Schule digital – Der Länderindikator* wurde die Rolle von digitalen Medien im deutschen Schulsystem untersucht und es stellte sich heraus, dass digitale Medien an deutschen Schulen kaum regelmäßig im Unterricht eingesetzt werden (Lorenz, Bos et al., 2017) und sich dieser Zustand nur sehr langsam verbessert (Lorenz, Endberg & Eickelmann, 2017). Zusätzlich geht aus einer *JIM-Studie* (Basisuntersuchung zum Medienumgang) hervor, dass mehr als die Hälfte der befragten Lehrkräfte im digitalgestützten Lernen und Lehren kein Potenzial sehen (Feierabend, Plankenhorn & Rathgeb, 2017). Beides, also die Fähigkeiten und die eigene Einstellung gegenüber Technologien, wirkt sich wiederum darauf aus, inwiefern digitale Medien tatsächlich im Unterricht eingesetzt werden. Es ist daher nicht überraschend, dass dahingehend spezielle Fortbildungsprogramme und Trainings für Lehrkräfte gefordert werden (Bos et al., 2016).

Aber auch der erwartungsvolle Blick auf die junge Generation von Lehrkräften ist wenig vielversprechend, denn Lehramtsstudierende, die zwar zu der Generation *Digital Natives* zählen, stellten sich wider Erwarten als wenig digital-affin heraus (Persike & Friedrich, 2016; Schmid et al., 2017). Wie eine Studie von Vogelsang, Finger, Laumann und Thysen (2019) mit etwa 600 Lehramtsstudierenden der Naturwissenschaften zeigte, waren ihre

Vorerfahrungen mit digitalgestütztem Lernen während der eigenen Schulzeit und auch während des Lehramtsstudiums eher gering und sie schöpften im Studium die Bandbreite an digitalen Werkzeugen und Anwendungen kaum aus (Persike & Friedrich, 2016; Vogelsang et al., 2019). Hier zeichnet sich bereits ab, dass aus mangelnden digitalen Kompetenzen im Bildungssystem ein Teufelskreis entsteht (vgl. Kammerl und Ostermann (2010)): Lehrkräfte mit geringer Expertise können die digitalen Kompetenzen der Schüler:innen nicht gezielt fördern. Diese können in ihrem Lehramtsstudium demnach kaum auf Vorwissen zurückgreifen und erhalten auch hier keine ausreichende digitale Kompetenzförderung, weshalb sie wiederum als Lehrkräfte nicht ausreichend in der Lage sind, die digitalen Kompetenzen einer neuen Schüler:innengeneration zu fördern. Hinzu kommt, dass die systematische und curricular verankerte Förderung von digitalen Kompetenzen im Lehramtsstudium noch unzureichend umgesetzt wird (Schiefner-Rohs, 2012), obwohl die KMK seit 2008 die technologiebezogene Professionalisierung angehender Lehrkräfte im Studium vorgibt (KMK, 2019). Diese Arbeit knüpft genau an dieser Stelle an und beschreibt einen konkreten Praxisansatz zur Förderung der digitalen Kompetenzen von Physik-Lehramtsstudierenden, um diese auf den lernförderlichen Einsatz von digitalen Medien im Physikunterricht vorzubereiten.

## 1.1 Forschungsinteresse und Ziele

Das oben beschriebene Praxisproblem, dass (angehende) Lehrkräfte nicht über ausreichende digitale Kompetenzen verfügen, motiviert das Forschungsinteresse dieser Arbeit: *Die Entwicklung und Evaluation einer Lehrveranstaltung in der Astrophysik, die zur technologiebezogenen Professionalisierung angehender Physiklehrkräfte beiträgt*. Die Professionalisierung zielt dabei auf ein Professionswissen der Lehrkräfte ab, das als das zentrale Wissen einer Lehrkraft verstanden wird (Baumert & Kunter, 2013) und ursprünglich das fachdidaktische Wissen darstellte (Shulman, 1987). Im Zuge der Digitalisierung wurde es später durch den Technologiebezug erweitert (Mishra & Koehler, 2006). Die technologiebezogene Professionalisierung der Studierenden wird in einer Lehrveranstaltung in der Astrophysik umgesetzt, da digitale Werkzeuge in dieser Fachdisziplin eine besondere Rolle spielen und hier, im Gegensatz zur klassischen Physik, Laborexperimente nur selten umsetzbar sind (z.B. Percy (2009)). Dies ermöglicht den authentischen Einsatz von Technologien. Der Fokus liegt dabei auf einer aktiven und selbstständigen Auseinandersetzung mit digitalen Werkzeugen wie Simulationen, die für die Erkenntnisgewinnung in der Astrophysik zentral sind. Hiermit wird insbesondere die Förderung von *fachspezifischen* digitalen Kompetenzen angestrebt. Ein wichtiger Bestandteil des Forschungsprojekts ist die enge Vernetzung von Fachwissenschaft und Fachdidaktik, die sich nicht nur durch den Entwicklungsprozess der Lehrveranstaltung sondern auch durch deren Durchführung zieht. Die Professionalisierung der Studierenden soll durch die gezielte Integration von digitalen Medien in ein fachwissenschaftliches

Modul der Astrophysik erfolgen, das zusätzlich um eine fachdidaktische Komponente erweitert wird. Das dient dem Ziel, die vielseitigen Komponenten des Lehrerverfessionswissens in der Lehrveranstaltung zu fördern. Darüber hinaus besteht das Vorhaben, Theorie und Praxis bewusst zu verbinden, wobei sich die Studierenden nicht nur mit dem *Lernen*, sondern auch mit dem *Lehren* von Astrophysik mit digitalen Medien befassen. Mit dem Forschungsinteresse ist zudem das Ziel verbunden, das entwickelte Lehrkonzept auf der Grundlage einer empirischen Wirkungsanalyse zu optimieren, um es an der Universität Göttingen langfristig im Lehramtsstudium der Physik zu implementieren. Darüber hinaus soll diese Entwicklungsarbeit zusammen mit der Wirkungsanalyse einen Beitrag zur fachdidaktischen Forschung im Bereich der technologiebezogenen Lehrerverfessionalisierung leisten, wie dies für den deutschsprachigen Raum im Bereich der Naturwissenschaften bereits mit ersten Best Practice Beispielen wie der Entwicklungsarbeit von Zimmermann (2022) in der Chemiedidaktik erfolgte (siehe Meßinger-Koppelt (2015) für eine detaillierte Übersicht). Einzelne Aspekte dieser Beispiele werden neben literaturbasierten Gestaltungsprinzipien für die Konzeption dieser Lehrveranstaltung herangezogen. Es besteht bislang jedoch kein ausgereiftes Lehrkonzept, das zu den Anforderungen und Zielen dieser Forschungsarbeit passt, weshalb in dieser Arbeit eine Neuentwicklung stattfindet. Des Weiteren stellt die Operationalisierung von digitalen Kompetenzen für Lehramtsstudierende ein aktuelles Interesse der Fachdidaktik dar (Becker, Meßinger-Koppelt & Thyssen, 2020). Die Entwicklungsarbeit und Wirkungsanalyse orientieren sich eng an diesen bestehenden Kompetenzmodellen und diese Arbeit soll als konkretes Beispiel dafür dienen, wie theoretische Modelle in der Praxis innovativ umgesetzt werden können. Die Wirksamkeit des entwickelten Lehrkonzepts wird theoriegeleitet mit qualitativen und quantitativen Erhebungsinstrumenten in einem Multi-Method-Ansatz untersucht. Für die Umsetzung des Forschungsinteresses ist ein Design-Based Research-Ansatz geeignet, der sich durch ein zyklisches Vorgehen auszeichnet und eine Überarbeitung des Lehrkonzepts anhand der Wirksamkeitsstudie zulässt. In dieser Arbeit werden zwei solcher Forschungszyklen dargestellt.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Im Anschluss an dieses Einleitungskapitel wird in Teil I dieser Arbeit der theoretische Hintergrund zum Lernen (Kapitel 2) und Lehren (Kapitel 3) mit digitalen Medien dargelegt, indem sowohl Theorien und Modelle als auch Erkenntnisse aus der empirischen Forschung vorgestellt werden. Mit diesem ersten Teil werden die literaturbasierten Grundlagen für die anschließende Entwicklungsarbeit und die Wirksamkeitsstudie gelegt, auf die daran anschließend in Teil III eingegangen wird. Dabei wird in Kapitel 4 der Design-Based Research-Ansatz dieser Arbeit beschrieben und es erfolgt die detaillierte Darstellung des entwickelten Lehrkonzepts und dessen Umsetzung in der Astrophysik-Übung. Anhand der exempla-

rischen Fachinhalte *Exoplaneten* und *Hertzsprung-Russell-Diagramm* (HR–Diagramm oder HRD) wird die Konzeption von zwei Übungssitzungen im Detail erläutert. Es folgen die Darstellung der Forschungsfragen und Methoden inklusive Stichprobenbeschreibung (Kapitel 5). Daran anschließend werden die Ergebnisse des ersten Forschungszyklus präsentiert (Kapitel 6). Der zweite Forschungszyklus, bestehend aus einem Re-Design, der Erprobung und den Ergebnissen der Wirksamkeitsstudie, wird in Kapitel 7 beschrieben, womit der zweite Teil der Arbeit abschließt. Der anschließende Teil III der Arbeit thematisiert den Umgang von Lernenden mit dem Hertzsprung-Russell-Diagramm – einer der zwei zuvor dargestellten Fachinhalte der Lehrveranstaltung. Bei der Erprobung der Lehrveranstaltung wurden im ersten Zyklus besondere Schwierigkeiten seitens der Studierenden mit diesem Diagramm festgestellt. Aus diesem Grund wurde eine empirische Studie zum Umgang von Lernenden mit diesem Diagramm durchgeführt. Die Studie motivierte sich aus den Praxiserfahrungen der Entwicklungsarbeit und die Studienergebnisse dienen zur Weiterentwicklung und Optimierung der Lehrveranstaltung. Dieser Teil der Arbeit gliedert sich folglich in den übergeordneten Teil der Entwicklungsarbeit ein. Im Detail wird auf den Hintergrund (Kapitel 8), die Forschungsfragen und Methoden (Kapitel 9) und die Studienergebnisse eingegangen (Kapitel 10). Im Abschluss der Arbeit (Teil IV) erfolgt zunächst die Diskussion der Ergebnisse anhand der Forschungsfragen (Kapitel 11). Dabei wird auf die Entwicklungsarbeit und Wirksamkeitsstudie, auf die empirische Studie zum Hertzsprung-Russell-Diagramm und auf die Umsetzung von Design-Based Research eingegangen. Die Arbeit schließt mit einem Fazit (Kapitel 12). Im Anhang der Arbeit werden die eingesetzten Erhebungsinstrumente, die entwickelten Kategoriensysteme, ausgewählte Studienergebnisse, exemplarische Lehr-Lern-Materialien sowie die adressierten fachinhaltlichen Lernziele und digitalen Kompetenzen dargestellt.

Teilergebnisse der vorliegenden Arbeit wurden in folgenden Veröffentlichungen vorab publiziert:

Langendorf, Merker, Hessman und Schneider (2021). Simulationsbasiertes Lernen im Astrophysik–Tutorium am Beispiel Schwarzkörper und Sternspektren. *PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.

Langendorf und Schneider (2021). Technologiebezogene Professionalisierung in einem Astrophysik–Seminar. Zur Veröffentlichung eingereicht bei *Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung 2021 virtuell*.

Langendorf, Schneider und Hessman (2022). Learning and teaching astronomy with digital tools promotes physics student teachers' digital competencies. Zur Veröffentlichung eingereicht und angenommen bei *Astronomy Education Journal* am 17.05.2022.

Langendorf, Schneider und Klein (2022). Extracting information from the Hertzsprung-

Russell diagram: An eye tracking study. Zur Veröffentlichung eingereicht und angenommen bei *Physical Review Physics Education Research* am 18.08.2022.

## Teil I

# Theoretischer Hintergrund

## 2 Lernen mit digitalen Medien

Digitale Medien sind mittlerweile ein fester Bestandteil des alltäglichen Lebens von Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen. Dies umfasst einerseits die private Nutzung digitaler Medien (z.B. Smartphones und Internet) zu Unterhaltungszwecken oder der Kommunikation. Andererseits beinhaltet dies auch die berufsbedingte Verwendung von Computern und unterschiedlichen digitalen Werkzeugen zur Forschung, Entwicklung, Organisation oder Produktion. Laut der aktuellen ARD/ZDF-Onlinestudie nutzen 94 % der deutschsprachigen Bevölkerung ab 14 Jahren einen Internetzugang (Beisch & Schäfer, 2020). Über 98 % der Jugendlichen zwischen 12 und 19 Jahren wachsen in Deutschland in einem Haushalt auf, der mit Smartphone, WLAN-Anschluss und Computer bzw. Laptop ausgestattet ist, und 73 % haben zudem Zugang zu einem Tablet (Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest, 2020). Das Smartphone ist bei nahezu allen jungen Menschen ein täglicher Begleiter (Beisch & Schäfer, 2020; Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest, 2020). Daher überrascht es nicht, dass Personen dieser Altersgruppe im Schnitt mehr als vier Stunden pro Tag mit medialen Angeboten im Internet verbringen (Beisch & Schäfer, 2020). Die Auswirkungen der Digitalisierung sind in der Alltags- und Arbeitswelt unserer Gesellschaft deutlich zu erkennen und beeinflussen auch das Lernen gravierend: Lernende können in kürzester Zeit von jedem Ort aus auf unzählige Informationen zugreifen und den Unterrichtsstoff durch spezielle Erklärvideos selbstständig nacharbeiten. Darüber hinaus können sie Lernmaterialien einfach austauschen und per Smartphone über Fragen und Probleme diskutieren. Die Möglichkeiten, Lernprozesse zu gestalten, verändern sich dadurch laufend. Die Europäische Union griff diese Veränderungen auf und definierte die digitale Kompetenz als eine von acht Schlüsselkompetenzen lebenslangen Lernens (Council of the European Union, 2018). Zuvor reagierte auch die Kultusministerkonferenz (KMK) auf die „digitale Revolution“ und formulierte mit den *Kompetenzen in der digitalen Welt* „konkrete Anforderungen für eine schulische Bildung in der digitalen Welt“ (KMK, 2016, S. 6). Die Schule soll ihrem Bildungsauftrag gerecht werden und Lernende auf die aktive Teilhabe am aktuellen und zukünftigen gesellschaftlichen Leben vorbereiten, wozu insbesondere auch digitalisierungsbezogene Entwicklungen zählen. Aus der ICILS-Studie (*International Computer and Information Literacy Study*) 2018 geht jedoch hervor, dass nur rund 23 % der befragten Achtklässler:innen aus Deutschland mindestens ein Mal pro Woche digitale Medien in der Schule für schulbezogene Zwecke einsetzen; außerhalb der Schule, ebenfalls für schulbezogene Zwecke, sind

es immerhin 42 %. Hiermit liegt Deutschland signifikant unter dem internationalen Mittelwert von 44 % innerhalb und 51 % außerhalb der Schule und auch weit hinter dem Vorreiter Dänemark (91 % bzw. 77 %) (Schaumburg, Gerick, Eickelmann & Labusch, 2019).

Im März 2020 wurde die Bedeutung von Digitalisierung für das Lernen aufgrund der Covid-19-Pandemie auf eine ganz neue Art und Weise deutlich. Mit dem ersten deutschlandweiten Lockdown dominierten fortan hybride Unterrichtskonzepte, die aus Präsenzunterricht und Home Schooling bestanden, den Schulalltag. Mehr als die Hälfte der Schüler:innen verwenden seitdem eine Schulcloud bzw. Online-Plattform und E-Mails, um auf Unterrichtsmaterial zugreifen zu können (Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest, 2020). Digitale Medien wurden hiermit für den Lernprozess essenziell, da sie den sozialen Austausch ermöglichen und eine Voraussetzung dafür sind, Zugang zum Lerninhalt und -material zu erhalten. Gleichzeitig wurde das eigenverantwortliche und selbstorganisierte Lernen stärker gefordert, was für manche Schüler:innen eine große Herausforderung darstellte (Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest, 2020; Tengler, Schrammel & Brandhofer, 2020). Dass der digitale Medieneinsatz in Lernprozessen nicht nur mit Chancen, sondern auch mit Herausforderungen einhergeht, ist aber nicht erst seit der Pandemie bekannt. Ein großer Anteil moderner Forschung im Bildungskontext bezieht sich auf das Lernen mit digitalen Medien. Zur lerntheoretischen Beschreibung der kognitiven Prozesse, die während des Lernens mit Multimedia relevant werden, können bereits mehrere Ansätze herangezogen werden (Kapitel 2.1). Zudem können aus der Literatur sowohl theoriegestützte als auch evidenzbasierte Vorteile sowie Herausforderungen vom digitalen Medieneinsatz für den Lernprozess zusammengefasst werden (Kapitel 2.2). An dieser Stelle sei klargestellt, dass Lehr-Lern-Prozesse vielseitig und komplex sind, so dass die lernförderliche Wirkung von Technologien nicht pauschal auf jedes Individuum und jede Situation übertragen werden kann. Damit das vielversprechende Potenzial, welches dem digitalgestützten Lernen zugesprochen wird, in der Praxis dennoch möglichst hohe Wirkung zeigen kann, sollten grundlegende Gestaltungsprinzipien und Gelingensbedingungen Beachtung finden (Kapitel 2.3). Sobald Technologien in Lernprozessen nicht als Lerngegenstand selbst (medienerzieherischer Einsatz) sondern als Werkzeug oder Lernmaterial für die Auseinandersetzung mit einem fachinhaltlichen Lerngegenstand integriert sind, handelt es sich um einen didaktisch motivierten Einsatz (Herzig, 2014). Computersimulationen stellen z.B. eine Form digitaler Werkzeuge dar, deren didaktischer Einsatz besonders im naturwissenschaftlichen Bereich stringent begründet werden kann und womit eine besonders lernförderliche Wirkung einhergehen kann (Kapitel 2.4).

## 2.1 Lerntheorien

Der Bildungskontext wird sowohl in der Forschung als auch in der Praxis von verschiedenen Lerntheorien beeinflusst. Die drei größten und bekanntesten Theorien sind die des Beha-

viormus, Kognitivismus und Konstruktivismus. Sie und alle weiteren Lerntheorien haben das gemeinsame Ziel, Bedingungen und Abläufe von Lernprozessen zu beschreiben bzw. zu erklären, und nutzen hierfür zum Teil sehr unterschiedliche Ansätze. Reinmann (2013, S. 4) äußert dazu, dass „keine Lerntheorie eine Beschreibung oder Erklärung für alle Lernformen [liefert].“ Lernprozesse sind vielseitig und komplex, weshalb es sinnvoll ist, dass mit unterschiedlichen Lerntheorien jeweils einzelne Facetten des Lernens unter die Lupe genommen werden. In diesem Kapitel werden daher ausgewählte Theorieansätze vorgestellt, in deren Fokus das Lernen mit digitalen Medien steht (vgl. Tabelle 2.1). Der erste Ansatz (Kapitel 2.1.1) bezieht sich auf die kognitive Belastung des Arbeitsgedächtnisses als Voraussetzung dafür, dass effektives Lernen möglich wird. Darauf aufbauend werden in der zweiten Theorie (Kapitel 2.1.2) die kognitiven Prozesse zur Informationsverarbeitung beim Lernen mit Multimedia in den Blick genommen. Zuletzt wird Lernen aus einer konstruktivistischen Sicht beleuchtet (Kapitel 2.1.3), womit neue Ansätze für Multimedialernen einhergehen. Der Konstruktivismus bezieht sich in seiner ursprünglichen Form nicht explizit auf Multimedialernen. Lerntheorien sind aber keinesfalls als abgeschlossen und endgültig aufzufassen, sondern passen sich den gesellschaftlichen Entwicklungen an (Reinmann, 2013). Aus diesem Grund entwickelte sich auch die konstruktivistische Theorie im Zuge der Digitalisierung weiter. Und tatsächlich bietet eine medienbasierte Lernumgebung in besonderem Maße die Möglichkeit, die lerntheoretischen Anforderungen des Konstruktivismus in Lernprozessen praktisch umzusetzen (Jonassen, 1995; Mayer, 2001; Schanze & Girwidz, 2018). Den Medien wird hier nicht mehr nur die Funktion zugeschrieben, Wissen zu transportieren und zu vermitteln (Arnold, 2005). Für erfolgreiches Lernen sollen digitale Medien stattdessen als *kognitive Werkzeuge* eingesetzt werden, die ein Lernen *mit* und nicht *von* Technologien ermöglichen (Jonassen, 1995). Seitens der digitalen Medien geht damit ein großes Potenzial für effektives Lernen einher, auf das in Kapitel 2.2 näher eingegangen wird. In Kapitel 2.3 werden darauf aufbauend u. a. konstruktivistisch begründete Gestaltungsprinzipien für das Lernen mit digitalen Medien dargestellt.

### 2.1.1 Kognitive Belastung

Chandler und Sweller (1991) beschreiben mit der *Cognitive Load Theory* (CLT) die Rolle der kognitiven Belastung des Arbeitsgedächtnisses bei Lernprozessen. Der Theorie liegt die Annahme zugrunde, dass das Arbeitsgedächtnis nur eine begrenzte Verarbeitungskapazität besitzt. Die Belastung des Arbeitsgedächtnisses beeinflusst somit den Lernerfolg und soll für ein effektives Lernen möglichst gering gehalten werden. Laut dem Modell von Baddeley (1992) speichert das Arbeitsgedächtnis (working memory) vorübergehend Informationen und verändert diese so, dass komplexe Aufgaben durchgeführt werden können. Aus dem Modell geht hervor, dass räumlich-visuelle und sprachliche Informationen zunächst in



Tabelle 2.1: Überblick über Theorien zum Lernen mit digitalen Medien

Ansatz	Grundannahmen	Publikation
Cognitive Load Theory	Die kognitive Belastung des Arbeitsgedächtnisses und dessen begrenzte Kapazität beeinflussen den Lernerfolg.	Chandler und Sweller (1991)
Cognitive Theory of Multimedia Learning	Lernen erfolgt durch eine aktive Informationsverarbeitung in zwei kognitiven Kanälen mit begrenzter Kapazität.	Mayer (2001)
Konstruktivismus, ICAP	Lernen erfolgt durch eine aktive Wissenskonstruktion; selbstbestimmtes, soziales Lernen; Handlungsspielraum	z.B. Jonassen (1991), Chi und Wylie (2014)

zwei unterschiedlichen Systemen vorübergehend gespeichert und verarbeitet werden und anschließend deren Verknüpfung erfolgt. Den Systemen wird dabei eine begrenzte Kapazität zugeschrieben (Baddeley, 1992, 2003). Lernprozesse können also nur dann erfolgreich sein, wenn die kognitive Gesamtbelastung die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses nicht übertrifft (Girwidz, 2015). Die kognitive Gesamtbelastung setzt sich in der CLT aus den folgenden drei Arten von Cognitive Load zusammen: *Intrinsic Cognitive Load* (ICL) bzw. intrinsische Belastung, *Extraneous Cognitive Load* (ECL) bzw. extrinsische Belastung und *Germane Cognitive Load* (GCL) bzw. lernbezogene Belastung (Sweller, 2010). Problemlöseaufgaben und Lernprozesse werden in der Regel von Instruktionen motiviert und begleitet, wobei die Lernenden dann im Detail folgende kognitiven Belastungsformen erfahren können:

**Intrinsic Cognitive Load:** ICL meint die kognitive Belastung, die durch die Schwierigkeit und Komplexität des Lerninhalts hervorgerufen wird (Leppink, Paas, Van der Vleuten, Van Gog & Van Merriënboer, 2013). Wie stark diese Belastung ist, wird durch das Vorwissen der Lernenden und die Aufgabenstellung bestimmt. ICL kann also nicht verändert werden, solange die Aufgabe und das Vorwissen der Lernenden unverändert bleiben. Dabei wirkt sich das Level der *Elementinteraktivität* auf den ICL aus. Eine geringe Interaktivität bedeutet, dass die zu lernenden Elemente unabhängig voneinander und vor allem hintereinander erlernt werden können und hierbei kaum mit anderen Elementen in Verbindung gebracht werden müssen. So wird das Arbeitsgedächtnis nur gering belastet und der ICL bleibt niedrig. Dies ist beispielsweise beim Auswendiglernen von Vokabeln und chemischen Symbolen der Fall (Sweller, 2010). Im Gegensatz zum bloßen Auswendiglernen ist die kognitive Belastung für ein tiefes Verständnislernen höher. Hierbei wird das Arbeitsgedächtnis durch die gleichzeitige und verknüpfte Verarbeitung von Elementen stärker belastet und die Elementinteraktivität ist demnach höher. Als Beispiel nennt Sweller (2010) das Lösen von algebraischen Gleichungen.

**Extraneous Cognitive Load:** ECL beschreibt die kognitive Belastung durch äußere Faktoren wie die Gestaltung und Darstellung der Instruktion oder des Lernmaterials und ist somit vom Lerninhalt losgelöst (Girwidz, 2015; Leppink et al., 2013). Bei der Gestaltung von Lehr-Lern-Materialien sollte diese Art der kognitiven Belastung beachtet und möglichst gering gehalten werden, indem beispielsweise unnötige oder redundante Informationen sowie unbekannte Darstellungsformen vermieden werden (Chandler & Sweller, 1991; Girwidz, 2015).

**Germane Cognitive Load:** GCL ist die kognitive Belastung von Lernenden, die durch den Lernprozess an sich erzeugt wird, und ist somit unabhängig vom dargestellten Lerninhalt. Es handelt sich beim GCL im Gegensatz zum ICL und ECL aber um keine unabhängige Art der Belastung, sondern um einen Cognitive Load, der eng mit der intrinsischen Belastung verknüpft ist. Mit GCL sind genau solche Kapazitäten des Arbeitsgedächtnisses gemeint, die zur Bewältigung der intrinsischen Belastung nötig sind. Die lernbezogene Belastung verhält sich zudem komplementär zum ECL: Wenn die extrinsische Belastung bei gleicher intrinsischer Belastung steigt, dann verringert sich die lernbezogene Belastung und umgekehrt. (Sweller, 2010).

Die intrinsische Belastung kann beispielsweise durch den kognitiven Prozess *Chunking* reduziert werden. Damit ist gemeint, dass mehrere Elementen, die stark zusammenhängen und sich von anderen Elementen eindeutig abgrenzen, zu einer einzigen Einheit (sog. *Chunk*) gruppiert werden (Gobet et al., 2001). Hier werden folglich komplexe Schemata gebildet, die kognitiv als ein Element verarbeitet werden, das Arbeitsgedächtnis entlasten und das Lernen unterstützen (Van Merriënboer & Sweller, 2005a). Auch hier gilt die Annahme, dass nur eine begrenzte Anzahl an Chunks bzw. Elementen zeitgleich kognitiv verarbeitet werden kann (Miller, 1956). *Chunking* ist eine typische Strategie beim Schachspielen (Chase & Simon, 1973) und wird auch in Physik beim Problemlösen oder Lernen mit multiplen Repräsentationen relevant (Lane, Cheng & Gobet, 2000). Wie gut die kognitive Entlastung dabei gelingt, hängt vom Vorwissen und der Expertise der Lernenden ab (Gobet et al., 2001). Gemäß der *Informations-Reduktions-Hypothese* gelingt es Lernenden mit einer hohen Expertise zudem, aufgabenrelevante Informationen zu identifizieren und redundante oder aufgabenirrelevante Informationen zu ignorieren. Die kognitiven Prozesse beschränken sich also idealerweise auf die relevanten Informationen, was mit einer Reduktion der intrinsischen Belastung einhergeht (Haider & Frensch, 1996, 1999). Die intrinsische und extrinsische Belastung können zum totalen Cognitive Load addiert werden. Solange die intrinsische Belastung ausreichend gering ist, führt eine hohe extrinsische Belastung nicht zwangsläufig zu ineffektiven Lernprozessen, solange in der Summe die Gesamtkapazität des Arbeitsgedächtnisses nicht überschritten wird. Wünschenswert ist grundsätzlich, die extrinsische Belastung durch eine geeignete Instruktion zu reduzieren, damit ausreichend Kapazitäten für eine hohe lernbezogene

Belastung zur Verfügung stehen und effektives Lernen ermöglicht wird (Van Merriënboer & Sweller, 2005b). In Abbildung 2.1 wird veranschaulicht, wie andernfalls eine kognitive Überlastung durch einen zu hohen ICL und ECL dazu führt, dass im Arbeitsgedächtnis keine Kapazität mehr für den GCL übrig bleibt. In diesem Fall kann der Lerngegenstand nicht mehr effektiv gelernt werden.

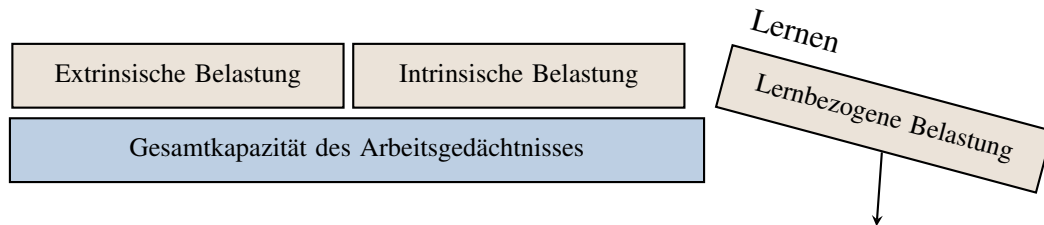


Abbildung 2.1: Kognitive Überlastung nach der Cognitive Load Theory (eigene Darstellung nach Girwidz (2015)).

Die CLT wird in der Bildungsforschung als theoretische Grundlage herangezogen, um Lernprozesse (z.B. Sweller (1988)) oder die Wirkung von Instruktionsmaterial (Paas & Van Merriënboer, 1994; Renkl, Gruber, Weber, Lerche & Schweizer, 2003; Saw, 2017) zu untersuchen und zu erklären, insbesondere im Zusammenhang mit digitalen Medien und Werkzeugen (z.B. Hochberg, Becker, Louis, Klein und Kuhn (2020), Schrader und Bastiaens (2012), Thees et al. (2020)). Hierbei kann auf ein Testinstrument von Leppink et al. (2013) zurückgegriffen werden, das alle drei Belastungsformen abdeckt.

### 2.1.2 Multimediales Lernen

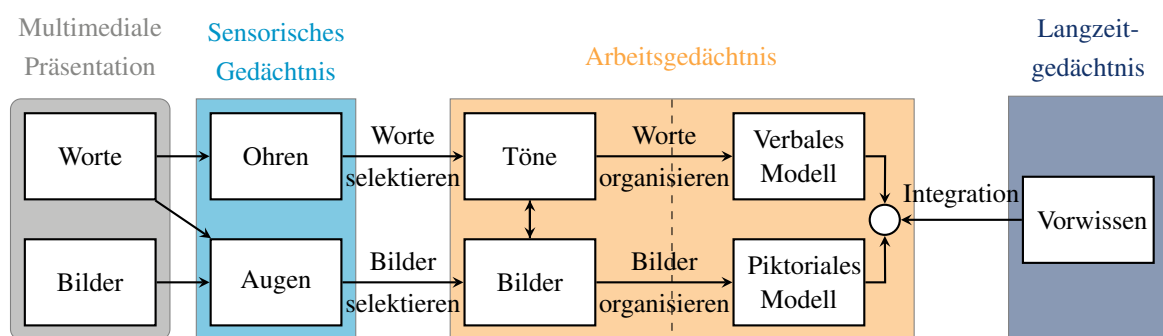


Abbildung 2.2: Veranschaulichung der Cognitive Theory of Multimedia Learning (eigene Darstellung nach Mayer (2001, S. 44)).

In diesem Kapitel werden Ansätze zur theoretischen Beschreibung von Multimedialernen vorgestellt. Mayer (2001) liefert mit seinem Modell (Abbildung 2.2) der *Cognitive Theory of Multimedia Learning* (CTML) einen solchen Ansatz, der international zur Erklärung und

effektiven Unterstützung von multimedialen Lernprozessen genutzt wird. Der CTML liegen drei zentrale Annahmen zugrunde: zwei Kanäle, eine begrenzte Kapazität und die aktive Verarbeitung.

1. Die Annahme, dass Personen *zwei Kanäle* zur Verarbeitung von Informationen nutzen können, geht auf das in Kapitel [2.1.1](#) vorgestellte Modell zum Arbeitsgedächtnis zurück (Baddeley, [1992](#)). Wahrgenommene Informationen werden in Abhängigkeit ihrer Präsentationsform (sprachbasiert oder bildbasiert) entweder im auditiv/verbalen oder im visuellen Informationskanal verarbeitet. Je nachdem ob eine Präsentation mit den Ohren oder den Augen wahrgenommen wird, wird demnach einer der beiden Kanäle für kognitive Prozesse im Arbeitsgedächtnis genutzt (Mayer, [2001](#)).
2. Es wird angenommen, dass jeder der zwei Kanäle eine *begrenzte Kapazität* besitzt. Folglich ist die Informationsmenge, die gleichzeitig im Arbeitsgedächtnis verarbeitet werden kann, begrenzt (Mayer, [2001](#)). Diese Annahme steht im Einklang mit den kognitionspsychologischen Theorien zum Arbeitsgedächtnis (Baddeley, [1992](#)) und zur kognitiven Belastung (Chandler & Sweller, [1991](#)).
3. Die letzte Annahme bezieht sich auf eine *aktive Verarbeitung* von Informationen im Lernprozess. Hierfür wählen Lernende relevante Informationen der dargebotenen Präsentation aus, organisieren diese Informationen zu einem kohärenten mentalen Modell und integrieren zudem ihr Vorwissen. Für einen sinnvollen multimedialen Lernprozess müssen Lernende also kognitiv aktiv werden und nicht bloß Informationen in einer passiven Haltung ansammeln (Mayer, [2001](#)).

Diese drei Annahmen spiegeln sich direkt im CTML-Modell, wie es in [Abbildung 2.2](#) dargestellt ist, wider. Für Mayers Theorie sind drei Gedächtnisarten (sensorisches, Arbeits- und Langzeitgedächtnis) relevant, die in der [Abbildung](#) durch farbige Rechtecke dargestellt werden. In diesen drei Speichersystemen werden aus der Außenwelt stammende multimediale Präsentationen in Form von Worten und Bildern vorübergehend gespeichert und verarbeitet (Mayer, [2001](#), [2005](#)). Die externen Informationen gelangen zunächst über Ohren und Augen in das sensorische Gedächtnis. Anschließend spielt das Arbeitsgedächtnis für multimediales Lernen die zentrale Rolle. Hier wird das Ausgangsmaterial, bestehend aus zuvor selektierten Informationen, gespeichert ([Abbildung 2.2](#): linke Hälfte des Arbeitsgedächtnisses) und so weiterverarbeitet, dass Wissen aktiv konstruiert wird, indem mentale Modelle gebildet werden ([Abbildung 2.2](#): rechte Hälfte des Arbeitsgedächtnisses). Dafür wird schließlich das bereits vorhandene Wissen, das im Langzeitgedächtnis gespeichert ist, abgerufen und integriert. Für eine aktive Wissenskonstruktion werden in der CTML die drei Speichersysteme durch die kognitiven Prozesse *Selektieren*, *Organisieren* und *Integrieren* miteinander verknüpft. Lernende (i) selektieren relevante Worte bzw. Bilder für deren Verarbeitung im

sprachbasierten bzw. bildbasierten Kanal, (ii) organisieren Worte bzw. Bilder zu einem verbalen bzw. piktorialen Modell und (iii) integrieren Vorwissen in eine Verknüpfung von verbalem und piktorialem Modell (Mayer, 2005). Mayer (2001) stellt in seinem Ansatz eine Besonderheit von Worten dar, denn diese können über die Ohren (in gesprochener Form) und über die Augen (in geschriebener Form) in das sensorische Gedächtnis gelangen. Bilder können dem gegenüber ausschließlich über die Augen wahrgenommen werden. Akustische und visuelle Informationen werden dann getrennt zum Arbeitsgedächtnis weitergeleitet und können hier ineinander umgewandelt werden (Abbildung 2.2: Pfeil zwischen Töne und Bilder). Die Umwandlung kann durch eine mentale Assoziation beispielsweise vom Bild einer Katze mit dem Klang des Wortes *Katze* hervorgerufen werden – und umgekehrt (Mayer, 2001, 2005). Anschließend werden sie in nur einem der beiden Kanäle weiterverarbeitet.

Zusammengefasst nimmt die CTML nach Mayer (2001) das Multimedialernen in den Blick, indem zwischen dem sprachbasierten und bildbasierten Verarbeitungskanal unterschieden wird. Die Kanäle sind kapazitär begrenzt und laufen parallel. Durch eine simultane Adressierung beider Kanäle kann die Menge an Informationen, die von Lernenden gleichzeitig aktiv verarbeitet wird, erhöht werden. Dadurch wird die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses besser ausgeschöpft. Mayer führte auf Grundlage seines Modells Studien durch, aus denen er Designprinzipien für multimediale Lernangebote ableiten konnte. Kuba, Rahimi, Smith, Shute und Dai (2021) nutzen diese beispielsweise bei der Gestaltung und Entwicklung von unterstützenden Lernvideos im Physikkontext und Ferrer und Garcia-Barrera (2014) evaluieren anhand der Prinzipien die Effektivität von Videos für die Methode des Flipped Classroom. Diese Designprinzipien (siehe Kapitel 2.3) werden aber auch darüber hinaus im Kontext der Bildungsforschung zur kriteriengeleiteten Entwicklung und Analyse von Multimediaanwendungen verwendet.

Im Zusammenhang mit Multimedialernen kann auch auf das *Modell des multimedialen Wissenserwerbs anhand verbaler und piktorialer Informationen* von Schnotz und Bannert (1999) eingegangen werden. Ähnlich zur CTML nach Mayer (2001) werden die kognitiven Verarbeitungsprozesse hier in einen depiktionalen und einen deskriptionalen Zweig unterschieden. Die Anwendung des Modells liegt insbesondere im Forschungskontext multipler Repräsentationen und ermöglicht dabei, das Text- und Bildverstehen von Lernenden zu beschreiben. Der Ansatz von Schnotz und Bannert (1999) liefert für diese Arbeit gegenüber der CTML jedoch keinen Mehrwert und wird deshalb an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt.

### 2.1.3 Konstruktivismus

Der konstruktivistische Ansatz ist eine Lerntheorie, in der Lernen als aktiver Konstruktionsprozess verstanden wird, bei dem Individuen eine eigene mentale Repräsentation der

Realität bilden. Es existiert also nicht *die eine* Art und Weise, wie ein Lerngegenstand gesehen und verstanden werden kann. Vielmehr gehört es zum Lernprozess, eine eigene Sicht auf den Lerngegenstand zu konstruieren und dabei eigene Erfahrungen und Interpretationen einfließen zu lassen (Jonassen, [1991], [1995]). Im Detail unterscheiden sich die Ansätze zur konstruktivistischen Lerntheorie und können nicht durch eine allgemeingültige Auffassung abgedeckt werden (Gerstenmaier & Mandl, [1995]). Gräsel, Bruhn, Mandl und Fischer ([1997], S. 5–7) fassen einige Grundannahmen zum Konstruktivismus zusammen und beschreiben Lernen als aktiven, konstruktiven, selbstgesteuerten und sozialen Prozess, der situations- und kontextgebunden ist. Das steht demnach deutlich in Kontrast zu der in anderen Lerntheorien verbreiteten Ansicht, dass Wissen durch Lehrende direkt auf passive Lernende übertragen werden kann. Die konstruktivistische Lerntheorie bezieht darüber hinaus Vorwissen, Vorerfahrungen, Motivation und Interesse von Lernenden mit ein. Lernende sollten dabei unterstützt werden, ihr Vorwissen abzurufen und dieses zusammen mit ihren Erfahrungen auf den neuen Lerngegenstand zu beziehen. So beziehen sie ihr Wissen aktiv in den Lernprozess ein und konstruieren neues Wissen (ebd.). Zudem kann *träges Wissen*, das kontextunabhängig gelernt wurde und in einer Problemsituation daraufhin nicht angewendet werden kann (Renkl, [1994]), durch konstruktivistische Lerngelegenheiten vermieden werden. Lernende sollten sich daher mit möglichst authentischen und realitätsnahen Problemen auseinandersetzen (Gerstenmaier & Mandl, [1995]; Gräsel et al., [1997]). Des Weiteren sind Lernende in der Planung, Organisation, Durchführung und Reflexion ihres Lernwegs bei ihrer Selbstregulierung zu unterstützen. Aus konstruktivistischer Sicht kann Lernen zudem nicht losgelöst vom sozialen Umfeld stattfinden. Der soziale Aspekt des Lernens wird hier beispielsweise durch kooperative Lernformen ermöglicht, in denen Lernende sich über ihre Wissenskonstruktion austauschen und diese diskutieren (Gräsel et al., [1997]). Insgesamt bieten konstruktivistische Lernumgebungen demnach gewisse Freiheiten für Lernende, damit sie eigene Erfahrungen machen sowie eigenes Wissen konstruieren und interpretieren können. Nur dann, wenn Lernende diesen Handlungsspielraum im Lernprozess auch selbst wahrnehmen, können sie diesen nutzen und im konstruktivistischen Sinne erfolgreich lernen (Gerstenmaier & Mandl, [1995]).

Chi und Wylie ([2014]) liefern mit ihrem Rahmen *Interactive, Constructive, Active, Passive* (ICAP) einen kognitiven Ansatz, der eng mit der konstruktivistischen Sichtweise verbunden ist. Auch hier liegt der Fokus auf der Beschreibung eines lernerzentrierten, selbstbestimmten und aktiven Lernprozesses, der in einer möglichst vertieften Wissenskonstruktion mündet. Dabei gehen Chi und Wylie ([2014]) noch einen Schritt weiter und konkretisiert in ihrem Modell die sichtbaren Lernaktivitäten, die im Sinne des Konstruktivismus erwünscht sind. In ihrer Taxonomie unterteilen sie diese in eine passive, aktive, konstruktive und interaktive Form der kognitiven Involviertheit (vgl. Tabelle [2.2]). Die vier Formen sind in eben

dieser Reihenfolge hierarchisch angeordnet und setzen jeweils voraus, dass die untergeordneten Aktivitätsformen erfüllt sind. Der ICAP-Rahmen beinhaltet die Hypothese, dass der Lernzuwachs mit aufsteigender Lernaktivität steigt (I>C>A>P). Chi und Wylie (2014) konnten diese Annahme mit ersten Studienergebnissen validieren. Ihre Ergebnisse weisen darauf hin, dass der Erfolg beim Lernen mit digitalen Medien umso höher ist, je höher die Lernaktivität bzw. kognitive Involviertheit gemäß ICAP ist. ICAP kann beobachtete Unterschiede im Lernzuwachs erklären und zum Entwickeln, Begründen oder Evaluieren von konstruktivistisch ausgerichteten Lernumgebungen genutzt werden.

Tabelle 2.2: Erläuterungen zum ICAP-Modell nach Chi und Wylie (2014).

Involviertheit	Verständnis	Definition	Beispiel
Interaktiv	sehr tiefgehend	Lernende sprechen gemeinsam über den Lerngegenstand und setzen sich mit der Sichtweise der Anderen auseinander.	Gemeinsamkeiten und Unterschiede diskutieren
Konstruktiv	tief	Lernende stellen selbstständig Überlegungen an, die über die erhaltenen Informationen hinaus gehen.	basierend auf einem Text ein Diagramm erstellen
Aktiv	oberflächlich	Physische Handlungen, die eine gezielte Aufmerksamkeit hervorrufen, werden durchgeführt.	Notizen zum Vortrag machen
Passiv	minimal	Lernende erhalten Informationen und liefern keinen eigenen Beitrag zum Lernprozess.	einen Vortrag hören

## 2.2 Potenzial digitaler Medien für den Lernprozess

Aus den vorgestellten Lerntheorien (Kapitel 2.1) können erste Potenziale für digitalgestützte Lernprozesse abgeleitet werden. Für eine theoretische Darlegung der Vorteile von Multimedialernen ist aber zunächst sinnvoll, die wesentlichen Eigenschaften von digitalen Medien zu kennen. Im Kontext von Lehr-Lern-Situationen zeichnen sich digitale Medien durch ihre vorteilhaften Eigenschaften der *Multimodalität*, *Multicodierung* und *Interaktivität* aus (Girwidz, 2020). Digitale Medien sprechen mehrere Sinne gleichzeitig an, wodurch Informationen durch mehrere sensorische Systeme aufgenommen werden (Multimodalität). Dies kann beispielsweise über die visuelle Darbietung von Bildern zusammen mit einer akustischen Darbietung von Erklärungen hervorgerufen werden. Bezogen auf die CTML nach Mayer (2001) erleichtert das die Informationsverarbeitung, weil Lernende hierfür zeitgleich zwei unterschiedliche kognitive Kanäle nutzen. An dieser Stelle knüpft auch die Eigenschaft der Multicodierung an, also die Darstellung eines Sachverhalts in verschiedenen Repräsentations-

bzw. Codierungsformen wie Bild oder Text. Multimodalität und Multicodierung sind demnach eng verknüpfte Merkmale, deren Mehrwert mit der CTML (Mayer, 2001) und der CLT (Chandler & Sweller, 1991) erklärt werden können. Diese Qualitäten können das Lernen erleichtern, indem die begrenzte Kapazität des Arbeitsgedächtnisses durch eine Informationsverarbeitung in unterschiedlichen Kanälen besser genutzt wird. Hierbei ist aber auch Vorsicht geboten, denn die Multicodierung kann durch zu viele dargebotene Informationen zur kognitiven Überlastung führen und Lernen hemmen (Girwidz, 2020). Digitale Medien ermöglichen des Weiteren besonders interaktive Lernprozesse, die in Einklang mit der konstruktivistischen Sicht über erfolgreiches Lernen als aktive Wissenskonstruktion stehen (vgl. Kapitel 2.1.3). Damit geht auch ein verstärktes Autonomieerleben einher, das sich positiv auf die Motivation auswirkt (Deci & Ryan, 2004). Insbesondere digitale Endgeräte wie Smartphone und Tablet bieten durch einen hohen Alltags- bzw. Lebensweltbezug zudem die Möglichkeit, authentische Lernumgebungen zu schaffen (Kuhn, Ropohl & Groß, 2017) – ganz im Sinne des Konstruktivismus. Man kann also davon ausgehen, dass der interaktive Umgang mit digitalen Medien ein tiefgehendes Verständnis des Lerngegenstands begünstigt und die Bildung von trägem Wissen vermeidet (vgl. Chi und Wylie (2014), Gerstenmaier und Mandl (1995), Gräsel et al. (1997)). Die kognitive Verknüpfung von verschiedenen Repräsentationsformen (vgl. Multimedialernen nach Mayer (2001)) kann ebenfalls für ein anwendbares Wissen und ein tieferes Verständnis sorgen. Darüber hinaus können digitale Medien die Bildung mentaler Modelle unterstützen (Girwidz, 2013).

Neben diesen lerntheoretisch erklärten Qualitäten von digitalen Medien können aus einer fachdidaktischen Perspektive weitere Merkmale gewinnbringende Auswirkungen auf das Lernen haben. Beispielsweise können durch digitale Medien dynamische Prozesse visualisiert werden, denen ein statisches Bild nicht gerecht werden würde (Girwidz, 2013). Dabei kann der zeitliche Rahmen von Prozessen und Phänomenen zur besseren Veranschaulichung und Erschließung in verlangsamter oder beschleunigter Form dargestellt werden (Kuhn et al., 2017). Die dynamische und beschleunigte Darstellung der Planetenbewegung in einer Animation ermöglicht einen Blick auf das Sonnensystem, der in der Realität oder durch analoge Medien so nicht möglich wäre – um nur ein Beispiel zu nennen. Darüber hinaus können auch für das menschliche Auge unsichtbare oder nicht beobachtbare Sachverhalte (z.B. Elektronenfluss, elektromagnetische Strahlung, das Innere eines Sterns) dargestellt werden (Wiemann, Adams, Loeblein & Perkins, 2010). Insbesondere der Computer, ein beliebtes digitales Medium, bietet vielseitige Anwendungsmöglichkeiten und kann als Werkzeug zur Kommunikation, Recherche, Berechnung komplexer Zusammenhänge oder zur Auswertung von großen Datensätzen genutzt werden. Der Computer übernimmt als Rechenwerkzeug Routineaufgaben, also sich wiederholende und meist simple Berechnungen, und entlastet damit die Lernenden, indem diese ihre kognitiven Ressourcen für den eigentlichen Lerngegenstand



nutzen können (Schaal, Spannagel & Vogel, 2011). Zuletzt ist der Einsatz von digitalen Medien zeit- und ortsunabhängig, wodurch Lernprozesse über den Unterricht hinaus individuell fortgeführt werden können (Kuhn et al., 2017; Wieman et al., 2010). Hiermit wird aber nur eine Auswahl der vorteilhaften Merkmale dargestellt. Die große Vielfalt an digitalen Medien ermöglicht insgesamt eine bereichernde Gestaltung von Lehr-Lern-Umgebungen auf eine Art, wie es analoge Medien nicht können. Digitalisierung ist im Bildungskontext also mit dem Potenzial verbunden, Lehr-Lern-Prozesse durch neue, moderne Ansätze weiterzuentwickeln und zu verbessern (Ladel, Knopf & Weinberger, 2018). Eine besondere Rolle spielen dabei Computersimulationen, die das entdeckende Lernen fördern können und einen experimentellen Zugang zum Lerngegenstand ermöglichen. In Kapitel 2.4 wird im Detail auf die Vorzüge des simulationsbasierten Lernens eingegangen.

Für eine praktische Umsetzung digitalgestützter Lehr-Lern-Formen spielt neben theoretischen Annahmen insbesondere auch die Evidenzorientierung eine wichtige Rolle. Aufbauend auf den theoretischen Überlegungen zum Lernen mit digitalen Medien wurde und wird daher die Wirkung digitalgestützter Lehr-Lern-Umgebungen in der Bildungsforschung und Fachdidaktik intensiv untersucht. Mit unterschiedlichen Studien wird das Potenzial von Multimedialernen, das aufbauend auf Lerntheorien und den Eigenschaften digitaler Medien erwartet wird, durch empirische Ergebnisse verdeutlicht. Hillmayr und Kolleg:innen fassen in einer Metastudie die Wirksamkeit von digitalen Werkzeugen im mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht der Sekundarstufe zusammen (Hillmayr et al., 2017; Hillmayr, Ziernwald, Reinhold, Hofer & Reiss, 2020). Sie berücksichtigen dabei ausschließlich Einzelstudien, die das Lernen mit digitalen Medien mit einer Kontrollgruppe vergleichen, in der kein Medieneinsatz erfolgte. Zusammengefasst wirkt sich der digitalgestützte im Vergleich zum traditionellen Unterricht positiv auf den Lernzuwachs der Schüler:innen aus, mit einer mittleren Effektstärke ( $g = 0.65$ ). Ähnliche Ergebnisse zeigen sich auch in anderen Meta-Analysen wie der von Higgins, Huscroft-D'Angelo und Crawford (2019). Sie analysieren die Wirkung von Technologien im Mathematikunterricht und stellen insgesamt einen positiven Einfluss auf die Leistung ( $d = 0.68$ ), Motivation ( $d = 0.30$ ) und Einstellung der Lernenden gegenüber Mathematik ( $d = 0.59$ ) fest. Aber auch in nicht mathematisch-naturwissenschaftlichen Disziplinen kann der Lernerfolg insgesamt positiv vom Einsatz mobiler Endgeräte wie Laptop oder Smartphone beeinflusst werden ( $d = 0.523$ ) (Sung, Chang & Liu, 2016). Im Detail geht aus der Metastudie von Hillmayr et al. hervor, dass der digitale Medieneinsatz die Einstellung der Schüler:innen gegenüber dem Unterrichtsfach positiv beeinflusst ( $g = 0.45$ ) (Hillmayr et al., 2020) und ihre Lernmotivation steigert (Hillmayr et al., 2017). Aus einer Befragung von erfahrenen Lehrkräften, die von Hillmayr et al. (2017) ergänzend zur Metastudie durchgeführt wurde, geht hervor, dass durch digitale Medien beson-

ders schülerzentrierte Lernformen geschaffen werden können. Die Lehrkraft wechselt dabei in eine moderierende und unterstützende Rolle und überlässt so den Schüler:innen die Steuerung des Lernprozesses. Mit dem schülerzentrierten Ansatz geht auch die Kommunikationsförderung im digitalgestützten Lernprozess einher. Die Kommunikation besteht dabei vor allem zwischen den Lernenden selbst. Die befragten Lehrkräfte berichten zudem von einem hohen Potenzial der Differenzierung mit digitalen Medien, was erneut mit der Lernerorientierung zusammenhängt. Durch geeignete digitale Anwendungen können die Lernenden ihr Lerntempo und den Schwierigkeitsgrad selbst bestimmen (Hillmayr et al., 2017).

Zusammengefasst ist der Einsatz von digitalen Medien in Lernprozessen auf unterschiedlichen Ebenen mit dem Potenzial verbunden, das Lernen zu bereichern. Abschließend ist aber klarzustellen, dass Unterricht nicht per se durch den Einsatz von digitalen Medien verbessert wird. In einem grundsätzlich schlechten Unterricht führt das zuvor beschriebene Potenzial vom digitalgestützten Lernen nicht automatisch zu größeren Lernerfolgen. In einer Erweiterung von John Hatties Meta-Studie „Visible Learning“ wird dies deutlich (Zierer, 2020): Voraussetzung für einen Mehrgewinn durch den Einsatz von digitalen Medien ist die Unterrichtsqualität selbst. Zudem wirkt sich die Expertise der Lehrkraft im Umgang mit digitalen Medien positiv auf den Lernzuwachs aus (Hillmayr et al., 2017). Das Potenzial digitaler Medien für den Lernprozess kann folglich erst dann voll ausgeschöpft werden, wenn ein fachdidaktisch begründeter Medieneinsatz erfolgt und dieser nicht dem bloßen Selbstzweck dient (z.B. Girwitz (2013), Higgins et al. (2019)). Dann kann die gesteigerte Lernmotivation der Schüler:innen auch über den sogenannten Neuheitseffekt, der durch die Neugestaltung des gewohnten Unterrichts entsteht, hinaus bestehen bleiben (Hillmayr et al., 2017).

### 2.3 Gelingensbedingungen und Gestaltungsprinzipien

Aus dem in Kapitel 2.2 beschriebenen Potenzial, das mit einem digitalen Medieneinsatz für Lernprozesse einhergeht, können Empfehlungen für die lernförderliche Gestaltung von digitalgestützten Lernumgebungen abgeleitet werden. Diese Empfehlungen setzen eine fachdidaktisch begründete und sinnvolle Integration von Technologien in den Lehr-Lern-Prozess voraus und sind sowohl theoriegeleitet als auch evidenzbasiert. Die im Folgenden erläuterten Handlungsempfehlungen werden abschließend in Tabelle 2.3 zusammengefasst. Hierbei wird kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben und grundsätzliche Gestaltungsprinzipien, die für einen gewinnbringenden (traditionellen) Unterricht relevant sind, werden als Voraussetzung angesehen.

Hillmayr et al. (2017) identifizieren in ihrer Meta-Studie methodische Maßnahmen, die zum Gelingen von digitalgestütztem Unterricht beitragen können und die positive Wirkung des digitalen Medieneinsatzes erhöhen. Aus ihren Ergebnissen kann man ableiten, dass eine Kombination von digitalen und analogen Lernmaterialien stattfinden sollte. Digitale Medien

sollten die traditionellen und etablierten Unterrichtsmethoden also nicht vollständig ersetzen sondern sinnvoll ergänzen. Zudem ist ein kurzfristiger Medieneinsatz dem längerfristigen vorzuziehen. Die Lernenden arbeiten darüber hinaus idealerweise in einer kollaborativen Sozialform, um sich paarweise über Probleme und den Lernweg austauschen zu können (ebd.). So wird Lernen zu einem sozialen Prozess, wie es auch der Konstruktivismus versteht. Lernende kommunizieren und kooperieren während des Lernens, wodurch automatisch ein Austausch über alternative Sichtweisen zum Lerngegenstand entsteht und die Reflexion des eigenen Arbeitens angeregt wird – beides vertieft den Lernprozess (Arnold, 2005). Eine solche Sozialform fördert die Kommunikation und Kooperation, ermöglicht die gegenseitige Unterstützung beim Lernen und zeichnet sich gemäß des ICAP-Modells durch einen hohen Grad der Involviertheit aus (Chi & Wylie, 2014). Die Lernenden sollten zudem Unterstützung durch die lehrende Person erfahren, indem auch hier ein sozialer Austausch stattfindet. Zu einem selbstgesteuerten Lernprozess gehört dabei, dass Lernende die Unterstützung seitens der Lehrkraft eigenständig einfordern und Zeitpunkt sowie Tiefe selbst festlegen können. Eine Eigentätigkeit und Selbstregulierung der Lernenden ist aber nur dann möglich, wenn in der digitalgestützten Lernumgebung Freiräume für individuelle und aktive Lernprozesse vorhanden sind. (Arnold, 2005; Gerstenmaier & Mandl, 1995; Hillmayr et al., 2017). Die Lehrkraft sollte im Vergleich zum traditionellen Unterricht daher eine Rollenverschiebung wahrnehmen und aus dem Zentrum des Lehr-Lern-Prozesses herausrücken (Hillmayr et al., 2017). Des Weiteren werden den Lernenden im Idealfall unterschiedliche digitale Werkzeuge und Ressourcen zur Verfügung gestellt, aus denen sie frei wählen können. Diese können zur Auseinandersetzung mit möglichst realitätsnahen, offenen und komplexen Problemen eingesetzt werden (Arnold, 2005). Erfolgt das Problemlösen mit Hilfe digitaler Werkzeuge wie einer Tabellenkalkulation oder einer Simulation, können Lernende die technologiegestützten Ergebnisse erst vollständig interpretieren, wenn sie die Funktionsweise des Werkzeugs kennen. Andernfalls bleibt das Werkzeug eine Black Box, deren Arbeitsweise und zugrundegelegten Gesetze die Lernenden nicht kennen (Schaal et al., 2011). Mit dem Einsatz von digitalen Medien kann die kognitive Belastung der Schüler:innen beim Lernen erhöht werden (Kuhn, 2018). Eine essenzielle Gelingensbedingung für digitalgestütztes Lernen ist daher die Vermeidung einer kognitiven Überlastung bzw. eines „multimedialen Overloads“ (Schaal et al., 2011, S. 6). Indem digitale Medien als kognitive Werkzeuge eingesetzt werden, können Lernende bei Routinearbeiten kognitiv entlastet werden und sich auf den eigentlichen Lerngegenstand konzentrieren. Durch das Lernen *mit* diesen digitalen Werkzeugen wird zudem eine aktive Wissenskonstruktion ermöglicht (Arnold, 2005; Jonassen, 1995). Außerdem können Lernende durch unterstützende Maßnahmen wie Instruktionen eine reduzierte extrinsische Belastung erfahren, was sich vorteilhaft auf den Lernprozess auswirkt (Chandler & Sweller, 1991; Girwidz, 2015).

Zur Reduktion der extrinsischen kognitiven Belastung trägt zudem eine lernförderliche und gelungene Gestaltung von digitalen Werkzeugen und multimedialen Anwendungen bei. Besonders bei eher geringem Vorwissen können Schüler:innen z.B. durch Strukturierungshilfen bzgl. des Lernprozesses oder des Lernmaterials beim Lernen unterstützt und kognitiv entlastet werden (Blömeke, 2003). Für einen erfolgreichen Lernprozess sollten daher digitale Anwendungen bevorzugt werden, die eine gewisse Qualität vorweisen und zum jeweiligen Lehr-Lern-Prozess (Zielgruppe, Lerngegenstand, Vorwissen, Lernziel, etc.) passen. Um aus dem breiten Angebot an digitalen Anwendungen ein qualitativ geeignetes Material zu finden, können Kriterienkataloge wie der von Altherr, Wagner, Eckert und Jodl (2003) genutzt werden. Der Katalog umfasst die drei Hauptkriterien *Motivation*, *Inhalt*, *Methode* und bewährte sich bereits in umfangreichen Praxisanwendungen. Durch konkrete Leitfragen können multimediale Materialien hiermit umfangreich analysiert werden. Die Leitfragen zielen hinsichtlich der Motivation auf die Benutzerfreundlichkeit, Attraktivität und eine klare Beschreibung von Ziel und Instruktion ab (z.B. *Gibt es interaktive Komponenten?*). Um den Inhalt zu analysieren, werden dessen Relevanz, Reichweite und Korrektheit kritisch betrachtet (z.B. *Werden Vereinfachungen angegeben oder gekennzeichnet?*). Zuletzt adressieren Leitfragen zur Methode die Flexibilität, Passung zur Zielgruppe, Realisierbarkeit und Dokumentation der Anwendung (z.B. *Werden hierdurch neue Zugänge zum Thema ermöglicht?*) (Altherr et al., 2003, S. 12).

Darüber hinaus können zum Bewerten und Auswählen von multimedialen Lehr-Lern-Angeboten auch zwölf lernförderliche Gestaltungsprinzipien herangezogen werden, die auf der Cognitive Load Theory of Multimedia Learning und damit verbundenen empirischen Untersuchungen aufbauen (Mayer, 2001, 2009). Fünf der zwölf Prinzipien können zur Reduktion der extrinsischen Belastung beitragen und so den Lernerfolg erhöhen. Dafür sollten beispielsweise die dargebotenen Informationen auf das Nötigste beschränkt (*Kohärenzprinzip*) und wichtige Aspekte hervorgehoben werden (*Signalisierungsprinzip*). Zusammenhängende Text- und Bildinformationen sollten zudem zeitgleich und nahe beieinander dargestellt werden (*zeitliches und räumliches Kontiguitätsprinzip*). Drei weitere Prinzipien können das Steuern wesentlicher Verarbeitungsprozesse unterstützen. Der Lernprozess ist besser, wenn Personen die zentralen Begriffe und Konzepte bereits vor dem multimedialen Lernen kennen (*Vortrainingsprinzip*) und die Informationen schrittweise und an das Lerntempo angepasst präsentiert werden (*Segmentierungsprinzip*). Zuletzt können mit vier Prinzipien Prozesse zur generativen Verarbeitung von Informationen gefördert werden, hierzu zählt das Anbieten von Textinformationen zusammen mit Bildinformationen (*Multimediaprinzip*). Ferner sollten die Textinformationen in einem persönlichen und ansprechenden Stil dargeboten werden (*Personalisierungsprinzip*). Mayer (2009) betont, dass die Designprinzipien von individuellen Rahmenbedingungen abhängen. Das Vorwissen der Lernenden sowie die Komplexität und

Präsentationsgeschwindigkeit des Lerngegenstands bestimmen, welche der zwölf Prinzipien in der jeweiligen Situation bedeutsamer und gewinnbringender sind als andere. Grundsätzlich kann man davon ausgehen, dass Lernende mit geringem Vorwissen stärker von den Prinzipien profitieren und wenn darüber hinaus ein komplexer Lerngegenstand in rasantem Tempo präsentiert wird, werden vor allem die Prinzipien zur Reduktion der extrinsischen Belastung wichtig.

Die hier beschriebenen Gestaltungsprinzipien gelten unabhängig von der Art des digitalen Mediums und je nach eingesetzter Technologie können sich darüber hinaus spezifische Handlungsempfehlungen ergeben – ein Beispiel ist das simulationsbasierte Lernen. Wodurch sich diese besonders gewinnbringende Form des digitalgestützten Lernens auszeichnet und welche Gelingensbedingungen hiermit verknüpft sind, wird im anschließenden Kapitel ausgeführt. Insgesamt gilt aber für jeden Medieneinsatz, dass dessen lernförderliche Wirkung von vielseitigen Faktoren abhängt. Daher zielen die Handlungsempfehlungen nicht allein auf technische Aspekte ab, sondern bauen auch auf pädagogischen und didaktischen Überlegungen auf (vgl. Tabelle 2.3). Abschließend sei kurz auf das *Substitution Augmentation Modification Redefinition Modell* (SAMR) von Puentedura (2006) verwiesen, aus dem weitere praktische Handlungsempfehlungen abgeleitet werden könnten. Dieses Modell ist jedoch einerseits nicht theoretisch fundiert und betrachtet andererseits den digitalgestützten Lernprozess nur einseitig aus einer technologischen Perspektive. Hamilton, Rosenberg und Akcaoglu (2016) äußern aus einer wissenschaftlichen Perspektive darüber hinaus deutliche Kritik am Modell, weshalb es in dieser Arbeit keine weitere Beachtung findet.

## 2.4 Simulationsbasiertes Lernen

Computersimulationen werden in der physikalischen Fachwissenschaft als Werkzeug zur Erkenntnisgewinnung eingesetzt und können den klassischen Erkenntnisweg bestehend aus *Beobachtung, Hypothesenbildung, Experiment* und *Theorie* (Stiller, Allmers, Habigsberg, Stockey & Wilde, 2020) an mancher Stelle sinnvoll erweitern. Dabei werden komplexe Algorithmen und höhere Mathematik genutzt, um die Lösung eines naturwissenschaftlichen Problems möglichst genau zu approximieren und so den Wissensstand voranzubringen (Richtberg, 2018). Der Parlamentarische Staatssekretär des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, Thomas Rachel, greift das in seiner Rede zum Thema *Simulation und Datenanalyse* auf und bezeichnet die Simulation neben dem Experiment und der Theoriebildung als „dritte Säule der Wissenschaft“ (Rachel, 2015). Es liegt nahe, dass Lernende sich bereits im Physikunterricht genauer mit Simulation befassen. Didaktische Computersimulationen, wie sie üblicherweise im Unterricht eingesetzt werden, sind dabei von fachwissenschaftlichen Simulationen zu unterscheiden. Hiermit ist vielmehr das Ziel verbunden, das für die Fachwissenschaft bereits bekannte Wissen für Lernende möglichst anschaulich und verständlich

Tabelle 2.3: Zusammenfassung von lernförderlichen Gestaltungsprinzipien für digitalgestützte Lernumgebungen.

Empfehlungen*	Erläuterung
<ul style="list-style-type: none"> <li>• kognitive Entlastung</li> </ul>	durch Einsatz kognitiver Werkzeuge; ein multimedialel Overload vermeiden; Ablenkung vom Lerngegenstand durch die digitale Anwendung vermeiden; erhöhte extrinsische Belastung vermeiden
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Differenzierung, Handlungsspielraum</li> <li>• Aktivität</li> </ul>	individuelles Vorwissen wird beachtet; Lernprozess wird eigenverantwortlich gesteuert hohe kognitive Aktivierung zur Förderung von sinnhaftem Lernen
<ul style="list-style-type: none"> <li>• keine Black Box</li> </ul>	Funktions- bzw. Arbeitsweise einer digitalen Anwendung ist ersichtlich und nachvollziehbar
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kompatibilität, Zusammenspiel</li> </ul>	sinnvolle Ergänzung durch analoge Handlungen; Kombination mit anderen digitalen Werkzeugen für einen individuellen Lernprozess
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Qualität, Passung</li> </ul>	digitale Anwendungen und Materialien kriteriengeleitet analysieren und nach Qualität und Eignung für Zielgruppe und Lernziel passend auswählen
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kollaboration</li> <li>• Unterstützung, Struktur</li> </ul>	Kommunikation und Kooperation fördern individuelles Lernen durch geeignete Maßnahmen unterstützen; Lernziele transparent machen; Lernende begleiten

\*Es wird kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben. Die Auflistung ist nicht hierarchisch.

darzustellen, was oft nicht über eine qualitative Darstellung von Lösungen und Phänomen hinaus geht (Richtberg, 2018). Den didaktischen Simulationen liegen daher weniger komplexe Berechnungen zugrunde (ebd.) und sie zeichnen sich in der Regel durch eine optisch ansprechende Benutzeroberfläche und ein attraktives Design aus (Altherr et al., 2003). Lernende können sich durch diese Simulationen dennoch vertieft mit Fragen und Methoden auseinandersetzen, die für die fachwissenschaftliche Forschung relevant sind (Podolefsky, Perkins & Adams, 2010). Den Begriff Computersimulation eindeutig zu definieren, ist aufgrund der zwei durchaus unterschiedlichen Formen (fachwissenschaftlich, didaktisch) schwierig, weshalb zur Charakterisierung im Folgenden die typischen Eigenschaften einer didaktischen Simulation<sup>1</sup> beschrieben werden. Simulationen zeigen ein Abbild von ausgewählten Aspekten oder Phänomenen der Wirklichkeit und basieren auf logischen Modellen (De Jong & Van Joolingen, 1998). Hierdurch kann ein komplexer Fachinhalt reduziert und vereinfacht werden, was eine kognitiv entlastende Wirkung zur Folge hat (De Jong, 2011). Gleichzeitig schaffen Simulationen eine äußerst realitätsnahe und somit authentische Lernumgebung, in der träges Wissen vermieden und deklaratives sowie prozedurales Wissen gefördert wer-

<sup>1</sup>Mit der einfachen Bezeichnung *Simulation* ist fortan eine didaktische Simulation gemeint. Andernfalls wird explizit gesagt, dass es sich um eine fachwissenschaftliche Simulation handelt.

den können (Gerstenmaier & Mandl, 1995; Gräsel et al., 1997; Urhahne & Harms, 2006). Lernende können mit einer Simulation interagieren und deren Ergebnisse durch aktives Eingreifen beeinflussen. Diese hohe Interaktivität ist ein zentrales Charakteristikum von Simulationen und unterscheidet sie wesentlich von Animationen (Berger, 2006; Finkelstein et al., 2005). Sie gehen folglich mit einem hohen Grad der Involviertheit einher (vgl. ICAP-Modell (Chi & Wylie, 2014)). Da Computersimulationen zu digitalen Werkzeugen zählen, ist mit ihrem Einsatz das in Kapitel 2.2 beschriebene Potenzial von digitalgestütztem Lernen verbunden. Darüber hinaus gibt es einige Vorteile für den Lernprozess, die speziell durch den Einsatz einer Simulation entstehen können und deren Charakteristik weiter beschreiben. Verglichen mit anderen Lernumgebungen können hier typische Fehlkonzepte direkt adressiert werden, indem z.B. die Vorstellung über Stromverbrauch durch sich bewegende Elektronen dargestellt wird. Indem unsichtbare Phänomene und Prozesse sichtbar gemacht werden und eine expertenähnliche Modellvorstellung repräsentiert wird, kann die Simulation das Bilden mentaler Modelle und somit den Lernprozess selbst unterstützen (Wieman et al., 2010). Eine weitere Qualität ist, dass Simulationen einen experimentellen Zugang zu physikalischen Phänomenen und Prozessen ermöglichen. Dadurch können sie für entdeckendes Lernen eingesetzt werden und ermöglichen in besonderem Maße eine lernerzentrierte und konstruktivistische Unterrichtsgestaltung (De Jong, 2011). Entdeckendes Lernen (discovery learning) ist eine konstruktivistische Lernform, bei der Lernende durch selbstbestimmtes und offenes Experimentieren die fachinhaltlichen Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten ableiten. Sie konstruieren ihr Wissen also aktiv und können den Lerngegenstand dadurch tiefgehender verstehen – so die Hypothese (Van Joolingen et al., 1999). Simulationen stehen darüber hinaus Experimenten hinsichtlich der Variablenmanipulation und des Erwerbs von Konzeptwissen in nichts nach (Finkelstein et al., 2005). Sie können daher zum Üben experimenteller Strategien (z.B. Variablenkontrolle) als Ergänzung (z.B. Vorbereitung, Nachbereitung) zu klassischen Experimenten eingesetzt werden und den Unterricht so verbessern (Rutten, Van Joolingen & Van Der Veen, 2012). Im Vergleich zu Laborexperimenten gibt es dabei mehrere Vorteile (Wieman et al., 2010):

- Simulationen können eingesetzt werden, wenn Experimente aus verschiedenen Gründen nicht durchgeführt werden können (z.B. zu teuer, verboten, nicht zugänglich, unmöglich durchzuführen).
- Simulationen können auch außerhalb des Unterrichts genutzt werden (z.B. Hausaufgaben, Prüfungsvorbereitung, Nachhilfe).
- Simulationen ermöglichen das einfache, ungefährliche Manipulieren auch von solchen Variablen, die in der Realität nicht oder nur schwer variiert werden können (z.B. Zeit).

- Simulationen können so angepasst werden, dass sie dem individuellen Vorwissen der Lernenden gerecht werden.
- Simulationen enthalten Feedback und eine implizite Führung (guidance), da sie die variierbaren Parameter vorgeben und eine direkte Reaktion erfolgt, sobald Lernende eine Größe manipulieren.

Der letzte Aspekt bezieht sich darauf, dass der Handlungsspielraum beim entdeckenden Lernen mit einer Simulation in einem Rahmen bleibt, der den Lernprozess produktiver gestaltet (Podolefsky et al., 2010). Das kann die Zeit reduzieren, die Lernende zum Identifizieren sinnvoller und zielführender Handlungen beim Experimentieren benötigen. Lernende erhalten zudem direkte Rückmeldung von der Simulation und sind weniger auf die Rückmeldung einer Lehrkraft angewiesen (Wieman et al., 2010), was eine schülerzentrierte Lernumgebung ermöglicht.

Mit digitalen Medien und insbesondere mit Simulationen geht durch die hohe Interaktivität und Kontrolle der Lernenden eine eigenverantwortliche Steuerung des Lernprozesses einher. Dies kann sich zwar positiv auf den Lernerfolg auswirken (vgl. Hillmayr et al. (2017)), führe bei schwächeren Schüler:innen jedoch zu „unsystematischen Verhaltensweisen“ und „zufälligen Strategien“ (Urhahne & Harms, 2006, S. 361). Gerade bei schwachen Lernenden kann simulationsbasiertes Lernen also zu einer hohen kognitiven Belastung führen, wodurch dessen Lernpotenzial nicht ausgeschöpft wird (ebd.). Wie bereits erwähnt, können Simulationen ideal für entdeckende Lernformen eingesetzt werden. Sie bieten eine effektive Möglichkeit, die für das entdeckende Lernen relevanten kognitiven Prozesse zu fördern – dazu zählen die Orientierung über den Sachverhalt, Hypothesenbildung und -prüfung, Planung und Steuerung des Vorgehens sowie abschließende Reflexion des Vorgehens (De Jong, 2011). De Jong und Van Joolingen (1998) identifizieren jedoch vier Problembereiche, die in diesem Zuge bei Lernenden auftreten können: Generieren von Hypothesen, Gestalten von Experimenten, Ergebnisinterpretation und Steuerung des Lernprozesses. Um die kognitive Belastung und weitere Schwierigkeiten zu minimieren, sollten die Lernenden Unterstützung und Führung z.B. in Form von Instruktionen erhalten (De Jong, 2011; Urhahne & Harms, 2006). Im Spannungsfeld zwischen einer Komplexitätsreduktion und selbstreguliertem Lernen liegt die Herausforderung darin, eine möglichst lernwirksame Form der Unterstützung und Orientierungshilfe zu finden (Urhahne & Harms, 2006). Maßnahmen zur instruktionalen Unterstützung von entdeckendem Lernen mit Simulationen können in drei Arten unterteilt werden (Zhang, Chen, Sun & Reid, 2004, S. 270):

**Interpretative Unterstützung:** Lernende werden *vor* der Auseinandersetzung mit der Simulation dabei unterstützt, nötiges Vorwissen zu aktivieren und abzurufen, Hypothesen zu generieren sowie ein kohärentes Verständnis zu entwickeln.



**Experimentelle Unterstützung:** Lernende werden *während* der Interaktion mit der Simulation dabei unterstützt, Experimente systematisch und logisch zu gestalten, Ergebnisse vorherzusagen und zu beobachten sowie begründete Schlussfolgerungen zu ziehen.

**Reflektierende Unterstützung:** Lernende werden *nach* dem Arbeiten mit der Simulation dabei unterstützt, sich den eigenen Lernprozess bewusst zu machen sowie ihre Beobachtungen und Ergebnisse reflektiv zu abstrahieren und integrieren.

Die vier Problembereiche, die De Jong und Van Joolingen (1998) identifizieren, werden hierdurch abgedeckt. In einer Meta-Analyse untersuchen Urhahne und Harms (2006) die Wirkung unterschiedlicher Maßnahmen zur interpretativen, experimentellen und reflektierenden Unterstützung entdeckender, simulationsbasierter Lernformen. Sie schlussfolgern, dass besonders die folgenden unterstützenden Instruktionsmaßnahmen eine lernförderliche Wirkung haben können:

- Arbeitsaufträge und ausgearbeitete Lösungsbeispiele (interpretativ)
- permanent verfügbare Hintergrundinformationen, Führung durch das Computerprogramm sowie Einfordern einer Begründung zur Erklärung des Simulationsergebnisses (experimentell)
- differenzierte Rückmeldung des Lernsystems sowie Hinweise und Aufgaben, die reflexionsanregend sind (reflektierend)

Aufgrund der hohen intrinsischen Belastung während der Interaktion mit einer Simulation sollten Instruktionsmaßnahmen zu diesem Zeitpunkt minimal gehalten werden, um das Arbeitsgedächtnis nicht unnötig extrinsisch zu belasten. Dementsprechend können interpretative und reflektierende Maßnahmen deutlich umfangreicher gestaltet sein (Urhahne & Harms, 2006).

Zusammengefasst sind Simulationen eine gewinnbringende Methode der Erkenntnisgewinnung und ihr hochgradig interaktiver Werkzeugcharakter kann einen lernförderlichen und experimentellen Zugang zu physikalischen Phänomenen liefern. Der Physikunterricht kann durch den Einsatz von Computersimulationen also einen besonderen Beitrag zur Auseinandersetzung von Lernenden mit modernen digitalen Medien leisten (Niedersächsisches Kultusministerium (Hrsg.), 2017). Gegenüber traditionellen Experimenten haben Computersimulationen einige Qualitäten, sie sollten diese aber nicht grundsätzlich ersetzen sondern sinnvoll ergänzen. Simulationsbasierte Lernumgebungen können zudem sehr gut mit konstruktivistischen Vorstellungen zum Lernen in Einklang gebracht werden, wodurch auch ihr Potenzial für den Lernprozess ersichtlich wird. Lernende erfahren beim entdeckenden Lernen mit Simulationen bereits eine implizite Führung, sollten aber auch durch geeignete Instruktionen kognitiv entlastet und somit in ihrem Lernprozess unterstützt werden. Abhängig

von der Gestaltung der eingesetzten Simulation erscheint eine eher enge oder offene Führung sinnvoll zu sein (Richtberg & Girwidz, 2013). Herausfordernd ist dabei, ein angemessenes Maß zwischen der Reduktion komplexer Anforderungen und der Förderung von offenen und selbstbestimmten Lernprozessen zu finden.

### 3 Lehren mit digitalen Medien

Für eine gelungene Planung und Umsetzung von digitalgestützten Lehr-Lern-Situationen ist ein theoretisches Verständnis über das Lernen mit digitalen Medien, wie es in Kapitel 2 dargelegt wurde, grundlegend. Darüber hinaus sollten die Lehr-Lern-Prozesse auch im Hinblick auf das Lehren betrachtet werden. Die Ergebnisse des Länderindikators 2017 (Lorenz, Bos et al., 2017) zeigen, dass nur die Hälfte der befragten Lehrkräfte der Sekundarstufe I regelmäßig (mindestens einmal pro Woche) digitale Medien im Unterricht einsetzt (Lorenz, Endberg & Eickelmann, 2017). Unter MINT-Lehrkräften ist der Anteil mit 57% größer als unter nicht-MINT-Lehrkräften und generell nutzen mehr männliche und jüngere Lehrkräfte den Computer regelmäßig (ebd.). Lehrkräfte, die den Mehrwert des Lernens mit digitalen Medien wahrnehmen, setzen zudem öfter digitale Medien regelmäßig ein (ebd.). Neben einer positiven Lehrer:inneneinstellung stellt auch eine hohe Selbsteinschätzung der medienbezogenen Kompetenzen einen Prädiktor für den Medieneinsatz dar (Endberg & Lorenz, 2017). Im Vergleich zu den Ergebnissen des Länderindikators aus 2015 (47.7%) und 2016 (49.8%) hat sich der regelmäßige Medieneinsatz von Lehrkräften aber wider Erwarten kaum erhöht (Lorenz, Endberg & Eickelmann, 2017). In der Schulpraxis wird währenddessen erwartungsvoll auf junge Lehrkräfte der Generation der Digital Natives geschaut, die, so die Hoffnung, eine tiefgehende Expertise für den lernförderlichen Medieneinsatz im Unterricht mitbringen. Leider kann man aus Studienergebnissen ableiten, dass Lehramtsstudierende, die zu den Digital Natives zählen, nicht als digital-affin bezeichnet werden sollten (Persike & Friedrich, 2016; Schmid et al., 2017). Von einer intensiven privaten Mediennutzung junger Menschen (Digital Natives) kann nicht automatisch auf eine gleichermaßen intensive Nutzung digitaler Medien für Studienzwecke geschlossen werden (Persike & Friedrich, 2016). Lehramtsstudierende berichten von eher wenigen lernbezogenen Vorerfahrungen mit digitalen Medien während ihrer eigenen Schulzeit und die lernbezogenen Vorerfahrungen mit digitalen Medien im Lehramtsstudium sind ähnlich gering (Vogelsang et al., 2019). Zudem beschränken sich ihre Vorerfahrungen überwiegend auf die Nutzung von fachunspezifischen Standardanwendungen, beispielsweise zum Verfassen von Texten oder zum Erstellen von Präsentationen (Persike & Friedrich, 2016; Vogelsang et al., 2019).

Hillmayr et al. (2017) schlussfolgern in einer Metastudie, dass die gezielte Förderung der digitalen Kompetenzen einer Lehrkraft den positiven Einfluss von digitalen Medien auf die Schüler:innenleistung erhöht. Vor diesem Hintergrund erscheint es sinnvoll, das Lehren mit digitalen Medien genauer in den Blick zu nehmen. Dabei sind folgende Fragestellungen relevant: Was sind grundsätzliche Voraussetzungen dafür, als (angehende) Lehrkraft lernförderlichen Unterricht mit digitalen Medien realisieren zu können? Über welche digitalen Kompetenzen sollten Lehrende verfügen? Wie können sie diese Kompetenzen im Laufe der Lehrer:innenausbildung erwerben? Auf diese Fragen wird im Folgenden einge-

gangen, indem zunächst verschiedene Rahmenmodelle zur Operationalisierung der digitalen Kompetenzen von Lehrenden vorgestellt werden (Kapitel 3.1). Anschließend werden aus der Literatur Empfehlungen abgeleitet, die für die Gestaltung einer universitären Lehrveranstaltung zur Förderung digitaler Kompetenzen bei Lehramtsstudierenden fungieren (3.2). Zuletzt wird der Einfluss der persönlichen Einstellung auf den tatsächlichen Medieneinsatz in der Unterrichtspraxis betrachtet (3.3).

### 3.1 Kompetenzrahmen

Mit dem zunehmenden Einfluss der Digitalisierung im Bildungskontext kam die Frage auf, welche Kompetenzen die Schüler:innen mit und über digitale Medien erwerben sollen. Durch die Kultusministerkonferenz wurde ein Katalog zu *Kompetenzen in der digitalen Welt* entwickelt (KMK, 2016). In sechs Bereichen werden darin die digitalen Kernkompetenzen für Schüler:innen festgehalten. Um aber eine dahingehend erfolgreiche Ausbildung und Kompetenzförderung der Schüler:innen überhaupt zu ermöglichen, ist die Expertise der Lehrenden von zentraler Bedeutung (Hillmayr et al., 2017). Hier schließt sich folglich direkt die Frage nach analogen Kompetenzrahmen für Lehrkräfte und angehende<sup>2</sup> Lehrkräfte an. Mittlerweile können zur operationalisierten Beschreibung digitaler Kompetenzen von (angehenden) Lehrkräften auf nationaler und internationaler Ebene insbesondere fünf unterschiedliche Ansätze herangezogen werden, die in Tabelle 3.1 zusammengefasst werden. Drei davon (TPACK, Dagstuhl-Dreieck und DiKoLAN) dienen als Basis dieser Arbeit und werden daher entsprechend der Reihenfolge ihrer Veröffentlichung im Detail vorgestellt. Die beiden anderen Ansätze (digi.Komp und DigCompEdu) sind fachunspezifisch und unpräzise (vgl. Becker et al. (2020)), weshalb sie in dieser Arbeit keine weitere Beachtung finden.

#### 3.1.1 TPACK-Modell

Mishra und Koehler (2006) entwickelten mit dem *Technological Pedagogical and Content Knowledge* (TPACK) einen theoretischen Ansatz, um unterschiedliche Fähigkeitsbereiche des Professionswissens einer Lehrkraft im 21. Jahrhundert zu beschreiben. Ihr Ansatz basierte auf dem Konzept zum *Pedagogical Content Knowledge* (PCK) nach Shulman (1986) und Shulman (1987) und erweiterte dieses durch einen Technologiebezug. Das bis dahin als getrennt betrachtete Fachwissen (*Content Knowledge*, CK) und pädagogische Wissen (*Pedagogical Knowledge*, PK) wurden von Shulman zum PCK vereint, um das Zusammenspiel und die Überschneidungen dieser einzelnen Bereiche hervorzuheben. Das PCK erfasst in besonderem Maße das zentrale Wissen einer Lehrkraft (Shulman, 1987) und wird im

---

<sup>2</sup>Gemeint sind Personen in der ersten und zweiten Phase der Lehrer:innenbildung, also Lehramtsstudium und Referendariat.

Tabelle 3.1: Zusammenfassender Überblick über digitale Kompetenzrahmen im Kontext der Lehrer:innenbildung. Die hervorgehobenen Ansätze dienen als Basis dieser Arbeit.

Ansatz	Publikation	Beschreibung	Zielgruppe
<b>TPACK</b>	Mishra und Koehler (2006)	Professionswissen; Selbsteinschätzungs-instrument	(angehende) Lehrkräfte
<b>Dagstuhl-Dreieck</b>	Gesellschaft für Informatik e.V. (2016)	Perspektiven digitaler Bildung	Schüler:innen und Lehrkräfte
digi.kompP	Brandhofer, Kohl, Miglbauer und Nárosy (2016)	digitale Kompetenzen; alle Phasen der Lehrer:innenbildung; fachunspezifisch	angehende Lehrkräfte
DigCompEdu	Redecker et al. (2017)	digitale Kompetenzen; fachunspezifisch	Lehrende aller Bildungsebenen
<b>DiKoLAN</b>	Becker, Meßinger-Koppelt und Thyssen (2020)	digitale Basiskompetenzen; fachspezifisch	Lehramtsstudierende (Naturwissenschaftler:innen)

deutschsprachigen Raum auch als Professionswissen oder Lehrerprofessionswissen bezeichnet (Baumert & Kunter, 2013). Im Zuge der steigenden Relevanz von Technik und Digitalisierung für Alltag und Beruf fanden digitale Medien zunehmend auch im Bildungsbereich Einzug. Das stellte Lehrkräfte vor neue Herausforderungen, weil hierfür eine Erweiterung ihres Professionswissens durch technologisches Wissen voraussetzend war. Unterschiedliche Ansätze befassten sich fortan mit der Erweiterung des PCK Konzepts durch einen Technologiebezug, wobei sich der Ansatz des TPACK nach Mishra und Koehler (2006) international durchsetzte. Bei Endberg (2019) ist eine genaue Beschreibung des Ursprungs und der Entwicklung hin zum TPACK-Ansatz zu finden, worauf an dieser Stelle verzichtet wird. Im Folgenden werden die sieben TPACK-Wissenskomponenten und ihre Darstellung als Venn-Diagramm (Abbildung 3.1) einzeln erläutert. Dabei wird zunächst auf die Basis eingegangen, also die gleichwertigen Bereiche *Content Knowledge*, *Pedagogical Knowledge* und *Technological Knowledge*, die durch je einen Kreis dargestellt werden. Die Überschneidung zweier Basisbereiche wird durch die Schnittfläche zweier Kreise dargestellt (*Pedagogical Content Knowledge*, *Technological Pedagogical Knowledge* und *Technological Content Knowledge*). Die Schnittfläche dieser drei gemeinsamen Bereiche stellt wiederum das *Technological Pedagogical Content Knowledge* als Gesamtüberschneidung und Kern des Modells dar (M. Koehler & Mishra, 2009; Mishra & Koehler, 2006). Das Venn-Diagramm der TPACK-Wissenskomponenten, wie es in Abbildung 3.1 dargestellt ist, wird durch den Kontext der Lehr-Lern-Situation eingerahmt. Individuelle, vielseitige und dynamische Eigenschaften im Kontext Klassenraum beeinflussen das Zusammenspiel von Fachinhalt, pädagogischem und

technologischem Wissen. An dieser Stelle sei angemerkt, dass das theoretische Modell ursprünglich als *TPCK* bezeichnet wurde und das Akronym *TPACK*, repräsentativ für *Technological Pedagogical And Content Knowledge*, erst seit 2007 Verwendung findet. Thompson und Mishra (2007) intendierten damit nicht nur die Aussprache zu erleichtern, sondern auch die integrative Betrachtung der Wissenskomponenten zu betonen.

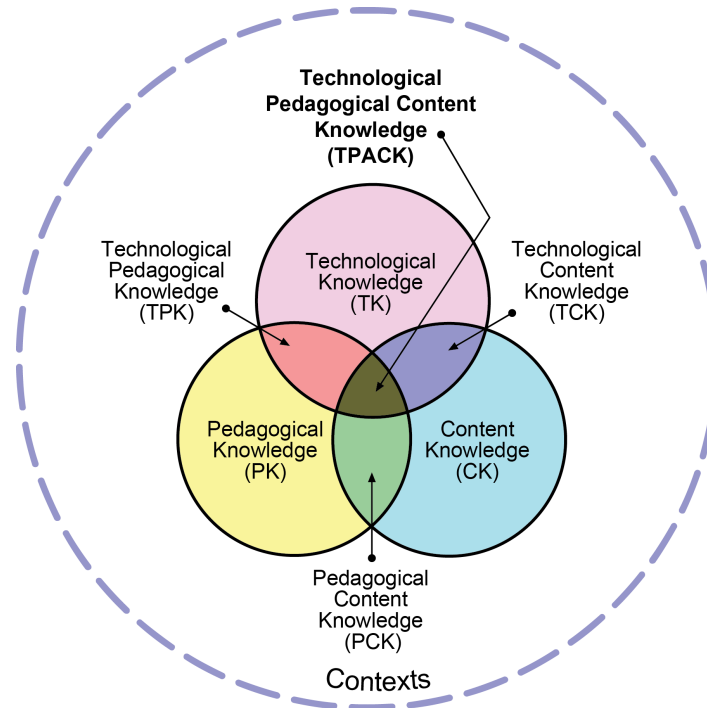


Abbildung 3.1: Veranschaulichung des TPACK-Modells nach Mishra und Koehler (2006) in einem Venn-Diagramm (Darstellung übernommen mit Genehmigung des Herausgebers, 2012, aus <http://tpack.org>).

**Content Knowledge (CK):** CK ist das Fachwissen, über das eine Lehrkraft zum Lehren eines Unterrichtsfachs verfügen sollte, und ist für eine gelungene Lehr-Lern-Situation von zentraler Bedeutung (M. Koehler & Mishra, 2009). Es umfasst Konzepte, Theorien, Fakten, Modelle und disziplinspezifisches Wissen wie beispielsweise Ansätze zur Erkenntnisgewinnung und Beweisführung im Bereich der Naturwissenschaften (M. Koehler & Mishra, 2009; Shulman, 1986).

**Pedagogical Knowledge (PK):** PK ist das Wissen über Methoden, Prozesse und Praktiken für das Lehren und Lernen. Hierzu zählen unter anderem vertiefte Kenntnisse bezüglich Lehr-Lern-Theorien, Kompetenzen im Classroom Management sowie jegliches Wissen, das für die Unterrichtsplanung und -durchführung relevant ist. Lehrkräfte mit einem vertieften PK können die allgemeinen Ziele und Werte von Bildung beschreiben und sie verstehen, wie Lernende Wissen konstruieren und Kompetenzen erwerben (M. Koehler & Mishra, 2009).

**Technological Knowledge (TK):** Ein tiefgehendes TK ermöglicht, Technologien im Alltag und an der Arbeit produktiv zur Lösung verschiedenster Probleme heranzuziehen. Es umfasst auch eine lebenslange Weiterentwicklung im Umgang mit Technologien. Die Bezeichnung Technologien meint hier sowohl herkömmliche Standards wie Buch und Tafel, als auch moderne Technologien wie digitale Werkzeuge und Ressourcen. Im Gegensatz zum CK und PK ist das TK ein Basisbereich, der sich aufbauend auf dem technologischen Fortschritt stetig weiterentwickelt, was eine klare Definition erschwert (M. Koehler & Mishra, 2009).

**Pedagogical Content Knowledge (PCK):** PCK ist das Wissen über die Verbindung von Fachinhalt und pädagogischem Wissen. Hier geht es darum, einen konkreten Fachinhalt für eine Lehr-Lern-Situation schülergerecht aufzuarbeiten, indem das Vorwissen der Lernenden, mögliche Fehlvorstellungen, lernförderliche Strategien, unterstützendes Instruktionsmaterial, Verbindungen zu anderen Fachinhalten und alternative Lernwege Beachtung finden (M. Koehler & Mishra, 2009; Shulman, 1986).

**Technological Pedagogical Knowledge (TPK):** TPK steht für das Wissen darüber, wie der Einsatz von bestimmten Technologien eine Lehr-Lern-Situation beeinflusst. Hier geht es darum, das Potenzial und die Grenzen von Technologien zu kennen und diese von einem pädagogischen Standpunkt aus zu betrachten: Wie wirkt sich der Einsatz beispielsweise auf die Sozialform oder das individuelle Lernen aus? Insbesondere bei solchen Technologien, die nicht explizit für einen Einsatz in der Bildung entwickelt wurden, sollten Lehrkräfte eine offene Haltung entwickeln, um diese auch im Bildungskontext auf kreative und lernförderliche Art einsetzen zu können (M. Koehler & Mishra, 2009).

**Technological Content Knowledge (TCK):** Ein ausgeprägtes TCK befähigt eine Lehrkraft, die Wechselwirkung zwischen Technologien und Fachinhalt zu verstehen, um für den zu lehrenden Inhalt eine passende Technologie auszuwählen. Ein konkreter Fachinhalt kann bestimmen, welche Technologien zur Veranschaulichung geeignet sind. Umgekehrt kann die gewählte Technologie den zu lehrenden Fachinhalt oder die damit verbundenen Repräsentationen verändern, indem beispielsweise für das menschliche Auge unsichtbare Aspekte sichtbar gemacht werden. M. Koehler und Mishra (2009) betonen auch unabhängig vom Bildungskontext eine historische Verbindung zwischen Fachinhalten und der Weiterentwicklung von Technologien, die in verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen den Kenntnisstand vorantrieb.

**Technological Pedagogical And Content Knowledge (TPACK):** „TPACK ist die Basis effektiven Lehrens mit Technologien“ (M. Koehler & Mishra, 2009, S. 66). Als Ge-

schnittstelle beschreibt es die zentralen Fähigkeiten einer Lehrkraft für den lernförderlichen Einsatz von Technologien im Unterricht und umfasst das komplexe Zusammenspiel zwischen Fachinhalt, Methode, Technik, Lehrenden und Lernenden. Folglich ist TPACK mehr als nur die bloße Zusammenfassung der drei Kernbereiche (CK, PK, TK), denn es geht dabei um deren dynamische Wechselwirkung sowie das stetige Bestreben der Lehrkraft, in Lehr-Lern-Prozessen ein Gleichgewicht zwischen diesen Kernbereichen zu halten (M. Koehler & Mishra, 2009).

TPACK ist ein Theorieansatz, dessen Gehalt in der theoretischen Forschung diskutiert und analysiert wird. Uneinigkeit besteht bislang beispielsweise darin, inwiefern TPACK als transformativer, also eigenständiger, oder als integrativer Wissensbereich, der aus anderen Teilbereichen zusammengesetzt ist, definiert werden kann (Angeli & Valanides, 2009; Angeli, Valanides & Christodoulou, 2016). Zudem bestehen im TPACK-Forschungsfeld ungenaue und sogar unterschiedliche Definition von einzelnen Wissensbereichen (Cox, 2008) und es wird kritisiert, dass man die einzelnen Wissenskomponenten nicht immer klar voneinander trennen könne (Angeli & Valanides, 2009). Rosenberg und Koehler (2015) nehmen darüber hinaus den Kontext als bedeutsamen Teilaspekt des Rahmenmodells in den Fokus und kritisieren, dass dieser im Großteil der TPACK-Forschung nicht berücksichtigt würde. Des Weiteren wird eine grundlegende Diskussion darüber geführt, ob TPACK in seiner ursprünglichen Form (M. Koehler & Mishra, 2009; Mishra & Koehler, 2006) als eigenständige Theorie verstanden werden könne (Graham, 2011). Aus der Kritik am TPACK-Ansatz entstanden daher unterschiedliche Erweiterungen und Variationen der ursprünglichen Darstellung (z.B. Angeli und Valanides (2009), Rosenberg und Koehler (2015)). Abseits von diesen theoretischen Diskussionen findet der TPACK-Ansatz seine Anwendung vor allem in der Praxis und der fachdidaktischen Forschung, auf nationaler und internationaler Ebene. Mishra und Koehler (2006) erläutern, dass der TPACK-Ansatz zur theoriebasierten Curriculumsentwicklung in der Lehrer:innenbildung herangezogen werden kann, da darauf aufbauend die zentralen und erforderlichen Kompetenzen von Lehrkräften für das technologiegestützte Unterrichten identifiziert werden können. Brandhofer, Kohl, Miglbauer und Nárosy (2016) identifizierten ebendiese auf dem TPACK-Modell basierenden Kompetenzen, um das Kompetenzmodell *digi.kompP* zur Beschreibung digitaler Kompetenzen von Lehrkräften zu entwickeln (vgl. Tabelle 3.1). Des Weiteren kann das TPACK-Modell die Unterrichtsplanung unterstützen, indem Lehrkräfte die Aspekte der einzelnen Wissenskomponenten gezielt heranziehen. Gur et al. (2015) formulierten aufbauend auf einem Literaturüberblick aus 116 Artikeln Leitfragen dazu, wie der TPACK-Ansatz in die Planung von Lehr-Lern-Situationen integriert werden kann. In einem ersten Schritt werden damit die inhaltlichen Lernziele (CK), die pädagogischen Ansprüche (PK) sowie die zugängliche Soft- oder Hardware (TK) fokussiert. Die anschließende Leitfrage regt zur Analyse der Lernenden (PCK) an. Der nächste



Schritt motiviert die Reflexion der Technologien aus fachinhaltlicher (TCK) und fachdidaktischer Perspektive (TPK). Eine abschließende Leitfrage verbindet alle bisherigen Planungsschritte und hebt das Gesamtziel hervor, die Lernenden im Lernprozess bestmöglich zu unterstützen (TPACK). Das TPACK-Rahmenmodell kann darüber hinaus eingesetzt werden, um Veränderungen in den Kompetenzen von Lehrkräften aufzudecken (Mishra & Koehler, 2006). Voraussetzung für eine Messung und Beobachtung des Lehrerprofessionswissens ist ein geeignetes Instrument. Schmidt et al. (2009) entwickelten und validierten ein TPACK-Selbsteinschätzungsinstrument für Lehramtsstudierende in den USA. Deren reliables Instrument besteht aus insgesamt 47 Items, die sich direkt an den sieben TPACK-Bereichen orientieren. Es kann für angehende Lehrkräfte mit beliebiger Fächerkombination eingesetzt werden. Das Instrument wurde in übersetzter Form im deutschsprachigen Raum erstmals für die Erhebung *Schule digital – der Länderindikator 2016* mit 1210 Lehrkräften verwendet (Bos et al., 2016; Endberg, 2019). Internationale Bemühungen, neben einem Selbsteinschätzungsinstrument auch ein objektives Testinstrument zur Messung der TPACK-Wissensbereiche zu entwickeln, führten bisher zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis (Endberg, 2019). Welche Empfehlungen aus dem TPACK-Ansatz schließlich für die gezielte Förderung und Weiterentwicklung der digitalen Kompetenzen in der Ausbildung von Lehrkräften abgeleitet werden können, wird in Kapitel 3.2 erläutert.

### 3.1.2 Dagstuhl- und Frankfurt-Dreieck

Die Gesellschaft für Informatik e.V. (2016) stellt in der Dagstuhl-Erklärung ein Modell zur „Bildung in der digitalen vernetzten Welt“ vor. Im *Dagstuhl-Dreieck* wird digitale Bildung aus den drei unterschiedlichen Perspektiven *technologisch*, *gesellschaftlich-kulturell* und *anwendungsbezogen* betrachtet (Abbildung 3.2). Um diese drei Perspektiven im Schulkontext erfolgreich in den Blick nehmen zu können, wird auch eine entsprechende Ausbildung der Lehrkräfte gefordert. Die drei Perspektiven des Modells umfassen sowohl informatische als auch medienpädagogische Kompetenzen und beeinflussen sich gegenseitig. Phänomene, Gegenstände oder Situationen, die Lernende in der digitalen vernetzten Welt wahrnehmen, werden daher wechselseitig aus allen drei Perspektiven betrachtet: Lernende analysieren Aspekte der Digitalisierung dahingehend, wie sie funktionieren (technologisch), wie sie mit der Gesellschaft oder einem Individuum wechselwirken (gesellschaftlich-kulturell) und wie man sie nutzen kann (anwendungsbezogen). Um eine nachhaltige und fundierte digitale Bildung zu fördern reicht es nicht, nur vereinzelte Facetten isoliert voneinander in den Blick zu nehmen. Vielmehr ist eine umfassende Betrachtung und Reflexion aller drei Perspektiven, die im Folgenden näher erläutert werden, nötig.

**Technologische Perspektive:** Diese Perspektive dient als technologische Basis für die Teilhabe in einer digitalen vernetzten Welt. Es wird analysiert, wie Technologien funk-

tionieren, wie sie gestaltet oder umgestaltet werden können und welchen Konzepten sie zugrundeliegen. Hier werden digitale Kompetenzen zum Problemlösen gefördert (Gesellschaft für Informatik e.V., [2016](#)).

**Gesellschaftlich-kulturelle Perspektive:** Diese Perspektive dient einerseits zur Auseinandersetzung mit der Wirkungsweise von Technologien auf die Gesellschaft, also beispielsweise die Auswirkung digitaler Medien auf die Meinungsbildung in einer Gesellschaft oder das Bewerten von Informationen aus dem Internet. Umgekehrt werden aus dieser Perspektive auch die Möglichkeiten, als Individuum Einfluss auf die Gestaltung und Entwicklung von Technologien zu nehmen, hinterfragt (ebd.).

**Anwendungsbezogene Perspektive:** Diese Perspektive dient zur zielgerichteten Auswahl von Technologien, um sie effektiv als Werkzeuge zum Erreichen eines Ziels einzusetzen. Hierfür sind Kenntnisse über die Grenzen und Möglichkeiten unterschiedlicher Werkzeuge sowie ein gekonnter Umgang mit diesen voraussetzend (ebd.).

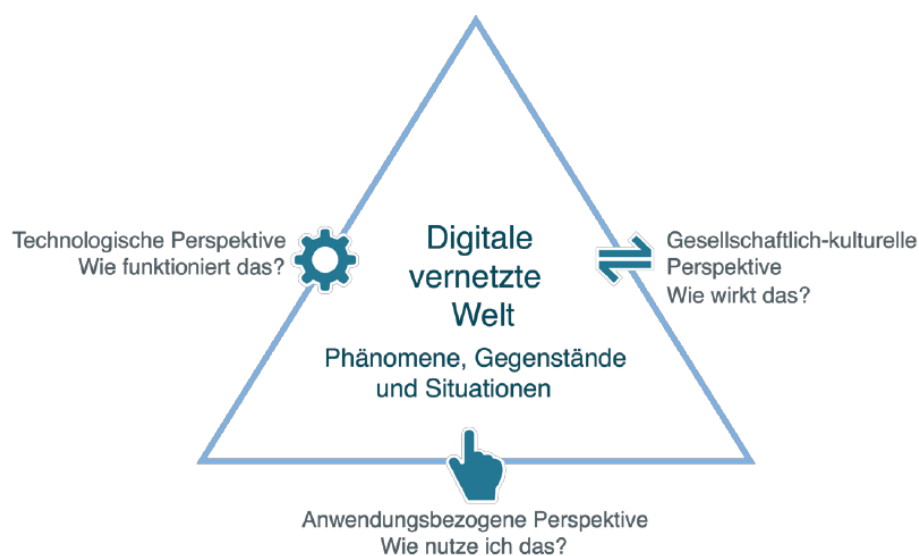


Abbildung 3.2: Veranschaulichung des Dagstuhl-Dreiecks und dessen drei Perspektiven zur Bildung in der digitalen vernetzten Welt (Darstellung übernommen aus Gesellschaft für Informatik e.V. ([2016](#), S. 3)).

Dieses Modell zeigt mit seinen drei Perspektiven auf, in welchen Bereichen die Kompetenzen der Lernenden zu ihrer digitalen Bildung beitragen. Zudem wird verdeutlicht, dass ein Perspektivwechsel sowie ein mehrdimensionaler Blick auf Phänomene der digitalen Welt nötig sind, um diese zu durchdringen. Aus dem Dagstuhl-Dreieck geht aber nicht hervor, wie die digitalen Kompetenzen im Detail aussehen und wie sie erworben werden können (Brandhofer & Wiesner, [2018](#)).

Das Dagstuhl-Dreieck, wie es in Abbildung 3.2 dargestellt ist, wurde 2019 durch das *Frankfurt-Dreieck* erweitert (Brinda et al., 2019). Das Grundgerüst wird weiterhin als Dreieck dargestellt, aber die einzelnen Perspektiven werden im Frankfurt-Modell umfassender beschrieben. Im Zentrum steht ein Betrachtungsgegenstand, der aus den drei Perspektiven *technologisch-medial*, *gesellschaftlich-kulturell* und der *Interaktionsperspektive* beschrieben wird. Jede Perspektive nimmt dabei explizit die Prozesse *Analyse*, *Reflexion* und *Gestaltung* des Betrachtungsgegenstands in den Blick. Das Modell kann unabhängig von der Disziplin als Orientierungsrahmen herangezogen werden, um Erfordernisse für digitale Bildung zu beschreiben. Der Anspruch, digitale Kompetenzen für die Teilhabe an einer digitalen vernetzten Welt im Frankfurt-Dreieck konkret zu definieren, besteht nicht. Die Autoren weisen aber darauf hin, dass der Ansatz zukünftig als Grundlage zur Kompetenzformulierung dienen kann. Zudem äußern sie sich, dass dieser Orientierungsrahmen auch in außerschulischen Bildungskontexten herangezogen werden kann, um Lernende auf die aktive Teilhabe an einer digitalen vernetzten Welt vorzubereiten (Brinda et al., 2019).

### 3.1.3 Orientierungsrahmen DiKoLAN



Abbildung 3.3: Schematische Darstellung des Orientierungsrahmens DiKoLAN zur Beschreibung der digitalen Basiskompetenzen von Lehramtsstudierenden (Darstellung übernommen aus Becker, Meßinger-Koppelt und Thyssen (2020, S. 18)).

Der Orientierungsrahmen *Digitale Kompetenzen für das Lehramt in den Naturwissenschaften* (DiKoLAN) ist ein Ansatz, mit dem die digitalen Basiskompetenzen für Lehramtsstu-

dierende der Naturwissenschaften strukturiert und operationalisiert werden (Becker et al., 2020). Die Autoren verfolgen damit das Ziel, die curriculare Verankerung von Digitalisierung im naturwissenschaftlichen Lehramtsstudium zu unterstützen. Der Ansatz unterscheidet zwischen vier allgemeinen Kompetenzen (*Dokumentation, Präsentation, Kommunikation/ Kollaboration, Recherche/ Bewertung*) und drei fachspezifischen Kompetenzen (*Messwert/ Datenerfassung, Datenverarbeitung, Simulation/Modellierung*), die für das Planen und Durchführen von digitalgestütztem Unterricht bedeutsam sind. Diese sieben Kompetenzbereiche stehen im Zentrum des Orientierungsrahmens. Sie sind einerseits in technische Basiskompetenzen eingebettet, die sich auf den allgemeinen Umgang mit digitalen Medien und Werkzeugen beziehen. Andererseits sind sie in rechtliche Rahmenbedingungen eingebettet, auf die im Ansatz aber kein detaillierter Bezug genommen wird. Der Orientierungsrahmen umfasst eine operationalisierte Ausformulierung der in Abbildung 3.3 veranschaulichten Kompetenzbereiche. Jeder der sieben Bereiche wird dafür zunächst in die Schwerpunkte *Unterricht, Methodik und Digitalität, fachwissenschaftlicher Kontext* und *spezielle Technik* unterteilt, die in dieser Reihenfolge den TPACK-Wissensbereichen TPACK, TPK, TCK und TK nach Mishra und Koehler (2006) zugeordnet werden können. Auf drei Niveaus (*nennen, beschreiben* und *anwenden/ durchführen*) werden die Kompetenzen ausdifferenziert und in tabellarischer Form ausführlich dargestellt. Die Kompetenz „beschreiben den Erkenntnisgewinn mit Simulationen und deren Vor-/ Nachteile [...] in verschiedenen konkreten Forschungsszenarien“ gehört beispielsweise zum Kompetenzbereich *Simulation/ Modellierung*. Sie bezieht sich mit einem mittleren Kompetenzniveau (*beschreiben*) auf den Schwerpunkt *fachwissenschaftlicher Kontext*, was zum TCK zählt. Im Folgenden werden die allgemeinen und fachspezifischen digitalen Kompetenzbereiche des DiKoLAN beschrieben.

**Dokumentation (DO):** Hierzu zählen Kompetenzen im Umgang mit digitalen Werkzeugen, die zur fachgemäßen, strukturierten Sicherung von Daten oder Informationen sowie zur fachgemäßen Darstellung von Arbeitsabläufen und -produkten dienen. Beispiel: „Die Notwendigkeit der Durchführung von Back-ups als elementaren Teil digitaler Datenverwaltung nennen.“ (Becker et al., 2020, S. 29)

**Präsentation (P):** Dieser Kompetenzbereich bezieht sich auf den adressatengerechten Einsatz von digitalen Medien zur Kommunikation und Erkenntnisgewinnung. Das umfasst auch Kenntnisse über Möglichkeiten und Grenzen unterschiedlicher Präsentationsmedien. Beispiel: „Ausgewählte fachwissenschaftliche Präsentationsformen und -medien beispielhaft beschreiben, z.B. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von Kollisionen [...].“ (Becker et al., 2020, S. 31)

**Kommunikation und Kollaboration (KK):** Das beschreibt den kompetenten Einsatz von digitalen Werkzeugen zur Planung und Umsetzung von asynchronen oder synchronen

Gruppenarbeiten, bei denen gemeinsame Dateien und Produkte zu erstellen sind. Beispiel: „Erstellen und Überarbeiten (synchron und asynchron) kollaborativ Text- und Datendateien.“ (Becker et al., 2020, S. 33)

**Recherche und Bewertung (RB):** Dieser Bereich beschreibt die Fähigkeit, digitale Werkzeuge zur Informationsbeschaffung heranzuziehen und diese Informationen anschließend zu strukturieren und zu bewerten. Aufbauend auf einem Suchziel werden unterschiedliche Quellen herangezogen und bewertet. „Führen eine fachspezifische Recherche gemäß der Gütekriterien durch und bewerten die gefundenen Ergebnisse.“ (Becker et al., 2020, S. 35)

**Messwert und Datenerfassung (MD):** Hierbei wird Bezug auf die mittel- oder unmittelbare Datenerhebung mit digitalen Werkzeugen genommen. Das reicht von der Eingabe analoger Messdaten, über den Einsatz von digitalen Messwerterfassungssystemen, bis hin zur Datengewinnung aus Bildern und Videos. Beispiel: „Ferngesteuerte Labore (z.B. Teleskope) zur Durchführung von Experimenten, die vor Ort nicht durchgeführt werden können, nennen.“ (Becker et al., 2020, S. 37)

**Datenverarbeitung (DV):** Das beliebige Weiterverarbeiten von Daten mit digitalen Werkzeugen zählt zu diesem Bereich (z.B. filtern, Größen berechnen, aufbereiten, analysieren und Datensätze zusammenführen). Beispiel: „Szenarien zum Einsatz der genannten Möglichkeiten einer Datenverarbeitung in spezifischen Lehr-Lern-Situationen mit Passung zu einem inhaltlich sinnvollen Kontext nennen.“ (Becker et al., 2020, S. 38)

**Simulation und Modellierung (SM):** Hierzu zählen Fertigkeiten, computergestützte Modellierungen zu entwickeln und bestehende Simulationen zur adressatengerechten Erkenntnisgewinnung und Kommunikation zu nutzen. Das umfasst auch Kenntnisse über Möglichkeiten und Grenzen solcher Werkzeuge für den Erkenntnisgewinn. Beispiel: „Planung und Durchführung kompletter Unterrichtsszenarien unter Einbindung von Simulationen bzw. Modellierungen und der Berücksichtigung geeigneter Sozial- und Organisationsformen.“ (Becker et al., 2020, S. 40)

DiKoLAN kann nicht nur zur Curriculumsentwicklung im Lehramtsstudium, sondern auch zur Entwicklung von speziellen Lehrveranstaltungen oder einzelnen Lernumgebungen herangezogen werden. Hierfür werden unterschiedliche Best Practice Ansätze vorgestellt und in das Kompetenzmodell eingeordnet. Darüber hinaus ist die Entwicklung eines Selbsteinschätzungsinstrument, das direkt an den Orientierungsrahmen anschließt, vorgesehen. Die Anschlussfähigkeit der in DiKoLAN formulierten Basiskompetenzen an die zweite Phase der Lehrer:innenbildung muss noch geprüft werden (Becker et al., 2020).

## 3.2 Professionalisierung von Lehramtsstudierenden

Mit der Entwicklung von Rahmenmodellen zur Beschreibung digitaler Kompetenzen von (angehenden) Lehrkräften ist die Basis für eine gezielte Kompetenzförderung gelegt. Die in Kapitel 3.1 vorgestellten Ansätze können zur Konzeption entsprechender Lehrveranstaltungen eingesetzt werden, indem darauf aufbauend die zentralen Kompetenzen identifiziert und Förderungsmaßnahmen geplant werden. So entstanden bereits unterschiedliche Fortbildungskonzepte für (angehende) Lehrkräfte mit dem Ziel, deren technologisches Professionswissen zu erweitern. Aus den Ansätzen zum Dagstuhl-Dreieck (Kapitel 3.1.2) und zum TPACK (Kapitel 3.1.1) wird klar, dass dafür eine bloße Akkumulation von Wissen darüber, wie unterschiedliche Technologien genutzt werden können, nicht ausreicht. Vielmehr ist im Sinne des TPACK-Modells die Einbettung von Technologien (TK) in einen pädagogischen Kontext (PK) und die konkrete Verbindung zu einem Fachinhalt (CK) anzustreben (Angeli et al., 2015; M. J. Koehler & Mishra, 2005). Diese Integration und Verbindung wird im *Learning by Design* Ansatz umgesetzt (M. J. Koehler & Mishra, 2005). Lehrkräfte werden hier vor authentische, praxisnahe Probleme gestellt, die sie durch den Einsatz von Technologien lösen sollen. Für das Problemlösen wechseln die Lehrkräfte aus einer passiven Rolle der *Nutzung* in eine aktive Rolle als *Gestalter:in* von Technologien, indem sie bei jeder Entscheidung fachliche, pädagogische und technologische Aspekte einbeziehen. In Lehrveranstaltungen zum *Learning by Design* Ansatz können unterschiedliche authentische Probleme thematisiert werden, wie beispielsweise einen Online-Kurs für Studierende zu entwickeln (M. J. Koehler, Mishra, Hershey & Peruski, 2004), Videos über Technologien zu erstellen (Wong, Mishra, Koehler & Siebenthal, 2007) oder eine Webseite zu überarbeiten (M. J. Koehler & Mishra, 2005). Auf internationaler Ebene wird in Projekten zur digitalen Kompetenzförderung von (angehenden) Lehrkräften häufig Bezug zu TPACK genommen – durchweg in verschiedenen Fachdisziplinen und Bildungsebenen. Der Ansatz wird einerseits explizit zur Lehrkonzeptentwicklung herangezogen (z.B. Angeli et al. (2015), Hong und Stonier (2015), Papanikolaou, Gouli und Makri (2014)), und dient andererseits als Grundlage zur Erhebung der geförderten digitalen Kompetenzen (vgl. Rodriguez Moreno, Agreda Montoro und Ortiz Colón (2019)).

In Deutschland wird die Professionalisierung von Lehramtsstudierenden im Umgang mit (fachspezifischen) digitalen Medien und Werkzeugen seit 2008 durch die Kultusministerkonferenz vorgegeben (KMK, 2019). Die erste Phase der Lehrer:innenbildung scheint eine Chance zum Durchbrechen eines eingangs erwähnten Teufelskreises aus fehlender Medienbildung zu bieten: Kammerl und Ostermann (2010) stellen die These auf, dass Studienanfänger:innen während der Schulzeit eine geringe Medienbildung erhielten und somit ein geringes Vorwissen zum Studienbeginn mitbringen. Während des Lehramtsstudiums erfahren die angehenden Lehrkräfte ebenfalls keine umfangreiche Medienbildung und werden aufgrund

von einer geringen eigenen Medienkompetenz ihre Schüler:innen in der Schulpraxis wiederum nicht qualifiziert fördern können – hier schließt sich der Kreislauf. Kammerl (2015) konnte die These des Teufelskreises fehlender Medienbildung bislang nicht widerlegen. Studierende des Lehramts stellten sich unter Studienanfänger:innen in der Tat als besonders wenig digital-affin heraus (Herzig & Grafe, 2007; Schmid et al., 2017) und in der universitären Lehrer:innenbildung ist eine systematische und standardisierte Kompetenzförderung dahingehend noch ausbaufähig (Schiefer-Rohs, 2012).

Es ist also nicht überraschend, dass die systematische und curricular verankerte Förderung von digitalen Kompetenzen in der universitären Lehrer:innenbildung deutschlandweit an Aufmerksamkeit gewinnt und innovative Konzepte für Lehrveranstaltungen zunehmend entwickelt sowie evaluiert werden. Für die fachspezifische Zielgruppe der Lehramtsstudierende aus dem naturwissenschaftlichen Bereich werden so beispielsweise im Rahmen des Kollegs *Didaktik:digital* der Joachim Herz-Stiftung (Meßinger-Koppelt, 2015) seit 2015 deutschlandweit universitäre Lehrveranstaltung implementiert und evaluiert. Mit bestehenden Best Practice Ansätzen und der damit verknüpften Begleitforschung lassen sich aus der Literatur Methoden und Maßnahmen ableiten, die zum Gelingen einer technologiebezogenen Lehrer:innenprofessionalisierung beitragen können. Goertz und Baeßler (2018) erstellten zudem einen Kriterienkatalog zur Identifizierung von besonders innovativen Studienangeboten im Lehramt, die auf Digitalisierung und Medienbildung eingehen. Darauf aufbauend werden im Folgenden Empfehlungen zur lernförderlichen Gestaltung einer universitären Lehrveranstaltung, die zur technologiebezogenen Professionalisierung von Lehramtsstudierenden beitragen soll, dargestellt und abschließend in Tabelle 3.2 zusammengefasst. Diese Empfehlungen dienen als Anregung für methodische und praktische Überlegungen bei der Lehrveranstaltungskonzeption und sollten an individuelle Lernziele und Rahmenbedingungen angepasst werden.

Zur Professionalisierung der Lehramtsstudierenden sollte in einer Lehrveranstaltung Bezug zu wissenschaftlich gesicherten Erkenntnissen über das Lernen mit digitalen Medien hergestellt werden, um die Grundlage für eine evidenzorientierte Planung und Durchführung von digitalgestütztem Unterricht zu schaffen (Sailer, Murböck & Fischer, 2017). Lehramtsstudierende sollten das Lehren und Lernen mit digitalen Medien aber nicht nur in der Theorie kennenlernen, sondern vielmehr auch eigene praktische Erfahrungen sammeln und diese theoriegestützt reflektieren. Hierfür ist als erster Schritt die eigenständige, theoretische und insbesondere praktische Auseinandersetzung mit digitalen Medien und Werkzeugen nötig (Krause & Eilks, 2015). Die Lehrveranstaltung sollte demnach Phasen bieten, in denen nicht nur die Lehrenden, sondern vielmehr die Studierenden Technologien selbstreguliert nutzen (Goertz & Baeßler, 2018). Dabei ist, wie bereits erwähnt, eine direkte Verknüpfung der Technologienutzung mit einem konkreten Fachinhalt sinnvoll (Angeli et al., 2015; M. J.

Koehler & Mishra, [2005]; Krause & Eilks, [2015]). Das Ziel einer solchen fachspezifischen Veranstaltung kann dann der Erwerb von fachinhalichen Kompetenzen mit digitalen Medien sein. Hierfür sollte bei der Lehrveranstaltungskonzeption eine interne Vernetzung zwischen Fachwissenschaft, Fachdidaktik und Bildungswissenschaft beherzigt werden (Goertz & Baeßler, [2018]). Ein tiefgehender Ausgleich von Theorie und Praxis sollte in einem zweiten Schritt durch eine theoriegestützte Unterrichtsplanung und die anschließende Durchführung und Reflexion der Lehr-Lern-Einheit erfolgen. Der Einsatz von geeigneten digitalen Medien und Werkzeugen ist für diese Lehr-Lern-Einheiten erwartungsgemäß verpflichtend. Durch eine externe Vernetzung mit regionalen Schulen wird zudem eine authentische, praxisnahe Lehr-Lern-Gelegenheit für die Lehramtsstudierenden geschaffen (Angeli et al., [2015]; Goertz & Baeßler, [2018]). Ein kurzfristiger Einsatz von digitalen Werkzeugen zum gemeinsamen Brainstorming oder für Umfragen aktiviert die Studierenden während der Lehrveranstaltung kognitiv und motiviert zur individuellen Auseinandersetzung mit den Fachinhalten (Kempen & Wassong, [2017]). Darüber hinaus sollten kollaborative Arbeitsformen eingeplant werden, in denen digitale Werkzeuge die Zusammenarbeit und den Austausch unter den Lehramtsstudierenden unterstützen (Angeli et al., [2015]; Goertz & Baeßler, [2018]). Hierzu zählt beispielsweise auch, dass die Studierenden digitale Werkzeuge zum Dokumentieren und Teilen von Lehr-Lern-Materialien nutzen (Sailer et al., [2017]). Die Lehrveranstaltung und der damit verbundene Einsatz von digitalen Medien sollte curricular verankert sein, um eine systematische Kompetenzförderung zu gewährleisten (Goertz & Baeßler, [2018]).

### 3.3 Einstellung einer Lehrkraft

Damit (angehende) Lehrkräfte digitale Medien erfolgreich in ihren Unterricht integrieren, sind nicht nur das Professionswissen und die erworbenen digitalen Kompetenzen entscheidend. Ob Lehrkräfte digitale Medien tatsächlich im Unterricht einsetzen, wird u. a. von deren Einstellung bestimmt – einem von drei kognitiven Einflussfaktoren, die in der *Theory of Planned Behavior* (TPB) nach Ajzen ([1991]) beschrieben werden (Abbildung 3.4). Das tatsächliche *Verhalten* eines Individuums wird gemäß der TPB direkt von der *Intention*, dieses Verhalten auszuüben, bestimmt. Je stärker die Intention, desto wahrscheinlicher ist das gezeigte Verhalten. Dabei wird die Intention als kognitives Konstrukt verstanden, das motivationale Faktoren hinsichtlich eines Verhaltens beschreibt und somit Anzeichen für die Willensstärke eines Individuums liefert (Ajzen, [1991]). Die Intention einer Person wird wiederum von den drei unabhängigen kognitiven Faktoren der (a) *Einstellung gegenüber dem Verhalten*, der (b) *subjektiven Norm* sowie der (c) *wahrgenommenen Verhaltenskontrolle* beeinflusst. Zunächst ist es selbsterklärend, dass ein beabsichtigtes Verhalten nur dann ausgeführt werden kann, wenn die Person über die nötigen Fähigkeiten und Voraussetzungen verfügt (*Verhaltenskontrolle*). Ajzen ([1991]) geht mit seiner Theorie aber noch einen Schritt



Tabelle 3.2: Grundlegende Empfehlungen zur Gestaltung einer universitären Lehrveranstaltung für die technologiebezogene Professionalisierung von Lehramtsstudierenden.

Empfehlungen*	Literatur
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evidenzorientierung (theoretische Grundlage)</li> </ul>	Sailer, Murböck und Fischer (2017)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• selbstständige Auseinandersetzung der Studierenden mit Technologien (Handlungsorientierung)</li> </ul>	Goertz und Baeßler (2018), M. J. Koehler und Mishra (2005), Krause und Eilks (2015)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• enge Verknüpfung von Technologien und Fachinhalt</li> </ul>	Angeli et al. (2015), M. J. Koehler und Mishra (2005), Krause und Eilks (2015)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Praxisbezug zum Lehrberuf (digitalgestützten Unterricht planen, durchführen, reflektieren)</li> </ul>	Angeli et al. (2015), Goertz und Baeßler (2018)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nutzung von digitalen Medien durch Dozierende und Studierende</li> </ul>	Goertz und Baeßler (2018), Kempen und Wassong (2017)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• interne und externe Vernetzung</li> </ul>	Goertz und Baeßler (2018)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kollaboration mit Hilfe von digitalen Medien</li> </ul>	Angeli et al. (2015), Goertz und Baeßler (2018), Sailer, Murböck und Fischer (2017)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• curriculare Verankerung</li> </ul>	Goertz und Baeßler (2018)

\*Es wird kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben.

weiter, indem er eine psychologische Perspektive einbringt und die *wahrgenommene* Verhaltenskontrolle betrachtet. Hierbei steht die Frage im Zentrum, welche Schwierigkeiten ein Individuum in Bezug auf eine Handlung wahrnimmt und ob sich die Person als fähig wahrnimmt, das Verhalten auszuüben. Eine Person, die sich sicher darin ist, eine Handlung tatsächlich ausüben zu können, wird also mit einer großen Wahrscheinlichkeit beharrlich bleiben und die Handlung erlernen, um sie schließlich auszuführen. Die *subjektive Norm* bezieht sich auf den wahrgenommenen Druck, der durch die Erwartungen des eigenen sozialen Umfelds entsteht, und wirkt sich ebenfalls auf die Intention aus. Dieser Druck wird als umso höher wahrgenommen, je stärker von einer Person erwartet wird, ein bestimmtes Verhalten zu zeigen. Zuletzt ist die *Einstellung* des Individuums gegenüber einem bestimmten Verhalten ein dritter Faktor, der direkt auf die Intention wirkt. Dabei wird die Frage aufgegriffen, inwiefern das Verhalten von der Person als vorteilhaft und sinnvoll wahrgenommen wird. Eine positive Einstellung gegenüber einem Verhalten erhöht die Wahrscheinlichkeit, das Verhalten zu zeigen (Ajzen, 1991). Bezogen auf digitale Medien kann aus der TPB insgesamt gefolgert werden: (a) Je vorteilhafter eine Lehrkraft den Einsatz digitaler Medien im Unterricht sieht, (b) je mehr sie denkt, dass der Medieneinsatz von ihr erwartet wird, und (c) je stärker sie ihre eigenen Fähigkeiten diesbezüglich einschätzt, desto wahrscheinlicher ist es, dass sie digitale Medien in ihrem Unterricht tatsächlich einsetzt (vgl. Vogelsang et al. 2019). Die digitalen

Kompetenzen der Lehrkraft, wie sie durch das TPACK-Modell in Kapitel 3.1.1 beschrieben werden, sind folglich für die wahrgenommene Verhaltenskontrolle relevant und ermöglichen eine Verknüpfung der beiden Ansätze TPACK und TPB.

Die drei kognitiven Faktoren werden schließlich von je einer salienten Überzeugung (*verhaltensbezogen, normativ* und *Kontrolle*) bestimmt, die in der TPB als Basis zur Vorhersage von Verhalten fungieren. Indem man ein Objekt mit bestimmten Attributen wie dessen Eigenschaften oder damit verbundenen Ereignissen assoziiert, entwickelt man Überzeugungen zu diesem Objekt (Ajzen, 1991). Die Überzeugungen beziehen sich auf ein bestimmtes Ergebnis, das aus der Handlung resultiert, wie damit verbundene Kosten oder andere Konsequenzen. Dieses Ergebnis wird entweder mit positiven oder negativen Attributen versehen und führt automatisch dazu, dass die Person eine Einstellung gegenüber dem Verhalten entwickelt, die entsprechend positiv oder negativ ist. Je wünschenswerter die Konsequenzen eines Verhaltens erscheinen, desto positiver sind die Überzeugungen zu dieser Handlung, was schließlich zu einer positiven Einstellung gegenüber dem Verhalten führt (Ajzen, 1991). An dieser Stelle sei der Vollständigkeit halber kurz auf das *Technology Acceptance Model* (TAM) (Davis, 1989) verwiesen. Dieses Modell bzw. seine Erweiterung (Venkatesh & Bala, 2008) stellt neben der TPB einen weiteren Ansatz dar, um den Einfluss von kognitiven Faktoren auf die Intention und Ausführung einer Handlung zu erklären. Im Gegensatz zur allgemeinen TPB betrachtet das TAM explizit das Verhalten von tätigen Lehrkräften im Zusammenhang mit Technologien, wobei deren Medienakzeptanz im Fokus steht. Die zentralen kognitiven Prozesse im TAM sind die wahrgenommene Nützlichkeit sowie der erwartete Aufwand, der mit der Handlung einhergeht. Die Einstellung spielt hier aber eine untergeordnete Rolle und wird in der Erweiterung des TAMs nicht als unabhängiges Konstrukt aufgeführt (Venkatesh & Bala, 2008).

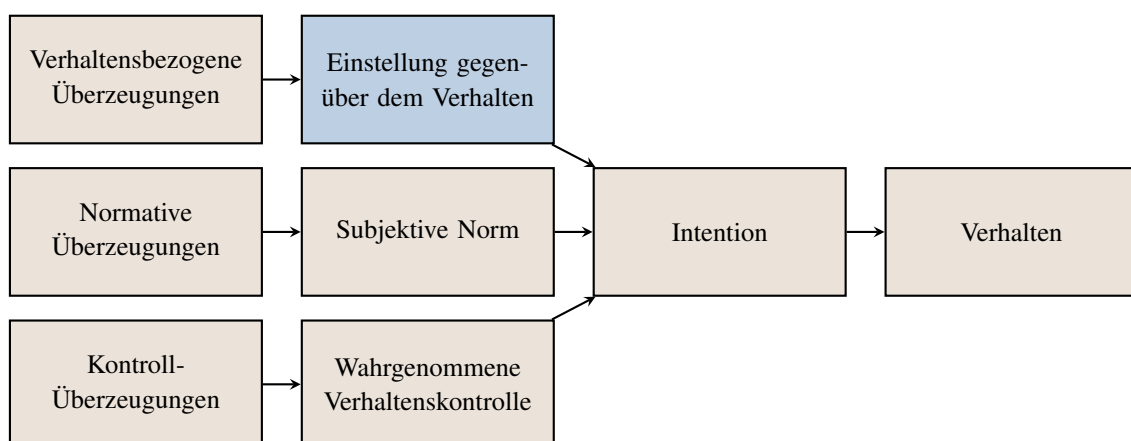


Abbildung 3.4: Veranschaulichung der Theory of Planned Behavior, in der unter anderem die Einstellung gegenüber einem Verhalten über die Intention schließlich das tatsächliche Verhalten beeinflusst (eigen Darstellung nach Ajzen (1991, S. 182)).

Im Kontext der Bildungsforschung allgemein und insbesondere im Bereich digitaler Medien wird die TPB häufig zum Erklären oder Vorhersagen von Verhalten bei Lehrenden herangezogen. Hierfür wird die Einstellung der (angehenden) Lehrkräfte gegenüber digitalen Medien als Prädiktor eines tatsächlichen Gebrauchs von digitalen Medien im Unterricht untersucht (Kreijns, Van Acker, Vermeulen & Van Buuren, 2013; J. Lee, Cerreto & Lee, 2010; Valtonen et al., 2015). Das erfolgt üblicherweise in quantitativer Form durch Fragebögen und vereinzelt bestehen auch qualitative Forschungsmethoden (Sadaf, Newby & Ertmer, 2012). Mit einem quantitativen Ansatz konnten Kreijns et al. (2013) bei über 1200 Lehrkräften einen positiven Einfluss der Einstellung auf die Intention, digitales Lernmaterial einzusetzen, feststellen. Vogelsang et al., 2019 fanden in ihrer quantitativen Studie mit über 600 Lehramtsstudierenden der Naturwissenschaften einen positiven Einfluss der Einstellung zum Lernen mit digitalen Medien auf die motivationale Orientierung der Studierenden. Dieses Konstrukt wurde im Sinne der TPB anstelle der Intention erhoben, da bei Lehramtsstudierenden aufgrund fehlender Praxiserfahrungen davon auszugehen sei, dass entsprechende Intentionen zur Handlung bisher kaum gebildet wurden (ebd.). Mit dem TPB-Ansatz wurde darüber hinaus die Wirkung von Lehrveranstaltungen zur Professionalisierung von Lehramtsstudierenden auf die Einstellung der Teilnehmenden untersucht (Valtonen et al., 2015). Hier wurde ein Zusammenhang zwischen ihrer Einstellung gegenüber der Integration von digitalen Medien in den Unterricht und der Intention zu dieser Handlung festgestellt – wie man es gemäß der TPB erwartet. Ein Prä-Post-Vergleich zeigte jedoch keinen Einfluss der Intervention auf die insgesamt positive Einstellung der Teilnehmenden.

## Teil II

# Entwicklungsarbeit und Wirksamkeitsstudie

## 4 Design und Entwicklung einer Lehrveranstaltung in der Astrophysik

Motiviert vom Vorhaben, die digitalen Kompetenzen der Physik-Lehramtsstudierenden fachspezifisch zu fördern, dient dieses Kapitel dazu, die Entwicklung einer entsprechenden Lehrveranstaltung zu beschreiben. Mit einem Forschungsansatz gemäß Design-Based Research (Kapitel 4.1) wird die Lehrveranstaltung in zwei Zyklen (re-)designed und durch eine Wirksamkeitsstudie begleitet. Die Entwicklungsarbeit basiert direkt auf der Theorie zum Lernen und Lehren mit digitalen Medien (Teil II) und beachtet insbesondere die Empfehlungen zur Gestaltung einer Lehrveranstaltung (Tabelle 3.2). Der Einsatz von digitalen Anwendungen wird entsprechend didaktisch begründet und auch hier führt die Beachtung der literaturbasierten Gestaltungsprinzipien (Kapitel 2.3) zu einer Qualitätssicherung. Ausgehend vom Status Quo an der Universität Göttingen (Kapitel 4.2) wird das neue Lehrkonzept vorgestellt (Kapitel 4.3) und anschließend auf die vorlesungsbegleitende Übung zur Einführung in die Astrophysik übertragen und strukturiert, indem astrophysikalische Fachinhalte mit passenden digitalen Anwendungen verknüpft werden (Kapitel 4.4). Am Beispiel von zwei Fachinhalten wird verdeutlicht, wie deren konkrete Umsetzung in der Übung geplant ist. Das erste Thema *Exoplaneten* (Kapitel 4.5) spielt als ausgewählter Fachinhalt für die Planung und Entwicklung von Physikunterricht eine besondere Rolle. Aus diesem Grund wird dahingehend nicht nur auf die Umsetzung in der Lehrveranstaltung eingegangen, sondern auch an curriculare Vorgaben für den Oberstufenunterricht im Fach Physik angeknüpft. Das *Hertzsprung-Russell-Diagramm* ist das zweite astrophysikalische Thema, dessen Umsetzung exemplarisch vorgestellt wird (Kapitel 4.6). Aus der Entwicklung dieser Übungssitzung resultierte eine empirische Studie zum Umgang von Lernenden mit dem Diagramm, die in Teil III vorgestellt wird. Die konkrete Umsetzung eines weiteren Fachinhalts (*Schwarzkörper und Sternspektren*) kann zudem in Langendorf et al. (2021) nachgelesen werden. Auf weitere Übungssitzungen wird im Rahmen dieser Arbeit aus Platzgründen nicht eingegangen. Verlaufspläne und entwickeltes Material können auf Nachfrage zur Verfügung gestellt werden.

## 4.1 Design-Based Research

Die fachdidaktische Designforschung befasst sich mit besonders praxisnahen Fragestellungen und der zeitgleichen Einhaltung von methodischen und empirischen Standards. Somit bewegt sich dieser Forschungsansatz zwischen Praxis und theoriegeleiteter Forschung, um sowohl der Forderung nach schulpraktischer Relevanz (durch anwendungsbezogene Entwicklungsarbeiten) als auch nach Empirie und Theoriebildung (durch Grundlagenforschung) nachzukommen (Wilhelm & Hopf, 2014). Ein solcher Ansatz ist *Design-Based Research* (DBR), dessen Ursprung auf Collins (1992) und Brown (1992) zurück geht. Hierbei werden theoriegeleitete, innovative Lernumgebungen entwickelt und mit fachdidaktischer Forschung verbunden, um herauszufinden, unter welchen Bedingungen diese lernwirksam sind (Design-Based Research Collective, 2003). Forscher:innen und Praktiker:innen arbeiten zusammen an der Entwicklung einer Intervention, deren Einsatz direkt im Feld stattfindet und somit eine nutzenorientierte Grundlagenforschung ermöglicht (Wilhelm & Hopf, 2014). Damit geht das für DBR charakteristische Ziel einher, nachhaltige und innovative Lehr-Lern-Formen zu entwickeln sowie das komplexe und vieleitige Wesen von Lernprozessen besser zu verstehen (Reinmann, 2005). Unter Innovationen versteht das Design-Based Research Collective (2003) Lernumgebungen, die aus lerntheoretischer Perspektive eine effektive Wirkung haben und in der Praxis bislang nicht umgesetzt oder hinsichtlich ihrer Wirkung nicht ausreichend verstanden wurden. DBR liefert also einerseits einen theoretischen Output in Form von „kontextualisierte[n] Theorien des Lernens und Lehrens einschließlich Wissen zum Designprozess“ und andererseits einen praktischen Output durch konkrete, innovative Anregungen zur Verbesserung von Lehr-Lern-Situationen (Reinmann, 2005, S. 61). Der Kontext spielt hierbei eine besondere Rolle, denn diese Forschung erfolgt nicht durch gezielt manipulierte und streng kontrollierte Laborstudien sondern durch Untersuchungen in realen, kontextabhängigen Situationen und füllt so eine Lücke in der Bildungsforschung (Collins, Joseph & Bielaczyc, 2004). Ausgangspunkt dieser Methode ist die Motivation, ein konkretes, praktisches Problem aus dem Bildungskontext theoretisch fundiert zu lösen – z.B. durch eine innovative Unterrichtsmethode oder einen neuen Zugang zum Lerngegenstand (Wilhelm & Hopf, 2014). Im Bereich von Lernumgebungen, die durch neue Medien unterstützt werden, stellt der DBR-Ansatz daher eine wichtige und vielversprechende Methode zur Entwicklung von entsprechenden Innovationen dar (F. Wang & Hannafin, 2005).

Abhängig vom konkreten Forschungsgebiet der Autor:innen werden die Merkmale von Design-Based Research in der Literatur mit unterschiedlichen Foki dargestellt. Gemein ist ihnen der zyklische Charakter, der sich aus Design, Durchführung, Analyse und Re-Design zusammensetzt und einen langfristigen Forschungsprozess bildet (vgl. Collins (1992), Design-Based Research Collective (2003), Reinmann (2005), F. Wang und Hannafin (2005), Wilhelm und Hopf (2014)). Bevor aber der erste Design-Zyklus beginnt, werden das Praxispro-

blem und die Rahmenbedingungen analysiert sowie relevante Literatur umfassend recherchiert, um die theoretische Grundlage für die DBR-Methode zu schaffen und Theorie mit Praxis zu verbinden (Fraefel, 2014; Rott & Marohn, 2015; F. Wang & Hannafin, 2005). Entscheidungen während der Entwicklungsphase sowie der Durchführung werden dokumentiert – gleiches gilt für die Forschungsergebnisse. Diese ergeben sich im Zusammenhang mit DBR häufig durch einen Ansatz, der sich aus qualitativen und quantitativen Forschungsmethoden zusammensetzt (F. Wang & Hannafin, 2005). Die Regeln und Ansprüche von fachdidaktischer Forschung werden auch in DBR beachtet, jedoch mit dem Unterschied, dass hier keine isolierte Untersuchung einer einzelnen Variable erfolgt (Wilhelm & Hopf, 2014). Die Forschungsergebnisse können dann zeitnah in den nächsten Zyklus aufgenommen werden und im Re-Design noch vor der nächsten Implementierung Berücksichtigung finden. Zudem werden die entwickelte Lernumgebung sowie die Theoriegrundlagen fortlaufend überprüft und angepasst, um das Design über mehrere Zyklen hinweg zu optimieren (Fraefel, 2014). Über den gesamten Forschungszyklus hinweg erfolgt ein Rückbezug auf vorherige Phasen (Wilhelm & Hopf, 2014). Am Ende von DBR kann auf eine Entwicklungsarbeit und empirische Ergebnisse zurückgegriffen werden, aus denen idealerweise Implikationen für eine Theorie zur Lösung eines konkreten Praxisproblems abgeleitet werden (Wilhelm & Hopf, 2014). Die folgende Abbildung 4.1 fasst den Ablauf von Design-Based Research für diese Arbeit in einem Modell zusammen. In Tabelle 4.1 werden die charakteristischen Teilaspekte von Design-Based Research nach Wilhelm und Hopf (2014) aufgegriffen und auf diese Arbeit übertragen, indem ein konkreter Bezug zum durchgeführten Ablauf hergestellt wird und zur besseren Orientierung eine Kapitelzuordnung erfolgt.

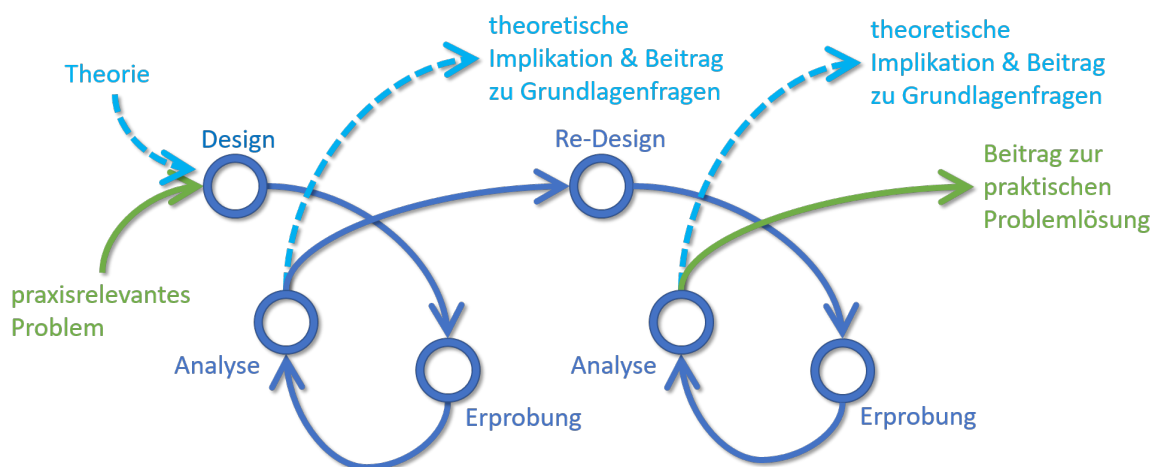


Abbildung 4.1: Ablaufmodell für den DBR-Ansatz dieser Arbeit (eigene Darstellung nach Fraefel (2014, S. 9) mit Erweiterungen nach Wilhelm und Hopf (2014)).

Designforschung unterscheidet sich hinsichtlich ihrer Bewertungskriterien wesentlich

von der Experimentalforschung. Hier sind zwar auch die klassischen Gütekriterien (Objektivität, Reliabilität und Validität) für den empirischen Forschungsanteil beachtenswert, insgesamt spielen aber vor allem Neuheit, Nützlichkeit und Innovation eine bedeutsame Rolle. Damit geht als weitere Abgrenzung zur klassischen Forschung einher, dass Stichproben und statistische Methoden hier kein alleiniges Maß für die Belastbarkeit der Ergebnisse sind. Stattdessen sind die interne Konsistenz ihrer Theorien sowie deren Verbindung mit kontextabhängigen Praxiserfahrungen ein Maß für die Erklärungskraft der Designforschung (Edelson, 2002; Reinmann, 2005). DBR ermöglicht es, die Wirkung einer Intervention zu untersuchen und diese anschließend zu optimieren – gleiches gilt für die Evaluationsforschung. Letztere befasst sich aber nicht mit der Beachtung von Theorien und deren Weiterentwicklung, worin ein Unterschied zur Designforschung liegt (Reinmann, 2005). Edelson (2002) formulierte drei wesentliche Gründe, die für die Designforschung im Bildungskontext sprechen und die zentralen Qualitäten zusammenfassen: i) DBR bietet eine produktive Möglichkeit zur Weiterentwicklung von Theorien, weil z.B. deren Unstimmigkeiten direkt in der Praxis erkannt und konsistent überarbeitet werden können. ii) Die Ergebnisse von Designforschung sind besonders nützlich, weil deren Anknüpfungspunkt und Praxisbezug direkt ersichtlich ist. iii) Mit DBR haben Forscher:innen die Möglichkeit, das Lehren und Lernen durch besonders innovative Entwicklungsarbeiten zu verbessern. Auch im Forschungsbereich der Physikdidaktik findet der DBR-Ansatz daher seine Berechtigung, wenn es um die theoriegeleitete Weiterentwicklung und Analyse innovativer Lehr-Lern-Umgebungen geht. Der Ansatz wird beispielsweise im Projekt *Epo-EKo* genutzt, um ein neuartiges Elektrizitätslehre-Konzept für den Physikunterricht weiterzuentwickeln und so bei Schüler:innen das Konzeptverständnis sowie Interesse an Physik zu erhöhen (Dopatka et al., 2018). Das damit verknüpfte, innovative Lehrkonzept zu elektrischen Schaltkreisen entstand ebenfalls im DBR-Ansatz (Burde & Wilhelm, 2020). Mit Bezug zur Physik bzw. Naturwissenschaft bauen darüber hinaus auch Forschungsarbeiten im Bereich der Curriculumsentwicklung (z.B. Haagen-Schützenhöfer und Hopf (2020)) und der Entwicklung von besonderen universitären Lehrveranstaltungen (z.B. Köster, Mehrrens, Brämer und Steger (2020), Tampe und Spatz (2019)) auf dem DBR-Konzept auf.

## 4.2 Status Quo und Rahmenbedingungen an der Univ. Göttingen

In Kapitel I erfolgte bereits eine umfassende Beschreibung der Ausgangslage und des damit verbundenen Ziels dieser Forschungsarbeit, die technologiebezogene Professionalisierung von Lehramtsstudierenden in Physik fachspezifisch zu fördern. Dieses Vorhaben wird durch das praxisrelevante Problem motiviert, dass die Erwartungen an (angehende) Lehrkräfte hinsichtlich ihrer digitalen Kompetenzen bisher nicht oder nicht ausreichend mit der Realität übereinstimmen. Die Entwicklung und empirische Evaluation einer innovativen Lehrveran-

Tabelle 4.1: Zusammenfassender Überblick über den DBR-Ansatz (Wilhelm &amp; Hopf, 2014, S. 41) und wie er in dieser Arbeit umgesetzt wurde, inklusive einer Kapitelzuordnung.

DBR-Merkmal	Umsetzung	Zuordnung
Ausgangspunkt: praxisrelevantes Problem	Technologiebezogene Professionalisierung von Lehramtsstudierenden in Physik	Kap. 1
Basis: Theorie	Lernen und Lehren mit digitalen Medien	Teil II (Kap. 2, 3)
FORSCHUNGSZYKLUS 1:		
Entwicklung	aufbauend auf Problemanalyse und Literaturrecherche	Teil II (Kap. 4)
erste Erprobung	im Wintersemester 2020/2021 mit 20 Studierenden (online)	Teil II (Kap. 5)
erste empirische Evaluation	Multi-Method Ansatz zur Wirksamkeit	Teil II (Kap. 6)
FORSCHUNGSZYKLUS 2:		
Überarbeitung	Rückbezug zu den vorangegangenen Phasen	Teil II (Kap. 7.1)
zweite Erprobung	im Wintersemester 2021/2022 mit 12 Studierenden (hybrid, später online)	Teil II (Kap. 7.2)
zweite empirische Evaluation	quantitative Erhebung zur Wirksamkeit	Teil II (Kap. 7.3)
Ergebnisse: Beitrag zu Theorie und Praxis	Diskussion der Entwicklungsarbeit und Forschungsergebnisse	Teil IV (Kap. 11, 12)

staltung im Fach Physik an der Universität Göttingen soll zur theoriegeleiteten Lösung dieses Problems beitragen. Um das Design und die Umsetzung dieser Entwicklungsarbeit verstehen zu können, werden zunächst der Status Quo und die Rahmenbedingungen am Standort Göttingen beschrieben. Damit geht zudem eine ausführliche Darstellung des Moduls zur Einführung in die Astrophysik einher (Kapitel 4.2.1), das zur Umsetzung des entwickelten Lehrkonzepts dienen soll. In diesem Zuge wird auch das besondere Potenzial astrophysikalischer Lernumgebungen verdeutlicht.

Zunächst kann zwischen dem Erwerb von fachunspezifischen und physikspezifischen digitalen Kompetenzen, auf denen der Fokus der Arbeit liegt, unterschieden werden. Lehramtsstudierende können in Göttingen bereits fachunspezifische digitale Kompetenzen erwerben oder erweitern, indem sie Wahl- oder Wahlpflichtmodule aus dem Lehrveranstaltungsangebot des Studiendekanats Lehrer:innenbildung (Zertifikatslinie #DigitaleBildung<sup>3</sup>) belegen. Entsprechende Seminarangebote sind demnach kein obligatorischer Bestandteil der

<sup>3</sup>Studiendekanat Lehrer\*innenbildung, Georg-August-Universität Göttingen: *Lehramt Plus, #DigitaleBildung*. <https://www.uni-goettingen.de/de/560405.html>, aktueller Stand: Mai 2022.



Lehrer:innenbildung, wodurch nur ein Teil der angehenden Lehrkräfte dieses Angebot zur eigenen Professionalisierung tatsächlich wahrnimmt. Ein Kernelement von Best Practice Veranstaltungen zur digitalen Kompetenzförderung ist die verpflichtende Integration entsprechender Fördermaßnahmen (Goertz & Baeßler, 2018). Ein Blick in die Modulbeschreibungen von Pflichtveranstaltungen im Lehramtsstudium Göttingen zeigt: Eine systematische, curricular verankerte Förderung physikspezifischer digitaler Kompetenzen besteht bislang nicht. Bei nur drei der zehn Pflichtveranstaltungen im 2-Fächer-Bachelor mit Profil Lehramt (kurz: 2FB) im Fach Physik werden in der Modulbeschreibung explizit technologiebezogene Lernziele oder Kompetenzen angegeben (Georg-August-Universität Göttingen, 2021b). In den zwei zusammenhängenden Lehrveranstaltungen *Physikalisches Grundpraktikum für 2FB I und II* zählen das „Beherrschen von physikalisch relevanten Anwendungen der Informationstechnologie“ sowie die „grundlegende/ sichere Computernutzung zum Bearbeiten, Aufbereiten und Darstellen physikalischer Probleme auch mit Hilfe grundlegender Programmierkenntnisse“ zu den Zielkompetenzen (ebd., S.6263-6265). Als dritte dieser Pflichtveranstaltungen zählen „Medien und Simulationen“ zu den Prüfungsanforderungen des Moduls *Didaktik der Physik I: Einführung* (Georg-August-Universität Göttingen, 2021b, S. 6266). Des Weiteren gehen im Master of Education (M.Ed.) im Fach Physik zwei der vier Pflichtmodule in ihrer Beschreibung explizit auf digitale Kompetenzen ein (Georg-August-Universität Göttingen, 2021a). In *Didaktik der Physik II: Unterrichtsbezogenes Experimentieren und Weiterentwicklung von Praxis an der Schule* werden Kompetenzen gefördert, bei denen die Studierenden „den digitalen Medieneinsatz im Physikunterricht bewerten“ und „den Computer zur Planung, Durchführung und Auswertung schulrelevanter Versuche einsetzen“ (ebd.,S.1267). Im Modul *Aktuelle Themen der Physik* zählt der „Umgang mit Präsentationsmedien“ zu den Zielkompetenzen (ebd.,S.1273). Zusammengefasst bezieht sich der in den Modulbeschreibungen festgehaltene Bezug zur Digitalisierung auf eine grundlegende fachdidaktische Auseinandersetzung mit digitalen Medien sowie ein digitalgestütztes Vorgehen beim Experimentieren. Dass die digitalen Kompetenzen von angehenden Lehrkräften im naturwissenschaftlichen Bereich aber deutlich umfangreicher und vielseitiger sind, wird beispielsweise im Orientierungsrahmen DiKoLAN (Abbildung 3.3) deutlich. Insbesondere die enge Verknüpfung von Technologie und Fachinhalt, wie sie für universitäre Lehrveranstaltungen zur Professionalisierung der Lehramtsstudierenden empfohlen wird (vgl. Tabelle 3.2), geht aus diesen Modulbeschreibungen nicht hervor. Auffallend ist, dass in keiner Modulbeschreibung der fachwissenschaftlichen Vorlesungen ein Bezug zum Lernen mit digitalen Medien besteht. Um mit dem Forschungsprojekt genau hier anzuknüpfen, soll eine bestehende fachwissenschaftliche Pflichtveranstaltung neuartig so umgestaltet werden, dass die Lehramtsstudierenden das Lernen und Lehren von Physik mit digitalen Medien selbst erleben. Hierfür kommen grundsätzlich nur Module in Frage, bei denen es sich um reine Lehr-

amtsveranstaltungen handelt und nicht um gemeinsame Veranstaltungen mit Studierenden im Physik-Bachelor of Science. Darüber hinaus sollte der Fachinhalt das Lernen mit digitalen Medien ermöglichen, so dass der Medieneinsatz didaktisch sinnvoll begründet (Girwidz, 2013) und aus lerntheoretischer Sicht gewinnbringend und innovativ ist (Design-Based Research Collective, 2003). Das Modul zur *Einführung in die Astrophysik*, bestehend aus einer Vorlesung und einer Übung, wird diesen Ansprüchen sehr gut gerecht.

### 4.2.1 Einführung in die Astrophysik und ihr Potenzial

Göttingen zählt deutschlandweit zu den wenigen Standorten, die universitäre Lehrveranstaltungen in Astronomie und Astrophysik für das gymnasiale Lehramt anbieten – Stand 2018 ist Göttingen in Niedersachsen der einzige Standort (Hohmann & Quast, 2018). Letzteres liegt vermutlich daran, dass Astrophysik in Niedersachsen kein Pflichtinhalt des Physikunterrichts ist. Dabei macht die KMK (2020) in den Bildungsstandards für die allgemeine Hochschulreife deutlich, dass Astrophysik ein aktuelles Teilgebiet der Physik ist, dass die derzeitigen und zukünftigen Entwicklungen dieser Disziplin darstellen und ihre Diversität deutlich machen kann. Im Kerncurriculum der gymnasialen Oberstufe wird zudem explizit darauf verwiesen, dass darin nicht enthaltene Themen wie Grundlagen der Kosmologie im Physikunterricht behandelt werden können, wenn Lehrkräfte die entsprechenden Freiräume schaffen. Im zweiten Halbjahr der gymnasialen Einführungsphase dient darüber hinaus das Wahlmodul im Umfang von etwa acht Doppelstunden zur Auseinandersetzung mit Fachinhalten, die über die curricularen Mindestanforderungen hinaus gehen. Voraussetzungen solcher Inhalte sind, dass a) Defizite aus der Sekundarstufe I gemindert und b) Anforderungen und Arbeitsweisen der Qualifikationsphase exemplarisch deutlich gemacht werden (Niedersächsisches Kultusministerium (Hrsg.), 2017). Dass astrophysikalische Inhalte diese Voraussetzungen in hohem Maße erfüllen, geht aus folgenden Argumenten hervor, die für das Unterrichten von Astrophysik sprechen:

Astrophysik...

- ermöglicht die Auseinandersetzung mit aktuellen Inhalten und Methoden zur Erkenntnisgewinnung in der Physik (Girwidz & Müller, 2016).
- knüpft an aktuelle Forschungsfragen der Physik an und ermöglicht dadurch besonders moderne Lernumgebungen (ebd.).
- und das Universum sind Teilgebiete der Physik, an denen Schüler:innen unabhängig vom Geschlecht großes Interesse haben (Elster, 2007).
- kann die Kompetenzen von Lernenden auf vielfältige Art fördern (z.B. rationales und abstraktes Denken, Nature of Science und Gebrauch moderner Technologien) (Percy,

2009).

- zeichnet sich durch einen besonders interdisziplinären Charakter aus (Fucili, 2005).
- trug und trägt essenziell zur Entwicklung von Wissenschaft bei (z.B. Mathematik, Computer und Technik, Ursprung des Lebens und außerirdisches Leben) (Percy, 2009).
- ist gesellschaftsrelevant und im Alltag vieler Menschen verankert (z.B. Zeitmessung und Kalender, Navigation, Kultur, Hobby, Wetter, Umweltbewusstsein und internationale Zusammenarbeit) (ebd.).
- baut auf Konzepten und Phänomenen der klassischen Physik (Optik, Mechanik, etc.) auf (ebd.).

Mit astrophysikalischen Themen geht kurzum ein vielversprechendes Potenzial für den Physikunterricht einher, weshalb Physikstudierenden an der Universität Göttingen im M.Ed. für acht Credit-Punkte das obligatorische Modul *Einführung in die Astrophysik (Lehramt)* belegen. Es setzt sich aus einer Vorlesung (vier Semesterwochenstunden) und einer begleitenden Übung (zwei Semesterwochenstunden) zusammen und wird in dieser Form seit 2018 jedes Wintersemester angeboten (vgl. Abbildung 4.2). In der Vorlesung werden u.a. Grundlagen aus den Bereichen astronomische Instrumente und Koordinaten, Sonnensystem, Exoplaneten, Sternaufbau- und -entwicklung, Astrobiologie und Kosmologie thematisiert. Als lehramtsspezifisches Modul sollen hierbei auch konkrete Bezüge zur schulischen Anwendung der Inhalte hergestellt werden (Georg-August-Universität Göttingen, 2021a, S. 1265). Das Modul bezieht in seiner ursprünglichen Form bereits eine Besonderheit von Astrophysik mit ein: die Technologien. In den oben aufgeführten Argumenten wird die besondere Beziehung zwischen digitalen Medien und Astrophysik bereits aufgegriffen. Im Gegensatz zur klassischen Physik spielen Computersimulationen für den astrophysikalischen Erkenntnisweg eine zentrale Rolle, da hier typische Laborexperimente kaum möglich sind (Percy, 2009). Darüber hinaus bestehen astrophysikalische Messungen häufig aus photometrischen Beobachtungen, die mit speziellen digitalen Werkzeugen bearbeitet und ausgewertet werden (Hessman & Modrow, 2006). Der digitale Medieneinsatz beim Lernen von Astrophysik lässt sich durch dessen Forschungsrelevanz und Realitätsbezug (Authentizität) und aus lerntheoretischer Sicht vor allem durch seinen Werkzeugcharakter und zentralen Beitrag zur Erkenntnisgewinnung (Innovation) didaktisch begründen. Die Hausaufgaben des Moduls greifen dies bereits in Form von Anleitungen und Instruktionen auf, die zur Programmierung von Simulationen oder zur Auswertung photometrischer Daten dienen. Die wöchentlichen Übungen dienen ausschließlich zur Besprechung dieser Hausaufgaben, in denen jeweils ausgewählte Vorlesungsinhalte zur Wiederholung und Vertiefung aufgegriffen werden. Das

<b>Georg-August-Universität Göttingen</b> <b>Modul M.Phy.2551: Einführung in die Astrophysik (Lehramt)</b> <i>English title: Introduction to Astrophysics for student teacher</i>	8 C 6 SWS
<b>Lernziele/Kompetenzen:</b> Nach erfolgreichem Absolvieren des Moduls sollten die Studierenden mit den grundlegenden Begriffen und Modellen der Astrophysik umgehen können. Die angestrebten Kompetenzen umfassen sowohl Grundlagen der Theorie als auch der Beobachtungstechniken. Mögliche Anwendungen im Physik- bzw. Naturwissenschaftlichen Unterricht in der Schule ist integrierter Bestandteil des Moduls.	<b>Arbeitsaufwand:</b> Präsenzzeit: 84 Stunden Selbststudium: 156 Stunden
<b>Lehrveranstaltung: Einführung in die Astrophysik Lehramt (Vorlesung)</b>	4 SWS
<b>Lehrveranstaltung: Einführung in die Astrophysik Lehramt (Übung)</b>	2 SWS
<b>Prüfung: Klausur (120 Minuten)</b> <b>Prüfungsvorleistungen:</b> Mind. 50% der Hausaufgaben in den Übungen müssen erfolgreich bearbeitet worden sein. <b>Prüfungsanforderungen:</b> Beobachtungstechniken, Planeten in- und außerhalb des Sonnensystems, Planetenentstehung, Sternaufbau, Sternentstehung und -entwicklung, Galaxien, AGN und Quasare, Kosmologie, Strukturentstehung.	8 C

Abbildung 4.2: Auszug aus der Modulbeschreibung zur *Einführung in die Astrophysik (Lehramt)*, wie es seit 2018 angeboten wird (Georg-August-Universität Göttingen, 2021a, S. 1265).

Modul wird von drei Fachwissenschaftlern der Astrophysik angeboten, die keinen fachdiaktischen Hintergrund haben. Sämtliche Hausaufgaben und Aktivitäten der Lernenden sind demnach fachwissenschaftlich motiviert und nicht grundsätzlich didaktisch oder lerntheoretisch fundiert – genau hier setzt diese Entwicklungsarbeit an. Insgesamt wird deutlich, dass das Astrophysik-Modul sehr gut für das Vorhaben der Arbeit, die digitalen Kompetenzen von Lehramtsstudierenden physikspezifisch zu fördern, geeignet ist. Der bestehende Ansatz, bei dem digitale Medien bisher aus einer rein fachwissenschaftlich motivierten Perspektive eingesetzt werden, soll fachdidaktisch durchdacht, theoriegestützt überarbeitet und somit explizit in einen technologischen Kontext gebracht werden. Hierdurch kann auch der in der Modulbeschreibung verankerte Anwendungsbezug für den Schulunterricht integriert werden (vgl. Abbildung 4.2). Die Vorlesung des Moduls bleibt unverändert, so dass sich diese Entwicklungsarbeit auf die Übung sowie die damit verbundenen Hausaufgaben bezieht.

### 4.3 Entwicklung eines Lehrkonzepts

Die obligatorische Lehrveranstaltung findet während der Vorlesungszeit in Form einer 90-minütigen Sitzung pro Woche statt und ist auf eine fachwissenschaftliche Vorlesung für das Lehramt abgestimmt, in der die Studierenden die Fachinhalte kennenlernen, bevor diese in der Lehrveranstaltung aufgegriffen und vertieft werden. Das Konzept umfasst die wöchentliche Abgabe von Hausaufgaben und jede Sitzung dient nicht nur zur Hausaufgabenbesprechung, sondern wird auch so weit didaktisch strukturiert, dass in einem weiteren Schritt physikalische Fachinhalte aufgegriffen und mit fachdidaktischen Themen verknüpft werden. Die Studierenden setzen sich dabei aktiv mit neuen Inhalten auseinander, anstatt während der Hausaufgabenbesprechung in eine passive Rolle zu verfallen (vgl. ICAP-Modell (Chi & Wylie, 2014)). Ausgehend vom Fachinhalt wird in der Lehrveranstaltung folglich ein konkreter Lehramtsbezug hergestellt. Wie dies im Detail aussieht, wird später erläutert. Zuerst wird hier das Ablaufmodell der konzipierten Lehrveranstaltung auf einer makroskopischen Ebene vorgestellt. Das entwickelte Konzept ist für 13 Vorlesungswochen geplant<sup>4</sup> und orientiert sich am schematischen Aufbau aus Abbildung 4.3. Darin wird der grobe Rahmen der Lehrveranstaltung dargestellt, der sich in vier Hauptphasen (bunt) und zwei Nebenphasen (grau) einteilen lässt. Letztere sind die Aktivierung von Vorwissen zu Beginn der Veranstaltung sowie die abschließende Prüfungsvorbereitung, in der Fragen geklärt und die Lernziele zusammengefasst werden. Sie umschließen die vier Hauptphasen und bestehen aus je einem Termin.

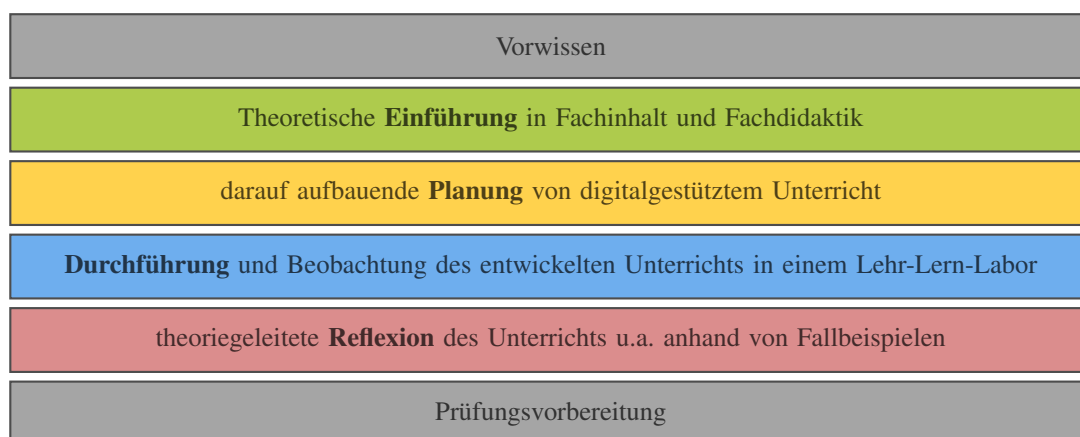


Abbildung 4.3: Schematische Darstellung zum Aufbau der entwickelten Lehrveranstaltung anhand eines Rahmenmodells (eigene Darstellung).

Die Hauptphasen zur Einführung, Planung, Durchführung und Reflexion orientieren sich am Aufbau von Seminaren zum Forschenden Lernen (FOL) (Sonntag et al., 2017) und solchen Seminaren, die mit dem Besuch von Lehr-Lern-Laboren (LLL) (Rehfeldt & Nordmeier,

<sup>4</sup>Aufgrund der Covid-19-Pandemie wurde das Wintersemester 2020/2021 von üblicherweise 14 auf 13 Wochen verkürzt.

(2019) verbunden sind. In der Lehrveranstaltung wird eine Form des Forschenden Lernens umgesetzt, bei der die Studierenden ihre eigene Praxis distanziert und theorie- bzw. evidenzorientiert analysieren, indem sie Unterricht planen, durchführen, beobachten und reflektieren. Das trägt zur Professionalisierung der angehenden Lehrkräfte bei, da sie eine „kritisch-reflexive Haltung gegenüber der Praxis einnehmen“ und ihre eigenen Ansichten hinterfragen und weiterentwickeln (Fichten, 2017, S. 156). Für FOL sind die Selbstständigkeit und Reflexion sowie der Theoriebezug entscheidend (ebd.). Die erste Phase der Lehrveranstaltung dient daher insbesondere zur Einführung in den Fachinhalt, der später zum Unterrichtsgegenstand werden soll, und liefert die fachdidaktischen Theoriegrundlagen zum Lernen und Lehren mit digitalen Medien, wie sie auch in Teil 1 dargestellt werden. Aufbauend auf dieser Theoriegrundlage erfolgt in der nächsten Phase die unterstützte, aber dennoch selbstständige Entwicklung einer digitalgestützten Lernumgebung. In der dritten Hauptphase erfolgt die Durchführung der entwickelten Lernumgebungen im XLAB<sup>5</sup> Göttingen, einem Experimentallabor für junge Leute. Die Einbindung eines LLLs in die Praxisphase der Lehrveranstaltung geht mit den Zielen einher, Theorie, Praxis und Reflexion eng miteinander zu verbinden sowie forschendes Lernen durch entsprechende Beobachtungsaufgaben zu ermöglichen (vgl. Krofta, Fandrich und Nordmeier (2013)). Der Vorteil eines LLLs gegenüber einem herkömmlichen Schulpraktikum ist die Komplexitätsreduktion, die durch eine kleine, besonders interessierte und motivierte Lerngruppe sowie die umfangreiche Unterstützung der Dozierenden und anderen Studierenden entsteht (Rehfeldt & Nordmeier, 2019). Dies kann einen wichtigen Beitrag zur Unterstützung der Professionalisierung der Studierenden leisten, ohne dabei einen sogenannten Praxisschock auszulösen (Dohrmann, 2019), und sich positiv auf das Lernen über Lehr-Lern-Prozesse auswirken (Steffensky & Parchmann, 2007). Um das Vorhaben zum FOL sinnvoll mit der Praxisphase im XLAB zu verbinden, wird den Studierenden in dieser dritten Hauptphase eine Beobachtungsaufgabe gestellt: Während die einen Studierenden die Schüler:innen unterrichten, beobachten ihre Mitstudierenden aktiv das Unterrichtsgeschehen – insbesondere bezüglich des fachdidaktischen Schwerpunkts zum Lernen und Lehren mit digitale Medien. Diese Beobachtungen, die in Form von Fallbeispielen festgehalten werden, stellen in der letzten Hauptphase der Lehrveranstaltung die Basis für eine theoriegeleitete Reflexion dar, in der das beobachtete Handeln analysiert und beurteilt wird sowie Handlungsalternativen diskutiert werden (vgl. (Rehfeldt & Nordmeier, 2019)).

Das Lehrkonzept besteht aus mehreren Bausteinen, deren Reihenfolge innerhalb einer Phase individuell verändert und somit leicht an die Rahmenbedingungen anderer Lehrveranstaltungen angepasst werden kann. Es gibt Bausteine mit einem i) fachdidaktischen und ii) fachwissenschaftlichen Bezug und iii) Bausteine für Hausaufgaben. Das Rahmenmodell

---

<sup>5</sup>Homepage des XLAB Göttingen: <https://xlab-goettingen.de/>

der Lehrveranstaltung, wie es in Abbildung 4.3 dargestellt wird, setzt sich auf mikroskopischer Ebene also aus drei Säulen zusammen, die wiederum aus einzelnen Bausteinen bestehen. Wie dies konkret aussieht, wird in Tabelle 4.2 zusammengefasst. Die kursiv gedruckten Bausteine der Tabelle können *passend zum Fachinhalt*, der jeweils zuvor in der Vorlesung behandelt wurde, frei gewählt werden – für eine konkrete Zuordnung der Fachinhalte in der Astrophysik-Übung siehe Kapitel 4.4.

Tabelle 4.2: Zusammenfassung der drei Säulen i) Fachdidaktik, ii) Fachwissenschaft und iii) Hausaufgaben des Lehrkonzepts und deren Bausteine.

	fachdidaktische Bausteine	fachwissenschaftliche Bausteine	Bausteine für Hausaufgaben
1	Einstieg: Ablauf, Anforderungen	Vorwissen	/
2	Simulationen in Forschung und Bildung	<i>zum Fachinhalt 1: Simulation im Selbstlernprozess</i>	Eigenschaften und Funktionen von Simulationen
3	digitalgestützter Physikunterricht, TPACK, Instruktionen	<i>zum Fachinhalt 2: Instruktionen zur eigenen Simulation formulieren</i>	<i>zum Fachinhalt 2: Simulation erstellen</i>
4	Gestaltungsprinzipien, Gelingensbedingungen	<i>zum Fachinhalt 3: digitale Anwendungen recherchieren, bewerten</i>	<i>passend zum Fachinhalt 3</i>
5		Einführung in den Fachinhalt 5	<i>passend zum Fachinhalt 4</i>
6	Entwicklung erster Ideen zur Unterrichtsplanung	Vertiefung zum Fachinhalt 5	Sachanalyse
7	Organisatorisches	<i>passend zum Fachinhalt 6</i>	<i>passend zum Fachinhalt 6</i>
8		<i>passend zum Fachinhalt 7</i>	<i>passend zum Fachinhalt 7</i>
9		<i>passend zum Fachinhalt 8</i>	Unterrichtsentwurf
10		<i>passend zum Fachinhalt 9</i>	Unterrichtsmaterial
11	Praxisphase im LLL	Fachinhalt 5 (Unterrichtsgegenstand)	Schülervorstellungen
12	Reflexion der Praxisphase	<i>passend zum Fachinhalt 10</i>	Fallbeispiel
13	Abschluss: Evaluation, Feedback	Prüfungsvorbereitung	<i>passend zum Fachinhalt 11</i>

Das Konzept orientiert sich eng an den theoretischen und empirischen Erkenntnissen, die in Teil II und insbesondere in Kapitel 3.2 dargestellt werden. So ist u.a. vorgesehen, dass die Lehrveranstaltung im Team-Teaching durchgeführt wird, also mit einer Vernetzung aus je einer Person mit fachdidaktischer und fachwissenschaftlicher Expertise. Darüber hinaus setzen die Lehrenden, passend zum fachdidaktischen Schwerpunkt, gezielt digitale Medien z.B. zum Präsentieren, Organisieren, Erklären, Einholen von Feedback, Kommunizie-

ren uvm. ein (vgl. Tabelle 3.2). In der **Einführungsphase** (grün, Wochen 2 bis 5) wird zu Beginn jeder Sitzung der fachdidaktische Inhalt in einem Impuls-Vortrag (5-10 Minuten) präsentiert. Dabei wird aktuelle und relevante Literatur vorgestellt, die sich auf den übergeordneten Schwerpunkt, das Lernen und Lehren von Physik mit digitalen Medien und insbesondere mit Simulationen, bezieht. Der fachdidaktische Baustein wird anschließend mit dem fachwissenschaftlichen Baustein verknüpft, indem das neue fachdidaktische Wissen direkt auf den konkreten Fachinhalt angewendet wird: Auf den ersten fachdidaktischen Baustein über Simulationen in Forschung und Bildung (vgl. Kapitel 2.4) folgt ein fachwissenschaftlicher Baustein, bei dem sich die Studierenden durch simulationsbasiertes Lernen aktiv und selbstständig mit dem neuen Fachinhalt auseinandersetzen. Theoretische Grundlage ist die Hausaufgabe über Eigenschaften und Funktionen von Simulationen. Aufbauend auf dem zweiten fachdidaktischen Baustein über Grundlagen zum digitalgestützten Unterricht (vgl. Kapitel 2.1, 2.2), zum TPACK-Modell (vgl. Kapitel 3.1.1) und zur Rolle von Instruktionen (vgl. Kapitel 2.4) formulieren die Studierenden Instruktionen für das Lernen mit einer in der Hausaufgabe selbst erstellten Simulation. Zuletzt lernen die Studierenden Gestaltungsprinzipien und Gelingenbedingungen (vgl. Kapitel 2.3) für digitalgestützte Lernumgebungen kennen und nutzen diese Grundlage, um digitale Anwendungen für einen konkreten Fachinhalt zu recherchieren und kriteriengeleitet zu bewerten. Die drei fachdidaktischen Bausteine der Einführungsphase sind folglich direkt mit den fachwissenschaftlichen Bausteinen sowie den Hausaufgaben verbunden – jede Sitzung baut auf diesen drei Säulen auf. Das Lehrkonzept kommt an dieser Stelle bereits der Empfehlung nach, Fachinhalt und Technologien zu verknüpfen. Obendrein werden die Studierenden mit dem Erstellen, Recherchieren, Bewerten und Aufarbeiten von Simulationen hier schon vor authentische, praxisrelevante Probleme gestellt (vgl. Tabelle 3.2). Die Einführungsphase schließt mit der Einführung in den Fachinhalt, der anschließend für die Praxisphase schülergerecht aufgearbeitet wird, und dient insgesamt als unterstützende Basis für die anschließenden Phasen. Folgende digitale Kompetenzen (dK) sind mit den Bausteinen dieser ersten Hauptphase vorrangig verbunden: Die Studierenden...

**dK1** ...nennen Eigenschaften einer Simulation.

**dK2** ...erläutern die fachspezifische Bedeutung von Simulationen für die aktuelle Forschung und Bildung und nennen dabei unterschiedliche Zugänge und Ziele.

**dK3** ...nennen Vor- und Nachteile beim Einsatz von digitalen Medien wie Simulationen in Lehr-Lern-Szenarien und gehen dabei auf spezifische Einsatzmöglichkeiten ein.

**dK4** ...nutzen eine Simulation im Selbstlernprozess.



**dK5** ...recherchieren, vergleichen und bewerten digitale Anwendungen für den Einsatz in Lehr-Lern-Szenarien kriteriengeleitet.

**dK6** ...erstellen eine schülergerechte Simulation und formulieren passende Instruktionen.

**dK7** ...fassen die wesentlichen Erkenntnisse aus Theorie und Forschung zum Lernen und Lehren mit digitalen Medien zusammen.

Die **Planungsphase** (gelb, Wochen 6 bis 10) beginnt mit einer vertieften Auseinandersetzung mit dem Unterrichtsinhalt insbesondere durch den Einsatz digitaler Medien und der Anfertigung einer Sachanalyse (Hausaufgabe), welche die fachwissenschaftliche Grundlage für den Unterricht darstellt. Die fachdidaktischen Bausteine beschränken sich in dieser zweiten Hauptphase auf die Entwicklung erster Ideen zur Unterrichtsplanung sowie eine organisatorische Klärung der Praxisphase. Beide Bausteine werden durch Diskussionen im Plenum oder in den Kleingruppen, die für die gemeinsame Unterrichtsplanung und -durchführung gebildet werden, realisiert. Die Gruppenarbeit von zwei bis drei Studierenden soll zur gegenseitigen Unterstützung dienen und die Kommunikation fördern. Die Kleingruppen geben den Unterrichtsentwurf und das erstellte Unterrichtsmaterial als gemeinsame Hausaufgaben ab und erhalten anschließend individuelles Feedback von den Lehrenden. In dieser Phase können vier Sitzungen und zwei Hausaufgaben vollständig zur digitalgestützten Auseinandersetzung mit den Fachinhalten genutzt werden. Somit bietet insbesondere diese dritte Phase viel Raum für die individuelle Auseinandersetzung mit digitalen Medien und den damit verknüpften Fachinhalten (vgl. Tabelle 3.2). Die Sitzung der anschließenden **Durchführungsphase** (blau, Woche 11) findet nicht wie gewohnt statt, sondern wird durch den Unterricht im LLL ersetzt. Als Vorbereitung setzen sich die Studierenden in der Hausaufgabe mit Schülervorstellungen auseinander, die für den entsprechenden Lerngegenstand relevant sein können. Die zweite und dritte Hauptphase tragen wesentlich zu einem Praxisbezug zum Lehrberuf bei und fördern die Kollaboration mit digitalen Medien (vgl. Tabelle 3.2). Dadurch werden die bereits formulierten digitale Kompetenzen dK1 bis dK7 wie folgt erweitert: Die Studierenden...

**dK8** ...nutzen entsprechende Software zur digitalen Kommunikation und Kollaboration, um Unterrichtsmaterial gemeinsam zu entwickeln und verwalten.

**dK9** ...arbeiten den Fachinhalt schülergerecht auf und stellen ihn mit digitalen Medien anschaulich dar.

**dK10** ...planen eine digitalgestützte Lehr-Lern-Einheit, in der eine Simulation eingesetzt wird, und führen diese Einheit durch.

**dK11** ... beschreiben didaktische Voraussetzungen für den Medieneinsatz und damit verbundene Auswirkungen auf Lehr-Lern-Situationen, um ihre methodischen Entscheidungen literaturgestützt zu begründen.

Die Studierenden erhalten für die Praxisphase im LLL eine Beobachtungsaufgabe, um in der anschließenden Hausaufgabe ein Fallbeispiel zu erstellen. Das dient in der **Reflexionsphase** (rot, Woche 12) zur theoriegeleiteten Analyse und Begründung der beobachteten Handlungen im Sinne forschenden Lernens. Mit dem digitalen Baustein zur Reflexion der Praxisphase besteht die Möglichkeit, Handlungsalternativen und eigene Erfahrungen im Plenum zu diskutieren (ca. 20 Minuten). Die übrige Zeit dient zur digitalgestützten Auseinandersetzung mit einem weiteren Fachinhalt. Mit der letzten Hauptphase wird eine weitere digitale Kompetenz adressiert: Die Studierenden...

**dK12** ...reflektieren ihre Praxiserfahrungen, indem sie eine beobachtete Situation zum Lehren und Lernen mit digitalen Medien beschreiben, literaturgestützt analysieren und Handlungsalternativen literaturgestützt diskutieren.

Das entwickelte Lehrkonzept ist mit zwölf vorrangig geförderten digitalen Kompetenzen der Lehramtsstudierenden verbunden. Die variablen Bausteine aus Tabelle 4.2 können zudem individuell so gestaltet werden, dass im Detail weitere digitale Kompetenzen in der Lehrveranstaltung adressiert werden. Im folgenden Kapitel wird eben dies für die Astrophysik-Übung erläutert, indem die Fachinhalte und eingesetzten digitalen Anwendungen vorgestellt werden.

#### 4.4 Struktur der Astrophysik-Übung

Das entwickelte Lehrkonzept bietet Freiraum für eine individuelle Gestaltung einzelner Bausteine (vgl. Abbildung 4.3), indem die Fachinhalte und Technologien passend zum fachwissenschaftlichen Schwerpunkt der Lehrveranstaltung (hier: Astrophysik) gewählt werden. Die weitere Struktur der Astrophysik-Übung wird also wesentlich durch die fixen Vorlesungsinhalte bestimmt. Diese sind:

- Teleskope, Instrumente, astronomische Koordinaten (Woche 1)
- Kepler-Gesetze (Woche 2), Mehrkörperprobleme, Stabilität, Gezeiten (Woche 3)
- Sonnensystem (Woche 4), Exoplaneten (Woche 5)
- Astrobiologie (Woche 5 und 10)
- Sonne (Woche 6), Strahlung (Woche 7), Sternaufbau (Woche 8), Sternentwicklung (Woche 9)

- Mikrowellenhintergrund, Interstellare Materie (Woche 11)
- Allgemeine Relativitätstheorie, Kosmologie (Woche 12)

In Absprache mit den Modulverantwortlichen werden zehn<sup>6</sup> zentrale Inhalte dieser Vorlesungsthemen in der Astrophysik-Übung erneut aufgegriffen. Die zeitliche Reihenfolge dieser Fachinhalte entspricht der Themenabfolge der Vorlesung und soll den zeitnahen sowie direkten Anschluss an diese sicherstellen. Für jeden Fachinhalt werden Lernziele formuliert (vgl. Kapitel A), die durch die Teilnahme an der Übung sowie die Bearbeitung der Hausaufgaben erreicht werden können. Die Studierenden werden dabei durch den Einsatz geeigneter digitaler Anwendungen unterstützt. In Tabelle 4.3 wird die Struktur der Astrophysik-Übung zusammengefasst, indem die Fachinhalte und die digitalen Anwendungen aufgelistet werden. In einer weiteren Spalte wird der jeweilige Zugang zum Fachinhalt mit der digitalen Anwendung angegeben, womit der Medieneinsatz aufbauend auf der Argumentation in Kapitel 2 entsprechend didaktisch begründet wird. So werden beispielsweise unterschiedliche Simulationen zur Erkenntnisgewinnung in den Selbstlernprozess eingebunden. Diese ermöglichen einen experimentellen Zugang zu Fachinhalten wie Exoplaneten und Schwarzkörpern an einer Stelle, an der klassische Experimente nicht möglich sind (Wieman et al., 2010), und schaffen so besonders interaktive Lernumgebungen (Berger, 2006; Finkelstein et al., 2005). Weitere digitale Anwendungen ermöglichen eine dynamische Visualisierung der Expansion des Universums und der Sternentwicklung, wodurch Unsichtbares sichtbar gemacht wird (Girwidz, 2013; Wieman et al., 2010). Zur kognitiven Entlastung bei der Verarbeitung großer Datenmengen werden zudem digitale Werkzeuge wie eine Tabellenkalkulation eingesetzt. Diese übernimmt Routinearbeiten und stellt den eigentlichen Lerngegenstand in den Vordergrund des Lernprozesses, was die Lernenden bei der Wissenskonstruktion unterstützt (Arnold, 2005; Jonassen, 1995). Indem die Studierenden mit digitalen Anwendungen selbstständig Simulationen erstellen, strukturieren sie ihr Vorwissen und setzen sich vertieft mit dem Lerninhalt auseinander, was ebenfalls die aktive Wissenskonstruktion fördert (Jonassen, 1994). Zuletzt bieten weitere digitale Anwendungen die Möglichkeit, eine besonders authentische und aktivierende Lernumgebung zu schaffen, in der Lernende astronomische Beobachtungen inklusive einer Datengenerierung selbstreguliert durchführen, was konstruktivistischen Vorstellungen entspricht (vgl. Kapitel 2.1.3).

In der Astrophysik-Übung kommen hierfür ausschließlich solche digitalen Anwendungen zum Einsatz, die kostenlos und leicht zugänglich sind. Eine dieser Anwendungen ist **Stellarium**<sup>7</sup>, eine open-source Planetariumssoftware für den Desktop oder den Browser. Die Software richtet sich an Hobbyastronomen, Lehrende sowie Forschende und kann beispiels-

---

<sup>6</sup>Aufgrund der Weihnachtsfeiertage findet die Übung in Woche acht nicht statt, also kann Fachinhalt 7 (vgl. Tabelle 4.3) nicht behandelt werden. Demnach werden insgesamt nur zehn Fachinhalte aufgegriffen.

<sup>7</sup>Homepage Stellarium: <https://stellarium.org/de/>

Tabelle 4.3: Struktur der Astrophysik-Übung: Auflistung der Fachinhalte, der damit verbundenen digitalen Anwendungen und des gewählten Zugangs zu Fachinhalt und Technologie. Die Verortung der Fachinhalte in der Lehrveranstaltung können Tabelle 4.2 entnommen werden. Für den siebten Fachinhalt werden hier keine Angaben gemacht, da dieser wegen der Weihnachtsferien in Woche acht nicht thematisiert werden kann.

Fachinhalt	digitale Anwendung	Zugang
1) astronomische Koordinaten	Stellarium	astronomische Beobachtung simulieren
2) Teleskop-Optik	GeoGebra	Simulation erstellen
3) Planetenbahn, Kepler-Gesetze	Snap!	Simulation erstellen
4) Jupiters Monde	Stellarium, Tabellenkalkulation	Daten generieren und auswerten
5) Exoplaneten: Transit-, Radialgeschwindigkeitsmethode	Snap!-, GeoGebra-Simulationen*	Selbstlernprozess (Erkenntnisgewinnung)
6) Schwarzkörper, Sternspektren	Snap!-, Python-Simulationen*, SDSS Datenbank	Selbstlernprozess (Erkenntnisgewinnung), Informationen recherchieren und strukturieren
7) /	/	/
8) Hertzsprung-Russell-Diagramm, Sternentwicklung	Astro-Simulationen	dynamische Veranschaulichung
9) Veränderliche: Supernova, Cepheiden	Tabellenkalkulation	Datenverarbeitung
10) Kosmische Entfernungsleiter	ImageJ, Tabellenkalkulation, Snap!-Simulation*	Daten generieren und verarbeiten, dynamische Veranschaulichung
11) Kosmologie (Hubble-Gesetz)	Snap!-Simulation*	dynamische Veranschaulichung

\*Das Material wurde in Zusammenarbeit mit Fachwissenschaftlern selbst erstellt und den Studierenden zur Verfügung gestellt.

weise zur Planung von eigenen Observationen, zur schnellen Berechnung unterschiedlicher Größen oder zur Veranschaulichung und Visualisierung genutzt werden (Zotti, Hoffmann, Wolf, Chéreau & Chéreau, 2021). Dabei können Zeit und Ort der simulierten Beobachtung beliebig eingestellt werden und man kann je nach Beobachtungsinteresse aus einer Vielzahl von Darstellungsoptionen wählen (Deep Sky-Objekte, Sternbilder, Horizont, Atmosphäre, Koordinatensystem uvm.). Auch **GeoGebra** ist eine open-source Software und kann als Browser- und Desktopanwendung genutzt werden. Hierbei handelt es sich um eine dynamische Geometriesoftware für Lehrende und Lernende, die insbesondere in den MINT-Fächern eingesetzt werden kann. Über die einfache und benutzerfreundliche Oberfläche dieses Werk-

zeugs können Geometrie, Algebra und Tabellen dynamisch verbunden und interaktive Lehr-Lern-Materialien entwickelt werden (Hohenwarter & Collaborators, 2022). Auf der Homepage stellen Nutzer:innen entwickeltes Unterrichtsmaterial wie einfache Animationen oder Simulationen zur freien Verfügung. Ein weiteres digitales Werkzeug, das in dieser Übung eingesetzt wird, ist **Snap!**. Hierbei handelt es sich um eine grafische Programmiersprache, die durch einen spielerischen und intuitiven Ansatz besonders gut für Anfänger:innen geeignet ist (Harvey & Mönig, 2020). Skript und Oberfläche werden parallel angezeigt, so dass Veränderungen und Entwicklungen des Programms direkt nachvollzogen werden können. Die Browser-Anwendung ist open-source und Nutzer:innen können eigene Programme für die Öffentlichkeit zur Verfügung stellen. Snap! ist die aktuelle Version von BYOB und baut auf dem Quellcode von Scratch auf (Harvey & Mönig, 2020). Darüber hinaus wird in der Übung eine astrophysikspezifische online-Datenbank eingesetzt. Diese beruht auf dem **SDSS** (Sloan Digital Sky Survey), womit die bisher umfangreichste Durchmusterung des Universums durchgeführt wird. In diesem internationalen Forschungsprojekt wird eine detaillierte dreidimensionale Karte erstellt, die ein Drittel des Himmels abdeckt. Darüber hinaus umfasst SDSS Spektren von mehr als drei Millionen astronomischen Objekten (Sloan Digital Sky Survey, 2022). Die Forschungsdaten werden regelmäßig veröffentlicht und können über die SDSS Datenbank online abgerufen werden. Zudem bietet die Homepage Zugang zu unterschiedlichen Tools wie dem SkyServer DR16<sup>8</sup>, mit denen die SDSS-Daten visualisiert und analysiert werden können. Hier haben Lehrende und Lernende freien Zugriff auf ein umfangreiches Unterrichts- und Selbstlernmaterial zum Thema Sterne und Galaxien, das auf die Originaldaten zurückgreift und unter Verwendung des SDSS-Tools direkt im Browser durchgeführt wird. Weitere digitale Anwendungen in der Übung sind **Astro-Simulationen**. Die University of Nebraska-Lincoln bietet im Rahmen ihres Astronomy Education Programms mehrere solcher astrophysikalischer Simulationen zur freien Verfügung an (K. Lee & Collaborators, 2022). Einige Simulationen aus dieser breiten online-Sammlung sind HTML5-basiert und können direkt im Browser genutzt werden. Die Website umfasst aber nicht nur Browseranwendungen, sondern auch kostenlose Desktopprogramme wie NAAP Labs<sup>9</sup>, worin mehrere Simulationen aus dem Astrophysik-Bereich enthalten sind. In der Astrophysik-Übung wird zudem ein digitales Werkzeug zur Bildverarbeitung eingesetzt. Hierfür eignet sich die Java-basierte und gemeinfreie Software **ImageJ**, die als Desktopanwendung für alle Betriebssysteme geeignet ist (Rasband & Collaborators, 2022). Man kann eigene Plug-Ins schreiben oder auf das freie Angebot an Plug-Ins zurückgreifen, um spezielle Operationen oder Berechnungen im Bereich astronomischer Bildverarbeitung durchzuführen (Hessman & Modrow, 2006). Zusammen mit einer klassischen Tabellenkal-

---

<sup>8</sup>Homepage des SDSS Sky Server DR16: <http://skyserver.sdss.org/dr16/en/home.aspx>

<sup>9</sup>Zugang zum Download von NAAP Labs: <https://astro.unl.edu/nativeapps/>, aktueller Stand: Mai 2022

kulationssoftware sind das schließlich alle digitalen Anwendungen, die in der Astrophysik-Übung im direkten Zusammenhang mit dem Fachinhalt eingesetzt werden (vgl. Tabelle 4.3).

Mit dem Einsatz dieser digitalen Anwendungen geht eine gewisse Vielfalt an Zugängen zum Fachinhalt einher. Die in Kapitel 4.3 festgehaltenen digitalen Kompetenzen dK1 bis dK12, die in der Astrophysik-Übung adressiert werden, können somit wie folgt erweitert werden: Die Studierenden...

dK13 ...gewinnen astrophysikalische (Mess-)Daten mit digitalen Werkzeugen.

dK14 ...nutzen digitale Werkzeuge zur Weiterverarbeitung von astrophysikalischen (Mess-)Daten.

dK15 ...nennen astrophysikalische Forschungsbereiche, in denen Simulationen zur Erkenntnisgewinnung eingesetzt werden, und gehen dabei auf gewonnene Erkenntnisse ein.

dK16 ...nutzen unterschiedliche Programme, mit denen Simulationen im Schulkontext eingesetzt werden können.

dK17 ...recherchieren astrophysikalische Informationen und Daten in spezifischen Datenbanken.

dK18 ...nutzen digitale Medien zur strukturierten Dokumentation und Sicherung von Informationen.

Insgesamt werden demnach 18 digitale Kompetenzen formuliert, die in der Astrophysik-Übung adressiert werden. Diese wurden aufbauend auf den in Kapitel 3.1 vorgestellten Kompetenzrahmen entwickelt. Sie greifen insbesondere die technologische und die anwendungsbezogene Perspektive des Dagstuhl-Dreiecks auf (Gesellschaft für Informatik e. V., 2016) und orientieren sich in besonderem Maße an den digitalen Basiskompetenzen des Orientierungsrahmens DiKoLAN (Becker et al., 2020, S. 28–41). In Anlehnung an Becker et al. (2020) werden daher die adressierten Kompetenzen der Astrophysik-Übung in Tabelle 4.4 in die allgemeineren und fachspezifischeren Kompetenzbereiche des Orientierungsrahmens eingeordnet. Die Tabelle enthält zudem eine Einordnung in die technologiebezogenen TPACK-Komponenten und gibt an, wie umfangreich ein Kompetenzbereich in der Astrophysik-Übung adressiert wird (Gewichtung von null bis fünf Punkte). Im Anhang (Tabelle A.1) ist darüber hinaus eine explizite Zuordnung der Kompetenzen dK1 bis dK18 zu den operationalisierten digitalen Basiskompetenzen des DiKoLAN zu finden. Die Kompetenzen dK7 (theoretische und empirische Erkenntnisse zum Lernen und Lehren mit digitalen Medien zusammenfassen) und dK12 (Beobachtungssituation analysieren) können in Tabelle 4.4 keinem

Kompetenzbereich eindeutig zugeordnet werden, weil sie sich auf digitale Medien als Ganzes beziehen und dabei allgemeinere und fachspezifischere Basiskompetenzen ansprechen. Sie können aber beide dem TPACK zugeordnet werden. Aus der Tabelle geht hervor, dass

Tabelle 4.4: Einordnung der in der Astrophysik-Übung adressierten digitalen Kompetenzen dK1 bis dK18 in den Orientierungsrahmen DiKoLAN (Becker, Meßinger-Koppelt & Thyssen, 2020) und das TPACK-Modell (Mishra & Koehler, 2006). Auf einer Skala von null bis fünf wird die Gewichtung des jeweiligen Kompetenzbereichs angegeben.

<b>Allgemeinere Kompetenzen</b>	Gewichtung	TPACK	TPK	TCK	TK
Dokumentation	● ● ● ○ ○				dK18
Präsentation	● ○ ○ ○ ○	dK9			
Kommunikation, Kollaboration	● ● ● ○ ○				dK8
Recherche, Bewertung	● ● ○ ○ ○			dK17	
<b>Fachspezifischere Kompetenzen</b>	Gewichtung	TPACK	TPK	TCK	TK
Messwert-, Datenerfassung	● ○ ○ ○ ○			dK13	
Datenverarbeitung	● ● ● ○ ○				dK14
Simulation, Modellierung	● ● ● ● ●	dK3 dK6 dK10 dK11	dK3 dK5	dK2 dK15 dK17	dK1 dK2 dK4 dK16

alle sieben Kompetenzbereiche des DiKoLAN und alle vier technologiebezogenen Komponenten des TPACK-Modells durch die digitalen Kompetenzen der Astrophysik-Übung abgedeckt werden. Der fachspezifische Fokus liegt hierbei deutlich auf dem Kompetenzbereich Simulation und Modellierung, während die Datenverarbeitung sowie Messwert- und Datenerfassung mit einer geringeren Gewichtung aufgegriffen werden. Im allgemeineren Bereich spielen die digitale Kommunikation und Kollaboration sowie die Dokumentation eine wichtige Rolle, da Lehrveranstaltung und Unterrichtspraxis online stattfinden und ein analoger Austausch nicht möglich ist. Darüber hinaus ist die digitale Dokumentation insofern bedeutsam, als dass die Aufgabenbearbeitung und die Hausaufgabenabgabe digital erfolgen und sämtliche Lehr-Lern-Materialien digital zur Verfügung gestellt werden. Zuletzt sind die digitale Recherche und Bewertung sowie Präsentation dem gegenüber zwei allgemeinere Kompetenzen, die in dieser Lehrveranstaltung weniger Raum einnehmen.

Das entwickelte Lehrkonzept und die konkrete Struktur der Astrophysik-Übung sind an dieser Stelle vollständig beschrieben. In den folgenden Kapiteln werden zwei ausgewählte Lehr-Lern-Einheiten der Übung detailliert vorgestellt, indem Bezug zu allen drei Säulen genommen wird und eine Einordnung in das Gesamtkonzept erfolgt.

## 4.5 Fachinhalt 5: Exoplaneten

Planeten, die außerhalb unseres Sonnensystems liegen, werden extrasolare Planeten oder Exoplaneten genannt. Getrieben vom menschlichen Entdeckerdrang und motiviert von Fragen nach weiterem Leben im Universum und der Existenz einer zweiten Erde, ist die Exoplanetenforschung heute ein zentrales Gebiet der Astrophysik, das auch von gesellschaftlichem Interesse ist (Piper, 2014). Der technologische Fortschritt ermöglicht die erfolgreiche Planetsuche mit unterschiedlichen Methoden. Die zwei ertragreichsten Methoden der bisherigen Forschung sind die Transit- und Radialgeschwindigkeitsmethode (vgl. Abbildung 4.4). Kombiniert man beide Methoden, können mit dem Planetenradius und der Planetenmasse

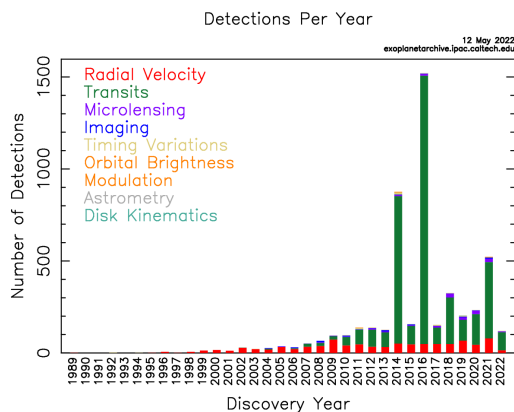


Abbildung 4.4: Anzahl der Entdeckungen von Exoplaneten in Abhängigkeit der Suchmethode (NASA Exoplanet Archive, 2022).

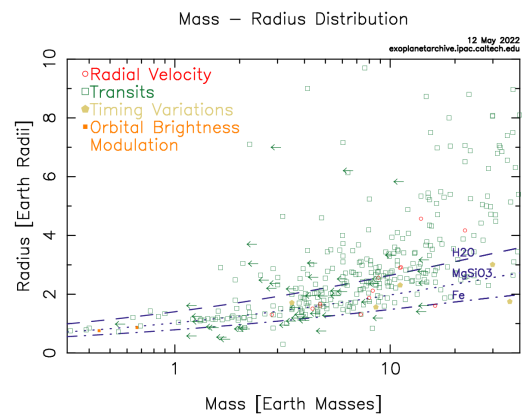


Abbildung 4.5: Masse-Radius-Diagramm für entdeckte Exoplaneten (NASA Exoplanet Archive, 2022).

erste Aussagen über dessen mittlere Dichte getroffen werden. Das Masse-Radius-Diagramm aus Abbildung 4.5 verdeutlicht dies. Es enthält Kurven konstanter Dichte für Modellkugeln aus Wassereis, Eisen und Gestein, denen die detektierten Exoplaneten zugeordnet werden. Zudem können über die Kombination beider Methoden die zentralen Bahnparameter des Exoplaneten (große Halbachse, Inklination und Exzentrizität) bestimmt werden (Jaumann, Köhler, Sohl, Tirsch & Pieth, 2018a).

### Transitmethode

Unter dem Begriff (*Planeten-*)*Transit* versteht man das Vorbeiziehen eines Planeten an einem Stern genau so, dass dieser Vorgang aus Sicht des Beobachters an der Sternvorderseite stattfindet. Das Prinzip ähnelt also dem einer Sonnenfinsternis (Jaumann, Köhler, Sohl, Tirsch & Pieth, 2018b). Als Resultat wird eine periodische Helligkeitsschwankung beobachtet, aus der auf einen Exoplaneten geschlossen werden kann (Piper, 2014). Die Helligkeitsschwankung wird in vier Phasen unterteilt: Mit dem *ersten Kontakt* der Planetenscheibe mit dem Rand



der Sternscheibe beginnt die Abnahme der relativen Helligkeit und somit auch der Transit. Der *zweite Kontakt* kennzeichnet den Beginn der vollständigen Bedeckungsphase, in der die gemessene Lichtintensität des Sterns ihr Minimum erreicht. Beendet wird die Phase mit dem *dritten Kontakt*, wenn die Intensität wieder zunimmt, weil der Planet sich aus der Sichtlinie entfernt. Der *vierte Kontakt* beendet den Transit und die relative Helligkeit erreicht ihren Ursprungswert (Scholz, 2014). Abbildung 4.6 zeigt eine typische Lichtkurve am Beispiel von TESS-Messdaten zum jupiterähnlichen Exoplaneten CoRoT-1b. Aus einer Lichtkurve

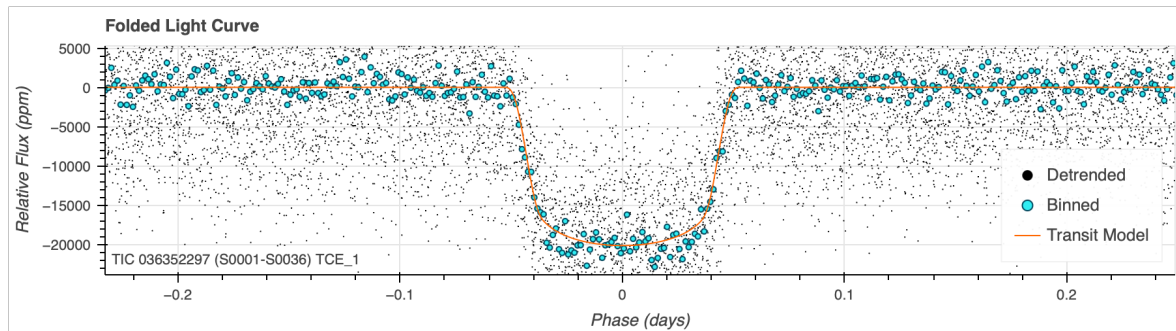


Abbildung 4.6: Plot der mit TESS aufgenommenen Lichtkurve eines Transits von CoRoT-1b (erstellt mit Exo.MAST (2021)). Der Exoplanet hat einen Radius von  $R_P = 1,49 \pm 0,08 R_{Jup}$  und seine Umlaufperiode beträgt ca. 1,5 Tage (Barge et al., 2008).

können die Transittiefe  $\Delta F$ , die Dauer des gesamten Transitvorgangs  $t_{Tr}$  und die Dauer der totalen Bedeckungsphase  $t_T$  direkt abgelesen werden. Die Transittiefe ist als Verhältnis der Intensitätsänderung  $\Delta I$  zur Intensität  $I_S$  des Sterns definiert und entspricht in der totalen Bedeckungsphase dem Verhältnis der Querschnittsflächen  $A_P$  und  $A_S$  bzw. der Quadrate der Radien  $R_P$  und  $R_S$  (Scholz, 2014, S. 115):

$$\Delta F = \frac{\Delta I}{I_S} = \frac{A_P}{A_S} = \frac{R_P^2}{R_S^2} \Leftrightarrow R_P = R_S \sqrt{\Delta F} \quad (1)$$

Der Planetenradius ist die zentrale Größe, die mit der Transitmethode gewonnen wird. Aber nicht jeder Transit kann beobachtet werden. Eine Inklination von  $i \neq 90^\circ$  hat zur Folge, dass der Planet nicht mittig vor dem Stern vorbeizieht, und verursacht demnach eine geringere Transiddauer. Abhängig vom Sternradius, Planetenradius und Bahnradius  $a_P$  gibt es also eine minimale Inklination, ab der ein Transit beobachtet werden kann (Scholz, 2014). Aufgrund der Randverdunkelung, einem geometrisch-fotometrischen Effekt, hat die Lichtkurve während der Totalitätsphase einen konkav gekrümmten Verlauf, der quadratisch vom Abstand zur Sternmitte abhängt (vgl. Abbildung 4.6, Trendlinie *Transit Model* (orange)). Wegen des Temperaturgradienten in der Photosphäre ist die Intensität des abgestrahlten Lichts im Zentrum des Sterns am höchsten und nimmt zum Rand hin ab (ebd.). Bei erdähnlichen Planeten und sonnenähnlichen Sternen kann ein Transit zwischen zwei und 16 Stunden dauern, wobei die

Folgen der Abdunkelung sehr gering sind (ca. 0,01 %). Bei den größeren, jupiterähnlichen Planeten ist diese Suchmethode erfolgreicher, da hier immerhin Helligkeitsschwankungen der Größenordnung 1 % zu beobachten sind (ebd.).

### Radialgeschwindigkeitsmethode

Diese Suchmethode macht sich die gegenseitige Anziehung von Planet und Stern zunutze, die auf den massenbedingten Gravitationskräften basiert. Planet und Stern kreisen beide um ihren gemeinsamen Schwerpunkt (Piper, 2014). Für eine außenstehende Person bewegen sich beide Körper periodisch auf diese zu und von ihr weg, in Blickrichtung liegt also eine Geschwindigkeitsvariation vor. Diese zeitabhängige Geschwindigkeitskomponente wird Radialgeschwindigkeit  $v_r$  genannt und ihre Variation kann über eine Rot- und Blauverschiebung des Sternspektrums gemessen werden. Über die Differenz der Wellenlängen des gemessenen  $\lambda_{obs}$  und ausgesandten Sternenlichts  $\lambda_{em}$  lässt sich die auf dem Dopplereffekt basierende Änderung  $\Delta\lambda = \lambda_{obs} - \lambda_{em}$  der Wellenlänge bestimmen. Diese hängt dann über die Lichtgeschwindigkeit  $c$  wie folgt mit der Radialgeschwindigkeit  $v_r$  zusammen (Scholz, 2014, S. 84):

$$v_r = \frac{\Delta\lambda \cdot c}{\lambda} \quad (2)$$

Der Planet selbst wird also nicht direkt entdeckt, sondern man schließt von der beobachteten periodischen Veränderung des Sternspektrums bzw. einer Veränderung der Radialgeschwindigkeit des Sterns auf dessen Existenz. Die Zentrale Größe der  $v_r$ -Methode ist die Planetenmasse  $m_P$ , die für kreisförmige Bahnen in Abhängigkeit der Inklination  $i$  auf einen Minimalwert abgeschätzt wird (Scholz, 2014, S. 99):

$$m_P \cdot \sin(i) = \left( \frac{P \cdot m_S^2}{2\pi \cdot G} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot v_{r,\max} \quad (3)$$

Hierbei ist  $v_{r,\max}$  der Maximalwert der Radialgeschwindigkeit<sup>10</sup>,  $P$  die Umlaufperiode,  $G$  die Newtonsche Gravitationskonstante und  $m_S$  die Sternmasse. Diese kann entweder über eine andere Methode konkret bestimmt werden (Spektralklasse oder Leuchtkraftklasse) oder die Planetenmasse wird in Einheiten der Sternmasse angegeben. Die Radialgeschwindigkeitsmethode eignet sich besonders für die Entdeckung von massereichen Exoplaneten, die eng um ihren Stern kreisen. Die  $v_r$ -Amplitude liegt dann in einer messbaren Größenordnung von 10 m/s (Piper, 2014). Aus der Planetenmasse kann über die Gleichung zum Zweikörperproblem und unter der Annahme, dass  $a_S \ll a_P$  und  $m_P \ll m_S$  gelten, der Bahnradius  $a_P$  des Exoplaneten bestimmt werden. Der zeitliche Verlauf der Radialgeschwindigkeitskurve

<sup>10</sup>Diese Amplitude wird in der Literatur auch mit  $K$  angegeben.

in Abhängigkeit von der Planetenposition  $\varphi(t)$  ist von der Exzentrizität  $e$  sowie der Orientierung der großen Halbachse  $\omega$  abhängig. Diese Größen bestimmen über den Zusammenhang  $v_r(\varphi(t)) = v_{r,\max} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-e^2}} \cdot (\cos(\varphi(t) + \omega) + e \cdot \cos(\omega))$  die Form der gemessenen  $v_r(t)$ -Kurve (Scholz, 2014, S. 95). Abbildung 4.7 zeigt eine nahezu sinusförmige  $v_r(t)$ -Kurve von 51 Peg, aus der auf die Existenz von Pegasi-51b ( $m_P \cdot \sin(i) = 0,47 \pm 0,02 M_{Jup}$ ) mit einer Umlaufdauer von ca. 4,2 Tagen geschlossen wurde (Mayor & Queloz, 1995) – die erste Entdeckung mit dieser Methode.

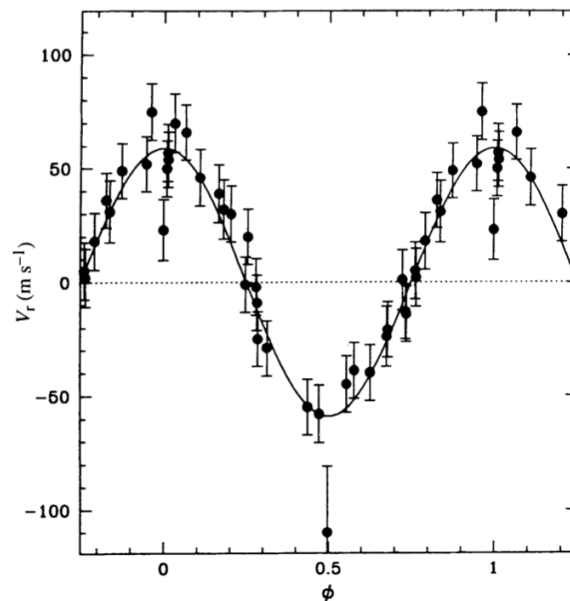


Abbildung 4.7: Originale Darstellung der orbitalen Bewegung von 51 Pegasi, wie sie von Mayor und Queloz (1995, S. 357) erstmals veröffentlicht wurde.

#### 4.5.1 Umsetzung in der Übung

Der Fachinhalt 5 über Methoden zur Suche von Exoplaneten ist der ausgewählte Lerngegenstand, zu dem die Studierenden im Rahmen der Übung Unterricht planen und durchführen. Sie setzen sich daher in insgesamt zwei Übungssitzungen (Einführung und Vertiefung) ausführlich mit den fachwissenschaftlichen Grundlagen (s.o.) auseinander (vgl. Tabelle 4.2). Die Einführungssitzung zählt zur ersten Hauptphase des Lehrkonzepts und ist wie folgt aufgebaut: Nach einer gemeinsamen Besprechung der Hausaufgabe über Jupiters Monde (20 Minuten) beginnt der Einstieg in den Fachinhalt mit einem kurzen, motivierenden Forschungsüberblick (3 Minuten) wie zu Beginn von Kapitel 4.5. Die Übungsleitung präsentiert hierfür eine aktuelle Version von Abbildung 4.4 über bisherige Planetendetektionen. In der anschließenden Erarbeitungsphase (50 Minuten) setzen sich die Studierenden im Selbstlernprozess mit den zwei Suchmethoden auseinander, indem sie Simulationen zur Erkenntnisgewinnung

nutzen. Der Transit wird mit Snap! (Abbildung 4.8) und die  $v_r$ -Methode mit GeoGebra (Abbildung 4.9) simuliert.

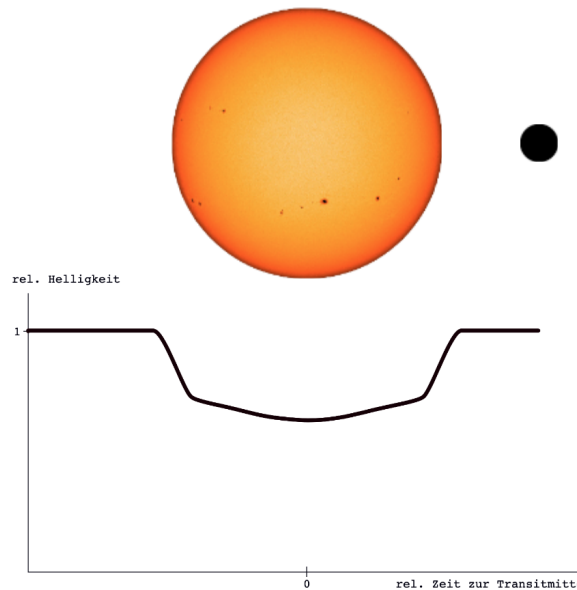


Abbildung 4.8: Screenshot der Oberfläche aus der selbst erstellten Snap!-Simulation zum Transit.

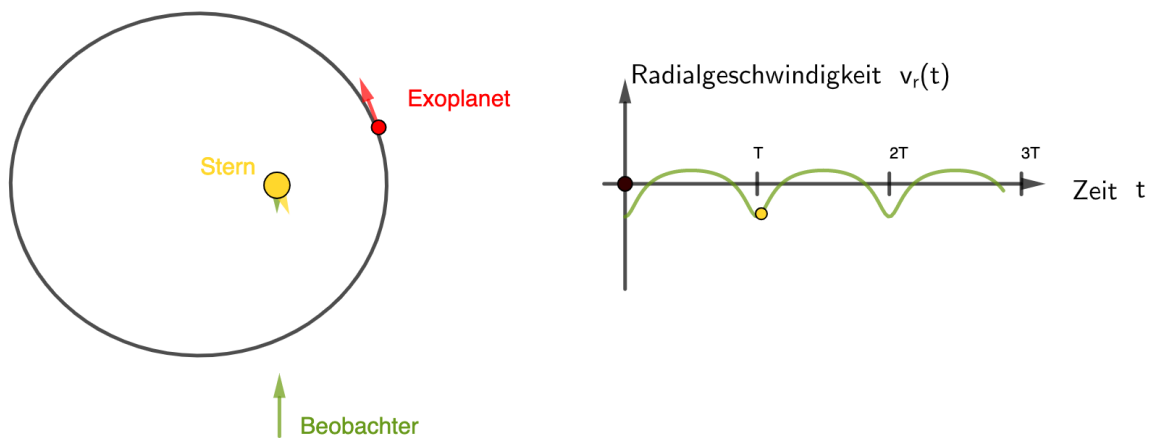


Abbildung 4.9: Screenshot der Oberfläche aus der selbst erstellten GeoGebra-Simulation zur Radialgeschwindigkeitsmethode.

Beide Computersimulationen ermöglichen für Lernende eine Auseinandersetzung mit einem anderweitig schwer zugänglichen, interessanten und gesellschaftsrelevanten Thema. Dabei reduzieren sich die Anwendungen in ihrer Benutzeroberfläche und Handhabung (Pfeiltasten und Schieberegler) auf ein Minimum, um die extrinsische kognitive Belastung gering zu halten und die Lernenden nicht abzulenken (vgl. Tabelle 2.3)<sup>11</sup>. Die synchrone Reprä-

<sup>11</sup>Hierin liegt der größte Unterschied zu vergleichbaren Simulationen aus dem Internet. Das motivierte die eigene Entwicklung von Simulationen.

sensation von Planetenbewegung und Messkurve verlangt eine tiefere, kognitive Auseinandersetzung mit den physikalischen Zusammenhängen, weil Bezüge zwischen den Darstellungen aktiv hergestellt werden müssen (Girwidz, 2013). Die Verwendung von multiplen Repräsentationen hat hierbei insbesondere die Funktion, Beziehungen zwischen zwei Repräsentationen zu vermitteln und die Lernenden zu motivieren, Informationen aus der einen in die andere Darstellung zu übersetzen (Ainsworth, 1999). Ein besonderer Reiz liegt bei der GeoGebra-basierten Simulation zudem in der dynamischen Darstellung von Geschwindigkeitsvektoren, womit ein abstraktes, in der Wirklichkeit unsichtbares Konzept verdeutlicht wird (ebd.). Beide digitalen Anwendungen fungieren als kognitive Werkzeuge, da sie (simulierte) Messwerte direkt auswerten und grafisch darstellen. Zudem bieten sie erkennbaren Handlungsspielraum für einen selbstgesteuerten Lernprozess, da abhängig vom Vorwissen ausgewählte Parameter manipuliert und Modellannahmen zur Randverdunkelung thematisiert werden können (vgl. Tabelle 2.3). Die Funktionsweise der Simulationen ist in GeoGebra und Snap! gut nachvollziehbar, weil der Quellcode jeweils neben der Oberfläche eingeblendet wird<sup>12</sup>. Von den Programmierkenntnissen der Lernenden hängt ab, inwiefern hier weitere Erklärungen nötig sind, um eine Black Box zu vermeiden (vgl. Tabelle 2.3). Die simulierten Daten der Snap!-Anwendung können zudem für eine vertiefte quantitative Auswertung in ein Tabellenkalkulationsprogramm importiert werden – ein Zusammenspiel mit weiteren kognitiven Werkzeugen ist also möglich (vgl. Tabelle 2.3). Schließlich verwenden beide digitalen Anwendungen fachlich korrekte Definitionen, Zusammenhänge und Begriffe.

Während des simulationsbasierten Lernens werden die Studierenden durch Instruktionsmaßnahmen unterstützt, um die kognitive Belastung, die mit einer hohen Interaktivität und Selbstregulierung einhergeht, zu reduzieren (Urhahne & Harms, 2006). In Form von experimenteller Unterstützung erläutert ein kurzer Informationstext zunächst die Funktionen und den Aufbau der Simulationen. Anschließend werden die Lernenden während der Interaktion mit der Simulation in ihrem systematischen Arbeiten unterstützt, indem sie zur physikalischen Erklärung der Simulationsergebnisse motiviert werden (vgl. Zhang et al. (2004)). Im Anhang B sind die eingesetzten Präsenzaufgaben zu finden. Diese Maßnahmen sind eher offen und schlicht, da durch die Simulationen selbst bereits eine implizite Führung erfolgt (vgl. Richtberg und Girwidz (2013)) und die Studierende aus der Vorlesung ein grundlegendes Vorwissen zum Fachinhalt haben. Die Studierenden arbeiten in dieser Phase bereits in den Kleingruppen, in denen später auch das Planen und Durchführen des Unterrichts erfolgt. Das fördert die vertiefte Kommunikation über den Fachinhalt und bietet Unterstützung bei der Erkenntnisgewinnung (Hillmayr et al., 2017). Die Erarbeitungsphase schließt mit einer Instruktion, die zur Reflexion und Einordnung der gewonnenen Erkenntnisse in den Sachzusammenhang motiviert, indem auf die Art von Exoplaneten eingegangen wird, die mit der

<sup>12</sup>Dieser Bereich ist in den Abbildungen 4.8 und 4.9 nicht enthalten.

jeweiligen Methode aufgespürt werden können. Somit zielt diese Phase auf das Erreichen der vorab definierten Lernziele (vgl. Kapitel A) in einer konstruktivistisch gestalteten Lernumgebung ab. Die anschließende Ergebnissicherung (10 Minuten) im Plenum dient zunächst nur zur Klärung von fachinhaltlichen Fragen sowie Problemen im Umgang mit den digitalen Werkzeugen. Die restliche Übungssitzung wird zur ersten Organisation der LLL-Besuche genutzt. Die Studierenden setzen sich in einer weiteren Ergebnissicherung daraufhin als Hausaufgabe ausführlich und selbstständig mit dem Fachinhalt auseinander, indem sie eine Sachanalyse (vgl. Abbildung 4.3) zur ausgewählten Suchmethode aus ihrer Unterrichtseinheit anfertigen. Diese wird im Einstieg (10 Minuten) der zweiten Übungssitzung besprochen, indem gemeinsam im Plenum Quizfragen zur Wiederholung des Fachinhalts gelöst werden und so ein Rückbezug zur ersten Übungssitzung hergestellt wird. Hierfür wird Kahoot!<sup>13</sup> verwendet, eine spielbasierte Lernplattform, die sich positiv auf die Lernleistung und die Dynamik einer Lehr-Lern-Situation auswirken kann (A. I. Wang & Tahir, 2020). Die damit einhergehende Aktivität der Studierenden kann sich auch aus einer lerntheoretischen Sicht positiv auf den Lernzuwachs auswirken (vgl. ICAP-Rahmen (Chi & Wylie, 2014)). Die anschließende Erarbeitung (15 Minuten) und Sicherung (5 Minute) sind mit dem Lernziel verknüpft, beide Suchmethoden zu kombinieren, um Aussagen über die mittlere Dichte von Exoplaneten zu treffen. Die Studierenden erhalten Messdaten aus Transit- und  $v_r$ -Beobachtungen unterschiedlicher Exoplaneten in digitaler Form, aus denen sie dessen Radius (Gleichung 1) und Masse (Gleichung 3) bestimmen. Als Endprodukt werden die berechneten Größen in ein gemeinsames Masse-Radius-Diagramm wie das in Abbildung 4.5 eingetragen, um im Plenum Aussagen über die mittlere Dichte zu diskutieren. Das Tabellenkalkulationsprogramm kommt hier als kognitiv entlastendes Werkzeug zum Einsatz und erleichtert die Datenverarbeitung (Jonassen, 1995). In der Vertiefungsphase (30 Minuten) setzen sich die Studierenden mit dem wissenschaftlichen Erkenntnisweg der Exoplanetensuche auseinander und erweitern so ihr physikalisches Wissen. Zunächst dient ein Input-Vortrag (10 Minuten) zur Einführung in astrophysikspezifische Datenbanken für Exoplaneten (NASA Exoplanet Archive, Exo.Mast und DACE)<sup>14</sup>. Hier können originale Messdaten recherchiert und unterschiedliche Plots (vgl. Abbildungen 4.4, 4.5, 4.6) erzeugt werden. Anschließend vollziehen sie den astrophysikalischen Erkenntnisweg nach, der sich von einer astronomischen Beobachtung und Datenaufnahme (ein Bild) hin zu einer Lichtkurve, deren Daten quantitativ ausgewertet werden können, entwickelt. Die einzelnen Schritte können aufbauend auf dem JS9-Tool der NASA (Matilsky, 2020) über die JS9 Exoplanet Activity<sup>15</sup> selbstständig durchlaufen

<sup>13</sup>Homepage von Kahoot!: <https://kahoot.com/>

<sup>14</sup>Datenbanken für Exoplaneten: Homepage von NASA Exoplanet Archive: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>; Homepage von Exo.MAST: <https://exo.mast.stsci.edu/>; Homepage von DACE: <https://dace.unige.ch/dashboard/>

<sup>15</sup>Homepage von JS9 Exoplanet Activity: <https://afh.sonoma.edu/js9-exoplanet-activity/>

werden. Die online-Lernumgebung umfasst eine thematische Einführung sowie technische Anleitung für das interaktive Tool – eine Form der instruktionalen Unterstützung (vgl. Urhahne und Harms (2006)). Die Lernenden werden folglich implizit durch den Lernprozess geführt und weitere Instruktionen sind an dieser Stelle nicht nötig. Die Auswertung von Originaldaten sorgt hier für eine besonders authentische Lernumgebung, in der träges Wissen vermieden und situiertes Lernen gefördert werden kann (vgl. Girwitz (2015), Herrington und Oliver (2000)). Die zweite Übungssitzung schließt mit den ersten Schritten zur Unterrichtsplanung, wobei die Studierenden in Kleingruppen nach geeigneten digitalen Anwendungen recherchieren und erste inhaltliche Schwerpunkte festlegen. In Tabelle 4.5 wird die beschrie-

Tabelle 4.5: Umsetzung von Fachinhalt 5 zu *Exoplaneten* in je einer Übungssitzungen während der Einführungsphase (grün) und der Vertiefungsphase (gelb).

Phase	Zeit	Inhalt	Methode, Material
<b>EINFÜHRUNG</b>			
Einstieg	3 min	Motivation: Forschungsüberblick	Plenum, Abbildung 4.4
Erarbeitung	50 min	physikalische Zusammenhänge bei Suchmethoden von Exoplaneten	simulationsbasiertes Lernen in Kleingruppen, 2 Simulationen, Instruktionen
Sicherung 1	10 min	Verständnisfragen, Probleme	Plenum
Sicherung 2	Hausaufgabe	Sachanalyse zur Suchmethode von Exoplaneten	Kleingruppen
<b>VERTIEFUNG</b>			
Einstieg	10 min	Wiederholung, Besprechung der Hausaufgaben	Plenum, Quizfragen
Erarbeitung	15 min	Mittlere Dichte: Kombination beider Suchmethoden	Plenum/ Einzelarbeit, Datensatz, gemeinsames Diagramm, Tabellenkalkulation
Sicherung	5 min	Verständnisfragen, Probleme, Ergebnisse	Plenum
Vertiefung	30 min	Wissenschaftlicher Erkenntnisweg: Datenbanken für Exoplaneten; vom Bild zur Lichtkurve	Plenum, Input-Vortrag, Kleingruppen, JS9 Exoplanet Activity
Praxis	30 min	Unterrichtsplanung: Recherche, Ideen	Kleingruppen

bene Umsetzung von Fachinhalt 5 abschließend zusammengefasst. Die hiermit verbundenen Lernziele (Kapitel A) können durch diese zwei Übungssitzungen erreicht werden. Die Studierenden profitieren dabei vom Einsatz unterschiedlicher digitaler Werkzeuge und können

so ihre digitalen Kompetenzen erweitern (insbesondere dK13, dK14, dK16, dK17).

#### 4.5.2 Umsetzung im schulischen Kontext

Im Rahmen der Übung bieten die Studierenden für Oberstufenschüler:innen aus der Region einen halbtägigen Kurs zum Thema Exoplanetensuche an. Dieser beginnt mit einer Einführung und Motivation in das Thema (15 Minuten). Es folgen die Einheiten zur Transit- und Radialgeschwindigkeitsmethode (je 90 Minuten) und der Kurs schließt mit einer Zusammenführung der beiden Methoden über das Masse-Radius-Diagramm und einer Zusammenfassung der Erkenntnisse (15 Minuten). Zwischen den Phasen liegen jeweils kurze Pausen. Der LLL-Kurs setzt kein astrophysikalisches Wissen voraus und unbekannte Fachbegriffe (z.B. Exoplanet) werden zuvor gemeinsam geklärt. Mit beiden Unterrichtseinheiten kann an curriculare Vorgaben aus dem Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe angeknüpft werden: In der Einführungsphase befassen sich die Schüler:innen im Bereich der Dynamik mit gleichförmigen Kreisbewegungen. Sie beschreiben diese mit Fachbegriffen (Umlaufdauer, Bahngeschwindigkeit und Zentripetalbeschleunigung) und können die Newtonschen Axiome beschreiben (Niedersächsisches Kultusministerium (Hrsg.), 2017). Darauf aufbauend wird die Planetenbewegung im LLL-Kurs als Kreisbewegung angenommen und die Keplerschen Gesetze werden auf das Newtonsche Gravitationsgesetz zurückgeführt. Der LLL-Kurs dient also zur Vertiefung von Kreisbewegungen in einem astrophysikalischen Kontext und kann daher bereits in der Einführungsphase belegt werden. Zudem werden im Kurs Bezüge zum Bereich Bewegung, Masse und Kraft aus dem Doppeljahrgang 7/8 hergestellt, indem die Bewegungsänderung der Himmelskörper als Resultat von wirkenden Kräften verstanden wird (Niedersächsisches Kultusministerium (Hrsg.), 2015). Die Transitmethode knüpft zudem an das Vorwissen der Schüler:innen aus dem Schuljahrgang 6 an, wo im Themenbereich der phänomentorientierten Optik die Finsternisse diskutiert werden (Niedersächsisches Kultusministerium (Hrsg.), 2015). Das Phänomen kann den Schüler:innen darüber hinaus aus dem Alltag bekannt sein (Sonnenfinsternis). Mit der  $v_r$ -Methode wird die Geschwindigkeit als gerichtete Größe dargestellt und in Komponenten zerlegt, was die Schüler:innen für Kräfte schon aus der Mechanik kennen (Doppeljahrgang 7/8) (Niedersächsisches Kultusministerium (Hrsg.), 2015). Diese Einheit kann abhängig von der Lerngruppe auch weiterführende Inhalte wie den Dopplereffekt, den Wellencharakter von Licht oder Spektrallinien aufgreifen und so an inhaltsbezogene Kompetenzen der Qualifikationsphase anschließen (Niedersächsisches Kultusministerium (Hrsg.), 2017). Für den gesamten Kurs können unterschiedliche Schülervorstellungen zur Kreisbewegung und Geschwindigkeit (Schecker & Wilhelm, 2018), zu optischen Phänomenen wie Farbe und Schatten (Haagen-Schützenhöfer & Hopf, 2018) oder zu Sternen (Hopf & Schecker, 2018) relevant werden, die gezielt aufgegriffen werden können. Die Schüler:innen können im Kurs aber nicht nur inhaltsbezogene, sondern



auch prozessbezogene Kompetenzen insbesondere im Bereich Erkenntnisgewinnung erlangen, indem sie Hypothesen formulieren und prüfen, mit Modellen arbeiten und den wissenschaftlichen Erkenntnisweg beschreiben. Umgesetzt werden die Lehr-Lern-Einheiten mit dem Einsatz von Computern u. a. zum Arbeiten mit Simulationen, wodurch der LLL-Kurs einen Beitrag zur Auseinandersetzung mit modernen Medien im Physikunterricht leistet (vgl. Niedersächsisches Kultusministerium (Hrsg.) (2017)). Pandemiebedingt findet der Kurs online per Videokonferenz statt.

## 4.6 Fachinhalt 8: HR-Diagramm und Sternentwicklung

Das Hertzsprung-Russell-Diagramm (HR-Diagramm oder HRD) ist nach den Astronomen Ejnar Hertzsprung (1873-1967) und Henry Norris Russell (1877-1957) benannt, die zunächst unabhängig voneinander erste Versionen dieses Diagramms veröffentlichten (Hertzsprung, 1911; Russell, 1914). Das HRD enthält Informationen über die zentralen Zusammenhänge zwischen Sternparametern und zählt aufgrund seiner Aussagekraft und Informationsdichte zu den gebräuchtesten und wichtigsten Werkzeugen der stellaren Astrophysik (Airey & Eriksson, 2019; Scholz, 2018). In einem typischen HRD (Abbildung 4.10) sind auf der doppelt besetzten Abszisse die Spektralklasse sowie die effektive Temperatur [Kelvin] aufgetragen. Die doppelt besetzte Ordinate enthält die absolute Helligkeit bzw. Magnitude [mag] sowie die Leuchtkraft in Einheiten der Sonnenleuchtkraft [ $L_{\odot}$ ] (Scholz, 2018). Die eingefärbte Fläche im Inneren des Diagramms gibt die Sternfarbe an. Die grauen Bereiche repräsentieren ausgewählte Leuchtkraftklassen.

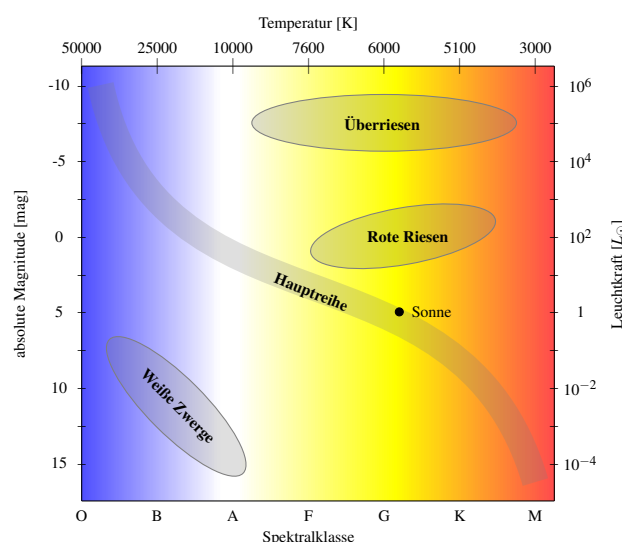


Abbildung 4.10: Typische Darstellung eines Hertzsprung-Russell-Diagramms (eigene Darstellung nach Langendorf, Schneider und Klein (2022)).

Im 19. Jahrhundert lieferte die Wissenschaft erste Beiträge, die zu dem heute gebräuch-

lichen HRD führten. So gilt die Spektralklasse mittlerweile als ein historisch begründetes Maß für Temperatursequenzen und die Stärke der Balmer-Linien. Zunächst bezog sich diese Klassifikation aber nur auf die Wasserstoff-Linien, die bei A-Sternen am stärksten ausgeprägt sind und deren Stärke über B- bis zu M-Sternen alphabetisch abnimmt (Pickering, 1887). Diese erste Klassifikation von Sternspektren geht auf Henry Draper zurück (Draper, 1879). Seine Arbeit, die im Henry-Draper-Katalog festgehalten ist, wurde von Annie Jump Cannon und Edward Pickering fortgeführt. Beide erkannten einen Zusammenhang der Sternspektren mit der Temperatur und sortierten die Reihenfolge der Klassen von heißen O- und B-Sternen bis zu kalten M-Sternen um (vgl. Abbildung 4.10) – die heute noch gebräuchliche Harvard-Klassifikation (Cannon & Pickering, 1918; Scholz, 2018). Dieser Zusammenhang wird im HRD direkt veranschaulicht, indem Spektralklasse und Temperatur jeweils auf der Abszisse aufgetragen sind. Die effektive Temperatur kann zudem näherungsweise über die Sternfarbe dargestellt bzw. mit dem Farbindex ( $B - V$ ) angegeben werden. Letzterer ist die temperaturabhängige Helligkeitsdifferenz  $M_B - M_V$  der Sterne gemessen im blauen (B) und visuellen (V) Spektralbereich (ebd.). Darüber hinaus besteht ein Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Leuchtkraft  $L$  eines Sterns, welche dessen emittierte Strahlungsleistung angibt. Für einen nicht idealen Schwarzkörper wie Sterne hängt die abgestrahlte Leistung neben der effektiven Temperatur  $T_{\text{eff}}$  auch vom Radius  $R$  des Sterns bzw. dessen Kugeloberfläche  $4\pi R^2$  ab und es gilt (Scholz, 2018, S. 77):

$$L = 4\pi R^2 \cdot \sigma T_{\text{eff}}^4 \quad (4)$$

Durch Logarithmieren dieser Gleichung zu  $\log(L) = 4\log(T_{\text{eff}}) + \log(4\pi R^2 \sigma)$  wird deutlich, dass im HRD Linien von konstantem Radius als parallele Geraden eingetragen werden können. Der Radius nimmt im Diagramm von unten links nach oben rechts zu (vgl. Scholz (2018, S. 190)). Auf der Ordinate ist neben der Leuchtkraft die absolute Magnitude aufgetragen, die ein historisch begründetes Maß für die Leuchtkraft ist (Scholz, 2018, S. 65). Die absolute Helligkeit bzw. Magnitude  $M$  gibt die scheinbare Helligkeit  $m$  eines Sterns in 10 pc Entfernung an.

$$M = M_{\odot} - 2,5 \log \left( \frac{L}{L_{\odot}} \right) \quad (5)$$

Ursprünglich wurde dem hellsten Stern am Nachthimmel die Helligkeit 1 mag zugeordnet und ein Stern, der mit bloßem Auge gerade noch sichtbar war, entsprach 6 mag. Mit der Entwicklung von Teleskopen wurden Sterne sichtbar, die weitaus dunkler als 6 mag sind, was zu einer Erweiterung dieser Skala führte (Miles, 2007). Gleichermaßen wurde die Skala für besonders helle Sterne mit negativen Werten kleiner als 1 mag erweitert.

Die Einteilung der Sterne in Leuchtkraftklassen gleicht folglich einer Einteilung nach der

absoluten Helligkeit (vgl. Gleichung 5). Abhängig vom Radius werden Sterne grob in Zwerge, Riesen und Überriesen unterschieden. Hertzsprung und Russell erkannten bereits 1913, dass Sterne in einem derartigen Diagramm (Abbildung 4.10) nicht gleichmäßig verteilt sind, sondern sich in konkreten Parameterbereichen häufen. Auffallend ist hier die Hauptreihe, die im Diagramm von rechts unten nach links oben verläuft. Sterne der Hauptreihe können sich folglich hinsichtlich ihrer Leuchtkraft und Temperatur stark unterscheiden. Hier gilt die Masse-Leuchtkraft-Beziehung  $L \sim M^3$ , die Masse nimmt entlang der steigenden Hauptreihe zu (Scholz, 2018). Das HR-Diagramm wird auch zur Darstellung der Sternentwicklung genutzt. Das Leben eines Sterns beginnt auf der Hauptreihe und abhängig von der Masse sowie der chemischen Zusammensetzung (Metallizität) ist sein weiterer Weg im Diagramm vorbestimmt. Sterne mit geringer Masse verweilen mit ca.  $10^{10}$  Jahren am längsten auf der Hauptreihe (ebd.) – vorausgesetzt, sie haben eine Mindestmasse von  $0,1 M_{\odot}$ , um Wasserstoffbrennen überhaupt zu ermöglichen (Unsöld & Baschek, 2002). Bei massereichen Sternen wird dann Energie über den CNO-Zyklus erzeugt, bei massearmen Sternen über den pp-Prozess. Die folgenden Brennphasen (Helium, Kohlenstoff, usw.) verlaufen kürzer und bei höheren Temperaturen. Sterne verlassen die Hauptreihe und werden zu roten Riesen und anschließend zu Überriesen. Durch die Verlagerung der Brennzonen vom Kern nach Außen bläht sich ein Stern auf. Mit einem starken Masse- und Energieverlust geht das Endstadium der Sterne einher: Massereiche Sterne mit mehr als  $8M_{\odot}$  enden als Schwarzes Loch oder Neutronenstern, massearme Sterne werden zum weißen Zwerg. Trägt man offene Sternhaufen in das HR-Diagramm ein, kann ihr Alter aufbauend auf den Modellen zur Sternentwicklung aus deren Struktur und insbesondere über den Abbiegepunkt der Hauptreihe geschätzt werden (ebd.). Vereinfacht gilt also: Je älter der Sternhaufen, desto weniger Sterne befinden sich noch auf der Hauptreihe und desto masseärmer sind die Sterne, die sich dort noch befinden.

#### 4.6.1 Umsetzung in der Übung

Fachinhalt 8 adressiert mit dem Hertzsprung-Russell-Diagramm elementare astrophysikalische Zusammenhänge, die für das Verstehen vom Sternaufbau und der Sternentwicklung essenziell sind. Das HR-Diagramm gilt für die Fachdisziplin als verbreitetes und mächtiges Werkzeug (Airey & Eriksson, 2019) und ist daher auch ein üblicher Bestandteil in universitären Lehrveranstaltungen zur Astronomie und Astrophysik (Brogt, 2009). Das motiviert das Aufgreifen dieses Fachinhalts in einer Übungssitzung (vgl. Tabelle 4.6). Im Einstieg der Sitzung (3 Minuten) werden unterschiedliche Darstellungen des HR-Diagramms gezeigt, um auf den verbreiteten Nutzen dieses Diagramms in der Astrophysik aufmerksam zu machen und eine detaillierte Auseinandersetzung hiermit zu motivieren. Es folgt die erste Erarbeitungsphase (30 Minuten), in der die Studierenden zunächst ein HRD wie in Abbildung 4.10

Tabelle 4.6: Umsetzung von Fachinhalt 8 zum HR-Diagramm und der Sternentwicklung in einer Übungssitzung.

Phase	Zeit	Inhalt	Methode, Material
Einstieg	3 min	Motivation: vielseitige Darstellungen des HRDs	Plenum, HRD-Abbildungen
Erarbeitung 1	30 min	physikalische Zusammenhänge im HRD	simulationsbasiertes Lernen in Kleingruppen, Simulation, Instruktionen
Sicherung 1	15 min	Verständnisfragen, Probleme	Plenum
Erarbeitung 2	30 min	Sternentwicklung im HRD	simulationsbasiertes Lernen in Kleingruppen, Simulation, Instruktionen
Sicherung 2	12 min	Verständnisfragen, Probleme, Alter eines Sternhaufens	Plenum, HRD-Abbildungen von Sternhaufen

beschreiben, indem sie auf die aufgetragenen physikalischen Größen sowie die Lage der Leuchtkraftklassen eingehen (vgl. Anhang B, Präsenzaufgaben). Anschließend dient eine dynamische und interaktive Darstellung des Diagramms dazu, zentrale Informationen zu entnehmen und physikalische Zusammenhänge zu untersuchen. Die Simulation wird von der Arbeitsgruppe *Astronomy Education at the University of Nebraska-Lincoln* als Browseranwendung zur Verfügung gestellt<sup>16</sup>. Das darin enthaltene HRD zeigt die Temperatur, die Leuchtkraft und den Radius eines Sterns (s. Abbildung 4.11). Auf der Hauptreihe ist die Sonne als Referenzstern zu finden und ein weiterer Stern kann dynamisch durch das Diagramm bewegt werden, wobei sich die Sternfarbe sowie sein Radius optisch an die Position im Diagramm anpassen. Die Simulation ist intuitiv und auf das Wesentliche reduziert, um nicht abzulenken und zu keiner unnötigen kognitiven Belastung zu führen. Die Studierenden können hier den Zusammenhang zwischen Leuchtkraft, Temperatur, Radius und Farbe durch gezieltes Variieren von Sternparametern untersuchen, wie es durch kein Experiment realisierbar wäre. Dies ermöglicht eine interaktive Auseinandersetzung mit den Zusammenhängen, die durch das Stefan-Boltzmann-Gesetz quantitativ beschrieben werden (vgl. Gleichung 4), und bildet die Basis für eine erfolgreiche Beschreibung der Sternentwicklung. Das simulationsbasierte Lernen wird von Instruktionen zur experimentellen Unterstützung begleitet (vgl. Zhang et al. (2004)) und stellt eine sinnvolle Ergänzung zum vorherigen analogen Lernprozess mit der Abbildung eines HR-Diagramms dar (vgl. Tabelle 2.3). Bevor aber in einer zweiten Erarbeitungsphase die Sternentwicklung im HRD aufgegriffen wird, erfolgt eine erste Sicherung (15 Minuten) der Ergebnisse der Erarbeitungsphase 1, um das voraus-

<sup>16</sup>Simulation *The Hertzsprung-Russell Diagram* zugänglich unter: <https://astro.unl.edu/mobile/HRdiagram/HRdiagramStable.html>, aktuelle Stand: Mai 2022

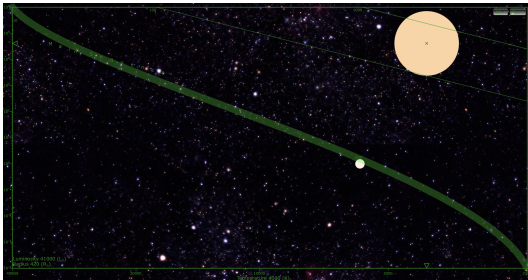


Abbildung 4.11: Screenshot der eingesetzten Simulation zum Hertzsprung-Russell-Diagramm in der Erarbeitungsphase 1.

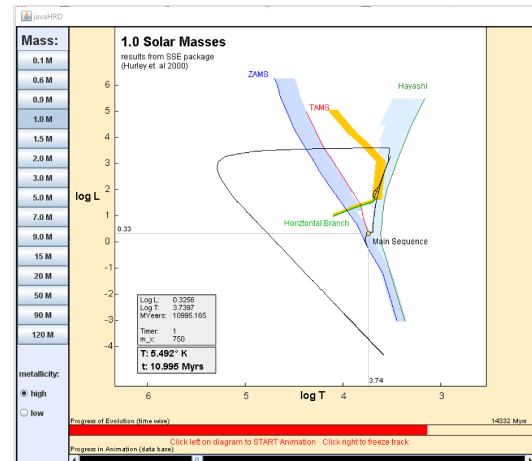


Abbildung 4.12: Screenshot der eingesetzten Simulation zur Sternentwicklung in der Erarbeitungsphase 2.

setzende Basiswissen über das Diagramm sowie die Sternparameter bei den Studierenden sicherzustellen.

In der zweiten Erarbeitungsphase (30 Minuten) wird eine Simulation von Ziegler (2006) eingesetzt, um die Sternentwicklung zu untersuchen. Auch in dieser Phase profitieren die Studierenden vom Austausch in Kleingruppen (vgl. Tabelle 2.3). Die eingesetzte Desktopanwendung steht zum Download zur freien Verfügung<sup>17</sup>. Hier können Zusammenhänge zwischen der Ausgangsmasse von Sternen und deren Entwicklungsphasen sowie Entwicklungszeiten untersucht werden (s. Abbildung 4.12). Die multimediale Anwendung zeichnet sich durch eine hohe Interaktivität, flexible Einsatzmöglichkeiten, sowie eine übersichtliche Darstellung der zentralen Lerninhalte aus. Ein großer Vorteil gegenüber statischen und analogen Darstellungsformen liegt offensichtlich in der dynamischen Veranschaulichung der zeitlichen Entwicklungen im Diagramm (Ziegler, 2006), was den Einsatz dieser Simulation im Lernprozess didaktisch begründet. In der Sicherungsphase wenden die Studierenden ihr erworbenes Wissen über die Sternentwicklung an, um das Alter zweier Sternhaufen im HRD zu vergleichen (12 Minuten). Somit können die mit diesem Fachinhalt verbundenen Lernziele (vgl. Kapitel A) in dieser Übungssitzung adressiert werden. Darüber hinaus werden die digitalen Kompetenzen der Studierenden erweitert (insbesondere dK4, dK18).

<sup>17</sup>Simulation *javaHRD* von Ziegler (2006) zugänglich unter: <https://astro.uni-bonn.de/~javahrd/>, aktueller Stand: Mai 2022

## 5 Forschungsfragen und Methoden

Diese Arbeit ist mit dem Ziel verbunden, einen Beitrag zur digitalisierungsbezogenen Professionalisierung von Physik-Lehramtsstudierenden zu leisten, indem diese an einer innovativen Lehrveranstaltung teilnehmen. Gerahmt durch einen DBR-Ansatz wurden quantitative und qualitative Forschungsmethoden in einem Multi-Method-Design genutzt, um die Wirkung der Lehrveranstaltung empirisch zu untersuchen. Dies sollte die forschungsbasierte, langfristige Optimierung des Lehrkonzepts gewährleisten. Hierbei wurde folgenden Forschungsfragen nachgegangen:

**FF1** *Wie entwickeln sich die digitalen Kompetenzen der Studierenden (erhoben mit einer retrospektiven TPACK-Selbsteinschätzung) im Laufe der Lehrveranstaltung?*

**FF2** *Wie entwickelt sich die Einstellung der Studierenden gegenüber dem Lernen mit digitalen Medien (erhoben mit einer Rating-Skala) im Laufe der Lehrveranstaltung?*

**FF3** *Wie evaluieren die Studierenden die Lehrveranstaltung (berichtete Stärken und Schwächen im Interview)?*

**FF3.1** *Wie nehmen die Studierenden die Authentizität der Lehrveranstaltung (erhoben mit einer Rating-Skala) wahr?*

Folgende Hypothesen wurden aufbauend auf der beschriebenen Literatur (Teil II) zu diesen Forschungsfragen formuliert:

**H1** Die Studierenden schätzen ihre digitalen Kompetenzen (TPACK) vor der Lehrveranstaltung als eher gering ein und es wird erwartet, dass diese Einschätzung mit fortlaufender Teilnahme zunimmt (vgl. Endberg (2019), Schiefner-Rohs (2012)).

**H2** Die fortlaufende Teilnahme an der Lehrveranstaltung wirkt sich positiv auf die Einstellung der Studierenden gegenüber dem Lernen mit digitalen Medien im Physikunterricht aus (vgl. Vogelsang et al. (2019)).

Für die dritte Forschungsfrage wurde keine Hypothese formuliert, da für den ersten Forschungszyklus diesbezüglich eine explorative Untersuchung geplant war.

### 5.1 Forschungsdesign

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurde ein Multi-Method-Ansatz mit drei quantitativen Erhebungszeitpunkten (Prä-, Mid-, Posttest) sowie einer daran anschließenden qualitativen Erhebung gewählt. Abbildung 5.1 veranschaulicht dieses Vorgehen. Im Prätest wurde die Einstellung der Studierenden vor Beginn der Intervention erhoben. Zudem machten die Studierenden hier demographische Angaben. Im Midtest (nach etwa der Hälfte der In-

tervention) und im Posttest (nach der vollständigen Intervention) wurde die Einstellung erneut erhoben. Die digitalen Kompetenzen wurden über eine retrospektive Selbsteinschätzung der TPACK-Komponenten ermittelt. Im Mid- und Posttest wurden demnach jeweils (a) die Selbsteinschätzung zum jetzigen Zeitpunkt, also während (Prätest) oder nach der Intervention (Posttest), sowie (b) die retrospektive Selbsteinschätzung für einen früheren Zeitpunkt, also vor der Intervention, erfragt. Somit war eine zusätzliche dritte Erhebung im Prätest nicht nötig. Mit diesem retrospektiven Ansatz sollte einer Änderung der individuellen Bezugsnorm (sog. Response Shift Bias), die mit einer Erweiterung der eigenen Kompetenzen einhergeht, entgegengewirkt werden (Bhanji, Gottesman, de Grave, Steinert & Winer, 2012). Desweiteren beinhaltete der Posttest eine Skala zur Authentizität der Intervention. Das Forschungsdesign entspricht einem Within-Subject-Design ohne Kontrollgruppe. Ein Manipulation Check im Posttest diente dazu, der fehlenden Kontrollgruppe entgegenzuwirken (für nähere Informationen siehe Kapitel 5.2). Im Anschluss an die 13-wöchige Intervention, d.h. an die entwickelte Lehrveranstaltung, wurden in der vorlesungsfreien Zeit leitfadengestützte Interviews als qualitative Forschungsmethode eingesetzt (s. Kapitel 5.3). Im Folgenden werden die eingesetzten quantitativen Instrumente sowie das genutzte Material der qualitativen Erhebung vorgestellt.

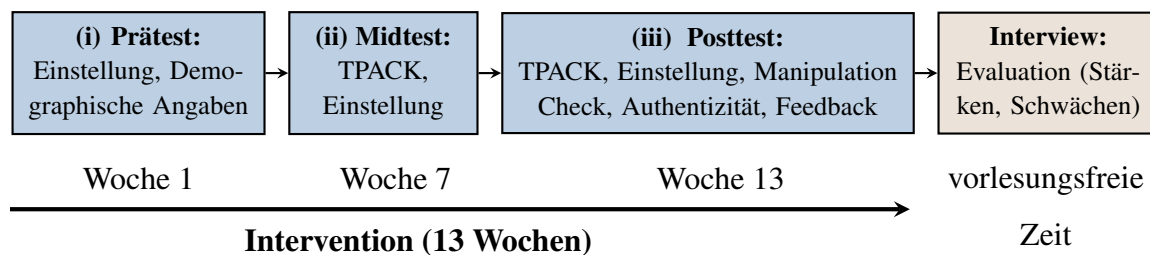


Abbildung 5.1: Darstellung des Forschungsdesigns bestehend aus drei Messzeitpunkten mit quantitativen Erhebungen (blau) während der 13-wöchigen Intervention und einer qualitativen Erhebung nach der Intervention in der vorlesungsfreien Zeit (verändert nach Langendorf, Schneider und Hessman 2022).

## 5.2 Quantitative Erhebung und Analyse

Die quantitative Erhebung setzte sich aus drei Fragebögen (Prä-, Mid, Posttest) zusammen, die jeweils zwischen fünf und fünfzehn Minuten in Anspruch nahmen und online durchgeführt wurden. Die Studierenden erhielten hierfür zu Beginn der jeweiligen Übungssitzung einen Zugang per QR-Code oder Link. In Tabelle 5.1 werden die eingesetzten Skalen zur Einstellung (FF2) und den digitalen Kompetenzen (FF1) zusammengefasst. Hier wird jeweils nur ein Beispielitem vorgestellt, während die vollständigen Skalen im Anhang C zu finden sind. Die Skala zur Einstellung gegenüber dem Lernen mit digitalen Medien wurde

Tabelle 5.1: Auflistung der mehrfach eingesetzten Skalen zur Einstellung gegenüber dem Lernen mit digitalen Medien (FF2), den technologiebezogenen TPACK-Komponenten (FF1) und der Authentizität der Lehrveranstaltung (FF3.1). Letztere wird in fachwissenschaftlich (FW) und fachdidaktisch (FD) unterschieden. Als Maß der internen Konsistenz wird das über die Erhebungszeitpunkte gemittelte Cronbach's  $\alpha$  angegeben.

Skala	Items	Beispiel	$\alpha$
Einstellung	8	Digitale Medien erlauben eine höhere Schüleraktivierung.	.55 (.86)
TPACK	5	Ich kann Unterricht so gestalten, dass die physikalischen Inhalte, die eingesetzten digitalen Medien und angewandten Lehrmethoden angemessen kombiniert werden.	.86
TCK	1	Ich kenne mich mit digitalen Medien aus, die ich für das Verständnis und die Auseinandersetzung mit den physikalischen Inhalten nutzen kann.	–
TPK	5	Ich kann digitale Medien auswählen, die helfen, die Lernprozesse der Schüler:innen in einer Unterrichtsstunde zu verbessern.	.70
TK	7	Ich besitze die nötigen technischen Fähigkeiten, um digitale Medien zu nutzen.	.87
Authentizität (FW)	4	Die thematisierten Fachinhalte sind für die aktuelle Forschung zur Astrophysik von Relevanz	.75
Authentizität (FD)	4	Meine Tätigkeiten orientierten sich an Anforderungen, die auch an eine ausgebildete Lehrkraft gestellt werden.	.75

unverändert von Vogelsang et al. (2019) adaptiert. Sie besteht aus acht Items und wurde von diesen in einer Studie mit über 600 Lehramtsstudierenden mit einem naturwissenschaftlichen Fach eingesetzt, wobei eine hohe interne Konsistenz (Cronbach's  $\alpha = .83$ ) festgestellt wurde (ebd.). Beim Einsatz der Skala in dieser Studie wurde hingegen eine geringe interne Konsistenz von  $\alpha = .55$  festgestellt. Dessen Ursache wurde in der homogenen und kleinen Stichprobe dieser Studie erwartet, weshalb die Skala zusätzlich unter 73 Lehramtsstudierenden (M.Ed.) beliebiger Fächerkombinationen eingesetzt wurde. Hier ergab sich mit einem Wert von  $\alpha = .86$  eine ähnliche interne Konsistenz wie bei Vogelsang et al. (2019). Dieses Messinstrument wird daher nicht verworfen, wengleich die geringe interne Konsistenz in diesem Fall bei der Ergebnisinterpretation Beachtung finden wird.

Die digitalen Kompetenzen wurden anhand der technologiebezogenen TPACK-Komponenten TPACK, TCK, TPK und TK untersucht. Diese vier Skalen sind Teil eines reliablen und validen Instruments von Schmidt et al. (2009), welches für angehende Lehrkräfte zur Selbsteinschätzung ihres Professionswissens dient. Die Items sind auf Englisch formuliert und in direkter Anlehnung an das TPACK-Modell von Mishra und Koehler (2006) entstanden (siehe Kapitel 3.1.1). Die TK- und TPK-Skalen wurden unverändert übernommen. Die TCK- und TPACK-Skalen wurden um jeweils drei Items reduziert, da hier im Gegensatz zur



Erhebung von Schmidt et al. (2009) mit Physik (im Original *Science*) nur eine Fächergruppe von Interesse war und drei Fächergruppen (im Original *Literacy, Mathematics* und *Social Studies*) irrelevant waren. Insgesamt sechs Items im Zusammenhang mit diesen drei Fächergruppen wurden demnach entfernt. Der Fragebogen wurde auf Deutsch eingesetzt, wobei die Übersetzung der englischen Items von Endberg (2019) übernommen wurde. Alle TPACK-Skalen mit mehr als einem Item zeigten in dieser Studie gute oder akzeptable Werte für die interne Konsistenz ( $\alpha \geq .70$ ) und werden in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Die Authentizität der Lehrveranstaltung wurde separat für deren fachwissenschaftlichen (FW) und fachdidaktischen (FD) Anteil betrachtet. Den eingesetzten Skalen liegt das Verständnis zugrunde, dass sich eine authentische Lernsituation durch eine starke Parallele zur zukünftigen Anwendungssituation auszeichnet (Honebein, Duffy & Fishman, 1993). Zur Erhebung der fachdidaktischen Authentizität wurde das Instrument von Nachtigall, Rummel und Serova (2018), das sie zur Untersuchung von unterschiedlichen Konzepten zur authentischen Wissenschaftsvermittlung in einem Schülerlabor nutzten, adaptiert und verändert. Ihre Skala zur *Form der Aufgaben* besteht aus vier Items und wurde so angepasst, dass sich diese allgemeiner auf *Tätigkeiten* anstatt ausschließlich auf *Aufgaben* bezogen. Darüber hinaus bezogen sich die umformulierten Items auf den Beruf einer *Lehrkraft* und nicht wie ursprünglich auf die *Wissenschaft*. So wurde in den Items gezielt die Parallelisierung zwischen den eigenen Handlungen der Studierenden im Rahmen der Lehrveranstaltung und den Anforderungen des zukünftigen Arbeitsfeldes als Lehrkraft adressiert. Die Skala zeigte eine akzeptable Reliabilität ( $\alpha = .75$ ). Darüber hinaus zielte die Skala zur fachwissenschaftlichen Authentizität analog auf die Parallelisierung zwischen astrophysikalischem Fachinhalt und Wissenschaft/ Forschung ab. Sie bestand aus vier selbst formulierten Items ( $\alpha = .75$ ), in denen die zentralen und kennzeichnenden Eigenschaften der Astrophysik aufgegriffen wurden (aktuelle Relevanz, historisch bedeutsame Erkenntnisse, Bezug zur klassischen Physik und moderne Methoden zur Erkenntnisgewinnung). Ein Beispielitem ist in Tabelle 5.1 zu finden.

Im Posttest wurde neben den in Tabelle 5.1 aufgelisteten Skalen ein Manipulation Check eingesetzt, dessen neun Items selbst formuliert wurden und ebenfalls im Anhang C vollständig zur Verfügung stehen. Der Manipulation Check diente dazu, die Wirkung der Astrophysik-Übung als Intervention im Vergleich zu herkömmlichen Physik-Übungen zu kontrollieren (*Für eine erfolgreiche Teilnahme und Aufgabenbearbeitung erforderte die Übung...*). Die Items wurden aus diesem Grund zusätzlich von Physik-Lehramtsstudierenden im Bachelor-Studium beantwortet, die sich bei ihren Angaben auf Physik-Übungen zu Pflichtmodulen wie *Experimentalphysik I* bezogen. Mit sieben Items ( $\alpha = .77$ ) wurde erhoben, inwiefern unterschiedliche digitalisierungsbezogene Kompetenzen in der Lehrveranstaltung adressiert wurden. Diese Skala basierte auf den sieben digitalen Basiskompetenzen des Orientierungsrahmens DiKoLAN nach Becker et al. (2020): *Dokumentation, Präsentation, Kommunika-*

tion/ Kollaboration, Recherche/ Bewertung, Messwert/ Datenerfassung, Datenverarbeitung und Simulation/ Modellierung (vgl. Kapitel 3.1.3). Zudem wurde im Manipulation Check mit jeweils einem Item erhoben, inwiefern Fachwissen und fachdidaktisches Wissen als die zwei Bausteine des Lehrkonzepts für die erfolgreiche Teilnahme an der Lehrveranstaltung erforderlich waren. Im Posttest wurde darüber hinaus über vier Items ein Feedback zu den (i) digitalen Werkzeugen und (ii) zum fachdidaktischen Anteil hinsichtlich der (a) Nützlichkeit für den Lernprozess und (b) der Passung zum astrophysikalischen Inhalt eingeholt. Die Items wurden eigens entwickelt (siehe Anhang C) und dienten zur Erweiterung der Evaluation.

Alle genannten Items wurden mit einer sechsstufigen Likert-Skala von 1 – trifft überhaupt nicht zu bis 6 – trifft voll und ganz zu erfasst. Die statistische Auswertung der Fragebögen erfolgte mit PSPP (Free Software Foundation, 2022). Zur Hypothesenprüfung wurden die unterschiedlichen Messzeitpunkte mit gepaarten t-Tests analysiert. Über einen persönlichen Code erstellten die Teilnehmenden ein Pseudonym, das die Zuordnung ihrer Fragebögen über drei Messzeitpunkte ermöglichte (siehe Anhang C). Der Manipulation Check wurde mit einem t-Test für unabhängige Stichproben analysiert. Alle hier berichteten Signifikanzen wurden, gemessen an der Anzahl  $n$  der statistischen Vergleiche, mit einer Bonferroni-Korrektur des  $p$ -Werts ermittelt. Bei statistisch signifikanten Unterschieden wurde zudem die Effektstärke mit Cohen's  $d$  bestimmt.

Der Fragebogen zum ersten Messzeitpunkt diente zudem der Erfassung demographischer Daten. Hierzu zählen neben den Angaben zum Alter, Semester oder Geschlecht auch Angaben zu individuellen Vorerfahrungen im Lernen und Lehren mit digitalen Medien (für einen vollständigen Fragebogen siehe Anhang C). Darauf wird in Kapitel 5.4 im Zuge der Stichprobenbeschreibung eingegangen.

### 5.3 Qualitative Erhebung und Analyse

Die Studierenden wurden am Ende der Intervention darüber informiert, dass sie einzeln an einem freiwilligen Forschungsinterview zur ausführlichen Evaluation der Lehrveranstaltung teilnehmen können. Diese fanden aufgrund der Pandemie per Videokonferenz statt und dauerten etwa 30 Minuten. Jedes semistrukturierte Interview wurde mit vier Leitfragen geführt: (1) *Wie haben Sie die Lehrveranstaltung im letzten Semester erlebt?* (2) *Bitte erzählen Sie von Ihren bisherigen Erfahrungen mit Physik-Übungen.* (3) *Inwiefern hat die Teilnahme an der Lehrveranstaltung Ihren Lernprozess beeinflusst?* (4) *Wie denken Sie darüber, digitale Werkzeuge als Lehrkraft zukünftig im Unterricht einzusetzen?* Diese Fragen wurden so formuliert, dass sie zum möglichst freien, unbeeinflussten und offenen Erzählen motivierten (Niebert & Gropengießer, 2014) und sind nach dem SPSS-Prinzip entstanden (Helfferrich, 2011): Mögliche Interviewfragen basierend auf dem Forschungsinteresse *sammeln*, die Fragenliste hinsichtlich ihrer Eignung *prüfen*, die Fragen inhaltlich in ein bis vier Bündel *sortieren*.

tieren und Einzelfragen unter jeder Leitfrage eines Bündels *subsumieren*. Der so entwickelte Leitfaden ist vollständig im Anhang [D](#) zu finden. Am Ende des Interviews wurden davon losgelöst zwei abschließende Fragen zur Gesamtbewertung der Lehrveranstaltung sowie zu konkreten Verbesserungswünschen gestellt.

Mit dem Einverständnis der Studierenden wurden die Interviews akustisch aufgezeichnet und in anonymisierter Form transkribiert. Die Analyse erfolgte gemäß der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring ([2014](#)). Im Detail wurde dabei so vorgegangen, wie Mayring ([2019](#)) es für die Evaluation einer Lehrveranstaltung vorschlägt: Mit einem deduktiv-induktiven Ansatz wurde analysiert, (a) wie zufrieden die Teilnehmenden mit der Lehrveranstaltung waren (deduktiv) und (b) worin die wesentlichen Stärken und Schwächen der Lehrveranstaltung lagen (induktiv). Damit ging einher, die (a) Zufriedenheit deduktiv durch fünf ordinale Kategorien zu beschreiben (*sehr unzufrieden* bis *sehr zufrieden*), deren Definition und Kodierregeln im Anhang [D](#) zu finden sind. Nach Mayring ([2019](#)) wurde die Kategorie *sehr unzufrieden* kodiert, wenn im Interview keine positiven Äußerungen zur Lehrveranstaltung gemacht wurden, ein negativer Gesamteindruck genannt und eindeutige Kritik geäußert wurde. War eines dieser Kriterien nicht erfüllt, dann traf die Kategorie *unzufrieden* zu. Die Kodierregel basierte auf der Zufriedenheitstheorie der multiplen Vergleiche (Michalos, [1985](#)), wonach Zufriedenheit als kognitiver Prozess verstanden wird, bei dem eigene Erfahrungen oder Ideale als Vergleichsmaßstab für die aktuelle Situation dienen. Analog wurden die Kodierregeln der weiteren vier Zufriedenheitskategorien festgelegt. Für diese Kategorien galt das gesamte Interview als Analyseeinheit. Zusätzlich wurden die beiden Kategorien (b) Stärke und Schwäche definiert (siehe Anhang [D](#)), für die eine zusammenhängende Aussage als direkte Reaktion auf die Interviewfrage als eine Analyseeinheit galt. Eine Aussage war als *Stärke* zu verstehen, wenn ein Aspekt deutlich als positiv bewertet wurde, keine negativen Äußerungen oder eine neutrale Haltung bestand, dabei auf mehr als nur ein Beispiel oder eine Situation eingegangen wurde sowie die Argumente im Anschluss nicht durch eigene Aussagen relativiert oder entkräftet wurden. Analog dazu wurde die *Schwäche* definiert. Unter diese beiden deduktiven Hauptkategorien wurden durch die Analyse der Transkripte induktive Subkategorien subsumiert, die ebenfalls in Anhang [D](#) beschrieben werden. Das so entstandene Kategoriensystem wurde von einer unabhängigen zweiten Raterin auf die Hälfte der Transkripte angewandt, wobei sich eine vollkommene Übereinstimmung bei der Zufriedenheit ( $\kappa = 1.00$ ) und eine fast vollkommene Übereinstimmung bei den Stärken und Schwächen ( $\kappa = 0.82$  vor der Diskussion,  $\kappa = 0.89$  danach) herausstellte.

## 5.4 Stichprobe

Im Wintersemester 2020/2021 erfolgte im Zuge des ersten Forschungszyklus die Erprobung des entwickelten Lehrkonzepts mit 20 Physik-Lehramtsstudierenden (16 männlich, vier

weiblich). Die Teilnehmenden waren im Mittel 25,7 ( $SD = 3.39$ ) Jahre alt und studierten im zweiten Semester des Master of Educations ( $M = 2.21$ ,  $SD = 1.15$ ). Neben Physik studierten sie unterschiedliche Zweitfächer: Mathematik (8), Sport (4), Geschichte (2), Erdkunde (2), Politik (1), Philosophie (1), Chemie (1), Englisch (1). Elf Teilnehmende belegten im Studium bereits eine freiwillige Zusatzleistung oder ein Wahlpflichtmodul, dessen Fokus auf digitalen Medien lag, und 17 Studierende verfügten bereits über Kenntnisse in einer Programmiersprache (14 davon in Python). Fünf der Teilnehmenden belegten das Modul zum zweiten Mal, da sie bereits im Wintersemester 2019/2020 die Prüfungsvorleistung erreichten, aber die Prüfung selbst nicht absolvierten. Die Gründe hierfür sind nicht bekannt. Folglich belegten 15 Studierende das Modul zum ersten Mal. An den wöchentlichen Übungssitzungen nahmen im Schnitt 16 der 20 Studierenden teil ( $SD = 2.48$ ). Am ersten Messzeitpunkt nahmen 20 Studierende an an der Fragebogenerhebung (Pretest) teil, am zweiten Messzeitpunkt (Midtest) waren es 12 und am dritten Messzeitpunkt (Posttest) waren es 16 Teilnehmende. Insgesamt entsprach das einer Rücklaufquote von 80%. Die Rücklaufquote hinsichtlich der Interviews lag bei 30% – es nahmen sechs Studierende teil.

Zum ersten Messzeitpunkt wurden die Vorerfahrungen der Studierenden mit digitalgestütztem Lernen und Lehren erhoben, um das relevante Vorwissen der Lerngruppe einzuschätzen und ggf. eine Anpassung der Lehrveranstaltung an diesen Stand vorzunehmen. Hierfür wurde die Skala zu *lernbezogenen Vorerfahrungen mit digitalen Medien in Schule und Hochschule* von Vogelsang et al. (2019) adaptiert, wobei von den 14 Items nur solche eingesetzt wurden, die auf für die Lehrveranstaltung relevante Vorerfahrungen eingehen (Lerninhalte aufbereiten, Lernvideos nutzen, Texte verfassen, Tabellenkalkulationprogramme und Simulationen). Vorerfahrungen mit Smartphone-Experimenten oder Augmented-Reality-Anwendungen spielten hier beispielsweise keine Rolle und wurden daher nicht als Items übernommen. Die fünf adaptierten Items zu *lernbezogenen* Vorerfahrungen wurden ergänzend dazu so umformuliert, dass sie sich auf die *lehrbezogenen* Vorerfahrungen mit digitalen Medien während der Praxisphasen im Lehramtsstudium (z.B. allgemeines Schulpraktikum) bezogen. Desweiteren wurden die Vorerfahrungen in der digitalen vernetzten Welt aufbauend auf den drei Perspektiven des Dagstuhl-Dreiecks (Gesellschaft für Informatik e.V., 2016) durch drei selbstformulierte Items erhoben (je für Schulzeit und Studium). Die hiermit erhobenen Vorerfahrungen sind von dem Fach Physik losgelöst und beziehen sich auf ein allgemeines Vorwissen. Das vollständige Erhebungsinstrument ist in Anhang C zu finden. Alle Items wurden über eine vierstufige Skala hinsichtlich ihrer Häufigkeit (*nie* bis *oft* bzw. *mindestens 4 Mal*) abgefragt.

Es stellte sich heraus, dass die Studierenden wie erwartet geringe Vorerfahrungen hatten, weshalb dahingehend keine Anpassung der entwickelten Lehrveranstaltung erfolgte. Geringe bis keine lern- und lehrbezogenen Vorerfahrungen zeigten sich insbesondere im Umgang mit

Tabellenkalkulationen und Simulation – digitale Werkzeuge, die in dieser Lehrveranstaltung eine besondere Rolle spielen. Etwa die Hälfte der Studierenden nutzte in der Schulzeit nie ein Tabellenkalkulationsprogramm und nie eine Simulation. Während des Studiums setzten dann immerhin nur 10% noch nie ein Tabellenkalkulationsprogramm ein, aber immernoch etwa ein Drittel nutzte währenddessen nie eine Simulation. In ersten Praxiserfahrungen als Lehrkraft nutzten ca. 80% der Studierenden nie ein Tabellenkalkulationsprogramm und etwa 65% machten keine lehrbezogenen Erfahrungen mit Simulationen. Dies sind nur ausgewählte Ergebnisse, während die vollständige deskriptive Darstellung der lern- und lehrbezogenen Vorerfahrungen in Anhang E zu finden ist. Ein gemischtes Bild zeigte sich darüberhinaus hinsichtlich der Vorerfahrungen in der digitalen vernetzten Welt. Während diese in der (i) gesellschaftlich-kulturellen Perspektive gering waren, gab es aber insbesondere im Studium Vorerfahrungen in der (ii) technologischen und (iii) anwendungsbezogenen Perspektive des Dagstuhl-Dreiecks. (i) So setzten sich in der Schulzeit die Hälfte und im Studium ein Drittel der Studierenden nie mit den persönlichen und gesellschaftlichen Auswirkungen unterschiedlicher digitaler Medien auseinander. (ii) Welche digitalen Medien und Programme effektiv wie genutzt werden können, thematisierten in der Schulzeit demgegenüber nur 25% nie und im Studium setzten sich alle Studierenden mindestens *selten* mit dieser anwendungsbezogenen Perspektive auseinander. (iii) Wie unterschiedliche digitale Medien und Programme funktionieren, thematisierten in der Schulzeit sogar nur 10% nie, während sich im Studium auch hiermit alle Studierenden mindestens *selten* auseinandersetzten. Die vollständigen deskriptiven Ergebnisse dieser Vorerfahrungen sind ebenfalls in Anhang E zu finden.

## 6 Ergebnisse des ersten Forschungszyklus

Die Analyse im ersten Forschungszyklus erfolgte wie in Kapitel 5 beschrieben. Im Folgenden wird zunächst auf die quantitative Datenanalyse hinsichtlich digitaler Kompetenzen und der Einstellung eingegangen. Im Anschluss werden die qualitativen und quantitativen Daten zur Lehrveranstaltungsevaluation berichtet. Das Kapitel schließt mit den Ergebnissen zum Manipulation Check und einer Zusammenfassung der Ergebnisse des ersten Zyklus.

### 6.1 TPACK-Selbsteinschätzung

Die technologiebezogenen TPACK-Komponenten wurden im (i) Mid- und (ii) Posttest jeweils mit einer zusätzlichen retrospektiven Selbsteinschätzung für den Zeitpunkt vor der Lehrveranstaltung erhoben. Aus diesem Grund werden in Abbildung 6.1 für diese beiden Messzeitpunkte separate Werte zum retrospektiven Prätest (i) und retrospektiven Prätest (ii) angegeben. Aus der Abbildung geht hervor, dass die Studierenden im Midtest ihr TPACK ( $M = 3.10$ ,  $SD = 0.88$ ), TCK ( $M = 3.08$ ,  $SD = 0.79$ ) und TPK ( $M = 3.20$ ,  $SD = 0.85$ ) auf der sechsstufigen Skala für den Zeitpunkt vor der Lehrveranstaltung als eher gering einschätzten. Ihre Kompetenzen hinsichtlich TK ( $M = 4.00$ ,  $SD = 1.03$ ) schätzten sie demgegenüber als eher hoch ein. Zum Zeitpunkt des Midtests, also nach der Hälfte der Lehrveranstaltung, schätzten die Teilnehmenden alle vier Komponenten als eher hoch ein – von TPACK ( $M = 3.88$ ,  $SD = 0.59$ ) und TCK ( $M = 4.00$ ,  $SD = 0.60$ ), über TPK ( $M = 4.25$ ,  $SD = 0.47$ ) bis zu TK ( $M = 4.29$ ,  $SD = 0.92$ ). Es zeigte sich ein signifikanter Zuwachs hinsichtlich TPACK nach der ersten Hälfte der Lehrveranstaltung ( $t(11) = 5.42$ ,  $p < 0.01$ ). Die Effektstärke lag bei  $d = 1.57$  und entspricht somit einem großen Effekt. Auch hinsichtlich TCK ( $t(11) = 4.75$ ,  $p = 0.01$ ,  $d = 1.37$ ) und TPK ( $t(11) = 6.65$ ,  $p < 0.01$ ,  $d = 1.92$ ) schätzten die Studierenden ihre Kompetenzen zur Hälfte der Lehrveranstaltung stärker ein als davor, mit jeweils großem Effekt.

Die retrospektive Selbsteinschätzung (ii) der Studierenden im Posttest unterschied sich statistisch nicht von der retrospektiven Selbsteinschätzung (i) im Midtest. Auch hier wurden TPACK ( $M = 3.36$ ,  $SD = 0.90$ ), TCK ( $M = 3.38$ ,  $SD = 1.26$ ) und TPK ( $M = 3.45$ ,  $SD = 0.83$ ) als eher gering und TK ( $M = 4.33$ ,  $SD = 0.96$ ) als eher hoch eingeschätzt. Nach der Lehrveranstaltung schätzen die Studierenden die vier Kompetenzbereiche als eher hoch ein. Mit einem Mittelwert von  $M = 4.58$  ( $SD = 0.45$ ) unterschied sich das TPACK hier mit großem Effekt von der eher geringen retrospektiven Einschätzung (ii) ( $t(15) = 6.21$ ,  $p < 0.001$ ,  $d = 1.92$ ). Auch TCK ( $M = 4.63$ ,  $SD = 0.72$ ), TPK ( $M = 4.64$ ,  $SD = 0.47$ ) und TK ( $M = 4.86$ ,  $SD = 0.58$ ) wurden im Posttest als eher hoch eingeschätzt. Bezüglich der TCK- ( $t(15) = 5.00$ ,  $p < 0.01$ ,  $d = 1.25$ ), TPK- ( $t(15) = 6.46$ ,  $p < 0.01$ ,  $d = 1.62$ ) und, im Gegensatz zum Midtest, auch bei der TK-Selbsteinschätzung ( $t(15) = 4.67$ ,  $p < 0.01$ ,  $d =$

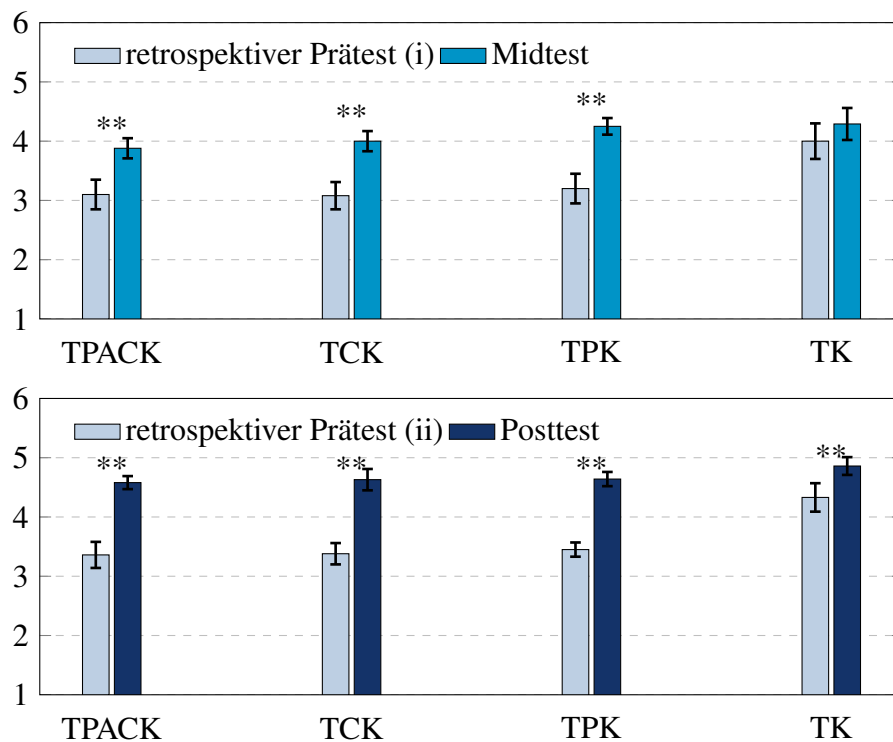


Abbildung 6.1: Ergebnisse der retrospektiven Selbsteinschätzung der TPACK-Komponenten im Midtest ( $N = 12$ ) (oben) und Posttest ( $N = 16$ ) (unten). Der retrospektive Prätest (i) und (ii) wurde separat zu beiden Messzeitpunkten zusätzlich zur jeweils aktuellen Selbsteinschätzung erhoben. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler des Mittelwerts an (eigene Darstellung verändert nach Langendorf, Schneider und Hessman (2022)).

1.17) zeigte sich, anders als beim retrospektiven Prätest (ii), jeweils ein Zuwachs mit großem Effekt. Die Auswertung der TPACK-Skalen erfolgte mit einer Bonferroni-Korrektur ( $n = 8$ ). An dieser Stelle sei angemerkt, dass ein statistischer Vergleich der Selbsteinschätzung im Midtest mit der im Posttest aufgrund des retrospektiven Prä-Post-Designs nicht sinnvoll ist.

## 6.2 Einstellung

Die Einstellung gegenüber dem Lernen mit digitalen Medien wurde zu allen drei Messzeitpunkten erhoben und Abbildung 6.2 veranschaulicht die Ergebnisse. Diese zeigen eine positive Einstellung der Studierenden sowohl vor ( $M = 4.56$ ,  $SD = 0.48$ ), zur Hälfte ( $M = 4.64$ ,  $SD = 0.38$ ), als auch nach der Lehrveranstaltung ( $M = 4.75$ ,  $SD = 0.30$ ). Die deskriptiven Daten basieren auf unterschiedlichen Stichprobengrößen, da an den drei Messzeitpunkten 20 (Prätest), 12 (Midtest) und 18 (Posttest) Studierende teilnahmen (vgl. Kapitel 5.4). Um im Sinne des Within-Subject-Designs Unterschiede in der Einstellung zwischen dem Prä- und Posttest zu untersuchen, reduzierte sich die angepasste Teilstichprobe (matched sample) für den gepaarten t-Test auf 14 Studierende, die an beiden Messzeitpunkten

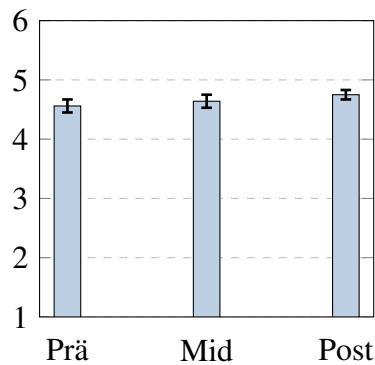


Abbildung 6.2: Ergebnisse zur Einstellung der Studierenden gegenüber dem Lernen mit digitalen Medien. Hier werden drei Messzeitpunkte (Prä- ( $N = 20$ ), Mid- ( $N = 12$ ) und Posttest ( $N = 16$ )) dargestellt.

teilnahmen. Es zeigten sich nach einer Bonferroni-Korrektur ( $n = 2$ ) keine Unterschiede in der Einstellung zwischen dem Prä- und Posttest ( $t(13) = 0.99, p > 0.05$ ). Analog gab es im Prä-Mid-Vergleich mit einer Teilstichprobe von 11 Studierenden keine Unterschiede in der Einstellung ( $t(10) = 0.65, p > 0.05$ ).

### 6.3 Evaluation

Die Analyse der sechs Interviews diente dazu, (a) die Gesamtzufriedenheit der Studierenden mit der Lehrveranstaltung zu ermitteln sowie (b) die wesentlichen Stärken und Schwächen der Veranstaltung zu identifizieren (vgl. Kapitel 5.3). Es stellte sich heraus, dass alle befragten Studierenden mit der Lehrveranstaltung insgesamt *zufrieden* waren. Sie äußerten sich überwiegend positiv gegenüber der Lehrveranstaltung und gingen nur an mancher Stelle auch auf Kritik ein, weshalb die Kategorie *sehr zufrieden* nicht zutreffend war. Es konnten 16 induktive Subkategorien unter die Kategorie *Stärke* subsumiert werden, wohingegen nur vier induktive Subkategorien zur *Schwäche* zählten (für eine vollständige Beschreibung siehe Anhang D). Zu den hauptsächlich wahrgenommenen Stärken und Schwächen zählen im Folgenden solche, die von mindestens der Hälfte der Befragten (drei von sechs) genannt wurden. Die zwölf wesentlichen Stärken und die zwei wesentlichen Schwächen werden in Tabelle 6.1 aufgelistet und sind nach der Anzahl Studierender, die auf diese Subkategorie eingingen, und die Häufigkeit, mit der diese Subkategorie erwähnt wurde, sortiert.

Zunächst wurden hinsichtlich des Konzepts der Lehrveranstaltung, neben fachwissenschaftlichen Bausteinen auch fachdidaktische Bausteine einzusetzen und diese durch den Einsatz digitaler Medien zu rahmen, fünf Stärken identifiziert: Am häufigsten wurde diesbezüglich als positiv hervorgehoben, dass die Lehrveranstaltung die Möglichkeit gibt, (i) die eigenen Erfahrungen und Kompetenzen im Bezug auf den angehenden Lehrberuf zu erweitern. Aussagen wie „also auf jeden Fall meine Kompetenzen als Lehrkraft, da hat es mich auf



Tabelle 6.1: Zusammenfassung der wesentlichen Stärken und Schwächen der Lehrveranstaltung aufbauend auf einer induktive Kategorienbildung. Die Subkategorien werden absteigend nach der Anzahl Studierender, die sich dazu äußerten, und der Häufigkeit der zugehörigen Aussagen sortiert (vgl. Langendorf, Schneider und Hessman (2022)).

	Induktive Kategorien	Anzahl	Häufigkeit
WESENTLICHE STÄRKEN			
(i)	Lernen als angehende Lehrkraft	6	15
(ii)	Einsatz digitaler Tools	6	11
(iii)	Praxiserfahrungen im Schülerlabor	6	6
(iv)	Fachdidaktischer Anteil	5	10
(v)	Vorbereitung auf die Hausarbeit	5	5
(vi)	Gruppenarbeit für Präsenzaufgaben	5	5
(vii)	Erfüllte Erwartungen an das Lehramtsstudium	4	11
(viii)	Übungsleitung	4	7
(ix)	Teamarbeit für XLAB-Kurse	3	5
(x)	XLAB-Betreuung	3	3
(xi)	Workload	3	3
(xii)	Hausarbeit als Prüfungsformat	3	3
WESENTLICHE SCHWÄCHEN			
(I)	Klausurvorbereitung	4	7
(II)	Bezug zur Vorlesung	4	6

jeden Fall weitergebracht“ wurden dahingehend von allen Interviewten gemacht. Daran anschließend hoben alle Studierenden die (iii) Praxiserfahrungen im Schülerlabor in Form von der Entwicklung und Erprobung digitaler Lehr-Lern-Einheiten als gewinnbringend hervor („Dem entsprechend ist das goldwert, so etwas selbst durchzuführen.“). Fünf der Studierenden beschrieben den (iv) fachdidaktischen Anteil der Lehrveranstaltung als Stärke, da es so „im Vergleich zu den anderen Übungen aus den fachwissenschaftlichen Modulen [...] viel mehr auch lehramtsbezogen [war]“. Hierbei stellt eine Person sogar direkten Bezug zwischen dem Fachinhalt und der Fachdidaktik her: „Ich glaube, dass der fachdidaktische Part, vor allen Dingen in Verknüpfung zu einem bestimmten Thema, in diesem Fall die Astrophysik, da gute Tore öffnet.“ Vier Studierende betonten, dass die Lehrveranstaltung ihren (vii) Erwartungen an die lernförderliche Gestaltung von Modulen im Lehramtsstudium gerecht wurde. Das zeigte sich in Äußerungen wie „und irgendwie ist das ja auch etwas, was eigentlich das Lehramtsstudium leisten sollte“. Darüber hinaus stellten alle Studierenden den (ii) Einsatz der digitalen Werkzeuge und Programme als Stärke heraus: „Also ich glaube, es hat für mich, was die Simulationen angeht, was man jetzt bei Schülern glaube ich als entdeckendes Lernen bezeichnen würde, gefördert.“ Des Weiteren wurden hinsichtlich der methodischen Gestaltung der Lehrveranstaltung zwei weitere Stärken identifiziert: Die (vi)

Gruppenarbeitsphasen während der Bearbeitung von Präsenzaufgaben wurden von fünf Interviewten als positiv hervorgehoben („mir hat es gefallen mit Breakouträumen, dass man in Kleingruppen gearbeitet hat“) und vier Personen äußerten sich positiv gegenüber der (ix) Teamarbeit im Zuge der XLAB-Kurse. Hinsichtlich der Anforderungen der Lehrveranstaltung konnten drei Stärken identifiziert werden: Die (v) Vorbereitung auf die Hausarbeit wurde von fünf Studierenden als gelungen empfunden: „Von daher fühle ich mich da auf jeden Fall gut darauf vorbereitet und glaube nicht, dass da wirkliche Probleme entstehen.“ Dabei wurde von drei Personen zusätzlich betont, dass die (xii) Hausarbeit als Prüfungsformat „so einfach viel besser zu dem [passt], was wir jetzt gelernt haben, als es in einer Klausur eventuell der Fall gewesen wäre.“<sup>18</sup> Zuletzt wurde von der Hälfte der Studierenden der (xii) Workload, also die Arbeitsbelastung in Verbindung mit der Lehrveranstaltung, als angemessen oder sogar „harmlos“ bezeichnet. Zuletzt wurden zwei Stärken der Lehrveranstaltung identifiziert, die auf die Rolle der lehrenden Personen eingehen: Die (viii) Übungsleitung bestehend aus zwei Expert:innen, die im Team-Teaching arbeiten, wurde von vier Personen als positiv empfunden. Zudem wurde die (x) Betreuung der Praxisphase im XLAB durch die Unterstützung der Übungsleitung und andere Maßnahmen von drei Studierenden als Stärke der Lehrveranstaltung wahrgenommen: „Insofern wurde das ganze Projekt sehr gut begleitet und man hat sich nicht allein gelassen damit gefühlt.“

Neben diesen verschiedenen Stärken äußerten die Studierenden zwei wesentliche Schwächen der Lehrveranstaltung. Eine davon lag in der (I) Vorbereitung auf die Klausur als ursprüngliche Prüfungsform: „Insofern muss ich sagen, dass für eine Klausur mich die Übung sehr verwirrt hat, weil ich nicht wusste, wie bezieht sich das denn jetzt ein.“ Bemerke, dass es hierbei nur um die Klausurvorbereitung durch die Lehrveranstaltung geht und nicht um die individuelle Vorbereitung in Selbstlernphasen. Die zweite Schwäche lag in dem mangelnden (II) Bezug zur Vorlesung. Vier Studierende äußerten sich negativ zum Zusammenspiel von Vorlesung und Übung als ein gemeinsames Modul, was beispielsweise in einer unzureichenden zeitlichen Synchronisation von Fachinhalten wahrgenommen wurde: „Es war ein bisschen schade, dass irgendwann die Vorlesung der Übung so ein bisschen hinterher gehängt hat.“ Zu dieser Schwäche zählten auch Äußerungen wie „irgendwo hatte ich immer das Gefühl, dass so ein bisschen die Vertiefung der Vorlesung fehlte.“ Dazu äußerte sich auch ein weiterer Student, der seine Aussage anschließend aber durch folgenden Satz entkräftete: „Man kann natürlich nicht beides haben irgendwo.“ Hierbei bezog er sich auf das gleichzeitige Adressieren von lehramtsbezogenen Kompetenzen und einem tiefen Verständnis astrophysikalischer Inhalte.

---

<sup>18</sup>Erinnerung: Ursprünglich war eine Klausur als Prüfungsformat vorgesehen.

### 6.3.1 Authentizität und Feedback

Die Evaluation der Lehrveranstaltung erfolgte neben den Interviews als qualitative Methode auch über eine quantitative Erhebung der Authentizität und ausgewähltem Feedbacks. Die Studierenden bewerteten die Lehrveranstaltung sowohl fachwissenschaftlich ( $M = 4.60$ ,  $SD = 0.71$ ) als auch fachdidaktisch ( $M = 4.70$ ,  $SD = 0.53$ ) als authentisch. Die eingesetzten digitalen Anwendungen und Programme waren darüber hinaus hilfreich für den Lernerfolg der Studierenden ( $M = 5.00$ ,  $SD = 0.82$ ). Auch die fachdidaktischen Bausteine waren für die angehenden Lehrkräfte hilfreich, weil sie sich dadurch umfassender mit Didaktik beschäftigten ( $M = 5.06$ ,  $SD = 0.85$ ). Die Studierenden nahmen zudem wahr, dass die digitalen Anwendungen und Programme ( $M = 4.88$ ,  $SD = 0.72$ ) sowie die fachdidaktischen Bausteine ( $M = 4.88$ ,  $SD = 0.81$ ) auf den astrophysikalischen Fachinhalt abgestimmt waren.

## 6.4 Manipulation Check

In Abbildung [6.3](#) werden die Ergebnisse des Manipulation Checks als Vergleich der Astrophysik-Übung mit den Angaben von zehn Lehramtsstudierenden zu Physik-Übungen aus dem Bachelorstudium dargestellt. Zunächst kann über die Astrophysik-Übung gesagt werden, dass Fachwissen ( $M = 4.44$ ,  $SD = 1.31$ ), fachdidaktisches Wissen ( $M = 4.63$ ,  $SD = 0.72$ ) und digitale Basiskompetenzen ( $M = 4.31$ ,  $SD = 0.75$ ), bestehend aus sieben Teilkompetenzen, umfassend adressiert wurden. Hinsichtlich der digitalen Basiskompetenzen wurden die fachspezifische Kompetenz zur Simulation ( $M = 5.19$ ,  $SD = 0.54$ ) und die allgemeinen Kompetenzen zur Kommunikation ( $M = 4.81$ ,  $SD = 1.11$ ), Dokumentation ( $M = 4.63$ ,  $SD = 1.20$ ) sowie Recherche ( $M = 4.50$ ,  $SD = 0.97$ ) mit einem Mittelwert  $M > 4$  als besonders bedeutsam eingestuft. Die fachspezifischen Kompetenzen zur Datenerfassung ( $M = 3.50$ ,  $SD = 1.51$ ) und Datenverarbeitung ( $M = 3.81$ ,  $SD = 1.28$ ) spielten zusammen mit der allgemeinen Kompetenz zur Präsentation ( $M = 3.75$ ,  $SD = 1.24$ ) mit einem Mittelwert  $3 < M < 4$  demgegenüber eine geringere, aber dennoch bedeutsame Rolle.

Im Vergleich zu den Physik-Übungen (2FB) wurden sowohl das fachdidaktische Wissen ( $t(10.55) = 3.63$ ,  $p < 0.05$ ,  $d = 1.76$ ) als auch die digitalen Kompetenzen ( $t(10.55) = 5.83$ ,  $p < 0.01$ ,  $d = 2.35$ ) in der Astrophysik-Übung mit jeweils großem Effekt umfassender adressiert. Nach einer Bonferroni Korrektur ( $n = 9$ ) zeigte sich hinsichtlich des Fachwissens zwischen diesen beiden unabhängigen Stichproben kein Unterschied ( $t(21.17) = -2.62$ ,  $p > 0.05$ ). Während alle drei Wissensbereiche in der Astrophysik-Übung mit Mittelwerten  $M > 4.3$  ähnlich hoch eingeschätzt wurden, zeigte sich bei den Physik-Übungen ein durchmisches Bild: Das Fachwissen ( $M = 5.40$ ,  $SD = 0.52$ ) wurde von den Befragten als sehr relevant eingeschätzt, während dem fachdidaktischen Wissen ( $M = 2.30$ ,  $SD = 1.95$ ) und den digitalen Kompetenzen ( $M = 2.14$ ,  $SD = 1.16$ ) eine geringe Bedeutsamkeit zugeschrie-

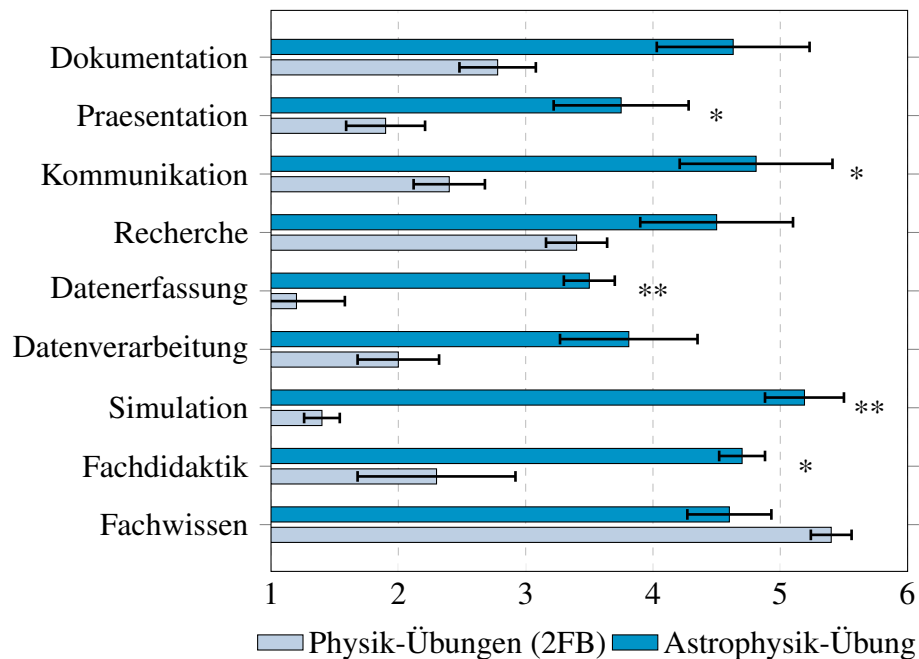


Abbildung 6.3: Ergebnisse des Manipulation Checks als Vergleich zwischen der Astrophysik-Übung ( $N = 16$ ) und Physik-Übungen aus dem 2-Fächer Bachelor (2FB) ( $N = 10$ ). Dargestellt werden die sieben Items zu digitalen Basiskompetenzen (Dokumentation, ... , Simulation) sowie das fachdidaktische Wissen und das Fachwissen (eigene Darstellung nach Langendorf, Schneider und Hessman (2022)).

ben wurde. Im Detail bestanden hinsichtlich einzelner Bereiche der digitalen Basiskompetenzen weitere Unterschiede zwischen den unabhängigen Stichproben. Wie in Abbildung 6.3 dargestellt, wurden die digitale Präsentation ( $d = 0.66$ ), Kommunikation ( $d = 1.02$ ), Datenerfassung ( $d = 0.66$ ) und Simulation ( $d = 2.62$ ) in der Astrophysik-Übung umfangreicher adressiert als in den Physik-Übungen, mit mittleren bis großen Effekten.

## 6.5 Zusammenfassung

Da aufbauend auf diesen Ergebnissen das Re-Design im zweiten Forschungszyklus erfolgte, werden die wesentlichen Erkenntnisse aus der Wirksamkeitsstudie im ersten Zyklus zusammengefasst:

- Die Studierenden schätzten ihre digitalen Kompetenzen hinsichtlich der technologiebezogenen TPACK-Komponenten vor der Lehrveranstaltung als eher gering und nach der Lehrveranstaltung als höher ein.
- Die Studierenden waren positiv gegenüber dem Lernen mit digitalen Medien eingestellt.
- Die Studierenden waren mit der Lehrveranstaltung zufrieden.

- Die Stärken der Lehrveranstaltung lagen insbesondere im Konzept, der methodischen Gestaltung, den Anforderungen sowie der Rolle der Übungsleitung.
- Die Schwächen der Lehrveranstaltung lagen insbesondere in der Klausurvorbereitung und dem Bezug zur Vorlesung.
- Die Studierenden bewerteten einzelne Aspekte der Lehrveranstaltung als authentisch, hilfreich und gut aufeinander abgestimmt.
- Die Lehrveranstaltung adressierte gleichermaßen digitale Basiskompetenzen, fachdidaktisches Wissen sowie Fachwissen und unterschied sich so von Physik-Übungen aus dem 2FB.

## 7 Zweiter Forschungszyklus

Aufbauend auf dem ersten Forschungszyklus erfolgten im zweiten Zyklus ein Re-Design und dessen Erprobung kombiniert mit einer erneuten empirischen Erhebung. Vorab sei angemerkt, dass sich die Lehrveranstaltung im ersten Zyklus wegen der Pandemie nur über 13 Wochen erstreckte und eine Hausarbeit als Prüfungsleistung eingesetzt wurde. Beides entsprach nicht den gewöhnlichen Rahmenbedingungen dieses Moduls, wie sie im zweiten Zyklus aber wieder vorlagen (14 Wochen und Klausur). In diesem Kapitel werden ausschließlich solche Aspekte erläutert, die sich vom ersten Zyklus unterschieden. Anschließend werden die Erprobung sowie die Stichprobe beschrieben und die zentralen Ergebnisse vorgestellt.

### 7.1 Re-Design

Das gesamte Material für die Übungssitzungen, also insbesondere die Präsentationsfolien und Arbeitsblätter (Hausaufgaben und Präsenzaufgaben), wurden für den zweiten Zyklus aktualisiert. Dies umfasste zunächst grundsätzliche Verbesserungen in Sprache und Ausdruck. Des Weiteren wurden vereinzelt Instruktionen präzisiert oder umstrukturiert, was basierend auf den Erfahrungen der ersten Erprobung förderlich erschien, um Unklarheiten seitens der Studierenden zu vermeiden. Hierzu zählte auch die Differenzierungsmaßnahme, einzelne Arbeitsaufträge als vertiefende Zusatzaufgaben zu kennzeichnen, um bei leistungsschwächeren Studierenden mehr Bearbeitungszeit für die grundlegenden Aufgaben zu schaffen, womit dem Feedback der Studierenden aus dem ersten Zyklus nachgegangen wurde (vgl. Anhang [D.2](#)). In diesem Zuge wurden zudem an mancher Stelle Phasen zur Zwischensicherung eingefügt. Darüber hinaus lag ein wichtiger Schritt in der Überprüfung der auf dem Material verlinkten Internetseiten. In dem seltenen Fall, dass der Link zu einer Simulation oder digitalen Anwendung veraltet war, wurde dieser aktualisiert oder durch einen Link zu einer alternativen Anwendung ersetzt. Alle Arbeitsblätter wurden zudem von einem neuen Astrophysik-Experten, der im zweiten Zyklus erstmals Teil der Übungsleistung war, hinsichtlich Inhalt und Verständlichkeit überprüft. Die Materialüberarbeitung umfasste auch die anfängliche Vorstellung des Lehrkonzepts (inklusive Anforderungen und Lernziele) in Form einer Präsentation in der ersten Übungssitzung. Damit sollte das Feedback der Studierenden aufgegriffen werden, dass der Wunsch nach mehr Klarheit und Transparenz hinsichtlich des neuen Lehrkonzepts bestehe. Aufgrund der positiven Rückmeldung und der Ergebnisse der ersten Wirksamkeitsstudie beschränkte sich das Re-Design davon abgesehen auf die Verbesserung der identifizierten Schwächen der Lehrveranstaltung. Alle Dozierenden des Moduls erarbeiteten gemeinsam Maßnahmen, um die Klausurvorbereitung und die Abstimmung zwischen Übung und Vorlesung zu verbessern. In dieser engen Zusammen-

arbeit zwischen Expert:innen der Fachwissenschaft und Fachdidaktik entstanden schließlich folgende Änderungen der ersten Erprobung: (1) Zur Verbesserung der Klausurvorbereitung wurde eine Probeklausur entwickelt. Diese orientierte sich direkt an der Struktur und den Anforderungen der tatsächlichen Klausur und sollte den Studierenden dadurch transparent machen, wie die Prüfung aussehen könnte. Im Vergleich zum ersten Zyklus bestand die Vorlesungszeit im Wintersemester 2021/ 2022 wieder wie gewohnt aus 14 anstatt aus 13 Wochen. Somit konnte die Probeklausur als zusätzliche Hausaufgabe in Woche 7 bearbeitet, von der Übungsleitung individuell korrigiert und in der Übungssitzung in Woche 8 gemeinsam besprochen werden. Folglich setzten sich die Studierenden zunächst individuell mit den Klausuraufgaben auseinander, erhielten anschließend individuelles Feedback durch die Übungsleitung und konnten abschließend Fragen und Unklarheiten diskutieren. (2) Zur Verbesserung der Synchronisation von Vorlesung und Übung wurde der ursprüngliche Ablaufplan der Vorlesung überarbeitet. Durch die zusätzliche Woche in diesem Semester war es möglich, Reserven als Zeitpuffer einzuplanen, falls einzelne Inhalte länger thematisiert werden würden als geplant. Darüber hinaus wurden die Vorlesungsinhalte in eine überarbeitete Reihenfolge gebracht, um sicherzustellen, dass jedes Thema zuerst in der Vorlesung und anschließend in der Übung aufgegriffen werden würde. Zuletzt wurde die Absprache zwischen den Dozierenden auch während des Semesters intensiviert, um direkt auf unerwartete Probleme oder spontane Änderungen reagieren zu können.

## 7.2 Erprobung

Die zweite Erprobung im Wintersemester 2021/2022 wurde durch das selbe Forschungsinteresse wie im ersten Zyklus motiviert und sollte gleichermaßen zur Beantwortung der in Kapitel 5 formulierten Forschungsfragen beitragen. Aus diesem Grund wurde das Forschungsdesign (Abbildung 5.1) im Wesentlichen beibehalten. In diesem Zyklus erfolgte jedoch keine qualitative Erhebung mit leitfadengestützten Interviews. Stattdessen wurden die induktiven Kategorien zu den hauptsächlichen Stärken (12) und Schwächen (2) der Lehrveranstaltung, die im ersten Zyklus gebildet wurden (siehe Anhang D.2), zur quantitativen Erhebung im Posttest eingesetzt. Zwei der induktiven Kategorien zur Stärke bezogen sich auf die Hausarbeit, welche im zweiten Zyklus nicht stattfand, und wurden daher nicht als Items formuliert. Ein Item zur Gesamtbewertung der Übung wurde zu den Stärken und Schwächen hinzugefügt, so dass sich eine Skala von 13 eigens formulierten, forschungsbasierten Items ( $\alpha = .83$ ) zur Evaluation der entwickelten Lehrveranstaltung ergab (siehe Anhang C). Da im ersten Zyklus die Rücklaufquote der Interviews deutlich geringer als bei den Fragebögen war, wurde diese Methode dem ursprünglichen Multi-Method-Ansatz vorgezogen. Ein Freitextfeld für Feedback stellte sicher, dass neben den bereits abgefragten noch weitere Stärken und Schwächen der Lehrveranstaltung genannt werden konnten. Des Wei-

teren erfolgte in diesem Zyklus keine erneute Erhebung des Manipulation Checks mit einer Kontrollgruppe (Physik-Übungen aus dem 2FB). Stattdessen diente der Manipulation Check ausschließlich der Untersuchung, inwiefern die Intention, unterschiedliche Kompetenzen in der Astrophysik-Übung zu adressieren, umgesetzt wurde. Die Daten aus diesem Zyklus sollten so die Ergebnisse aus dem ersten Zyklus erweitern, bei dem bereits ein Vergleich mit anderen Physik-Übungen als Referenz erfolgte.

Die zweite Durchführung fand mit zwölf Physik-Lehramtsstudierenden (fünf männlich, sieben weiblich) aus dem ersten oder zweiten M.Ed.-Semester ( $M = 1.67$ ,  $SD = 0.87$ ) statt, die im Mittel 23.91 ( $SD = 2.30$ ) Jahre alt waren. Elf der Studierenden nahmen an der ersten quantitativen Erhebung teil, weshalb sich die nachfolgende Stichprobenbeschreibung auf diese Personen bezieht. Mathematik (4), Chemie (3), Sport (1), Englisch (1), Französisch (1), Latein (1) und Chinesisch (1) waren neben Physik deren Zweitfächer. Nur eine Person belegte im Studium bereits eine freiwillige Zusatzleitung mit einem Schwerpunkt zu digitalen Medien. Alle Studierenden verfügten über Kenntnisse in Python und belegten das Modul zum ersten Mal. An den wöchentlichen Übungssitzungen nahmen jeweils mindestens 75 % (neun von zwölf) teil. Die Übungssitzungen wurden von Woche 1 bis Woche 7 hybrid angeboten, wobei rund vier Personen in Präsenz und der Rest online teilnahmen. Ab Woche 8 fand die Übung wie im ersten Zyklus ausschließlich online statt – ebenso die XLAB-Kurse in Woche 12. Die Rücklaufquote hinsichtlich der quantitativen Fragebogenerhebungen betrug 75 %, wobei elf Personen am Prätest und jeweils acht am Mid- und Posttest teilnahmen. Analog zur Stichprobenbeschreibung in Kapitel 5.4 wird hier nur von ausgewählten Vorerfahrungen der Studierenden mit digitalen Medien beim Lernen und Lehren berichtet. Eine vollständige Darstellung der deskriptiven Ergebnisse ist in Anhang E zu finden. Die Studierenden verfügten auch in diesem Jahr über geringe bis keine lern- und lehrbezogenen Vorerfahrungen im Umgang mit Tabellenkalkulationen und Simulationen. Etwa 80 % der Studierenden nutzten in der Schulzeit nie ein Tabellenkalkulationsprogramm und ca. ein Viertel nutzen nie sowie drei Viertel nur selten Simulationen. Auch im Lehramtsstudium setzten jeweils drei von elf Personen nie diese beiden digitalen Werkzeuge ein, wobei insbesondere zu Simulationen kaum lernbezogenes Vorwissen aus dem Studium bestand, denn 90 % der Personen setzten diese nie oder nur selten ein. Zudem bestand kaum lehrbezogenes Vorwissen zum Einsatz von Tabellenkalkulationen oder Simulationen in Praxisphasen des Studiums, denn jeweils 80 % der Befragten setzten diese Werkzeuge währenddessen nie ein. Ähnlich zur ersten Stichprobe hatten die Studierenden in der Schulzeit und im Studium geringe Vorerfahrungen mit der (i) gesellschaftlich-kulturellen Perspektive des Dagstuhl-Dreiecks. Mit der (ii) technologischen und (iii) anwendungsbezogenen Perspektive setzten sich dann immerhin im Studium alle Befragten mindestens *selten* auseinander. Hierzu ist ebenfalls eine detaillierte Aufschlüsselung der deskriptiven Daten in Anhang E zu finden.



## 7.3 Ergebnisse

Analog zu Kapitel 6 werden die Ergebnisse für den zweiten Forschungszyklus vorgestellt.

### TPACK-Selbsteinschätzung

In Abbildung 7.1 werden die Ergebnisse der TPACK-Selbsteinschätzung, erhoben im Midtest (oben) und Posttest (unten), dargestellt. Die Studierenden schätzten die technologiebezogenen TPACK-Skalen im retrospektiven Prätest (i) insgesamt als gering ein. Insbesondere die Kompetenzbereiche TPACK ( $M = 2.45$ ,  $SD = 0.63$ ), TCK ( $M = 2.63$ ,  $SD = 0.74$ ) und TPK ( $M = 2.50$ ,  $SD = 0.66$ ) wurden mit Skalenmittelwerten  $M < 3$  eher niedrig eingestuft. Der Bereich TK wurde mit einem Mittelwert von  $M = 3.32$  ( $SD = 1.15$ ) zwar etwas höher eingeschätzt, lag aber dennoch in der unteren Skalenhälfte. Im Midtest wurde TPACK als eher hoch ( $M = 3.92$ ,  $SD = 0.28$ ) eingeschätzt und auch die Bereiche TCK ( $M = 4.25$ ,  $SD = 0.89$ ), TPK ( $M = 4.22$ ,  $SD = 0.45$ ) sowie TK ( $M = 4.29$ ,  $SD = 1.16$ ) wurden als eher hoch bewertet. Im Vergleich zum retrospektiven Prätest (i) zeigte sich in der Selbsteinschätzung der Studierenden im Midtest ein statistischer Unterschied: Die Kompetenzbereiche hinsichtlich TPACK ( $t(7) = 5.96$ ,  $p < 0.01$ ,  $d = 2.11$ ), TCK ( $t(7) = 4.33$ ,  $p < 0.05$ ,  $d = 1.53$ ), TPK ( $t(7) = 6.52$ ,  $p < 0.001$ ,  $d = 2.31$ ) und TK ( $t(7) = 3.93$ ,  $p < 0.05$ ,  $d = 1.39$ ) wurden im Midtest jeweils mit großem Effekt höher als im Prätest eingeschätzt.

Die retrospektive Selbsteinschätzung (ii) zeigte ein ähnliches Bild wie die retrospektive Selbsteinschätzung (i): Die Studierenden schätzten TPACK ( $M = 2.30$ ,  $SD = 0.69$ ), TCK ( $M = 2.38$ ,  $SD = 0.52$ ) und TPK ( $M = 2.40$ ,  $SD = 0.69$ ) als eher gering ein, während TK mit einem Mittelwert von  $M = 3.54$  ( $SD = 1.23$ ) knapp in der oberen Skalenhälfte lag. Im Posttest schätzten die Studierenden die vier Kompetenzbereiche TPACK ( $M = 4.33$ ,  $SD = 0.63$ ), TCK ( $M = 4.88$ ,  $SD = 0.64$ ), TPK ( $M = 4.42$ ,  $SD = 0.59$ ) sowie TK ( $M = 4.23$ ,  $SD = 1.07$ ) mit Mittelwerten  $M > 4$  als eher hoch ein. Im Vergleich zur retrospektiven Selbsteinschätzung zeigten sich auch hier Unterschiede mit großen Effekten. Die Studierenden schätzten ihre Kompetenzen hinsichtlich TPACK ( $t(7) = 5.60$ ,  $p < 0.01$ ,  $d = 1.098$ ), TCK ( $t(7) = 7.64$ ,  $p < 0.001$ ,  $d = 2.70$ ), TPK ( $t(7) = 5.80$ ,  $p < 0.01$ ,  $d = 2.05$ ) und TK ( $t(7) = 3.56$ ,  $p < 0.05$ ,  $d = 1.26$ ) nach der Lehrveranstaltung höher ein als davor.

### Einstellung

In Abbildung 7.2 werden die Ergebnisse zur Erhebung der Einstellung gegenüber dem Lernen mit digitalen Medien an drei Messzeitpunkten veranschaulicht. Die Studierenden waren demgegenüber sowohl vor ( $M = 4.59$ ,  $SD = 0.75$ ,  $N = 11$ ), während ( $M = 4.63$ ,  $SD =$

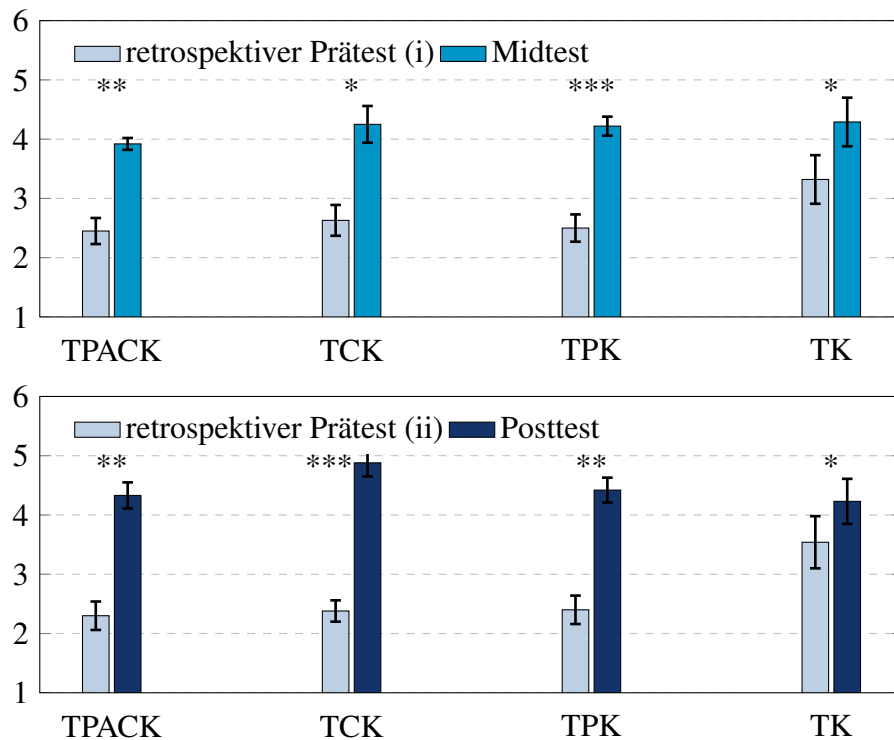


Abbildung 7.1: Ergebnisse der retrospektiven Selbsteinschätzung der TPACK-Komponenten im Midtest ( $N = 8$ ) (oben) und Posttest ( $N = 8$ ) (unten). Der retrospektive Prättest (i) und (ii) wurde separat zu beiden Messzeitpunkten zusätzlich zur jeweils aktuellen Selbsteinschätzung erhoben. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler des Mittelwerts an.

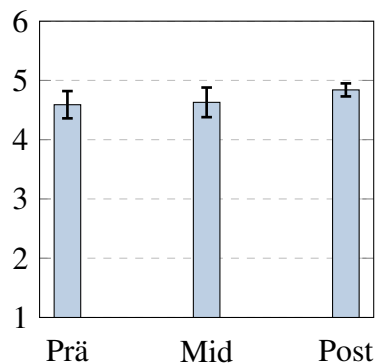


Abbildung 7.2: Ergebnisse zur Einstellung der Studierenden gegenüber dem Lernen mit digitalen Medien. Hier werden drei Messzeitpunkte (Prä- ( $N = 11$ ), Mid- ( $N = 8$ ) und Posttest ( $N = 8$ )) dargestellt.

0.69,  $N = 8$ ) als auch nach ( $M = 4.84$ ,  $SD = 0.31$ ,  $N = 8$ ) der Lehrveranstaltung positiv eingestellt. Die angepasste Stichprobe (matched sample) für den Prä-Post-Vergleich wurde analog zum ersten Forschungszyklus gebildet und umfasste sieben Studierende. Es zeigte sich kein Unterschied in der Einstellung dieser Studierenden zwischen dem Prä- und Posttest. Analog gab es im Prä-Mid-Vergleich mit einer Teilstichprobe von  $N = 7$  keinen Unterschied.

### Evaluation

Im zweiten Zyklus erfolgte die Evaluation über eine Rating-Skala im Posttest. Die deskriptiven Ergebnisse werden in Tabelle 7.1 dargestellt. Mit Skalenmittelwerten zwischen 3.88 ( $SD = 1.25$ , Bezug zur Vorlesung) und 5.88 ( $SD = 0.35$ , XLAB-Betreuung) wurden alle zwölf erhobenen Aspekte der Lehrveranstaltung als positiv (von *eher gut* bis *sehr gut*) bewertet. Insbesondere die Aspekte im direkten Zusammenhang mit dem Besuch des Schülerlabors (also XLAB-Betreuung, Teamarbeit für XLAB-Kurse und Praxiserfahrungen im Schülerlabor) wurden mit einem Mittelwert  $M > 5$  von den Studierenden am besten bewertet. Dies galt auch für die Übungsleitung sowie die Methode der Gruppenarbeit für die Bearbeitung von Präsenzaufgaben. Fünf weitere Aspekte wurden mit einem Mittelwert  $4 < M < 5$  als gut bewertet. Hierzu zählten vier Aspekte des Lehrkonzepts (fachdidaktischer Anteil, digitale Tools, Lernen als angehende Lehrkraft und erfüllte Erwartungen an das Lehramtsstudium) sowie ein Aspekt der Anforderungen (Workload). Diese zehn Aspekte der Lehrveranstaltung wurden im ersten Zyklus als induktive Subkategorien der Stärken der Lehrveranstaltung identifiziert. Die zwei bewerteten Aspekte zur Klausurvorbereitung und zum Bezug zur Vorlesung wurden demgegenüber im ersten Zyklus als Schwächen identifiziert. Sie wurden im zweiten Zyklus im Schnitt zwar als eher gut bewertet, grenzen sich im Mittel aber deutlich von den anderen bewerteten Aspekten ab ( $3 < M \leq 4$ ). Die Gesamtbewertung der Lehrveranstaltung fiel mit einem Mittelwert von  $M = 5.13$  ( $SD = 0.64$ ) gut aus. Vier von acht Studierende gaben darüber hinaus Feedback im Freitextfeld an. Deren qualitative Analyse, die analog zu der aus dem ersten Forschungszyklus erfolgte, führte jedoch zu keiner Erweiterung des entwickelten Kategoriensystems. Daher wird angenommen, dass mit der eingesetzten Evaluationsskala die hauptsächlichen Stärken und Schwächen der Lehrveranstaltung abgedeckt wurden.

Diese Evaluationsergebnisse wurden analog zum ersten Zyklus durch die Erhebung der Authentizität sowie allgemeinem Feedback ergänzt. Die Studierenden schätzten die Lehrveranstaltung sowohl fachwissenschaftlich ( $M = 4.25$ ,  $SD = 0.87$ ) als auch fachdidaktisch ( $M = 4.41$ ,  $SD = 0.94$ ) als authentisch ein. Darüber hinaus waren die eingesetzten digitalen Anwendungen hilfreich für den Lernerfolg der Studierenden ( $M = 4.63$ ,  $SD = 1.19$ ) und auf den astrophysikalischen Fachinhalt abgestimmt ( $M = 4.25$ ,  $SD = 1.28$ ). Der fachdidaktische Anteil wurde ebenfalls als hilfreich empfunden ( $M = 4.63$ ,  $SD = 1.06$ ) und auch hier wurde die Abstimmung zum Fachinhalt von den Studierenden als passend bewertet ( $M = 4.38$ ,  $SD = 1.19$ ).

Tabelle 7.1: Deskriptive Ergebnisse der Evaluation im zweiten Zyklus. Dargestellt werden die Mittelwerte und Standardabweichungen der zwölf Items zu möglichen Stärken und Schwächen sowie einem Item zur Gesamtbewertung der Lehrveranstaltung. Die Items sind in absteigender Reihenfolge ihrer Bewertung sortiert.

Bewerteter Aspekt der Lehrveranstaltung	$M$	$SD$
1) XLAB-Betreuung	5.88	0.35
2) Übungsleitung	5.75	0.46
3) Teamarbeit für XLAB-Kurse	5.50	0.76
4) Praxiserfahrungen im Schülerlabor	5.25	0.89
5) Gruppenarbeit für Präsenzaufgaben	5.25	0.46
6) Fachdidaktischer Anteil	4.88	0.83
7) Digitale Tools	4.63	0.92
8) Lernen als angehende Lehrkraft	4.63	0.74
9) Erfüllte Erwartungen an das Lehramtsstudium	4.63	0.74
10) Workload	4.38	0.92
11) Klausurvorbereitung	4.00	1.07
12) Bezug zur Vorlesung	3.88	1.25
Gesamtbewertung	5.13	0.64

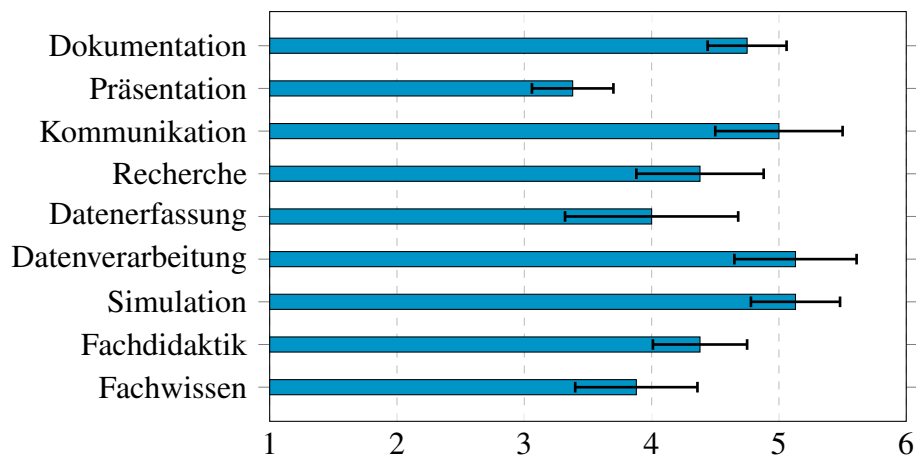


Abbildung 7.3: Deskriptive Ergebnisse des Manipulation Check der Astrophysik-Übung ( $N = 8$ ). Dargestellt werden die sieben Items zu digitalen Basiskompetenzen (Dokumentation, ... , Simulation) sowie das fachdidaktische Wissen und das Fachwissen.

### Manipulation Check

Die deskriptiven Ergebnisse des Manipulation Checks werden in Abbildung [7.3](#) dargestellt. Bemerke, dass im zweiten Zyklus kein Vergleich mit anderen Physik-Übungen erfolgte. Auch in diesem Zyklus wurden nach Angaben der Studierenden das Fachwissen ( $M = 3.88$ ,  $SD = 1.36$ ), das fachdidaktische Wissen ( $M = 4.38$ ,  $SD = 1.06$ ) und die digitalen Basiskompetenzen ( $M = 4.54$ ,  $SD = 0.99$ ) gleichermaßen umfassend adressiert. Letztere können in die sieben Basiskompetenzen unterschieden werden. Die fachspezifischen Kompe-

tenzbereiche Datenverarbeitung ( $M = 5.13, SD = 1.36$ ) und Simulation ( $M = 5.13, SD = 0.99$ ) sowie der allgemeine Kompetenzbereich Kommunikation ( $M = 5.00, SD = 1.41$ ) wurden mit einem Mittelwert  $M \geq 5$  als besonders bedeutsam eingestuft. Die fachspezifische Kompetenz zur Datenerfassung ( $M = 4.00, SD = 1.93$ ) sowie die allgemeinen Kompetenzen zur Dokumentation ( $M = 4.75, SD = 0.89$ ) und Recherche ( $M = 4.38, SD = 1.41$ ) wurden mit einem Mittelwert  $4 \leq M < 5$  als bedeutsam eingeschätzt. Die allgemeine Kompetenz zur Präsentation ( $M = 3.38, SD = 0.92$ ) schien für die Lehrveranstaltung hingegen eher weniger bedeutsam zu sein.

## 7.4 Zusammenfassung

Die Ergebnisse des zweiten Forschungszyklus können analog zu denen des ersten Zyklus (Kapitel [6.5](#)) wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Studierenden schätzten ihre digitalen Kompetenzen hinsichtlich der technologiebezogenen TPACK-Komponenten vor der Lehrveranstaltung als eher gering und nach der Lehrveranstaltung als höher ein.
- Die Studierenden waren positiv gegenüber dem Lernen mit digitalen Medien eingestellt.
- Die Studierenden bewerteten die Lehrveranstaltung insgesamt als gut.
- Die Studierenden bewerteten das Konzept, die methodische Gestaltung, die Anforderungen sowie die Rolle der Übungsleitung als positiv.
- Die Klausurvorbereitung und der Bezug zur Vorlesung wurden als eher gut bewertet, schnitten unter allen bewerteten Aspekten der Lehrveranstaltung jedoch am schlechtesten ab.
- Die Studierenden bewerteten einzelne Aspekte der Lehrveranstaltung als authentisch, hilfreich und gut aufeinander abgestimmt.
- Die Lehrveranstaltung adressierte gleichermaßen digitale Basiskompetenzen, fachdidaktisches Wissen sowie Fachwissen.

## Teil III

# Lernende und das Hertzsprung–Russell–Diagramm

## 8 Hintergrund und Motivation

Das Hertzsprung–Russell–Diagramm ist der achte astrophysikalische Fachinhalte der entwickelten Lehrveranstaltung (Kapitel 4.6). Die Praxiserfahrungen im ersten Zyklus deuteten darauf hin, dass seitens der Studierenden verschiedene Verständnisprobleme im Umgang mit diesem Diagramm vorlagen. Während der zwei Erarbeitungsphasen in der Übungssitzung (vgl. Tabelle 4.6) zeigten sich insbesondere Schwierigkeiten hinsichtlich physikalischer Zusammenhänge und der Einschätzung des Alters von Sternhaufen. Konkrete Ursachen für die Verständnisprobleme konnten dabei jedoch nicht ausgemacht werden. Neben diesen Praxiserfahrungen geht auch aus der Literatur hervor, dass mit dem HR–Diagramm diverse Lernschwierigkeiten verbunden sein können (Airey & Eriksson, 2019; Eriksson, Rosberg & Redfors, 2017). Airey und Eriksson (2019) unterteilten diese Schwierigkeiten in vier potentielle Hürden, welche direkt durch die besonderen Eigenschaften des HRDs, wie sie auch in Kapitel 4.6 beschrieben wurden, hervorgerufen werden:

**Historisch (*History*):** Mit der absoluten Magnitude und der Spektralklasse haben zwei der abgebildeten Sternparameter einen historischen Ursprung. Die Definition und Interpretation dieser zwei Größen kann daher für Lernende eine Herausforderung sein, wenn ihnen die historischen Wurzeln nicht bekannt sind.

**Auslassungen (*Omission*):** Die Masse und der Radius sind zwei zentrale Sternparameter, die im Diagramm nicht explizit dargestellt werden. Der Radius wächst im HRD von unten links nach oben rechts und die Masse von Hauptreihensternen nimmt mit steigender Leuchtkraft von unten rechts nach oben links zu. Für Lernende, die nicht mit den physikalischen Zusammenhängen vertraut sind, kann die Entnahme von derartigen Informationen aus dem Diagramm schwierig sein.

**Überladung (*Overloading*):** Die visuelle Komplexität des HRDs ist aufgrund seiner Informationsfülle vergleichsweise hoch. Dies äußert sich auch im eingefärbten Hintergrund, der nicht aus ästhetischen sondern aus physikalischen Gründen Bestandteil des Diagramms ist – er gibt die Sternfarbe an.

**Erwartungen (*Expectations*):** Das HRD beinhaltet mehrere kontraintuitive Aspekte, die

vermutlich nicht den Erwartungen und bisherigen Erfahrungen der Lernenden entsprechen. (i) Die Temperaturwerte nehmen von links nach rechts ab, die heißen Sterne liegen also links. (ii) Heiße Sterne sind blau und kalte Sterne rot, was genau umgekehrt zur Assoziation von hohen Temperaturen mit warmen Farben wie Rot ist. (iii) Damit geht einher, dass „tote“ Sterne heiß sind, obwohl Hitze eher mit dem Leben verbunden wird. (iv) Die Skalen der Temperatur und der Leuchtkraft sind logarithmisch und nicht linear.

Aufbauend auf ihrer Analyse schreiben Airey und Eriksson (2019) dem HR-Diagramm eine hohe disziplinäre Affordanz (*disciplinary affordance* (Airey, 2015)) zu, da Astrophysiker:innen einen deutlich höheren Nutzen aus dem Diagramm ziehen als die bloße Visualisierung von astrophysikalischen Messwerten. Für Expert:innen dieser Disziplin bietet das HRD tiefgehende Informationen über komplexe Zusammenhänge von Sternparametern und den Prozess der Sternentwicklung. Sie können auch solche Informationen ablesen, die nicht explizit dargestellt sind. Demgegenüber stufen Airey und Eriksson (2019) die pädagogische Affordanz (*pedagogical affordance* (Airey, 2015)) des HRDs als niedrig ein. Aufgrund der oben beschriebenen potentiellen Hürden im Umgang mit dem Diagramm schätzen sie diesen Fachinhalt für Lehr-Lern-Situationen als schwer zugänglich ein und nehmen an, dass Lernende im Gegensatz zu Astrophysiker:innen den disziplinären Nutzen des HRD auf den ersten Blick nicht erkennen können. Da das HR-Diagramm für die astrophysikalische Disziplin von herausragender Bedeutung und ein üblicher Bestandteil von universitären Lehrveranstaltungen ist (Brogt, 2009), es wird daher auch in gängigen Lehrbüchern wie dem von Carroll und Ostlie (2017) thematisiert, besteht aus fachdiaktischer Sicht die Notwendigkeit, dessen pädagogische Affordanz zu erhöhen (vgl. Airey und Eriksson (2019)). Ein erster Schritt ist dahingehend die gezielte empirische Untersuchung von aufkommenden Schwierigkeiten in Lernprozessen mit dem HRD, was aber in der fachdidaktischen Forschung bislang nicht ausreichend erfolgte. Aus diesem Grund werden die Entwicklungsarbeit und Wirkungsamkeitsstudie dieser Arbeit (Teil II) durch eine empirische Studie zum Umgang von Lernenden mit dem HR-Diagramm erweitert. Die Ergebnisse sollen zum Re-Design der entsprechenden Übungssitzung und somit zur langfristigen Optimierung der entwickelten Lehrveranstaltung beitragen und gliedern sich daher direkt in den DBR-Ansatz ein. In den folgenden Kapiteln werden die Forschungsfragen formuliert, das methodische Vorgehen beschrieben und die Ergebnisse der empirischen Studie vorgestellt. Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurden Eye-Tracking (ET) zur Analyse der visuellen Aufmerksamkeit, retrospektive Interviews und ein quantitatives Erhebungsinstrument eingesetzt. Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst und in die Entwicklungsarbeit eingeordnet.

## 9 Forschungsfragen und Methoden

Aufbauend auf der beschriebenen Literatur sowie den Praxiserfahrungen aus dem ersten Zyklus motivierte sich das Forschungsinteresse, den Umgang von Lernenden mit dem HR-Diagramm und insbesondere den Prozess der Informationsentnahme aus diesem Diagramm zu untersuchen. Damit ging das Ziel einher, die Schwierigkeiten, Lernprozesse sowie Strategien im Umgang mit dem HRD umfassend zu analysieren. Folgende Forschungsfragen wurden dabei adressiert:

**FF1** *Wie gut gelingt Studierenden die Entnahme von Informationen aus dem HRD (gemessen durch Scores) und von welchen Schwierigkeiten berichten sie (aufgedeckt durch Interviews und der Einschätzung der kognitiven Belastung)?*

**FF2** *Können die berichteten Schwierigkeiten während der Auseinandersetzung mit dem HRD durch eine Analyse der visuellen Aufmerksamkeit empirisch gestützt werden?*

**FF3** *Wie wirkt sich das Level der Expertise auf die Auseinandersetzung mit dem HRD aus?*

Hinsichtlich der ersten Forschungsfrage wurde erwartet, dass die in der Literatur beschriebenen Lernschwierigkeiten unterstützt und erweitert werden können. Diese sollten einerseits auf einer Outcome-Ebene durch das Problemlösen von Items zum HRD offengelegt und andererseits von den Lernenden in retrospektiven Interviews auf einer prozessbasierten Ebene beschrieben werden. Bezüglich der zweiten Forschungsfrage erfolgte die Identifikation von Lernschwierigkeiten durch die Analyse der visuellen Aufmerksamkeit, deren Beitrag ebenfalls auf einer prozessbasierten Ebene lag. Die dritte Forschungsfrage zielte auf den Vergleich von Lernenden mit einem hohen und niedrigen Testergebnis beim Lösen der HRD-Items ab und beinhaltete eine Analyse der Blickbewegung. Dieser Vergleich sollte Aufschluss darüber geben, was einen erfolgreichen Umgang mit dem HRD ausmachte und wie diese beiden Gruppen im Umgang mit dem Diagramm vorgehen. Aufbauend darauf konnten Heuristiken für das Problemlösen mit dem HRD formuliert werden, welche die in den ersten zwei Forschungsfragen adressierten Lernschwierigkeiten aufgreifen.

Die bezüglich der zweiten Forschungsfrage angestrebte Analyse der Blickbewegung beim Problemlösen mit Diagrammen ist in der Physikdidaktik eine beliebte und aktuelle Forschungsmethode. Hierfür wurde Eye-Tracking bereits in verschiedenen Studien eingesetzt, um die visuellen und kognitiven Prozesse sowie Schwierigkeiten beim Problemlösen mit Diagrammen, die zu der Repräsentationsform der Graphen zählen, zu untersuchen (Hahn & Klein, 2022). Chumachemko, Shvarts und Budanov (2014) untersuchten beispielsweise den Umgang von Experten und Novizen mit einem kartesischen Koordinatensystem. Sie fanden heraus, dass die Sakkaden der Experten insbesondere in horizontaler und vertikaler Richtung verliefen, was die typische Herangehensweise an kartesische Koordinatensysteme zeigt.



Des Weiteren wurde in zwei Studien herausgefunden, dass die Studierende einer unbekannt-ten Achsenbeschriftung mehr Aufmerksamkeit widmeten als einer bekannten und sie für die Informationsentnahme aus unvertrauten Kontexten mehr Zeit benötigten als aus vertrauten Kontexten (Klein, Küchemann, Brückner, Zlatkin-Troitschanskaia & Kuhn, [2019]; Susac, Bubic, Kazotti, Planinic & Palmovic, [2018]). Aber auch unabhängig von Eye-Tracking besteht ein grundsätzliches Forschungsinteresse in der Interaktion von Lernenden mit Graphen (z.B. Beichner ([1994]), Wemyss und van Kampen ([2013])), weil darin im wissenschaftlichen sowie schulischen Kontext eine zentrale Kompetenz von Lernenden liegt (von Kotzebue & Nerdel, [2012]). In den Bildungsstandards für Physik (KMK, [2020]) werden fachspezifische Diagramme und Graphen beispielsweise unter der Kommunikationskompetenz der Lernenden aufgeführt. Darüber hinaus wird die Informationsentnahme aus Diagrammen als eine kognitive Teilkompetenz des PISA-Tests definiert und darin gezielt durch Aufgaben erhoben (Artelt et al., [2001]). Vor diesem Hintergrund erscheint der Einsatz von Eye-Tracking (ET) zur Untersuchung von Lernschwierigkeiten im Umgang mit dem HRD nützlich und sinnvoll, da so auch das in der Fachdidaktik bestehende Forschungsinteresse durch ein einzigartiges und wichtiges Diagramm der Astrophysik erweitert wird.

## 9.1 Forschungsdesign

Das Studiendesign unterteilte sich in vier Hauptphasen, die in Abbildung 9.1 dargestellt werden, und die Teilnahme erfolgte jeweils einzeln in den Räumlichkeiten des Eye-Tracking Labors. Dabei wurden ein 24-Zoll Bildschirm und ein stationäres Eye-Tracking System (Tobii X3-120, < 0.40° Auflösung, 120 Hz) eingesetzt. Die Teilnehmenden saßen etwa 65 cm vom Bildschirm entfernt und wurden instruiert, den Kopf nicht zu bewegen. Vor Beginn jeder Messung wurde der Eye-Tracker durch eine neun-Punkte Kalibrierung eingestellt.

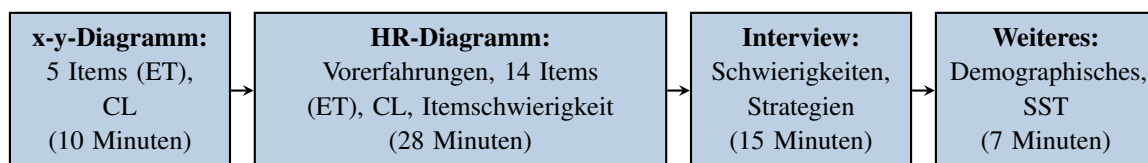


Abbildung 9.1: Darstellung des Forschungsdesigns bestehend aus vier Phasen. Die Studie dauerte etwa eine Stunde.

In der ersten Phase zum *x-y-Diagramm* lösten die Studierenden zunächst fünf Items am Computerbildschirm, in denen Punkte in einem kartesischen Koordinatensystem, also einem kontextfreien *x-y-Diagramm* (kurz *xy*), dargestellt waren. Dabei wurden die Stimuli so präsentiert, dass zuerst (a) die Aufgabenstellung, dann für 0,6 Sekunden (b) ein Fixationskreuz, dann erneut (c) die Aufgabenstellung zusammen mit dem Diagramm und abschließend (d) ein verblasstes Diagramm mit der Aufforderung zur mündlichen Beantwortung des Items er-

schiene (vgl. Abbildung 9.2). Bei der Itembearbeitung erhielten die Studierenden also zuerst die Möglichkeit, die Aufgabenstellung zu verstehen (a). Anschließend wurde ihr Blick auf die Mitte des Bildschirms gelenkt (b). Dann konnten sie das Diagramm interpretieren und über die Itemlösung nachdenken (c). Anschließend an diese Denkphase sprachen sie die Lösung in der Sprechphase laut aus, ohne dabei das Diagramm scharf sehen zu können (d). Die Studierenden konnten durch Betätigen der Leertaste jeweils die nächste Phase der Stimulipräsentation starten, wobei der Wechsel von (b) zu (c) nach 0,6 Sekunden automatisch erfolgte. Dieses Prozedere wurde zu Beginn der ersten Phase durch zwei triviale Beispielitems eingeübt, bevor die fünf xy-Items präsentiert wurden, und wurde aus zwei Gründen gewählt. Erstens konnte so die Blickbewegung der Studierenden in der Denkphase aufgenommen werden, ohne eine zusätzliche kognitive Belastung durch gleichzeitiges Denken und Sprechen zu erzeugen. Zweitens ermöglichte die vorgegebene Reihenfolge Text—Fixationskreuz—Diagramm einen einheitlichen Startpunkt der Blickbewegung beim Betrachten des Diagramms, wodurch Transitionen zum Text als erneutes Lesen einfach nachvollzogen werden konnten. Die fünf xy-Items waren hinsichtlich ihrer Anforderungen und der Diagrammdarstellung isomorph zu ausgewählten Items zum HRD, wie sie in der zweiten Phase der Studie eingesetzt wurden. Beide Itemtypen werden in Kapitel 9.2 im Detail vorgestellt. Im Anschluss an diese erste ET-Messung schätzten die Studierenden anhand eines Fragebogens ihre kognitive Belastung (CL) im Zusammenhang mit der Itembearbeitung ein. Die zweite Phase zum *HR–Diagramm* schloss nahtlos daran an, indem die Studierenden anhand des Fragebogens Angaben zu den Vorerfahrungen mit Astrophysik und der Vertrautheit mit dem HRD machten. Es folgte die zweite ET-Messung, bei der 14 Items zum HRD eingesetzt wurden. Die Stimulipräsentation erfolgte wie bereits zuvor. Auch in dieser Phase machten die Studierenden anschließend Angaben zur kognitiven Belastung in Bezug auf die zuvor bearbeiteten HRD-Items. Darüber hinaus gaben sie auf dem Fragebogen für alle HRD-Items die wahrgenommene Itemschwierigkeit an. Diese Phase war mit etwa einer halben Stunde der Hauptteil der Studie. Im Anschluss wurde ein leitfadengestütztes Interview durchgeführt, um die Studierenden nach Schwierigkeiten und Strategien im Umgang mit dem HRD zu befragen. Die Interviews dauerten etwa 15 Minuten. Abschließend wurden in der vierten Phase der Studie demographische Informationen erhoben und die Studierenden absolvierten einen standardisierten Test zum räumlichen Vorstellungsvermögen am Computer. Insgesamt dauerte die Studie etwa eine Stunde. Alle eingesetzten Instrumente und das verwendete Material werden in den nachfolgenden Kapitel näher erläutert und sind im Anhang F zu finden.

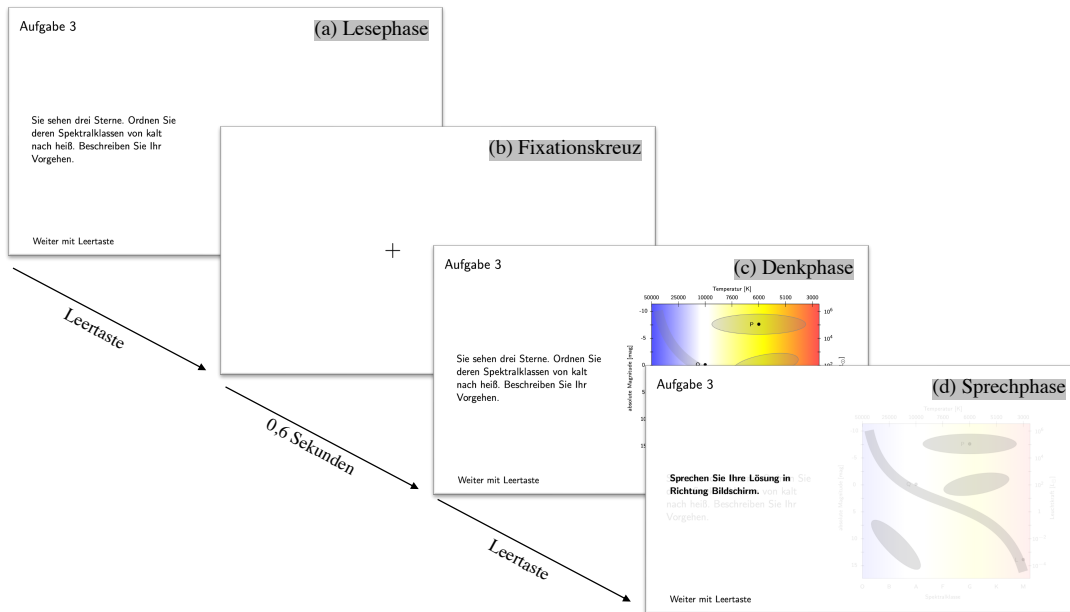


Abbildung 9.2: Veranschaulichung der Stimulipräsentation bestehend aus der Lesephase, dem Fixationskruz, der Denkphase und der Sprechphase. Dieses Prozedere wurde für alle xy- und HRD-Items eingesetzt. Erst in der Sprechphase wurde die Beantwortung des Items laut ausgesprochen (eigene Darstellung nach Langendorf, Schneider und Klein (2022)).

## 9.2 HRD– und xy–Items

Da auf keinen standardisierten Test aus der Literatur zurückgegriffen werden konnte, wurden die HRD– und xy–Items eigens für diese Studie entwickelt. Bei der Entwicklung der HRD–Items wurde die Empfehlung von Airey und Eriksson (2019) beachtet, das HRD in drei Schritten einzuführen, um die pädagogische Affordanz zu erhöhen und diesen Lerninhalt zugänglicher zu machen: Die ersten Items A1–A8 verlangten daher die Auseinandersetzung mit allen aufgetragenen physikalischen Größen (Spektralklasse, Temperatur, absolute Magnitude und Leuchtkraft). Im nächsten Schritt adressierten die Items A9–A12 das Identifizieren der zentralen Zusammenhänge zwischen den aufgetragenen Größen. Zuletzt zielten die Items A13 und A14 auf das Verstehen der übergeordneten Bedeutung des HRDs ab, also die Sternentwicklung und die Einteilung in Leuchtkraftklassen. Die 14 HRD-Items bestanden jeweils aus einem Aufgabentext und einem Diagramm wie dem in Abbildung 4.10, in dem abhängig von der Aufgabenstellung unterschiedliche Informationen (z.B. Sterne, Entwicklungswege, etc.) gegeben waren. Die Items adressierten verschiedene Kompetenzen, die für die Informationsentnahme aus einem Diagramm relevant sind. Nach Lachmayer, Nerdel und Precht (2007) bezogen sich die nötigen Fähigkeiten beim Diagrammgebrauch auf die Bereiche *Identifizierung* und *Ablesen*: Die Items verlangten das Ablesen und Vergleichen von Werten, das Beschreiben und Vorhersagen von Trends sowie das Erkennen von Zusammenhängen, wofür zunächst die dargestellten Relationen, Variablen und Achsen identifiziert

Tabelle 9.1: Beschreibung der HRD-Items sowie der dazu isomorphen xy-Items (gekennzeichnet mit †) (Langendorf, Schneider &amp; Klein, 2022).

Item	Anforderungen	Zusätzliche Informationen
A1†	Spektralklasse angeben († x-Wert angeben)	2 Sterne († 2 Punkte)
A2†	Trend für eine Temperaturzunahme bei konstanter Leuchtkraft vorhersagen († Trend für eine Zunahme in x-Richtung bei konstantem y-Wert vorhersagen)	1 Stern († 1 Punkt)
A3	Temperaturwerte in Abhängigkeit der Spektralklasse vergleichen	3 Sterne
A4	Trend für die Farbe in Abhängigkeit von der Temperatur vorhersagen	1 Stern
A5	Temperaturwerte in Abhängigkeit der Farbe vergleichen	2 Leuchtkraftklassen (Riesen, Weiße Zwerge)
A6†	Magnitudenwerte vergleichen († y-Werte vergleichen)	3 Sterne († 3 Punkte)
A7†	Leuchtkraftwerte vergleichen († y-Werte vergleichen)	2 Sterne und die Sonne († 2 Punkte und ein Referenzpunkt)
A8†	Paare von Leuchtkraftwerten vergleichen († Paare von y-Werten vergleichen)	3 Sternpaare († 3 Punktepaare)
A9	Zusammenhang zwischen Masse und Leuchtkraft erkennen	2 Sterne
A10	für Sterne der Hauptreihe den Zusammenhang zwischen Temperatur, Leuchtkraft, Magnitude und Farbe erkennen	1 Leuchtkraftklasse (Hauptreihe)
A11	Zusammenhang zwischen Masse und Temperatur anhand der Masse-Leuchtkraft-Beziehung erkennen	1 Leuchtkraftklasse (Hauptreihe), $L \propto m$
A12	Entwicklung des Radius beschreiben	Sternentwicklung (3 Phasen), $L \propto T \cdot R$
T13	gesamte Sternentwicklung beschreiben und auf den Radius eingehen	Sternentwicklung (4 Phasen), $L \propto T \cdot R$
A14	Radiuswerte und Farbe vergleichen	4 Leuchtkraftklassen (Hauptreihe, Rote Riesen, Überriesen, Weiße Zwerge)

werden mussten. Die Items wurden so formuliert, dass eine erfolgreiche Bearbeitung ohne spezifisches Vorwissen zur Astrophysik möglich war. Sie sollten also nicht das astrophysikalische Wissen der Studierenden testen, sondern Erkenntnisse über die Informationsentnahme aus dem HRD ermöglichen. Zu fünf der HRD-Items wurden isomorphe xy-Items entwickelt, bei denen ein kartesisches Koordinatensystem mit je einer kontextfreien x- und

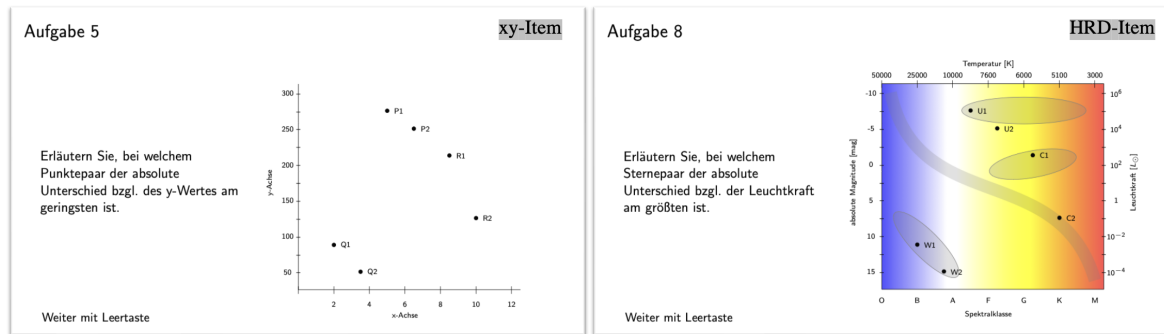


Abbildung 9.3: Beispiel für ein isomorphes Itempaar mit einem x-y-Diagramm (links) und einem HRD (rechts). Gesucht werden das Punktepaar P1, P2 (xy-Item) und U1, U2 (HRD-Item).

y-Achse eingesetzt wurde. Die Aufgabenstellung sowie die gegebenen Informationen im Diagramm wurden entsprechend des x-y-Diagramms zur Vergleichbarkeit so umformuliert, dass sich die Anforderungen nicht änderten und alle Diagrammelemente dieselbe Position beibehielten. Zudem wurde darauf geachtet, die isomorphen Items so anzupassen, dass dieselben eingetragenen Punkte wie im HRD-Item als korrekte Lösung identifiziert wurden, um die Blickbewegungen vergleichen zu können. Ein Beispiel hierfür ist mit dem Itempaar A8<sup>†</sup> in Abbildung 9.3 zu finden. Im HRD-Item (rechts) wird das Paar mit dem *größten* absoluten Unterschied in der Leuchtkraft gesucht, was aufgrund der logarithmischen Skala das oberste Paar (U1, U2) ist. Im xy-Item (links) ist ebenfalls das oberste Paar (P1, P2) die Lösung, jedoch wird hier nach dem Punktepaar mit dem *geringsten* absoluten Unterschied in y-Richtung gefragt. In Tabelle 9.1 werden darüber hinaus alle eingesetzten HRD-Items und die dazu isomorphen xy-Items (gekennzeichnet durch ein † Symbol) zusammengefasst.

Die mündlichen Antworten der Studierenden wurden für beide Itemsorten zunächst verschriftlicht und anschließend anhand eines festen Schemas bewertet. Dabei wurden korrekte Aussagen jeweils mit einem Punkt bewertet und abhängig von den Anforderungen des Items konnten zwischen einem (z.B. Item A11) und vier Punkte (z.B. Item A12) erreicht werden. Die Studierenden erhielten in der Summe maximal 32 Punkte für die HRD-Items und maximal zehn Punkte für die xy-Items, was einer maximalen Gesamtpunktzahl von 42 Punkten entsprach. Die Hälfte des Datenmaterials wurde von einem zweiten unabhängigen Rater bewertet, der das Bewertungsschema aus Anhang F als Grundlage nahm. Zwischen beiden Personen zeigte sich eine fast vollkommene Übereinstimmung in der Bewertung der Items ( $\kappa = 0.91$ ). Die Scores der Studierenden wurden für die anschließende Analyse itemweise durch den Maximalscore geteilt, um so die *Lösungswahrscheinlichkeit* eines Items zu bestimmen. Die Lösungswahrscheinlichkeit lag daher zwischen 0 (geringe Lösungswahrscheinlichkeit, also schwieriges Item) und 1 (hohe Lösungswahrscheinlichkeit, also einfaches Item).

Während der Itembearbeitung wurden die Blickbewegungen der Studierenden mit einem

## Aufgabe 12

(T)

Die Leuchtkraft von Sternen ist proportional zur Temperatur und dem Radius des Sterns:

$$L \sim T \cdot R$$

Ein Stern bewegt sich wie angegeben im Diagramm. Beschreiben Sie die Änderung seines Radius für beide Schritte.

Weiter mit Leertaste

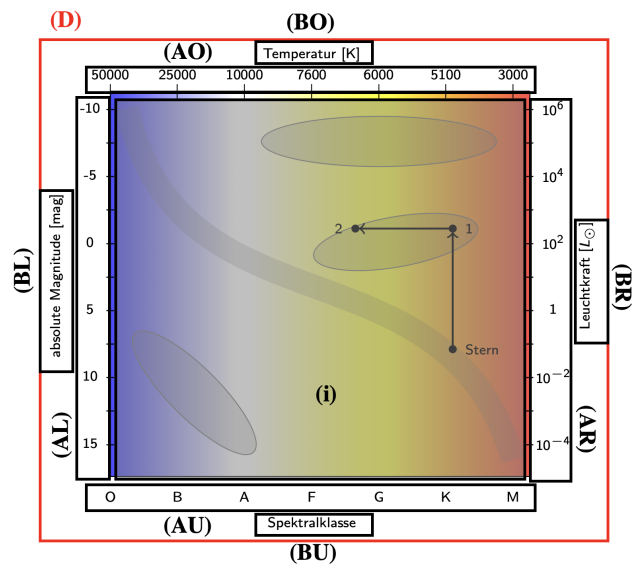


Abbildung 9.4: Definition der AOIs, wie sie für alle HRD- und xy-Items genutzt wurde. In rot werden die zwei globalen AOIs zum Text (T) und zum Diagramm (D) dargestellt. Innerhalb der D-AOI liegen neun lokale AOIs zum Inneren des Diagramms (i) sowie den Achsen (AO, AU, AL, AR) und deren Beschriftung (BO, BU, BL, BR).

Eye-Tracker aufgenommen. Die Analyse der ET-Daten erfolgte ausschließlich zur Denkphase der Stimulipräsentation (vgl. Abbildung 9.2). Hierfür wurden für das HRD sowie das x-y-Diagramm Areas of Interest (AOIs) definiert, um dafür ET-Metriken wie die Total Visit Duration (TVD) als verbrachte Zeit auf einer AOI und die Total Visit Counts (TVCs) als Anzahl der Sprünge in eine AOI zu bestimmen. Darauf aufbauend wurden anhand von gepaarten t-Tests mit Bonferroni-Korrektur die Metriken zwischen den isomorphen Diagrammen verglichen. Die definierten AOIs können nach Hahn und Klein (2022) in *globale* und *lokale* Bereiche unterschieden werden. Abbildung 9.4 zeigt exemplarisch für das Item A12, wie die AOIs in dieser Studie definiert wurden. Die T-AOI und die D-AOI wurden global definiert und sind in der Abbildung rot markiert. Die T-AOI umfasste den Aufgabentext. Deren Größe unterschied sich also von Item zu Item. Die Größe der D-AOI war demgegenüber fest, denn diese AOI umfasste das gesamte Diagramm inklusive der Achsenbeschriftungen. Diese globale AOI beinhaltete zudem neun lokale AOIs, die sich gegenseitig nicht überlappten und individuelle Größen hatten. Hierzu zählte zunächst das Innere des Diagramms (i-AOI). Darüber hinaus wurden jede Achse (A) und jede Achsenbeschriftung (B) als lokale AOIs für die vier aufgetragenen physikalischen Größen definiert. Damit die AOI-Bezeichnungen zwischen den HRD- und xy-Items analog waren, wurden diese jeweils entsprechend ihrer Position im Diagramm, also oben (O), unten (U), links (L) oder rechts (R) bezeichnet. Daraus ergaben sich neben der i-AOI schließlich acht weitere lokale AOIs (AO, AU, AL, AR und BO, BU, BL und BR), deren Größe sich zwischen den Items nicht unterschied.

Tabelle 9.2: Auflistung der eingesetzten Skalen zur kognitiven Belastung (ICL, GCL) nach Leppink, Paas, Van der Vleuten, Van Gog und Van Merriënboer (2013) und zur Vertrautheit mit dem HRD (selbst formuliert). Als Maß der internen Konsistenz wird das gemittelte Cronbach's  $\alpha$  angegeben.

Skala	Items	Beispiel	$\alpha$
ICL	3	Die in den Aufgaben behandelten Zusammenhänge habe ich als sehr komplex wahrgenommen.	.82
GCL	3	Die Aufgabenbearbeitung hat mein Verständnis von Diagrammen verbessert.	.88
Vertrautheit	6	Ich kann beschreiben, wie das Hertzsprung–Russell–Diagramm aussieht.	.83
Item-schwierigkeit	14	Geben Sie im Folgenden die Schwierigkeit jeder einzelnen Aufgabe zum HRD an.	.72

### 9.3 Quantitative Erhebung und Analyse

Die in dieser Studie eingesetzten quantitativen Erhebungsinstrumente werden in Tabelle 9.2 aufgelistet. Die CL-Messung erfolgte anhand des Instruments von Leppink et al. (2013). Dessen Items wurden an die Gegebenheiten dieser Studie angepasst und so umformuliert, dass sie sich auf das HRD bzw. das x-y-Diagramm bezogen. Die Abfrage erfolgte über eine zehnstufige Likert-Skala, wobei zur intuitiveren Interpretation im Nachhinein eine lineare Transformation der Skalenwerte auf das Intervall [0,1] erfolgte. Eine geringe kognitive Belastung wurde mit 0 und eine hohe mit 1 impliziert. Die CL-Skala deckte drei Arten der kognitiven Belastung (ICL, GCL und ECL) ab und eine explorative Faktorenanalyse unterstützte diese inhaltlich plausible Struktur. Es wurde eine Hauptkomponentenanalyse mit Varimax-Rotation durchgeführt. Anhand des Kaiser-Kriteriums und des Scree-Plots konnten für den HRD-Teil und den xy-Teil drei Faktoren extrahiert werden. Dabei wurden ausschließlich Faktoren mit Eigenwerten von mindestens 1 betrachtet. Die extrahierten Faktoren klärten eine Gesamtvarianz von 76.09% beim HRD-Teil und 73.74% beim xy-Teil auf. In Tabelle 9.3 werden die Faktorladungen für den HRD-Teil und den xy-Teil anhand der rotierten Komponentenmatrix dargestellt. Die Faktorzuordnung ist in der Tabelle farblich markiert und erfolgte, wenn die Faktorladung mindestens 0.40 und die Differenz zu Querladungen mindestens 0.20 betrug. Die so extrahierten Faktoren im HRD-Teil waren inhaltlich plausibel und konnten den drei Belastungsarten ICL, GCL und ECL zugeordnet werden. Beim xy-Teil war die inhaltliche Interpretation der extrahierten Faktoren hingegen unplausibel, da hier die drei Items zum ECL nicht auf einen gemeinsamen Faktor luden. Der ECL wurde durch Items abgedeckt, wie z.B. *Die Anweisungen waren voll von unklaren und unbekanntem Begriffen*. Hierbei ergaben sich Bodeneffekte, die sich auch in einer geringen Reliabilität zeigten ( $\alpha = 0.08$ ). Aus diesem Grund beschränkte sich die Analyse der Daten auf die

Tabelle 9.3: Die rotierte Komponentenmatrix der Messung zur kognitiven Belastung über je drei Items zum ICL, ECL und GCL. Die Messung erfolgte separat für die Belastung im Zusammenhang mit dem HRD und dem x-y-Diagramm. Die Zuordnung der Variablen auf die Faktoren wird durch eine farbliche Markierung angegeben.

Item	HRD			xy		
	Komp. 1	Komp. 2	Komp. 3	Komp. 1	Komp. 2	Komp. 3
ICL1	.91	.06	.12	.87	.08	.10
ICL2	.86	-0.1	.01	.81	.17	-.20
ICL3	.74	.09	.37	.74	-.01	.35
ECL1	-.14	-.19	.82	-.01	-.14	.93
ECL2	.30	.04	.74	.71	-.19	-.24
ECL3	.36	-.30	.68	.61	.14	.03
GCL1	.44	.71	.82	.08	.96	-.08
GCL2	-.06	.94	.74	.11	.92	-.13
GCL3	-.01	.91	.68	.00	.88	.01

Items zum ICL und GCL, die jeweils eine gute Reliabilität aufwiesen ( $\alpha > .80$ ) und deren Struktur in der Faktorenanalyse inhaltlich plausibel aufgezeigt wurde. Die Ergebnisse zur kognitiven Belastung wurden anhand von gepaarten t-Tests analysiert, um die HRD-Items mit den xy-Items zu vergleichen.

Zur Erhebung der Vertrautheit mit dem HRD als Teil der Vorerfahrungen wurde eine Skala mit sechs Items entwickelt, die eine gute Reliabilität zeigte und ebenfalls über eine 10-stufige Likert-Skala erhoben wurde. Darüber hinaus wurde die wahrgenommene Itemschwierigkeit über eine 6-stufige Likert-Skala für jedes der 14 HRD-Items erhoben und diese selbst formulierten Items zeigten eine akzeptable Reliabilität. Auch hier erfolgte jeweils die lineare Transformation der Skalenwerte wie oben beschrieben. Zudem wurde ein Item zur Erhebung der Vorerfahrungen mit Astrophysik (i) in der Schulzeit, (ii) im Studium und (iii) privat formuliert. Hier konnte alternativ die Option angekreuzt werden, dass (iv) kein Vorwissen besteht. Zur Erhebung des räumlichen Vorstellungsvermögens wurde ein standardisiertes Instrument von Shah und Miyake (1996) eingesetzt – eine Version des Spatial Span Task (SST). Hierbei wurde auf einem Computerbildschirm ein Buchstabe (F, J, L, P oder R) (i) entweder gespiegelt oder korrekt und (ii) beliebig innerhalb der Darstellungsebene gedreht dargestellt. Die Studierenden mussten innerhalb von zwei Sekunden auf dem Bildschirm anklicken, ob der Buchstabe korrekt oder gespiegelt ist, und sich dessen Drehrichtung merken. Diese wurde erst nach einer mit der Zeit steigenden Anzahl weiterer Buchstaben abgefragt. Der SST misst demnach die Fähigkeit, räumliche Informationen zu verarbeiten und sich diese gleichzeitig zu merken. Das räumliche Vorstellungsvermögen wurde mit Werten von 0 bis 1 angegeben.



## 9.4 Qualitative Erhebung und Analyse

In den semistrukturierten Interviews dienten zwei Leitfragen dazu, die Studierenden zum freien und offenen Erzählen zu motivieren (Niebert & Gropengießer, 2014) und dabei ihre Erfahrungen aus der Studie insbesondere im Zusammenhang mit der Itembearbeitung mitzuteilen: (1) *Erzählen Sie einmal, wie Sie die Bearbeitung der Aufgaben in dieser Studie erlebt haben.* (2) *Erzählen Sie bitte, inwiefern Ihnen der Umgang mit dem HRD leicht oder schwer gefallen ist.* Zur Unterstützung erhielten die Studierenden ein ausgedrucktes HRD wie das in Abbildung 4.10. Unterschiedliche weiterführende Fragen dienten zudem dazu, die Ausführungen der Studierenden zu vertiefen oder zu präzisieren. Dabei wurden die Studierenden zum einen zu *prozessbasierten* Äußerungen motiviert (z.B. *Wie sind Sie bei der Bearbeitung der Aufgaben vorgegangen?*), in denen sie ihr konkretes Vorgehen und angewandte Strategien beschrieben. Zum anderen wurden die Studierenden gebeten, *inhaltsbezogene* Erfahrungen zum HRD zu berichten, die sich auf das Vertrautmachen mit dem neuen Diagramm (z.B. *Können Sie die Situation beschreiben, in der Sie das HRD zum ersten Mal betrachtet haben?*) und dessen besondere Eigenschaften bezogen (z.B. *Inwiefern ist Ihnen am HRD etwas Unerwartetes oder Besonderes aufgefallen?*). Die Leitfragen und auch die weiterführenden Fragen sind analog zur qualitativen Erhebung der Wirksamkeitsstudie (vgl. Kapitel 5.3) nach dem SPSS-Prinzip entstanden (Helfferich, 2011). Auch hier wurden die Interviews mit dem Einverständnis der Studierenden akustisch aufgezeichnet und anschließend in anonymisierter Form transkribiert. Diese Transkripte wurden mit der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring (2014) ausgewertet, wobei ein induktiver Ansatz genutzt wurde. Aufbauend auf dem Datenmaterial wurden dabei in Einklang mit der ersten Forschungsfrage solche Kategorien gebildet, in denen Schwierigkeiten, Probleme, Verwirrung oder Unverständnis mit Bezug zum HRD angesprochen wurden. Als Analyseeinheit galt hier analog zur Wirksamkeitsstudie eine zusammenhängende Aussage als direkte Reaktion auf eine Interviewfrage. Das so entstandene Kategoriensystem mit zehn Kategorien (Anhang F) wurde von einem zweiten unabhängigen Rater auf die Hälfte des Datenmaterials angewandt. Dabei zeigte sich eine gute Übereinstimmung vor ( $\kappa = 0.78$ ) und eine fast vollkommene Übereinstimmung nach dem Diskutieren der unabhängigen Kodierungen ( $\kappa = 0.86$ ). Jedes Transkript wurde abschließend so ausgewertet, dass eine Kategorie pro Person nur einmalig gezählt wurde, auch wenn diese innerhalb des Transkripts mehrfach kodiert wurde. Der Grund hierfür war, dass zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage ausschließlich von Interesse war, *ob* sich eine Person zu einer Lernschwierigkeit äußerte und nicht, *wie häufig* sie dies tat.

## 9.5 Stichprobe

Die Studie wurde im Wintersemester 2021/ 2022 mit 35 Physikstudierenden im ersten Semester (20 männlich, zehn weiblich) durchgeführt. Deren mittleres Alter betrug 19.7 ( $SD = 1.5$ ) Jahre und die durchschnittliche Abiturnote war mit 1.5 ( $SD = 0.5$ ) vergleichsweise gut (vgl. KMK (2022)). Das räumliche Vorstellungsvermögen der Studierenden konnte mit durchschnittlich 0.61 ( $SD = 0.17$ ) nach Klein, Hahn und Kuhn (2021) als hoch ( $SST > 0.52$ ) bezeichnet werden. Alle Teilnehmenden verfügten über eine normale bis nahezu normale Sehkraft. Die Studierenden wurden direkt in der Vorlesung über die Studie informiert, ohne dabei konkrete Informationen über den Inhalt oder das Ziel zu erfahren. Ihre Teilnahme war freiwillig und wurde mit 15 Euro vergütet. Sie wurden instruiert, nach der Studie nicht mit nachfolgenden Teilnehmenden über deren Inhalt und Aufbau zu sprechen und diese nicht über das HRD zu informieren. Die Studie wurde mit Studierenden im ersten Semester durchgeführt, weil einerseits davon ausgegangen wurde, dass diese grundsätzlich über die Fähigkeiten zur Informationsentnahme aus Diagrammen verfügen, und andererseits deren Vorwissen hinsichtlich des HRDs als gering bis nicht vorhanden erwartet wurde. Beides konnte bestätigt werden. Die Vertrautheit mit dem HRD wurde über eine Skala mit sechs Items erhoben und deren Mittelwert lag im Intervall von 0 bis 1 nur bei 0.2 ( $SD = 0.06$ ). Im Detail gab nur eine Person an, mit dem HRD bereits vertraut zu sein. Die anderen Studierenden gaben an, das HRD zuvor nicht gesehen und sich nicht damit auseinandergesetzt zu haben. Darüber hinaus setzte sich etwa ein Drittel der Studierenden (12 von 35) zuvor nicht mit Astrophysik auseinander, weder im privaten Umfeld noch in schulischen oder universitären Lehrveranstaltungen. Die Studienteilnehmenden waren demnach leistungsstark, aber ohne spezifisches Vorwissen im Bereich der Astrophysik.

## 10 Ergebnisse

Die Datenanalyse erfolgte wie zuvor beschrieben. Im Folgenden werden zunächst die quantitativen Ergebnisse im Zusammenhang mit der Itembearbeitung und der Fragebogenerhebung vorgestellt, wozu die Punktzahl bzw. Lösungswahrscheinlichkeit, die Itemschwierigkeit und die kognitive Belastung zählen. Anschließend werden die Eye-Tracking Analyse sowie die Ergebnisse der Interviewauswertung vorgestellt. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse und deren Einordnung in die Entwicklungsarbeit aus Teil III. Die Diskussion der Ergebnisse erfolgt anschließend zusammen mit denen der Wirksamkeitsstudie in Kapitel II.

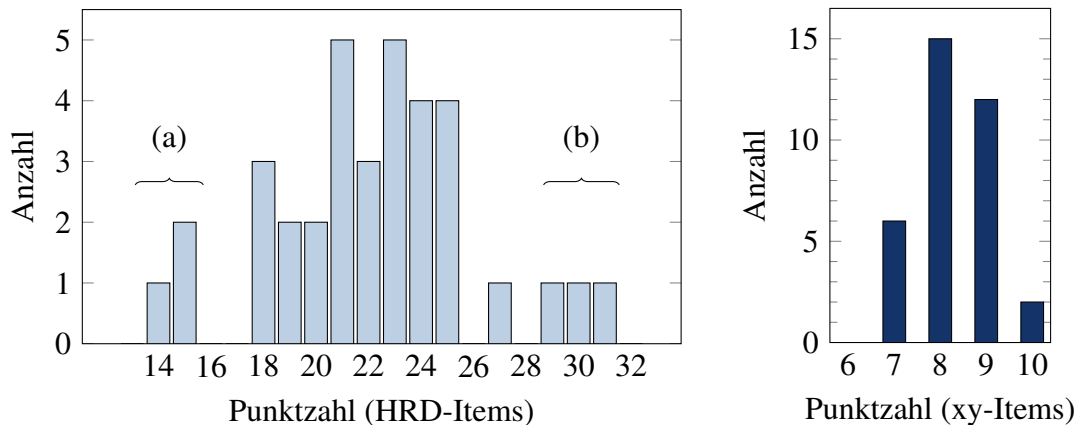


Abbildung 10.1: Deskriptive Darstellung der Punkteverteilung im HRD-Teil (links) und dem xy-Teil (rechts). Die drei Studierenden mit der geringsten Punktzahl im HRD-Teil werden als (a) leistungsschwach bezeichnet. Analog werden die drei Studierenden mit der höchsten Punktzahl als (b) leistungsstark bezeichnet (eigene Darstellung nach Langendorf, Schneider und Klein (2022)).

## 10.1 Lösungswahrscheinlichkeit, Itemschwierigkeit, Belastung

Die deskriptive Analyse der Itembearbeitung zeigte zunächst, dass die Studierenden 69% des Maximalwerts von 32 Punkten im HRD-Teil ( $M = 22.1$ ,  $SD = 3.9$ ) und 83% des Maximalwerts von 10 Punkten im xy-Teil ( $M = 8.2$ ,  $SD = 0.8$ ) erreichten. Aus Abbildung 10.1 geht hervor, dass bei den HRD-Items zwischen 14 und 31 Punkten (44% bis 97% der Maximalpunktzahl) erreicht wurden, während bei den xy-Items zwischen 7 und 10 Punkten (70% bis 100% der Maximalpunktzahl) erreicht wurden. Aufbauend auf der erreichten Punktzahl wurde für die HRD- und xy-Items die Lösungswahrscheinlichkeit bestimmt und in Abbildung 10.2 dargestellt. Die HRD-Items sind dabei mit abfallender Lösungswahrscheinlichkeit, also von einfach (links) bis schwierig (rechts), sortiert. Die Lösungswahrscheinlichkeiten der isomorphen Items sind an entsprechender Stelle ebenfalls in der Abbildung zu finden. Die mittlere Lösungswahrscheinlichkeit der fünf HRD-Items A1†, A2†, A6†, A7† und A8† betrug 0.58 ( $SD = 0.18$ ) und die der fünf xy-Items 0.83 ( $SD = 0.08$ ). Ein gepaarter t-Test zeigte, dass diese fünf HRD-Items eine signifikant geringere Lösungswahrscheinlichkeit hatten und folglich mit großem Effekt schwieriger waren als die isomorphen Items ( $t(34) = -7.65$ ,  $p = .000$ ,  $d = 1.29$ ). Darüber hinaus erfolgte ein entsprechender Vergleich auf Itemebene, der signifikante Unterschiede mit kleinen bis großen Effekten innerhalb der isomorphen Itempaare A2† ( $t(34) = -2.05$ ,  $p < .05$ ,  $d = 0.35$ ), A6† ( $t(34) = -6.73$ ,  $p = .000$ ,  $d = 1.14$ ), A7† ( $t(34) = -2.71$ ,  $p = .01$ ,  $d = 0.46$ ) und A8† ( $t(34) = -5.84$ ,  $p = .000$ ,  $d = 1.00$ ) zeigte (vgl. Abbildung 10.2). Beim Itempaar A1† wurde aufgrund von Deckeneffekten kein Unterschied festgestellt. Neben der Lösungswahrscheinlichkeit wurde aufbauend auf den Einschätzungen der Studierenden für je-

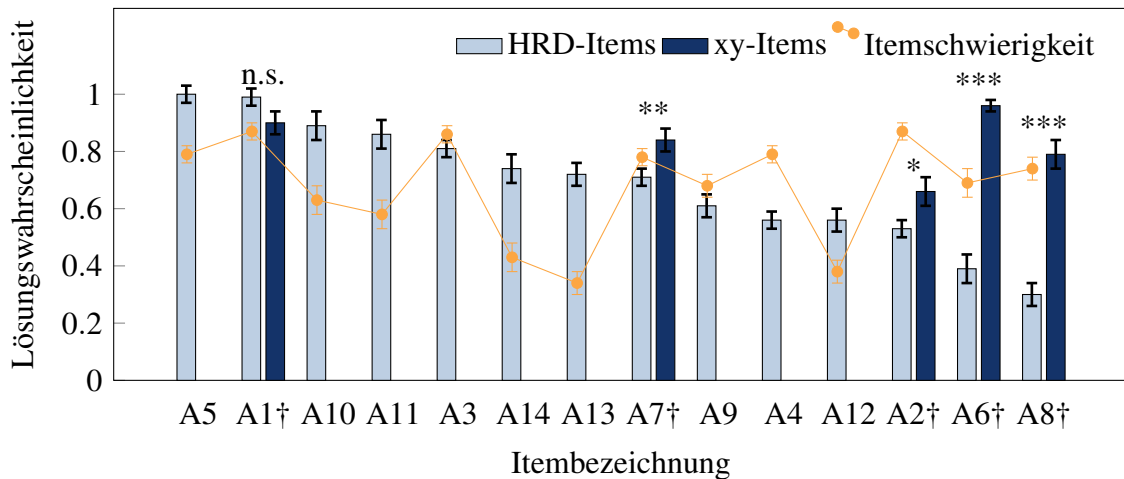


Abbildung 10.2: Ergebnisse der Lösungswahrscheinlichkeit der verwendeten HRD– (hell) und xy–Items (dunkel). Die Items sind mit absteigender Lösungswahrscheinlichkeit, also von einfach (links) bis schwierig (rechts), sortiert. Die Messpunkte (orange) geben die eingeschätzte Itemschwierigkeit von 0 (schwierig) bis 1 (einfach) an. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler des Mittelwerts an (eigene Darstellung nach Langendorf, Schneider und Klein (2022)).

des HRD-Item die wahrgenommene Itemschwierigkeit bestimmt, die parallel zur Lösungswahrscheinlichkeit von 0 (schwierig) bis 1 (einfach) reicht. Sie wird in [Abbildung 10.2](#) durch einzelne Messpunkte (orange) dargestellt. Im Mittel wurden die HRD-Items mit  $M = 0.67$  ( $SD = 0.18$ ) als eher einfach eingestuft, wobei die Einschätzungen insgesamt zwischen  $M = 0.34$  ( $SD = 0.25$ ) für das am schwierigsten eingeschätzte Item A13 und  $M = 0.87$  ( $SD = 0.19$ ) für das am einfachsten eingeschätzte Item A2† lagen. Aus der Abbildung geht hervor, dass man von der eingeschätzten Itemschwierigkeit nicht direkt auf die tatsächliche Lösungswahrscheinlichkeit schließen kann: Die drei Items A2†, A6† und A8† wurden von den Studierenden als überdurchschnittlich einfach eingeschätzt, obwohl sie die Items mit der geringsten Lösungswahrscheinlichkeit waren. Eine Korrelationsanalyse auf Itemebene ergab darüber hinaus, dass bei den Items A7† und A8† jeweils ein negativer Zusammenhang zwischen der Lösungswahrscheinlichkeit und der eingeschätzten Itemschwierigkeit bestand. Bei Item A7† korrelierte ein hoher Wert der wahrgenommenen Itemschwierigkeit mittelstark mit einer niedrigen Lösungswahrscheinlichkeit ( $r = -0.40$ ,  $p < .05$ ); bei Item A8† zeigte sich analog sogar eine starke Korrelation ( $r = -0.60$ ,  $p = .000$ ). Je einfacher die beiden Items demnach für die Studierenden waren, desto schlechter wurden sie tatsächlich gelöst. Es zeigte sich folglich in beiden Fällen ein Einschätzungsfehler der Studierenden hinsichtlich der Anforderungen der Items A7† und A8†.

Die Messung der kognitiven Belastungsformen ICL und GCL wurde für beide Diagrammarten durchgeführt. Hinsichtlich der HRD-Items zeigten sich dabei mit Mittelwerten  $M > 0.5$  eher hohe Belastungen. Die Studierenden berichteten im Zusammenhang mit den xy-

Tabelle 10.1: Ergebnisse zur Messung der kognitiven Belastung im Zusammenhang mit dem HRD und dem x-y-Diagramm. Ein gepaarter t-Test zeigte jeweils signifikante Unterschiede hinsichtlich der intrinsischen kognitiven Belastung (ICL) und der lernbezogenen Belastung (GCL).

Skala	HRD-Teil ( $M, SD$ )	xy-Teil ( $M, SD$ )	t-Test	$d$
ICL	0.51 (0.08)	0.09 (0.00)	$t(34) = 14.68,$ $p = .000,$	2.48
GCL	0.71 (0.08)	0.29 (0.15)	$t(34) = 10.26,$ $p = .000,$	1.74

Items demgegenüber für den ICL und GCL mit Mittelwerten  $M < 0.3$  von einer geringen Belastung. Aus dem Vergleich der zwei Itemformen in Tabelle 10.1 geht hervor, dass die Studierenden im Vergleich zum x-y-Diagramm im Zusammenhang mit dem HRD sowohl eine höhere intrinsische als auch eine höhere lernbezogene Belastung wahrnahmen – mit großen Effekten. Abschließend erfolgte mit den folgenden Variablen eine Korrelationsanalyse nach Pearson mit Bonferroni-Korrektur ( $n = 10$ ): Abiturnote, HRD-Punktzahl, xy-Punktzahl, Vertrautheit mit dem HRD, SST, mittlere wahrgenommene Itemschwierigkeit, ICL (HRD), GCL (HRD), ICL (xy), GCL (xy). Dabei wurden keine signifikanten Korrelationen gefunden.

## 10.2 Eye-Tracking

Im ersten Schritt wurden die ET-Daten der HRD-Items dahingehend ausgewertet, dass die Betrachtungszeit einer lokalen AOI (vgl. Abbildung 9.4) bestimmt wurde, indem die TVD auf die Größe der jeweiligen AOI normiert wurde. Durch die Normierung konnten für jedes Item die AOIs identifiziert werden, die größenunabhängig die meiste Aufmerksamkeit erhielten. In Tabelle 10.2 werden itemweise die drei lokalen AOIs mit der größten normierten TVD angegeben (von 1 bis 3). Zusätzlich werden die AOIs, auf deren physikalische Größen im Itemtext eingegangen wurde und die somit zum Lösen des Items relevant waren, in der Tabelle farblich markiert. Bei Item A12 aus Abbildung 9.4 wurden beispielsweise die Leuchtkraft und die Temperatur im Text genannt, weshalb die AOIs der oberen Größe (AO, BO) sowie der rechten Größe (AR, BR) in Tabelle 10.2 markiert sind. Zusätzlich ist hier die i-AOI markiert, da das Innere des Diagramms zur Bearbeitung von Items zur Sternentwicklung relevant war. Analog war die i-AOI für das Lösen der Items A13 und A14 relevant und wird daher entsprechend farblich markiert. In Tabelle 10.2 werden zunächst die vier AOIs der Achsen (A), dann die i-AOI zum Diagramminneren und abschließend die vier B-AOIs der Achsenbeschriftungen aufgelistet, wodurch sich hinsichtlich der markierten relevanten AOIs in der Tabelle ein symmetrisches Muster ergibt. Besonders auffallend ist die BO-AOI,

Tabelle 10.2: Itemweise Übersicht zur visuellen Aufmerksamkeit auf den lokalen AOIs der Achsen (AL, AR, AO, AU), des Inneren des Diagramms (i) und der Achsenbeschriftungen (BL, BR, BO, BU): Es werden die drei AOIs mit der höchsten normierten TVD angegeben und zudem sind die im Item adressierten AOIs farblich markiert (Langendorf, Schneider & Klein, 2022).

Item	AL	AR	AO	AU	i	BL	BR	BO	BU
A1				1	3				2
A2		3	2				1		
A3			1	2					3
A4			1	2					3
A5			1		2	3			
A6	2					1	3		
A7		1			3		2		
A8		1			3		2		
A9	3	1					2		
A10	2					1	3		
A11		2				3	1		
A12		2	3				1		
A13		3	2				1		
A14			2		1		2		

also die Achsenbeschriftung der Temperatur, denn diese war für acht Items relevant und erhielt gleichzeitig bei keinem Item eine hohe Aufmerksamkeit. Diese Beobachtung wurde bei keiner weiteren AOI gemacht. Aus der Tabelle geht zudem hervor, dass die Achsenbeschriftungen der Leuchtkraft (BR) und der Magnitude (BL) bei je zwei Items (BR-AOI: Items A6, A14; BL-AOI: Items A5, A11) zu den Bereichen mit besonderer Aufmerksamkeit zählten, obwohl die physikalische Größe darin jeweils nicht adressiert wurde. Das ist auch bei der i-AOI zu beobachten, die in vier Fällen (Items A1, A5, A7, A8) zu den Bereichen mit der meisten Aufmerksamkeit zählte, obwohl die Sternentwicklung und somit das Diagramminnere nicht im Item adressiert wurden. Die Temperaturachse (AO) erhielt in Item A14 ebenfalls eine hohe Aufmerksamkeit, obwohl die Temperatur im Itemtext nicht angesprochen wurde. Abgesehen von diesen genannten Fällen stimmten die adressierten AOIs mit den Bereichen, welche die meiste visuelle Aufmerksamkeit erhielten, überein.

In einem weiteren Schritt wurden die ET-Daten für einen Vergleich der isomorphen Itempaare A1<sup>†</sup>, A2<sup>†</sup>, A6<sup>†</sup>, A7<sup>†</sup> und A8<sup>†</sup> ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Tabelle F.3 im Anhang zu finden. Mit gepaarten t-Tests wurden die HRD- und xy-Items hinsichtlich der TVD und der TVC für die zwei globalen AOIs zum Diagramm und Text verglichen. Beim Vergleich der gesamten TVD für die D-AOI (Diagramm) stellte sich zunächst heraus, dass die Studierenden das HRD insgesamt mit großem Effekt länger betrachteten als das x-y-Diagramm ( $d = 0.94$ ). Auf Itemebene stellten sich zudem A1<sup>†</sup> und A6<sup>†</sup> im Detail als die

zwei Items heraus, bei denen das HRD länger als das x-y-Diagramm betrachtet wurde. Die TVD für die D-AOI war für Item A1† mit großem Effekt ( $d = 0.84$ ) und für Item A6† mit mittlerem Effekt ( $d = 0.65$ ) beim HRD größer als beim xy-Item. Hinsichtlich der TVD und TVC für die T-AOI (Text) wurden über die gesamten fünf Items betrachtet keine Unterschiede festgestellt. Auf Itemebene wurden aber der Text vom xy-Item A2† ( $d = 0.68$ ) und der Text vom HRD-Item A6† ( $d = 0.62$ ) jeweils länger betrachtet als der dazu isomorphe Text. Zudem zeigte der Vergleich der TVD für die T-AOI, dass der Text vom HRD-Item A6† ( $d = 0.69$ ) mit mittlerem Effekt häufiger erneut gelesen wurde, als dies beim xy-Text der Fall war. Wie in Tabelle [F.3](#) zusammengefasst wird, wurden keine weiteren Unterschiede gefunden.

Anschließend an diese Analyse der globalen AOIs erfolgte zwischen den Itempaaren ein Vergleich der TVD für die lokalen AOIs der vier Achsen (A) und Achsenbeschriftungen (B), um auch hier Bereiche zu identifizieren, die vergleichsweise lange betrachtet wurden. Die TVD der AOI wurde dabei für jedes HRD- und xy-Item auf die Zeit, die insgesamt mit dem Item verbracht wurde, normiert. So konnten Bereiche identifiziert werden, die unabhängig von der Bearbeitungszeit eine erhöhte Aufmerksamkeit erhielten. Mit t-Tests wurden diesbezüglich die AOIs der physikalischen Größen im HRD mit denen der isomorphen Größen im x-y-Diagramm verglichen, also z.B. die AOIs AU und BU der Spektralklasse mit denen der x-Achse. Bei den Items A7† und A8† erhielten die Achse und die Achsenbeschriftung der Leuchtkraft (AR, BR) mit mittlerem bis großem Effekt eine längere Aufmerksamkeit als die isomorphe y-Achse und deren Achsenbeschriftung ( $t(34) \geq 3.27$ ,  $p \leq .024$ ,  $d \geq 0.55$ ). Des Weiteren erhielt die Achsenbeschriftung der Magnitude (BL) bei Item A6† mit einem mittleren Effekt mehr Aufmerksamkeit als die Beschriftung der y-Achse ( $t(34) = 4.12$ ,  $p = .000$ ,  $d = 0.70$ ). Gleiches zeigte sich hinsichtlich der Achsenbeschriftung der Spektralklasse (BU) bei Item A1† im Vergleich zur Beschriftung der x-Achse ( $t(34) = 3.09$ ,  $p = .048$ ,  $d = 0.52$ ). Hinsichtlich der anderen Achsen und deren Beschriftungen wurden keine weiteren Unterschiede festgestellt. Diese quantitativen Daten konnten zudem durch den qualitativen Vergleich von Heatmaps gestützt werden. In [Abbildung 10.3](#) sind hierfür auf der rechten Seite die Heatmaps des Itempaars A8† dargestellt. Daraus geht hervor, dass die Studierenden nahezu die gesamte Leuchtkraftachse betrachteten, während sie nur einzelne Bereiche der y-Achse fixierten und das insbesondere im oberen und unteren Achsenbereich. Darüber hinaus zeigt der Vergleich, dass die Beschriftung der Leuchtkraftachse mehr Aufmerksamkeit erhielt als die y-Achsenbeschriftung. Aus den quantitativen Ergebnissen ging hervor, dass bei diesem Itempaar die Leuchtkraftachse und deren Beschriftung mehr Aufmerksamkeit erhielten als die y-Achse und deren Beschriftung, was folglich mit den qualitativen Daten übereinstimmt. [Abbildung 10.3](#) zeigt auf der linken Seite zudem die Heatmaps des Itempaars A6†. Hier zeigte der qualitative Vergleich,

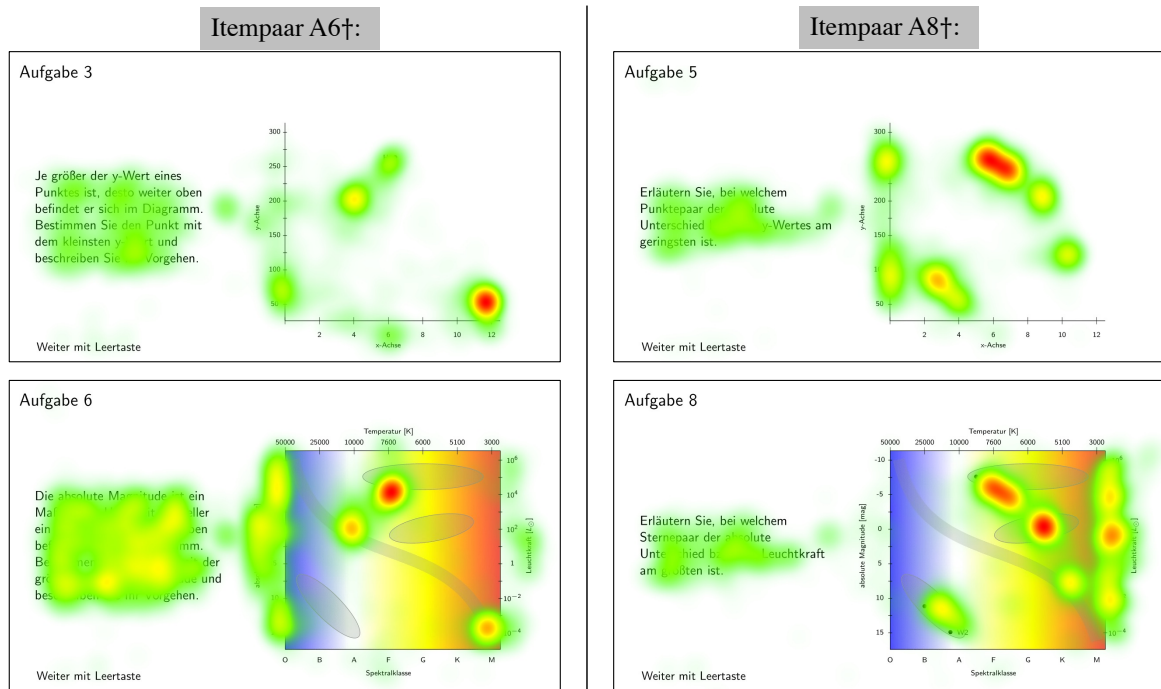


Abbildung 10.3: Heatmaps der isomorphen Itempaare A6† (links) und A8† (rechts), wobei jeweils die Blickbewegung beim xy-Item (oben) mit der beim HRD-Item (unten) verglichen wird.

dass die Magnitudenachse deutlich umfassender fixiert wurde als die isomorphe y-Achse. Die quantitativen Daten zeigten bei diesem Itempaar eine stärkere Aufmerksamkeit auf der Achsenbeschriftung der Magnitude im Vergleich zu der y-Achsenbeschriftung, was auch aus den Heatmaps hervorgeht. Analoge Ergebnisse zeigten sich in den Heatmaps der anderen Itempaare, auf die an dieser Stelle aber nicht weiter eingegangen wird. Insgesamt stehen die quantitativen Daten (ET-Metriken) bei der Analyse der lokalen AOIs also in Einklang mit den qualitativen Daten (Heatmaps).

Zuletzt wurde eine Korrelationsanalyse durchgeführt, in welche die ET-Daten zusammen mit der Punktzahl der HRD-Items und der eingeschätzten Itemschwierigkeit einfließen. Die Ergebnisse zeigen folgende Zusammenhänge:

- Ein HRD-Item wurde als umso schwieriger eingeschätzt, je mehr Zeit die Studierenden auf dem Diagramm (TVD für D-AOI) ( $r = -0.72$ ,  $p = .000$ ,  $N = 14$ ) und auf dem Text des HRD-Items (TVD für T-AOI) verbrachten ( $r = 0.87$ ,  $p = .000$ ,  $N = 14$ ).
- Die Studierenden lasen den HRD-Text umso häufiger erneut (TVC für T-AOI), als je schwieriger sie das HRD-Item einschätzten ( $r = -0.91$ ,  $p = .000$ ,  $N = 14$ ).
- Eine längere Bearbeitungszeit aller HRD-Items ging mit einer höheren Punktzahl einher ( $r = 0.70$ ,  $p = .000$ ,  $N = 35$ ).



- Je höher die Punktzahl der Studierenden bei den HRD-Items, desto länger betrachteten sie die Achsen (TVD für A-AOIs;  $r = 0.61$ ,  $p = .000$ ,  $N = 35$ ) und das Innere des Diagramms (TVD für i-AOI;  $r = 0.64$ ,  $p = .000$ ,  $N = 35$ ).

Aus dem ersten Punkt wird klar, dass die Studierenden mit der Bearbeitungszeit die Itemschwierigkeit assoziierten. Insgesamt zeigte diese Analyse auch, dass Studierende mit einer höheren Punktzahl den Achsen und dem Inneren des Diagramms über einen längeren Zeitraum Aufmerksamkeit widmeten. Daran anknüpfend werden im nachfolgenden Abschnitt zwei Teilstichproben anhand ihrer HRD-Punktzahl verglichen, indem eine qualitative Betrachtung ihrer visuellen Aufmerksamkeit erfolgt.

### Leistungsstarke und leistungsschwache Studierende

Aufbauend auf der erreichten Punktzahl bei den HRD-Items wurden bei einer post-hoc Aufteilung die zwei Teilstichproben (a) *leistungsschwach* und (b) *leistungsstark* gebildet (vgl. Abbildung 10.1). Beide Gruppen bestanden aus drei Teilnehmenden und grenzten sich hinsichtlich der Punktzahl klar von den anderen Studierenden ab. Die leistungsschwachen Studierenden erreichten eine Punktzahl  $\leq 15$ , was 50% der Maximalpunktzahl entsprach, die leistungsstarken Studierenden  $\geq 29$ , was 90% der Maximalpunktzahl entsprach. Die leistungsstarken Studierenden benötigten insgesamt 1615 s ( $SD = 249$  s) für die Bearbeitung aller HRD-Items, also etwa 27 Minuten. Demgegenüber benötigten die leistungsschwachen Studierenden mit durchschnittlich 833 s ( $SD = 197$  s), also etwa 14 Minuten, mit großem Effekt weniger Zeit für die HRD-Items ( $d = 3.48$ ). Mit einer Analyse der Heatmaps dieser beiden Gruppen erfolgte ein qualitativer Vergleich der visuellen Aufmerksamkeit während der Auseinandersetzung mit dem HRD. In Abbildung 10.4 erfolgt auf der linken Seite zunächst eine Gegenüberstellung für den Anfangsstimulus (erster Blick auf das HRD), der noch vor der Itembearbeitung dazu diente, sich mit dem HRD vertraut zu machen. Dieser Stimulus war nicht mit Problemlösen verbunden und erforderte im Anschluss keine mündliche Antwort. Diese beiden Heatmaps zeigen folglich die visuelle Aufmerksamkeit der zwei Gruppen für die erste Auseinandersetzung mit dem Diagramm. Demgegenüber zeigen die beiden Heatmaps auf der rechten Seite die visuelle Aufmerksamkeit der leistungsstarken (unten) und leistungsschwachen (oben) Studierenden beim Problemlösen am Beispiel von Item A6†. Dieses Item erforderte den Vergleich der Magnitudenwerte, um den Stern mit der größten Magnitude (im Diagramm unten rechts) zu identifizieren. Aus Abbildung 10.4 wird ersichtlich, dass die leistungsschwachen Studierenden fälschlicherweise den obersten Stern stark fokussierten, während die leistungsstarken Studierenden korrekterweise eine besondere Aufmerksamkeit auf den untersten Stern richteten. Die qualitativen Ergebnisse des Vergleichs beider Teilstichproben im Umgang mit dem HRD kann aufbauend auf den dargestellten Heatmaps wie folgt zusammengetragen werden: (i) Die leistungsschwachen Studie-



Tabelle 10.3: Zusammenfassung der identifizierten Lernschwierigkeiten und Strategien im Umgang mit dem HRD aufbauend auf einer induktive Kategorienbildung. Die Kategorien werden absteigend nach der Anzahl Studierender (von 35), die sich dazu äußerten, sortiert (vgl. Langendorf, Schneider und Klein (2022)).

	Induktive Kategorien	Spezifizierung	Anzahl
LERNSCHWIERIGKEITEN			
(i)	Physikalische Bedeutung	<i>L, M, T, SK</i>	30
(ii)	Achsenorientierung	<i>M, T</i>	26
(iii)	Achsenkalierung	<i>L, M, T, SK</i>	22
(iv)	Diagrammeigenschaften	Ursprung, 4 Achsen	22
(v)	Komplexität		19
(vi)	Physikalische Zusammenhänge	quantitativ, qualitativ	15
(vii)	Leuchtkraftklassen		15
(viii)	Farbe	Hintergrund, Temperatur	14
(ix)	Unsichtbare Aspekte	Masse, Radius	4
(x)	Sternentwicklung		4
STRATEGIEN			
(I)	Identifizieren und Ausblenden		20
(II)	Farbe ignorieren		15
(III)	Betrachten der Achsen		13
(IV)	Zusammenhänge verstehen		12
(V)	Farbe als Orientierung		7
(VI)	Reduktion der Achsen		7
(VII)	Kartesisches Koordinatensystem		6
(VIII)	Räumliche Orientierung		5
(IX)	Leuchtkraftklassen ignorieren		4

### 10.3 Interviews

Die Studierenden berichteten pro Interview durchschnittlich von  $M = 6.66$  ( $SD = 2.4$ ) Schwierigkeiten im Umgang mit dem HRD, weshalb insgesamt 233 kodierte Aussagen in der qualitativen Inhaltsanalyse ausgewertet wurden. In Tabelle 10.3 werden die zehn induktiv gebildeten Kategorien zu Lernschwierigkeiten im Umgang mit dem HRD zusammengefasst und entsprechend der Anzahl an Studierenden, bei denen dieses Problem auftrat, sortiert. Bei 85.7% der Studierenden war die *physikalische Bedeutung* oder Interpretation einer der dargestellten physikalischen Größen schwierig, was die häufigste Kategorie darstellte. Sie spiegelte sich in Aussagen wie „was Magnitude ist, kann ich mir überhaupt nicht vorstellen“ wider. Die Studierenden berichteten in diesem Zuge auch von unbekanntem Fachbegriffen oder physikalischen Einheiten und bezogen sich dabei im Detail auf die Magnitude (77.1%), die Spektralklasse (45.7%), die Leuchtkraft (31.4%) und die Temperatur (2.9%). Des Weiteren stellten die *Achsenorientierung* (74.3%) und die *Achsenkalierung* (62.9%)

für den Großteil der Befragten eine Lernschwierigkeit dar. Hinsichtlich der Magnitude nahmen 65.7% der Studierenden die Achsenorientierung und 17.1% die nichtlineare Skalierung als herausfordernd wahr. Die Achsenorientierung der Temperatur stellte für 42.9% und dessen nichtlineare Skala für 31.7% der Studierenden eine Schwierigkeit dar („Wo ich erst einmal gestolpert bin, ist diese Sache mit der Temperatur, dass sie andersherum verläuft, als man erwarten würde.“). Darüber hinaus berichteten die Lernenden von Schwierigkeiten mit der logarithmischen Leuchtkraftskala (31.7%) und der intervallskalierten Spektralklasse (25.7%). Diese Kategorien (i) bis (iii) wurden von den meisten Studierenden genannt und beziehen sich alle auf die vier physikalischen Größen, die im HRD aufgetragen sind.

Darüber hinaus äußerten sich 62.9% der Befragten zu Problemen mit den *Diagrammeigenschaften*, die sich beim HRD von denen eines üblichen kartesischen Koordinatensystems unterscheiden. Mit Aussagen wie „dass man keinen konkreten Nullpunkt ausmachen kann“ nahmen die Studierenden in dieser Kategorie Bezug zum fehlenden Koordinatenursprung und den vier anstatt üblichen zwei Koordinatenachsen. Die *Komplexität* des HRDs war für 54.3% der Studierenden aufgrund der Informationsfülle und weiteren unspezifischen Aussagen zur Schwierigkeit des Diagramms ein Problem, z.B.: „weil mir noch deutlich mehr Informationen gegeben waren als die, die ich letztendlich benötigt habe, und ich dann auch daran gedacht habe.“ Zudem war das konzeptuelle Verstehen von quantitativen und qualitativen *Zusammenhängen* im HRD, wie beispielsweise „die Verbindung zwischen den Achsen herzustellen, [...] eher schwieriger“ (42.9%). Ebenfalls 42.9% der Befragten äußerten Schwierigkeiten hinsichtlich der visuellen Repräsentation und der Interpretation der *Leuchtkraftklassen*, wie beispielsweise über die Hauptreihe: „Es hat mich ein bisschen verwirrt, dass ein Feld nicht als oval angegeben ist, sondern so eine Linie.“ Die *Farbe* im Hintergrund des Diagramms sowie deren kontraintuitiver Zusammenhang mit der Temperatur wurde von 40.0% der Lernenden als herausfordernd wahrgenommen, denn „anfangs haben [...] die Farben dann noch abgelenkt wegen der Temperatur.“ Mit jeweils 11.4% wurden die *unsichtbaren Aspekte* wie die fehlenden Angaben zur Masse und dem Radius eines Sterns („das musste man sich noch mal zusätzlich dazu denken“) sowie die *Sternentwicklung* von den wenigsten Studierenden als herausfordernd beschrieben.

Neben den Lernschwierigkeiten wurden durch die qualitative Inhaltsanalyse neun Strategien im Umgang mit dem HRD identifiziert, die ebenfalls in Tabelle 10.3 aufgelistet sind. Die Strategien beziehen sich einerseits auf das Vertraut machen mit dem HRD als ersten Lernschritt (Strategien III, IV) und andererseits auf den daran anschließenden Problemlöseprozess (Strategien I, II, V bis IX). Bei der ersten Auseinandersetzung mit dem HRD wendeten 34.3% der Studierenden die Strategie *Zusammenhänge verstehen* an. Sie machten sich zunächst mit den Zusammenhängen der jeweils zwei parallelen Achsen vertraut, also zwischen Leuchtkraft und Magnitude sowie zwischen Spektralklasse und Temperatur. Das dabei

erworbene Verständnis nutzten sie anschließend für das Problemlösen. Darüber hinaus berichteten 37.14 % davon, dass das genaue *Betrachten der Achsen* („also definitiv immer eine Achsenbetrachtung“) zentral für das Verstehen des HRDs und hilfreich für das anschließende Problemlösen war („Am Anfang habe ich mir das Diagramm gut angeschaut und [...] habe auch auf Kleinigkeiten geachtet, wie, dass die Temperatur nicht linear anwächst.“). Beim Problemlösen selbst nutzten die Studierenden sieben weitere Strategien, wie das *Identifizieren und Ausblenden*, welche mit 57.1 % am verbreitetsten war. Die Studierenden identifizierten aufgabenrelevante Informationen und blendeten Irrelevantes aus. Damit ging einher, dass 42.9 % der Befragten die *Farbe ignorierten* und 11.4 % die *Leuchtkraftklassen ignorierten*. Die Farbe wurde von 20.0 % der Lernenden demgegenüber als hilfreich wahrgenommen, denn sie nutzten die *Farbe als Orientierung*, indem sie deren vertikale Struktur als eine Art Koordinatengitter interpretierten („weil die Farbverläufe Parallelen zur senkrechten Achse darstellen“). Als weitere Strategie der Informationsreduktion erfolgte darüber hinaus bei 20.0 % der Studierenden eine *Reduktion der Achsen*, indem sie ausschließlich eine horizontale und eine vertikale Achse nutzten. Durch diese weitere Informationsreduktion wurden beispielsweise nur die Leuchtkraft (vertikal) und die Temperatur (horizontal) anstelle von allen vier Größen in das Problemlösen einbezogen. Dabei gingen 14.3 % der Studierenden noch einen Schritt weiter, indem sie alle vier Achsen ignorierten und eine *räumliche Orientierung* im Diagramm nutzten – also z.B. je weiter oben im Diagramm, desto größer die Leuchtkraft, oder je weiter links im Diagramm, desto heißer der Stern („ist es höher oder tiefer, ist es weiter links oder weiter rechts?“). Eine weitere Strategie beim Problemlösen stellte das Vorstellen eines *kartesischen Koordinatensystems* und dessen direkter Vergleich zum HRD dar (17.1 %): „Ich habe mich bemüht, [...] möglichst Ähnlichkeiten zu finden mit dem bereits bekannten [x-y-]Diagramm.“ Dies führte bei den Studierenden so weit, dass sie ihr Vorgehen beim Problemlösen mit dem x-y-Diagramm direkt auf den Umgang mit dem HRD übertrugen („ich habe mich dann noch daran erinnert, dass die [Aufgabe] schon einmal vorkam, [...], kennst du ja schon“). Inwiefern diese Strategie aber zielführend ist, ist an dieser Stelle unklar. In dieser Strategie wird eine Ursache für Fehler und Verständnisprobleme im Umgang mit dem HRD vermutet, worauf später in der Diskussion (Kapitel [11.2](#)) eingegangen wird.

## 10.4 Zusammenfassung und Einordnung

Die zentralen Ergebnisse dieser empirischen Studie zum Umgang von Studierenden mit dem HRD können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Studierenden konnten die HRD-Items ohne spezifisches Vorwissen in Astrophysik und ohne mit dem HRD bereits vertraut zu sein erfolgreich bearbeiten.

- Die Studierenden erkannten die Schwierigkeit von HRD-Items mit geringer Lösungswahrscheinlichkeit nicht und schätzten diese stattdessen als einfach ein.
- Die Studierenden nahmen im Umgang mit dem HRD eine höhere kognitive Belastung als im Umgang mit dem x-y-Diagramm wahr.
- Die Studierenden berichteten von unterschiedlichen Lernschwierigkeiten im Umgang mit dem HRD, die insbesondere auf die vier physikalischen Größen zurückzuführen waren.
- Die Blickdaten der Studierenden deuteten ebenfalls auf Schwierigkeiten insbesondere mit der Magnitude und der Leuchtkraft hin.
- Die Studierenden berichteten von unterschiedlichen Strategien, die sie beim Kennenlernen des HRDs und dem anschließenden Problemlöseprozess nutzten.

Zudem können aufbauend auf den Studienergebnissen und insbesondere auf dem Vergleich von leistungsschwachen und leistungsstarken Studierenden folgende Heuristiken abgeleitet werden, die als Empfehlungen für das Problemlösen mit dem HRD dienen:

**Vertrautheit:** Noch vor dem Problemlöseprozess sollten Lernende sich ausreichend Zeit dafür nehmen, das HRD und die darin dargestellten physikalischen Größen kennenzulernen und zu verstehen.

**Genauigkeit:** Vor und während des Problemlösens sollten Lernende die einzelnen Achsen detailliert betrachten. Dabei kann durch die Analyse der gesamten Achse insbesondere deren Skalierung und Orientierung verstanden werden.

**Adaption:** Vor und während des Problemlösens sollten Lernende sich der ungewohnten Eigenschaften des HRDs bewusst werden. Nur so kann ein Umdenken stattfinden, bei dem die bisherigen Heuristiken zum Umgang mit Diagrammen hinterfragt und auf das HRD angepasst werden.

**Zusammenhänge:** Vor und während des Problemlösens sollten Lernende mit den Zusammenhängen zwischen den physikalischen Größen im HRD vertraut werden.

Diese Heuristiken können beim Planen von Lehr-Lern-Umgebungen zum HRD herangezogen und darin durch instruktionale Unterstützung gezielt aufgegriffen werden. Es erscheint sinnvoll, sowohl Lehrende als auch Lernende für die Besonderheiten des HRDs sensibel zu machen, um das nötige Umdenken zu ermöglichen (Adaption). Daher wird empfohlen, dass Lehrende mit den in dieser Studie identifizierten potentiellen Lernschwierigkeiten vertraut sind und diese in der Lernumgebung gezielt thematisieren (z.B. *Beschreiben Sie, inwiefern*

*das HRD für Sie unerwartete oder schwierige Eigenschaften aufweist.*). An geeigneter Stelle können zudem Instruktionen eingesetzt werden, um lernförderliche Strategien im Umgang mit dem HRD vorzustellen. Mit diesen Heuristiken trägt die empirische Studie zum HRD direkt zum übergeordneten Ziel der Entwicklung und Erprobung einer Astrophysik-Übung bei. Gemäß des DBR-Ansatzes bietet die Studie eine empirische Grundlage für die Weiterentwicklung des Lehrkonzepts und leistet somit einen Beitrag zur praktischen Problemlösung.<sup>19</sup>

---

<sup>19</sup>Aufgrund von zeitlichen Überschneidungen der Durchführung und Auswertung dieser empirischen Studie mit dem zweiten Zyklus der Astrophysik-Übung im Wintersemester 2021/ 2022 war eine direkte Implementation der Forschungsergebnisse in das Re-Design leider nicht möglich.

## Teil IV

# Abschluss

## 11 Diskussion

Die Ergebnisse dieser Arbeit werden anhand der Forschungsfragen diskutiert. Dabei wird sowohl auf die Forschungsfragen der Entwicklungsarbeit (siehe Kapitel 5) als auch auf die der empirischen Studie zu Lernenden im Umgang mit dem HRD (siehe Kapitel 9) eingegangen. Im Anschluss wird der verwendete DBR-Ansatz (siehe Kapitel 4.1) diskutiert, wobei auch auf die enge Zusammenarbeit zwischen Fachwissenschaft und Fachdidaktik eingegangen wird.

### 11.1 Entwicklung und Wirksamkeit der Lehrveranstaltung

#### Digitalisierungsbezogene Kompetenzen

Die erste Forschungsfrage lautet *Wie entwickeln sich die digitalen Kompetenzen der Studierenden im Laufe der Lehrveranstaltung?* In beiden Forschungszyklen stellte sich heraus, dass die Studierenden die drei technologiebezogenen TPACK-Komponenten TPACK, TCK und TPK für den Zeitpunkt vor der Lehrveranstaltung als eher gering einschätzten. Die retrospektive TK-Selbsteinschätzung grenzte sich etwas von diesen drei Komponenten ab und wurde in beiden Zyklen vorher als mittel bis eher hoch eingeschätzt. Diese Komponente bezieht sich auf das technologiebasierte Wissen und ist fachunabhängig. Der Grund für die vergleichsweise hohe TK-Selbsteinschätzung wird darin vermutet, dass die Studierenden seit April 2020 pandemiebedingt virtuelle Lehrveranstaltungen besuchten und somit gezwungen waren, verschiedene digitale Kompetenzen sowie ihr technologiebezogenes Wissen dahingehend zu erweitern, dass virtuelles Lernen und Kommunizieren möglich wurde (Bogdandy, Tamas & Toth, 2020). Dies wurde jedoch in dieser Arbeit nicht empirisch untersucht. Insgesamt wurden die TPACK-Komponenten von den Studierenden für den Zeitpunkt vor der Lehrveranstaltung als eher gering eingeschätzt. Dessen Ursache wird darin angenommen, dass obligatorische Lehrveranstaltungen zur Förderung entsprechender Kompetenzen im Lehramtsstudium bislang wenig systematisch verankert sind (Schiefner-Rohs, 2012). So belegten im ersten Zyklus elf Studierende eine freiwillige Lehrveranstaltung zur Förderung digitaler Kompetenzen und im zweiten Zyklus war es nur eine Person, wodurch die vorherige Kompetenzförderung unter den Studierenden sehr heterogen war. Die Studierenden beider Forschungszyklen berichteten zudem von eher geringen lern- und lehrbezogenen Vorerfahrungen mit digitalen Medien, was die obige Annahme unterstützt. Obwohl



alle Teilnehmenden im Master studierten und somit bereits mindestens ein Schulpraktikum im Bachelorstudium absolviert hatten, setzten sie digitale Medien wie Simulationen oder Tabellenkalkulationsprogramme bislang kaum bis nie zum Unterrichten ein. Die hier entwickelte Lehrveranstaltung bot demnach für viele Studierende die erstmalige Möglichkeit, Physikunterricht mit digitalen Medien zu planen, erproben und evaluieren. Nach der Veranstaltung berichteten die Studierenden beider Zyklen von einem Kompetenzzuwachs in allen vier Bereichen und schätzten ihre digitalen Kompetenzen insgesamt als eher hoch ein. Für die statistischen Unterschiede zwischen dem Prä- und Mid- bzw. Posttest zeigten sich dabei auffallend große Effektstärken, was vermutlich an dem retrospektiven Studiendesign lag (Drennan & Hyde, 2008; Lam & Bengo, 2003). Hinsichtlich TPACK, TCK und TPK berichteten die Studierenden beider Stichproben von einem Kompetenzzuwachs, der sich bereits zur Hälfte der Lehrveranstaltung im Midtest zeigte. Eine TK-Erweiterung fand im ersten Zyklus hingegen erst am Ende der Lehrveranstaltung statt, was daran liegen kann, dass erst in der zweiten Hälfte der Lehrveranstaltung die fachdidaktischen Bausteine reduziert und die digitalgestützten fachinhaltlichen Bausteine priorisiert wurden (vgl. Tabelle 4.2). Dabei war der Kompetenzzuwachs in beiden Stichproben in den Bereichen TPACK, TCK und TPK am größten, was damit einhergeht, dass diese Kompetenzbereiche ursprünglich vor der Lehrveranstaltung deutlich geringer ausgeprägt waren als der TK-Bereich.

Die Ergebnisse des Manipulation Checks ermöglichen hinsichtlich der ersten Forschungsfrage trotz fehlender Kontrollgruppe die Schlussfolgerung, dass die digitalen Kompetenzen der Studierenden mit der Teilnahme an der Lehrveranstaltung gefördert wurden. In beiden Zyklen berichteten die Studierenden davon, dass unterschiedliche fachspezifische und allgemeine digitale Basiskompetenzen adressiert wurden und stellten dabei auch die besondere Rolle der Simulation heraus. Darüber hinaus zeigte der Vergleich mit anderen Physik-Übungen im ersten Zyklus den innovativen Charakter des Lehrkonzepts, der mit dem Aufgreifen der digitalen Kompetenz sowie der Fachdidaktik einhergeht. Die Schlussfolgerung wird zudem durch Interviewaussagen von Studierenden unterstützt, in denen sie sich über die Erweiterung ihrer digitalen Kompetenzen in direktem Zusammenhang mit der Lehrveranstaltung äußerten. Die mit der ersten Forschungsfrage verknüpfte Hypothese, dass die Studierenden vor der Lehrveranstaltung geringe digitale Kompetenzen haben und diese im Laufe der Lehrveranstaltung erweitern, wird demnach von diesen Ergebnissen unterstützt. Darüber hinaus kann die Ursache der Kompetenzerweiterung der Teilnahme an der Lehrveranstaltung zugeschrieben werden.

### **Einstellung zum Lernen mit digitalen Medien**

Die zweite Forschungsfrage lautet *Wie ändert sich die Einstellung der Studierenden gegenüber dem Lernen mit digitalen Medien im Laufe der Lehrveranstaltung?* In beiden Zyklen

wurde über alle Messzeitpunkte hinweg eine positive Einstellung der Studierenden zum Lernen mit digitalen Medien festgestellt. Die mit dieser Forschungsfrage verknüpfte Hypothese, dass sich die Teilnahme an der Lehrveranstaltung positiv auf die Einstellung der Studierenden auswirkt, konnte aber in beiden Forschungszyklen nicht bestätigt werden. Es sei angemerkt, dass das eingesetzte Messinstrument in der Stichprobe eine geringe interne Konsistenz zeigte und die Größen der angepassten Stichproben (matched samples) zur Untersuchung des zeitlichen Verlaufs mit  $N = 14$  (erster Zyklus) bzw.  $N = 7$  (zweiter Zyklus) klein waren. Im Umkehrschluss kann aber aus den Ergebnissen nicht automatisch gefolgert werden, dass die Lehrveranstaltung die Einstellung gegenüber dem Lernen mit digitalen Medien grundsätzlich nicht beeinflusste. Dass diese Einstellung durchaus durch ein innovatives Lehrkonzept positiv beeinflusst werden kann, zeigt beispielsweise die Evaluation eines Seminars mit sieben Chemie-Lehramtsstudierenden an der TU Dortmund (Zimmermann & Melle, 2019). Ein weiterer Grund dafür, dass keine positive Entwicklung der Einstellung festgestellt wurde, kann daran liegen, dass die Mittelwerte der Einstellung bereits im Prätest hoch waren (vgl. Valtonen et al. (2015)). Der Einfluss der Astrophysik-Übung auf die Einstellung der Physik-Lehramtsstudierenden bedarf folglich einer tiefergehenden Untersuchung. Dabei könnte beispielsweise zwischen einer allgemeinen sowie einer fachspezifischen Einstellung gegenüber dem Lernen mit digitalen Medien unterschieden werden, wie Krause, Pietzner, Dori und Eilks (2017) dies in einer Erhebung mit Chemie-Lehramtsstudierenden durchführten. In dieser Arbeit konnte neben den quantitativen Ergebnissen zur Beschreibung der Einstellung auch auf die qualitative Analyse der Interviews zurückgegriffen werden. In Aussagen wie „ich sehe dem [Einsatz von digitalen Medien] im Physikunterricht relativ positiv entgegen“ oder „mein Plan war es, [...] später ein recht digitaler Lehrer zu werden“ zeigt sich die grundsätzlich positive Einstellung der Studierenden gegenüber dem Lernen mit digitalen Medien. Die Studierenden äußerten in den Interviews nicht nur eine positive Einstellung, sondern darüber hinaus auch konkrete Ideen für den intendierten Einsatz von digitalen Medien in ihrem zukünftigen Unterricht, z.B.: „dass man [dieses Experiment] durch eine Simulation ersetzen kann“ und „Stellarium war ein super Programm, was ich mir gut vorstellen kann zu nutzen“. Nach der TPB bestimmt die Einstellung gegenüber einem Verhalten die Intention, dieses Verhalten tatsächlich auszuüben (Ajzen, 1991). Der tatsächliche Einsatz von digitalen Medien im Unterricht erscheint aufbauend auf den genannten Aussagen also als wahrscheinlich. Die qualitativen Ergebnisse stehen zudem im Einklang mit den quantitativen Ergebnissen, die eine positive Einstellung der Studierenden in beiden Zyklen zeigten.

### Evaluation der entwickelten Lehrveranstaltung

Die dritte Forschungsfrage lautet *Wie evaluieren die Studierenden die Lehrveranstaltung?* Mit dieser Forschungsfrage wurde keine Hypothese verknüpft, da sie explorativ untersucht wurde. Zur Beantwortung der Forschungsfrage werden qualitative und quantitative Daten herangezogen. Aus den Interviews im ersten und der Evaluationskala im zweiten Forschungszyklus wurde geschlussfolgert, dass die Studierenden insgesamt zufrieden mit der Lehrveranstaltung waren. Anhand der Interviewanalyse wurden das Lehrkonzept, die methodische Gestaltung, die Anforderungen und die Rolle der Übungsleitung als vier besonders positive Aspekte identifiziert. Alle vier Aspekte spielten in der Entwicklungsphase der Lehrveranstaltung (Teil III) eine wichtige Rolle und deren Umsetzung wurde literaturbasiert (Teil II, z.B. Tabelle 3.2) geplant. Deren positive Bewertung durch die Studierenden betont also einerseits die Wichtigkeit, Lehrveranstaltungen literaturbasiert zu entwickeln, und bietet mit der Astrophysik-Übung andererseits ein gelungenes Beispiel dafür, wie Theorien und Literatur praktisch umgesetzt werden können. Im Folgenden werden die Evaluationsergebnisse anhand der grundlegenden Empfehlungen zur Gestaltung einer Lehrveranstaltung für die technologiebezogene Professionalisierung angehender Lehrkräfte aus Tabelle 3.2 diskutiert, um eine Verbindung zwischen Theorie und Praxis herzustellen. Das entwickelte Lehrkonzept passte in den Augen der Studierenden zu den Anforderungen und Kompetenzen, die für den späteren Lehrberuf relevant sind, und stellte einen authentischen Bezug zum Lehrberuf her. Dieser Praxisbezug, wie er z.B. von Angeli et al. (2015) in Form von Planung, Durchführung und Reflexion von Unterricht empfohlen wird, war demnach eine Stärke der Lehrveranstaltung. Die Studierenden schätzten zudem die selbstständige Auseinandersetzung mit digitalen Werkzeugen im Kontext der Astrophysik aus einer lernenden und auch lehrenden Perspektive. Darüber hinaus erkannten die Studierenden die besondere Rolle von Simulationen für die Astrophysik. Die Empfehlungen zur Handlungsorientierung (z.B. Goertz und Baeßler (2018)) und zur engen Verknüpfung von Fachinhalt und Technologien (z.B. Angeli et al. (2015)) wurden daher erfolgreich umgesetzt. Die als theoretische Grundlage dienenden fachdidaktischen Bausteine wurden positiv bewertet und kommen so der Empfehlung zur Evidenzorientierung nach (Sailer et al., 2017). Darüber hinaus wurde die Vernetzung von Expert:innen der Fachwissenschaft und Fachdidaktik von den Studierenden gelobt (Goertz & Baeßler, 2018). Die in Tabelle 3.2 genannten Empfehlungen zur Nutzung der digitalen Medien durch Dozierende und Studierende zur Kollaboration mit digitalen Medien sowie zur curricularen Verankerung wurden weder als besondere Stärke noch Schwäche aufgegriffen. Wie zufriedenstellend deren Umsetzung in der Lehrveranstaltung gelang, kann an dieser Stelle im Gegensatz zu den bereits diskutierten Empfehlungen folglich nicht gesagt werden. In beiden Zyklen stellten sich die Klausurvorbereitung und der Bezug zur Vorlesung als die hauptsächlichsten Schwächen der Lehrveranstaltung heraus. Im zweiten Zyklus wurden diese

beiden Aspekte zwar am schlechtesten bewertet, aber die Studierenden stuften sie dennoch als eher gut ein. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die beiden Schwächen im Vergleich zum ersten Zyklus bereits verbessert werden konnten und gleichzeitig noch weiteres Verbesserungspotenzial besteht. Aufbauend auf der Interviewanalyse wurde eine quantitative Skala zur Evaluation im zweiten Zyklus entwickelt, deren Ergebnisse in Einklang mit denen des ersten Zyklus stehen. Im zweiten Zyklus wurden keine neuen Stärken und Schwächen identifiziert, weshalb angenommen wird, dass die induktiv entwickelte Evaluationsskala die zentralen Aspekte abdeckte.

## 11.2 Lernende und das HRD

### Informationsentnahme und Lernschwierigkeiten

Die erste Forschungsfrage lautet *Wie gut gelingt Studierenden die Entnahme von Informationen aus dem HRD und von welchen Schwierigkeiten berichten sie?* Die 14 HRD-Items konnten wie erwartet ohne spezifisches Vorwissen gelöst werden, denn pro Item erhielt mindestens eine Person die maximale Punktzahl und insgesamt erreichten die Studierenden zwischen 44 % und 97 % der Maximalpunktzahl. Die Analyse der kognitiven Belastung zeigte, dass die Studierenden mit dem HRD einen höheren Lerneffekt und ein besseres Verständnis erlangten als beim Umgang mit dem x-y-Diagramm (GCL-Skala, Leppink et al. (2013)). Die HRD-Items wurden so konzipiert, dass ihre Anforderungen von Item A1† bis Item A14 zunahmen (vgl. Kapitel 9.2, Tabelle 9.1). Die Lösungswahrscheinlichkeit der HRD-Items, wie sie in Abbildung 10.2 in absteigender Reihenfolge von einfach zu schwierig aufgetragen ist, kann diese Reihenfolge jedoch nicht bestätigen. So können beispielsweise die Items A10 und A11 mit einer Lösungswahrscheinlichkeit  $> 0.8$  als eher einfach bezeichnet werden, obwohl sie zu den Items mit mittelhohen Anforderungen zählten, bei denen Zusammenhänge zwischen physikalischen Größen erkannt werden mussten. Die Zusammenhänge waren dabei aber rein qualitativ zu beschreiben und eine quantitative Analyse der physikalischen Größen war nicht nötig, was für die Studierenden offensichtlich einfacher war als erwartet.

Demgegenüber können die Items A2†, A6† und A8† als die drei schwierigsten Items bezeichnet werden, obwohl sie zu denen mit den geringsten Anforderungen zählten. Hier wurden das Vorhersagen eines Trends für eine Veränderliche (Temperatur; Item A2†) und das Vergleichen von mehreren Werten bzw. Wertepaaren hinsichtlich einer Größe (Magnitudo und Leuchtkraft) erwartet (Items A6† und A8†). Zu allen drei Items existierten isomorphe xy-Items mit den selben Anforderungen im Umgang mit Diagrammen. Deren Bearbeitung gelang den Studierenden jedoch signifikant besser, weshalb die Eigenschaften des HRDs vermutlich die Ursache für die geringen Lösungswahrscheinlichkeiten der HRD-Items sind. Die drei HRD-Items verlangten die Auseinandersetzung mit der ungewohnten Achsenori-

entierung der Temperatur und der Magnitude sowie die Informationsentnahme aus der logarithmisch skalierten Leuchtkraftachse. In den Interviews berichteten die Studierenden davon, dass eben diese Aspekte des Diagramms für Schwierigkeiten sorgten, und sie stehen dabei in Einklang mit der bisherigen Literatur (Airey & Eriksson, 2019). Ein Blick in die Itemlösungen der Studierenden unterstützt dies zudem: Studierende mit einer inkorrekten Lösung in Item A6† identifizierten den obersten Stern im Diagramm fälschlicherweise als den mit der größten Magnitude (Schwierigkeit: Achsenorientierung) und in Item A8† wurde das Sternpaar mit der größten räumlichen Distanz fälschlicherweise als das Paar mit dem größten Leuchtkraftunterschied identifiziert (Schwierigkeit: Achsenskalierung). Dieses Vorgehen passt zu den bisherigen Heuristiken im Umgang mit üblichen kartesischen Koordinatensystemen und sechs der Studierenden berichteten dahingehend sogar von der Strategie, ihr Vorgehen für die xy-Items auf die HRD-Items übertragen zu haben (vgl. Kapitel 10.3). Darüber hinaus wurde Item A8† umso schlechter gelöst, je einfacher es von den Studierenden eingeschätzt wurde. Insgesamt legen diese Ergebnisse die Vermutung nahe, dass die Studierenden die Besonderheiten des HRDs, die unter anderem in der Achsenorientierung und -skalierung liegen, nicht erkannten und somit auch die damit einhergehenden Herausforderungen nicht wahrnehmen konnten. Insbesondere die Heuristiken *Genauigkeit* und *Adaption* (vgl. Kapitel 10.4) scheinen hier also noch nicht etabliert gewesen zu sein. Das kann erklären, wieso die Studierenden in der Überzeugung eines erfolgreichen Problemlöseprozesses die Schwierigkeit der Items unterschätzten.

Aus der Analyse der kognitiven Belastung ging ebenfalls hervor, dass der Umgang mit dem HRD im Gegensatz zur Auseinandersetzung mit dem x-y-Diagramm herausfordernd war. Die Studierenden nahmen das Thema und die Zusammenhänge im HRD als vergleichsweise komplex wahr (ICL-Skala, Leppink et al. 2013). Die Ursache wird in der hohen Elementinteraktivität des HRDs gesehen, welche sich auf den ICL auswirkt (Sweller, 2010). Diese Annahme wird davon unterstützt, dass die Studierenden von den Lernschwierigkeiten *physikalische Zusammenhänge* und *Komplexität* berichteten, was sich in einer hohen Elementinteraktivität äußern kann. Um die mit dem HRD einhergehenden Schwierigkeiten bewältigen zu können und die intrinsische Belastung zu reduzieren, nutzten die Studierenden Strategien, die sich mit der Informations-Reduktions-Hypothese (Haider & Frensch, 1996, 1999) und dem Chunking (Gobet et al., 2001) deckten.

Die Analyse der Lösungswahrscheinlichkeit für die HRD-Items und der Vergleich der isomorphen Itempaare ließen bereits auf Lernschwierigkeiten im Umgang mit dem HRD schließen (Achsenorientierung der Magnitude und Temperatur, Achsenskalierung der Leuchtkraft), die von den Interviewdaten anschließend unterstützt und erweitert wurden. Die dabei identifizierten Lernschwierigkeiten sind konform mit der Literatur und erweitern diese sinnvoll, wie folgende Einordnung der induktiven Kategorien in die vier potentiellen Hürden

nach Airey und Eriksson (2019) zeigt. (A) Die Kategorie *physikalische Bedeutung* entspricht hinsichtlich der Magnitude und der Spektralklasse der potentiellen Hürde *Historisch*, jedoch sind Leuchtkraft und Temperatur nicht gleichermaßen auf historische Wurzeln zurückzuführen, weshalb diese Spezifizierungen hierzu nicht passen. (B) Der potentiellen Hürde *Auslassungen* entspricht die Kategorie *unsichtbare Aspekte*. (C) Die potentielle Hürde *Überladung* gleicht den induktiven Kategorien *Komplexität*, *Leuchtkraft* und der Spezifizierung *Farbe im Hintergrund*. (D) Die Kategorien *Achsenorientierung* und *Achsenkalierung* gehen konform mit der potentiellen Hürde *Erwartungen*, beinhalten jedoch auch die Magnitude und Spektralklasse, welche von Airey und Eriksson (2019) zur Hürde *Historisch* zählen. Diese Hürde kann darüber hinaus durch die induktive Kategorie *Diagrammeigenschaften* erweitert werden, die sich auf die unerwarteten Aspekte des HRDs als Repräsentation eines Diagramms beziehen. (Die Assoziation von Hitze mit Leben als Teil dieser potentiellen Hürde wurde in keinem Interview genannt.) Die meisten Studierenden äußerten Probleme in den Bereichen *Erwartungen* und *Überladung*, gefolgt von *Historisch*. In den *Auslassungen* sahen die Studierenden hingegen vergleichsweise selten den Grund für Schwierigkeiten mit dem HRD. Die induktiven Kategorien *physikalische Zusammenhänge*, *Sternentwicklung* und die *physikalische Bedeutung der Leuchtkraft und der Temperatur* konnten nicht zugeordnet werden. Ihnen ist der Bezug zum astrophysikalischen Fachinhalt und Schwierigkeiten beim Verstehen, Interpretieren und Analysieren von entsprechenden Zusammenhängen gemeinsam. Sie können in einer fünften potentiellen Hürde, dem *Fachinhalt*, zusammengefasst werden. Der Fachinhalt sorgte ähnlich zur Barriere *Historisch* erkennbar für Lernschwierigkeiten im Umgang mit dem HRD.

### Visuelle Aufmerksamkeit

Die zweite Forschungsfrage lautet *Können die berichteten Schwierigkeiten während der Auseinandersetzung mit dem HRD durch eine Analyse der visuellen Aufmerksamkeit empirisch unterstützt werden?* Die Analyse der visuellen Aufmerksamkeit unterstützte insgesamt die Erkenntnis, dass die HRD-Items für die Studierenden schwieriger als die xy-Items zu lösen waren. Dies geht zunächst aus dem Ergebnis hervor, dass das HRD länger als das x-y-Diagramm betrachtet wurde, was mit einer höheren kognitiven Belastung verknüpft ist (Susac, Bubic, Martinjak, Planinic & Palmovic, 2017). Des Weiteren wurden vereinzelte lokale AOIs des HRDs länger betrachtet als die dazu isomorphen AOIs im x-y-Diagramm, was darin begründet sein kann, dass Lernende unbekannte oder unvertraute Diagrammelemente länger fixieren als bekannte und vertraute Bereiche (Klein et al., 2019; Susac et al., 2018). Die Ursache dafür, dass die Achsenbeschriftungen der Leuchtkraft, Magnitude und Spektralklasse sowie die Achse der Leuchtkraft eine vergleichsweise hohe visuelle Aufmerksamkeit erhielten, wird darauf aufbauend in der Unbekanntheit dieser physikalischen Größen vermutet.

Diese Vermutung wird dadurch unterstützt, dass die Achsenbeschriftung der Temperatur als eine physikalische Größe, mit der Physikstudierende gut vertraut sind, keine besondere Aufmerksamkeit erhielt (vgl. Tabelle 10.2). Gleichzeitig erhielten die anderen physikalischen Größen teilweise sogar dann eine erhöhte Aufmerksamkeit, wenn sie im Item überhaupt nicht adressiert wurden. Diesbezüglich ist die Rolle der Expertise, wie sie in der dritten Forschungsfrage aufgegriffen wird, näher zu betrachten. Grundsätzlich passte die visuelle Aufmerksamkeit der Studierenden bei der Bearbeitung der 14 HRD-Items zu den Itemanforderungen und den Achsen der adressierten physikalischen Größen (Tabelle 10.2). Auf Basis dieser quantitativen ET-Daten können jedoch keine weiteren Aussagen über Schwierigkeiten getroffen werden. Hinsichtlich der ersten Forschungsfrage unterstützen die qualitativen ET-Daten in Form von Heatmaps (vgl. Abbildung 10.3) jedoch die diskutierte Schlussfolgerung, dass Lernschwierigkeiten in Verbindung mit der Leuchtkraft und der Magnitude bestanden. Für die anderen Achsen können jedoch keine entsprechenden Schlussfolgerungen gezogen werden.

### **Leistungsstarke und leistungsschwache Studierende**

Die dritte Forschungsfrage lautet *Wie wirkt sich das Level der Expertise auf die Auseinandersetzung mit dem HRD aus?* Zunächst zeigte die Korrelationsanalyse basierend auf den Daten aller Studierenden, dass eine hohe HRD-Punktzahl mit einer hohen visuellen Aufmerksamkeit auf den Diagrammachsen und dem Diagramminneren sowie einer längeren Bearbeitungszeit der HRD-Items einherging. Aus dem Review von Hahn und Klein (2022) über den Einsatz von Eye-Tracking in der physikdidaktischen Forschung geht hervor, dass die Analyse der Blickbewegung in Abhängigkeit von der Expertise ein sehr verbreiteter Ansatz ist und deren Zusammenhang bereits in mehreren Studien festgestellt wurde. Zur Beantwortung dieser dritten Forschungsfrage wurden daher zwei Teilstichproben verglichen, die als leistungsstarke und leistungsschwache Studierende bezeichnet wurden. Dabei wurde ein internes Expertise-Kriterium herangezogen, das sich auf die Korrektheit der Antworten in dieser Studie bezog. Die Blickbewegungen beider Gruppen wurden durch die Analyse von Heatmaps verglichen, um darauf aufbauend und unter Berücksichtigung der anderen Studienergebnisse vier Heuristiken zu formulieren, die den Umgang mit dem HRD erleichtern sollen: *Vertrautheit, Genauigkeit, Adaption* und *Zusammenhänge* (vgl. Kapitel 10.4). Mit den Heuristiken wird unter anderem empfohlen, ein Umdenken im Umgang mit Diagrammen zu durchlaufen, um gewohnte Strategien, z.B. die kulturell verankerte Art und Weise ein kartesisches Koordinatensystem zu lesen (Chumachemko et al., 2014), zu überdenken. Solche Strategien können jedoch nur durch gezieltes Üben verändert werden, denn Lernende haben sie bereits stark verinnerlicht. Das wurde beispielsweise bei der Bearbeitung von Item A6† deutlich, bei dem alle leistungsschwachen Studierenden den obersten Stern fälschlicherweise

als den mit der größten Magnitude identifizierten und dies mit seiner Position im Diagramm begründeten. Es impliziert hier eine rein oberflächliche Wahrnehmung des Items ohne ein tiefergehendes Verständnis der Magnitude. Zudem legt dies nahe, dass die leistungsschwachen Studierenden sich zu sehr auf die räumliche Orientierung im Diagramm (ebenfalls eine der identifizierten Strategien) konzentrierten und keine detaillierte Achsenbetrachtung erfolgte. Das Überdenken von vertrauten Strategien im Umgang mit Diagrammen stellt demnach einen zentralen Schritt für die erfolgreiche Informationsentnahme aus dem HRD dar.

### 11.3 Design-Based Research

Ausgangspunkt des Design-Based Research Ansatzes war die technologiebezogene Professionalisierung angehender Physiklehrkräfte. In zwei vollständigen Forschungszyklen wurde das entwickelte Lehrkonzept mit insgesamt 32 Studierenden erprobt und empirisch evaluiert. Aufbauend auf den Erfahrungen und Forschungsergebnissen des ersten Zyklus erfolgte ein Re-Design der Lehrveranstaltung sowie eine Anpassung der Forschungsmethoden. Dabei lieferten insbesondere die identifizierten Schwächen konkrete Ansatzpunkte für die Optimierung des Konzepts. Die identifizierten Stärken bekräftigten gleichzeitig die Nützlichkeit dieser neuen Lehrveranstaltung und motivierten dazu, das Konzept im Wesentlichen beizubehalten. Darüber hinaus stellte sich die Kombination von qualitativen und quantitativen Forschungsmethoden, wie sie beim DBR-Ansatz üblich ist (F. Wang & Hannafin, 2005), als gewinnbringend heraus. Die Ergebnisse des ersten Forschungszyklus wurden durch die Ergebnisse im zweiten Zyklus unterstützt, was deren Belastbarkeit erhöht und für die Zuverlässigkeit der quantitativen Instrumente spricht. Die Forschungsergebnisse zeigen, dass in diesem zyklischen Ansatz ein authentisches Lehrkonzept entwickelt wurde, das zur technologiebezogenen Professionalisierung angehender Physiklehrkräfte beiträgt und dahingehend als Innovation verstanden werden kann (Design-Based Research Collective, 2003). Da genau hier das praxisrelevante Problem und somit die Motivation des Projekts lag, kommt diese Entwicklungsarbeit einer der beiden Anforderungen an DBR nach und liefert einen Beitrag zur praktischen Problemlösung (Wilhelm & Hopf, 2014). Gleichzeitig können auch theoretische Implikationen aus der Entwicklungsarbeit und Wirkungsanalyse abgeleitet werden, um zur Klärung von Grundlagenfragen beizutragen – die zweite Anforderung an einen DBR-Ansatz (ebd.). So baut das Lehrkonzept direkt auf empirischen und theoretischen Empfehlungen der Literatur auf und orientiert sich dabei insbesondere am TPACK-Ansatz (Mishra & Koehler, 2006) und daran anschließenden Arbeiten (z.B. Angeli et al. (2015), Becker et al. (2020), M. J. Koehler und Mishra (2005)). Basierend auf den Forschungsergebnissen wird beispielsweise die Empfehlung von M. J. Koehler und Mishra (2005) unterstützt, Technologien in einen pädagogischen Kontext einzubetten und mit einem konkreten Fachinhalt zu verknüpfen, um alle drei Wissensbereiche TK, PK und CK miteinander zu verbinden, denn dieser



Ansatz stellte sich in dieser Arbeit als lernförderlich heraus. Darüber hinaus wurden durch die qualitative Inhaltsanalyse induktive Stärken und Schwächen der Lehrveranstaltung identifiziert, die als Grundlage für die Entwicklung von Items im zweiten Zyklus dienen. Sie decken die Kernaspekte der entwickelten Lehrveranstaltung ab und können in Kombination mit Freitextantworten auch zukünftig zur quantitativen Evaluation dieser Veranstaltung eingesetzt werden. Gleichzeitig dienen die Items als Gestaltungsempfehlung für die Entwicklung ähnlicher Lehrveranstaltungen zur Förderung des technologiebezogenen Professionswissens. Sie sind einerseits ein kontextabhängiges Produkt aus der Praxis und stehen andererseits in Einklang mit der Literatur, wie bereits diskutiert wurde (vgl. Kapitel 11.1 und Tabelle 3.2). Hierin zeigt sich die enge Verbindung zwischen Theorie und Praxis, was ein besonderes Merkmal des DBR-Ansatzes ist (Fraefel, 2014). Des Weiteren war es durch das zyklische Vorgehen im DBR-Ansatz möglich, die in der ersten Erprobung festgestellten Schwierigkeiten im Umgang mit dem HR-Diagramm durch eine empirische Studie gezielt zu untersuchen. Das in Teil III vorgestellte Forschungsprojekt motivierte und entwickelte sich demnach aus einer kontextabhängigen Praxiserfahrung. Dessen Forschungsergebnisse gliedern sich direkt in den DBR-Ansatz der Arbeit ein, indem sie sowohl theoretische Implikationen zum Lernen mit dem HRD als auch konkrete Praxisempfehlungen für die Gestaltung einer entsprechenden Lehr-Lern-Einheit bieten. Aus zeitlichen Gründen konnten Letztere leider nicht in das Re-Design einfließen und wurden demnach im zweiten Zyklus nicht erprobt. Im Sinne des DBR-Ansatzes sollen sie jedoch außerhalb dieser Arbeit in einem dritten Zyklus beim erneuten Re-Design berücksichtigt und anschließend erprobt werden.

In beiden Zyklen bestand eine enge Zusammenarbeit zwischen den modulverantwortlichen Astrophysiker:innen und den Physikdidaktiker:innen. Der Ansatz, dass Expert:innen aus beiden Disziplinen zusammenarbeiten, wurde folglich nicht nur mit der Übungsleitung (Teamteaching) umgesetzt sondern auch während der gesamten Entwicklung und Durchführung des neuen Lehrkonzepts. Diese Kollaboration kam nicht nur der Forderung zur internen Vernetzung bei der Planung von universitären Lehrveranstaltungen nach (vgl. Tabelle 3.2 und Goertz und Baeßler (2018)), sondern passte auch zu den Vorstellungen vom DBR-Ansatz, dass Praktiker:innen und Forscher:innen gemeinsam an der Entwicklung einer Intervention arbeiten (Wilhelm & Hopf, 2014). Darüber hinaus zeigte sich so bereits bei der Entwicklung der Lehrveranstaltung die Verknüpfung von Fachwissen, fachdidaktischem Wissen und technologiebezogenem Wissen im Sinne des TPACK-Ansatzes. Alle Beteiligten profitierten hier von den Erfahrungen und der Expertise der jeweils anderen Disziplin. Dadurch konnten astrophysikalische Inhalte didaktisch aufbereitet und der Einsatz von digitalen Werkzeugen durch forschungsrelevante und praxisnahe Anwendungen besonders authentisch gestaltet werden.

## 12 Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der DBR-Ansatz genutzt, um eine Lehrveranstaltung in der Astrophysik mit digitalen Medien innerhalb von zwei Forschungszyklen zu entwickeln und zu evaluieren. Hiermit wurde das Ziel verfolgt, die technologiebezogene Professionalisierung angehender Physiklehrkräfte zu fördern und dabei für die fachdidaktische Forschung einen praktischen und theoretischen Output zu bieten. Aus der Erfahrung, dass die Studierenden das HRD in der ersten Erprobung als herausfordernd wahrnahmen, motivierte sich ein weiteres Forschungsinteresse hinsichtlich des Umgangs von Lernenden mit dem HRD, das auch zur Optimierung der Lehrveranstaltung dienen sollte. Beide Projekte, also die Entwicklungsarbeit mit Wirkungsanalyse und die empirische Studie zum HRD, werden im Folgenden hinsichtlich ihrer Limitationen und Implikationen beschrieben. Die Arbeit schließt mit einem Ausblick sowie dem Fazit.

Insgesamt basiert die entwickelte Astrophysik-Übung auf einem innovativen und authentischen Lehrkonzept, das Lehramtsstudierenden die praxisnahe Auseinandersetzung mit digitalen Medien anhand von aktuellen und forschungsrelevanten Fachinhalten ermöglicht. Dafür wurden technologiegestützte Methoden der Erkenntnisgewinnung zusammen mit einer fachdidaktischen Perspektive in ein bestehendes Modul zur Einführung in die Astrophysik (Lehramt) integriert, um die zusammenhängenden Kompetenzbereiche des Lehrerberufswissens (vgl. TPACK-Modell) gezielt zu fördern. Die abschließenden Prüfungsergebnisse des Moduls zeigten seitens der Studierenden in beiden Zyklen im Durchschnitt ein gutes astrophysikalisches Fachwissen, wenngleich diese Erkenntnis auf keinem standardisierten Test basiert. Durch das zyklische Vorgehen konnte die Lehrveranstaltung aufbauend auf Erfahrungen und dem Feedback der Studierenden optimiert werden, auch wenn hinsichtlich der Prüfungsvorbereitung und der Parallelisierung zur Vorlesung weiterhin Raum für Verbesserung besteht. Die Studierenden waren bereits im ersten Zyklus zufrieden mit der Lehrveranstaltung und hoben insbesondere solche Aspekte des Lehrkonzepts als Stärke hervor, deren Umsetzung auf literaturbasierte Gestaltungsempfehlungen (vgl. Tabelle 3.2) zurückzuführen ist – z.B. Handlungsorientierung und Praxisbezug. Somit ist das Lehrkonzept ein gelungenes und konkretes Beispiel dafür, wie Forschungsergebnisse und Theorien praktisch im Feld umgesetzt werden können. Eine weitere Qualität des DBR-Ansatzes war, dass die Ergebnisse der Wirksamkeitsstudie im ersten Zyklus durch die im zweiten Zyklus unterstützt wurden. Dies erhöhte die Stichprobengröße und somit die Belastbarkeit der statistischen Auswertung. Darüber hinaus ermöglichte die Kombination von unterschiedlichen Erhebungsinstrumenten im Multi-Method Ansatz, die Wirksamkeit der Lehrveranstaltung vielseitig zu analysieren – trotz fehlender Kontrollgruppe. Hierbei konnten verschiedene Datenquellen (Interviews, TPACK-Skala und Manipulation Check) trianguliert werden, um Erkenntnisse zum Kompetenzerwerb zu gewinnen, was die Konsistenz hervorhebt. Aus der Wirksamkeitsstudie ging

hervor, dass die Teilnehmenden der Lehrveranstaltung ihre digitalisierungsbezogenen Kompetenzen erweiterten und über eine positive Einstellung gegenüber dem Lernen mit digitalen Medien verfügten. Aufbauend auf der TPB wird daher erwartet, dass die Studierenden zukünftig digitale Medien mit einer hohen Wahrscheinlichkeit in ihrem Physikunterricht einsetzen werden. Es kann geschlussfolgert werden, dass die entwickelte Lehrveranstaltung den in Kapitel 1 beschriebenen Teufelskreis aus schlechter digitaler Bildung in Schule und Hochschule durchbrechen kann. Mit einer weiteren Erhebung (Follow-Up) könnte diese Vermutung empirisch geprüft werden. Dabei wäre auch eine Untersuchung der Nachhaltigkeit der Lehrveranstaltung möglich, in der die technologiebezogenen TPACK-Skalen erneut erhoben werden.

Die empirische Studie zum Umgang von Lernenden mit dem HRD gliederte sich passend in den Entwicklungsprozess der Astrophysik-Übung ein. Obwohl die Studienergebnisse wegen zeitlicher Überschneidungen hier nicht direkt umgesetzt wurden, bieten diese eine wichtige Grundlage für die lernförderliche Weiterentwicklung dieser und auch anderer Lehrveranstaltungen zum HRD. Im Nachhinein wäre für den Gruppenvergleich der leistungsstarken und leistungsschwachen Studierenden eine größere Gesamtstichprobe wünschenswert gewesen, um die statistische Aussagekraft zu erhöhen. Die Stichprobengröße dieser ET-Studie ist mit 35 Studierenden zwischen dem Durchschnitt in der mathematikdidaktischen Forschung ( $M = 28.56$ ,  $SD = 21.70$ ; Strohmaier, MacKay, Obersteiner und Reiss (2020)) und dem in der physikdidaktischen Forschung ( $M = 54.4$ ,  $SD = 29.9$ ; Hahn und Klein (2022)). Eine weitere Limitation dieser Studie liegt in den eingesetzten x-y-Diagrammen, die mit zwei linearen Achsen der einfachsten Form eines kartesischen Koordinatensystems entsprachen – hiermit sind die Studierenden bestens vertraut. In einer weiteren Studie sollten die isomorphen Items daher systematisch so angepasst werden, dass sie mit bis zu vier nichtlinearen Achsen dem HRD maximal ähnlich sind. Insgesamt kam diese Studie dem Forschungsinteresse nach, Lernschwierigkeiten im Umgang mit dem HRD zu identifizieren, und darüber hinaus deckten die eingesetzten Methoden die dahinterliegenden Strategien und kognitiven Lernprozesse beim Problemlösen mit dem HRD auf. Wie zuvor bei der Wirksamkeitsstudie wurden auch hier unterschiedliche Datenquellen herangezogen, um Erkenntnisse über Lernschwierigkeiten zu gewinnen (Fragebogen, Lösungswahrscheinlichkeit, Interviews und Blickbewegung). Die Ergebnisse unterstützen und erweitern die bestehende Literatur, insbesondere durch die vier Heuristiken zum Problemlösen mit dem HRD (vertraut machen, akkurat sein, adaptieren und Zusammenhänge erkennen). Es wird empfohlen, diesen forschungsbasierten Ansatz zukünftig zur Einführung des HRDs in unterschiedlichen Lehr-Lern-Situationen wie der hier entwickelten Astrophysik-Übung heranzuziehen. Des Weiteren stellten sich die eingesetzten Materialien zum HRD als lernförderlich heraus, obwohl dies ursprünglich nicht tendiert war, weshalb diese in Zukunft neben den Heuristiken als wei-

tere Grundlage für die Entwicklung von Lehr-Lern-Materialien zur Einführung des HRDs dienen. Vor allem im Rahmen der entwickelten Astrophysik-Übung ist darauf aufbauend die Entwicklung einer interaktiven digitalen Lehr-Lern-Umgebung anzustreben, mit der die Studierenden die Besonderheiten des HRDs kennenlernen und in der die Lernschwierigkeiten, welche gut mit Eye-Tracking untersucht werden können, gezielt aufgegriffen werden. Hiermit ist das langfristige Ziel verbunden, die pädagogische Affordanz dieses besonderen Werkzeugs der Astrophysik zu erhöhen und Lernende beim Umgang mit dem Diagramm effektiv zu unterstützen.

Zusammengefasst ist hier also in einer Kooperation zwischen Fachwissenschaft und Fachdidaktik ein konkreter Best Practice Vorschlag zur Lösung eines Praxisproblems entstanden (technologiebezogene Professionalisierung), der zudem zur fachdidaktischen Grundlagenforschung beiträgt. Eine besondere Qualität liegt darin, dass das Lehrkonzept in bestehende Lehrveranstaltungen implementiert werden kann und keine Neugründung von Modulen erforderlich ist. Die Teilnehmenden verfügen darüber hinaus nach der Lehrveranstaltung über eine Bandbreite an digitalen Werkzeugen und Anwendungen, mit denen sie sich bereits ausführlich als *Lernende* auseinandersetzten und die sie daher zukünftig als *Lehrende* zur digitalen Kompetenzförderung von Schüler:innen im Klassenraum einfach einsetzen können. Das Lehrkonzept ist speziell auf Module im Lehramtsstudium ausgerichtet und verbindet auf authentische Weise das Lernen und Lehren von Fachinhalten mit digitalen Medien, indem Theorie und Praxis kombiniert werden. Abschließend ist mit dieser Arbeit also eine innovative Astrophysik-Übung entstanden, deren Lehrkonzept leicht auf andere naturwissenschaftliche Lehrveranstaltungen übertragen werden kann und die so zu einer zeitgemäßen Lehrerprofessionalisierung im 21. Jahrhundert beiträgt.

## 13 Verzeichnisse

### 13.1 Literatur

- Ainsworth, S. (1999). The functions of multiple representations. *Computers & education*, 33(2-3), 131–152.
- Airey, J. (2015). Social semiotics in higher education: Examples from teaching and learning in undergraduate physics. In *Concorde Hotel/National Institute of Education, Singapore, 3-5 November 2015* (S. 103). Swedish Foundation for International Cooperation in Research in Higher ...
- Airey, J. & Eriksson, U. (2019). Unpacking the Hertzsprung-Russell diagram: A social semiotic analysis of the disciplinary and pedagogical affordances of a central resource in astronomy. *Designs for Learning*, 11(1), 99–107.
- Ajzen, I. (1991). The theory of planned behavior. *Organizational behavior and human decision processes*, 50(2), 179–211.
- Altherr, S., Wagner, A., Eckert, B. & Jodl, H. J. (2003). Multimedia material for teaching physics (search, evaluation and examples). *European Journal of Physics*, 25(1), 7.
- Angeli, C. et al. (2015). Developing Secondary Education Computer Science Teachers' Technological Pedagogical Content Knowledge. *European Journal of Educational Sciences*, 2(2), 9–30.
- 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.
- Angeli, C., Valanides, N. & Christodoulou, A. (2016). Theoretical considerations of technological pedagogical content knowledge. *Handbook of technological pedagogical content knowledge (TPACK) for educators*, 11.
- Arnold, P. (2005). Einsatz digitaler Medien in der Hochschullehre aus lerntheoretischer Sicht. URL: <http://www.e-teaching.org/didaktik/theorie/lerntheorie/arnold.pdf> (Stand: 21.7. 2006).
- Artelt, C., Baumert, J., Klieme, E., Neubrand, M., Prenzel, M., Schiefele, U., ... Tillmann, K.-J. et al. (2001). PISA 2000: Zusammenfassung zentraler Befunde.
- Baddeley, A. (1992). Working memory. *Science*, 255(5044), 556–559.
- Baddeley, A. (2003). Working memory: looking back and looking forward. *Nature reviews neuroscience*, 4(10), 829–839.
- Barge, P., Baglin, A., Auvergne, M., Rauer, H., Léger, A., Schneider, J., ... Alonso, R. et al. (2008). Transiting exoplanets from the CoRoT space mission-I. CoRoT-Exo-1b: a low-density short-period planet around a G0V star. *Astronomy & Astrophysics*, 482(3), L17–L20.

- Baumert, J. & Kunter, M. (2013). professionelle Kompetenz von Lehrkräften. In *Stichwort: Zeitschrift für Erziehungswissenschaft* (S. 277–337). Springer.
- Becker, S., Meßinger-Koppelt, J. & Thyssen, C. (2020). *Digitale Basiskompetenzen*. Joachim Herz Stiftung.
- Beichner, R. J. (1994). Testing student interpretation of kinematics graphs. *American journal of Physics*, 62(8), 750–762.
- Beisch, N. & Schäfer, C. (2020). Ergebnisse der ARD/ZDF-Onlinestudie 2020. *European Journal of Physics*, 9, 462–481.
- Berger, V. (2006). Mit dem Computer im Unterricht modellieren. In H. F. Mikelskis (Hrsg.), *Physik-Didaktik, Praxishandbuch für die Sekundarstufe I und II* (S. 139–148). Berlin: Cornelsen.
- Bhanji, F., Gottesman, R., de Grave, W., Steinert, Y. & Winer, L. R. (2012). The retrospective pre–post: a practical method to evaluate learning from an educational program. *Academic emergency medicine*, 19(2), 189–194.
- Blömeke, S. (2003). Lehren und Lernen mit neuen Medien-Forschungsstand und Forschungsperspektiven. *Unterrichtswissenschaft*, 31(1), 57–82.
- Bogdandy, B., Tamas, J. & Toth, Z. (2020). Digital transformation in education during covid-19: A case study. In *2020 11th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom)* (S. 000173–000178). IEEE.
- Bos, W., Lorenz, R., Endberg, M., Eickelmann, B., Kammerl, R. & Welling, S. (2016). *Schule digital–der Länderindikator 2016. Kompetenzen von Lehrpersonen der Sekundarstufe I im Umgang mit digitalen Medien im Bundesländervergleich*. Münster; New York: Waxmann.
- Brandhofer, G., Kohl, A., Miglbauer, M. & Nárosy, T. (2016). digi. kompP–Digitale Kompetenzen für Lehrende. *Open Online Journal for Research and Education*, 6, 38–51.
- Brandhofer, G. & Wiesner, C. (2018). Medienbildung im Kontext der Digitalisierung: Ein integratives Modell für digitale Kompetenzen. *R&E-SOURCE*, (10).
- Brinda, T., Brüggem, N., Diethelm, I., Knaus, T., Kommer, S., Kopf, C., . . . Weich, A. (2019). Frankfurt-Dreieck zur Bildung in der digital vernetzten Welt. <https://dagstuhl.gi.de/frankfurt-dreieck>. Gesellschaft für Informatik.
- Brogt, E. (2009). *Pedagogical and curricular thinking of professional astronomers teaching the Hertzsprung-Russell diagram in introductory astronomy courses for non-science majors*. The University of Arizona.
- Brown, A. L. (1992). Design experiments: Theoretical and methodological challenges in creating complex interventions in classroom settings. *The journal of the learning sciences*, 2(2), 141–178.

- Burde, J.-P. & Wilhelm, T. (2020). Teaching electric circuits with a focus on potential differences. *Physical Review Physics Education Research*, 16(2), 020153. doi:[10.1103/PhysRevPhysEducRes.16.020153](https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.16.020153)
- Cannon, A. & Pickering, E. (1918). The Henry Draper (HD) Catalogue: 0h, 1h, 2h and 3h. *Annals of the Harvard College Observatory*, 91.
- Carroll, B. W. & Ostlie, D. A. (2017). *An introduction to modern astrophysics*. Cambridge University Press.
- Chandler, P. & Sweller, J. (1991). Cognitive load theory and the format of instruction. *Cognition and instruction*, 8(4), 293–332.
- Chase, W. G. & Simon, H. A. (1973). Perception in chess. *Cognitive psychology*, 4(1), 55–81.
- Chi, M. T. & Wylie, R. (2014). The ICAP framework: Linking cognitive engagement to active learning outcomes. *Educational psychologist*, 49(4), 219–243.
- Chumachenko, D., Shvarts, A. & Budanov, A. (2014). The Development of the Visual Perception of the Cartesian Coordinate System: An Eye Tracking Study. *North American Chapter of the International Group for the Psychology of Mathematics Education*.
- Collins, A. (1992). Toward a design science of education. In *New directions in educational technology* (S. 15–22). Springer.
- Collins, A., Joseph, D. & Bielaczyc, K. (2004). Design research: Theoretical and methodological issues. *The Journal of the learning sciences*, 13(1), 15–42.
- Council of the European Union. (2018). Council Recommendation of 22 May 2018 on key competences for lifelong learning. *Official Journal of the European Union*.
- Cox, S. M. (2008). A conceptual analysis of technological pedagogical content knowledge.
- Davis, F. D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS quarterly*, 319–340.
- De Jong, T. (2011). Instruction based on computer simulations. *Handbook of research on learning and instruction*, 446–466.
- De Jong, T. & Van Joolingen, W. R. (1998). Scientific discovery learning with computer simulations of conceptual domains. *Review of educational research*, 68(2), 179–201.
- Deci, E. L. & Ryan, R. M. (2004). *Handbook of self-determination research*. University Rochester Press.
- Design-Based Research Collective. (2003). Design-based research: An emerging paradigm for educational inquiry. *Educational researcher*, 32(1), 5–8.
- Dohrmann, R. (2019). *Professionsbezogene Wirkungen einer Lehr-Lern-Labor-Veranstaltung*. Logos Verlag.

- Dopatka, L., Spatz, V., Burde, J.-P., Wilhelm, T., Ivanjek, L., Hopf, M., . . . Haagen-Schützenhöfer, C. (2018). Design-Based Research: Elektrizitätslehre mit Potenzial und Kontexten EPo-EKo. *PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, 1*.
- Draper, H. (1879). On photographing the spectra of the stars and planets. *Memorie della Societa Degli Spettroscopisti Italiani, 8*, A81–A86.
- Drennan, J. & Hyde, A. (2008). Controlling response shift bias: the use of the retrospective pre-test design in the evaluation of a master's programme. *Assessment & Evaluation in Higher Education, 33*(6), 699–709.
- Edelson, D. C. (2002). Design research: What we learn when we engage in design. *The Journal of the Learning sciences, 11*(1), 105–121.
- Elster, D. (2007). Student interests—the German and Austrian ROSE survey. *Journal of Biological Education, 42*(1), 5–10.
- Endberg, M. (2019). *Professionswissen von Lehrpersonen der Sekundarstufe I zum Einsatz digitaler Medien im Unterricht: eine Untersuchung auf Basis einer repräsentativen Lehrerbefragung*. Waxmann Verlag.
- Endberg, M. & Lorenz, R. (2017). Kapitel VI Selbsteinschätzung medienbezogener Kompetenzen von Lehrpersonen in der Sekundarstufe I im Bundesländervergleich und im Trend von 2015 bis 2017. *Schule digital—der Länderindikator, 151*.
- Eriksson, U., Rosberg, M. & Redfors, A. (2017). Disciplinary discernment from Hertzprung-Russell-diagrams. In *NFSUN 2017, Trondheim, 7-9 June*.
- Exo.MAST. (2021). CoRoT-1b TESS Light Curve. [https://exo.mast.stsci.edu/exomast\\_planet.html?planet=corot1b](https://exo.mast.stsci.edu/exomast_planet.html?planet=corot1b).
- Feierabend, S., Plankenhorn, T. & Rathgeb, T. (2017). JIM-Studie 2002. Jugend, Information, (Multi-) Media. Basisuntersuchung zum Medienumgang 12-bis 19-Jähriger. Stuttgart: Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest.
- Ferrer, G. A. & Garcia-Barrera, A. (2014). Evaluation of the effectiveness of flipped classroom videos. In *Proceedings of INTED2014 Conference* (S. 2608–2613).
- Fichten, W. (2017). Forschendes Lernen in der Lehramtsausbildung. *Forschendes Lernen. Wie die Lehre in Universität und Fachhochschule erneuert werden kann, 155–164*.
- Finkelstein, N. D., Adams, W. K., Keller, C., Kohl, P. B., Perkins, K. K., Podolefsky, N. S., . . . LeMaster, R. (2005). When learning about the real world is better done virtually: A study of substituting computer simulations for laboratory equipment. *Physical review special topics-physics education research, 1*(1), 010103.
- Fraefel, U. (2014). Professionalization of pre-service teachers through university-school partnerships. In *Conference Proceedings of WERA Focal Meeting, Edinburgh*.
- Free Software Foundation. (2022). GNU PSPP. <https://www.gnu.org/software/pspp/>.



- Fucili, L. (2005). Implementing the Astronomy Education Research. *Highlights of Astronomy, 13*, 1032–1036.
- Georg-August-Universität Göttingen. (2021a). Modulverzeichnis Education (M.Ed.). Version AM II 03/23.03.2021. <https://www.uni-goettingen.de/de/83336.html>.
- Georg-August-Universität Göttingen. (2021b). Modulverzeichnis Physik (B.A.) (2-Fächer/Profil-Lehramt). Version AM II 09/07.06.2021. <https://www.uni-goettingen.de/de/315715.html>.
- Gerstenmaier, J. & Mandl, H. (1995). Wissenserwerb unter konstruktivistischer Perspektive. *Zeitschrift für Pädagogik, 41*(6), 867–888.
- Gesellschaft für Informatik e.V. (2016). Dagstuhl-Erklärung – Bildung in der digitalen vernetzten Welt. <https://dagstuhl.gi.de/dagstuhl-erklaerung>.
- Girwidz, R. (2004). Lerntheoretische Konzepte für Multimediaanwendungen zur Physik. *PhyDid A-Physik und Didaktik in Schule und Hochschule, 1*(3), 09–19.
- Girwidz, R. (2013). Lernen mit bewegten Bildern. Animationen und dynamische Visualisierungen im Physikunterricht. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik, 137*(1), 4–9.
- Girwidz, R. (2015). Multimedia unter lerntheoretischen Aspekten. In *Physikdidaktik* (S. 843–877). Springer.
- Girwidz, R. (2020). Multimedia und digitale Medien im Physikunterricht. In E. Kircher, R. Girwidz & H. E. Fischer (Hrsg.), *Physikdidaktik | Grundlagen* (S. 457–527). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Girwidz, R. & Müller, A. (2016). Unser Universum – ein Blick über den Horizont hinaus. *Unterricht Physik, 155* (27), 2–7.
- Gobet, F., Lane, P. C., Croker, S., Cheng, P. C., Jones, G., Oliver, I. & Pine, J. M. (2001). Chunking mechanisms in human learning. *Trends in cognitive sciences, 5*(6), 236–243.
- Goertz, L. & Baeßler, B. (2018). Überblicksstudie zum Thema Digitalisierung in der Lehrerbildung. Überblicksstudie zu elf ausgewählten Fallbeispielen. *Zusammenarbeit mit den Expertinnen und Experten der Ad-hoc Arbeitsgruppe Lehrerbildung und Digitalisierung. Online-Ressource Hochschulforum Digitalisierung. Arbeitspapier, 36*.
- Graham, C. R. (2011). Theoretical considerations for understanding technological pedagogical content knowledge (TPACK). *Computers & Education, 57*(3), 1953–1960.
- Gräsel, C., Bruhn, J., Mandl, H. & Fischer, F. (1997). Lernen mit Computernetzen aus konstruktivistischer Perspektive. *Unterrichtswissenschaft, 25*(1), 4–18.
- Gur, H. et al. (2015). A short review of TPACK for teacher education. *Educational Research and Reviews, 10*(7), 777–789.

- Haagen-Schützenhöfer, C. & Hopf, M. (2018). Schülervorstellungen zur geometrischen Optik. In H. Schecker, T. Wilhelm, M. Hopf & R. Duit (Hrsg.), *Schülervorstellungen und Physikunterricht* (Kap. 5, S. 89–114). Berlin: Springer-Verlag.
- Haagen-Schützenhöfer, C. & Hopf, M. (2020). Design-based research as a model for systematic curriculum development: The example of a curriculum for introductory optics. *Physical Review Physics Education Research*, 16(2), 020152.
- Hahn, L. & Klein, P. (2022). Eye tracking in physics education research: A systematic literature review. *Physical Review Physics Education Research*, 18(1), 013102.
- Haider, H. & Frensch, P. A. (1996). The role of information reduction in skill acquisition. *Cognitive psychology*, 30(3), 304–337.
- Haider, H. & Frensch, P. A. (1999). Eye movement during skill acquisition: more evidence for the information-reduction hypothesis. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 25(1), 172.
- Hamilton, E. R., Rosenberg, J. M. & Akcaoglu, M. (2016). The substitution augmentation modification redefinition (SAMR) model: A critical review and suggestions for its use. *TechTrends*, 60(5), 433–441.
- Harvey, B. & Mönig, J. (2020). Snap! Reference Manual. <https://snap.berkeley.edu/snap/help/SnapManual.pdf>.
- Helfferrich, C. (2011). *Die Qualität qualitativer Daten*. Springer.
- Herrington, J. & Oliver, R. (2000). An instructional design framework for authentic learning environments. *Educational technology research and development*, 48(3), 23–48.
- Hertzprung, E. (1911). Publikationen des Astrophysikalischen Observatoriums zu Potsdam. 63.
- Herzig, B. (2014). *Wie wirksam sind digitale Medien im Unterricht?* Bertelsmann Stiftung Gütersloh.
- Herzig, B. & Grafe, S. (2007). *Digitale Medien in der Schule: Standortbestimmung und Handlungsempfehlungen für die Zukunft; Studie zur Nutzung digitaler Medien in allgemein bildenden Schulen in Deutschland*. Dt. Telekom, Zentralbereich Unternehmenskommunikation.
- Hessman, F. V. & Modrow, E. (2006). An Introduction to Astronomical Image Processing with ImageJ. <https://www.astro.physik.uni-goettingen.de/~hessman/ImageJ/Book/>.
- Higgins, K., Huscroft-D'Angelo, J. & Crawford, L. (2019). Effects of technology in mathematics on achievement, motivation, and attitude: A meta-analysis. *Journal of Educational Computing Research*, 57(2), 283–319.
- Hillmayr, D., Reinhold, F., Ziernwald, L. & Reiss, K. (2017). *Digitale Medien im mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht der Sekundarstufe. Einsatzmöglichkeiten, Umsetzung und Wirksamkeit*. Münster: Waxmann.

- Hillmayr, D., Ziernwald, L., Reinhold, F., Hofer, S. I. & Reiss, K. M. (2020). The potential of digital tools to enhance mathematics and science learning in secondary schools: A context-specific meta-analysis. *Computers & Education*, 153, 103897.
- Hochberg, K., Becker, S., Louis, M., Klein, P. & Kuhn, J. (2020). Using smartphones as experimental tools—a follow-up: cognitive effects by video analysis and reduction of cognitive load by multiple representations. *Journal of Science Education and Technology*, 1–15.
- Hohenwarter, M. & Collaborators. (2022). GeoGebra. <https://www.geogebra.org>.
- Hohmann, S. & Quast, M. (2018). Astronomie in der Lehrerbildung. *PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*, 1.
- Honebein, P. C., Duffy, T. M. & Fishman, B. J. (1993). Constructivism and the design of learning environments: Context and authentic activities for learning. In *Designing environments for constructive learning* (S. 87–108). Springer.
- Hong, J. E. & Stonier, F. (2015). GIS in-service teacher training based on TPACK. *Journal of Geography*, 114(3), 108–117.
- Hopf, M. & Schecker, H. (2018). Schülervorstellungen zu fortgeschrittenen Themen der Schulphysik. In H. Schecker, T. Wilhelm, M. Hopf & R. Duit (Hrsg.), *Schülervorstellungen und Physikunterricht* (Kap. 11, S. 225–242). Berlin: Springer-Verlag.
- Jaumann, R., Köhler, U., Sohl, F., Tirsch, D. & Pieth, S. (2018a). *Expedition zu fremden Welten: 20 Milliarden Kilometer durch das Sonnensystem*. Springer-Verlag.
- Jaumann, R., Köhler, U., Sohl, F., Tirsch, D. & Pieth, S. (2018b). Merkur und Venus. In *Expedition zu fremden Welten* (Kap. 2, S. 29–82). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Jonassen, D. H. (1991). Objectivism versus constructivism: Do we need a new philosophical paradigm? *Educational technology research and development*, 39(3), 5–14.
- Jonassen, D. H. (1994). Technology as cognitive tools: Learners as designers. *ITForum Paper*, (1), 67–81.
- Jonassen, D. H. (1995). Computers as cognitive tools: Learning with technology, not from technology. *Journal of Computing in Higher Education*, 6(2), 40–73.
- Kammerl, R. (2015). Medienbildung–(k)ein Unterrichtsthema? Eine Expertise zum Stellenwert der Medienkompetenzförderung in Schulen in Hamburg und Schleswig-Holstein. *Medienanstalt Hamburg Schlesweig-Holstein*.
- Kammerl, R. & Ostermann, S. (2010). *Medienbildung–(k)ein Unterrichtsfach? Eine Expertise zum Stellenwert der Medienkompetenzförderung in Schulen*.
- Kempen, L. & Wassong, T. (2017). VEMINT mobile with Apps: Der gezielte Einsatz von mobilen Endgeräten in einem Mathematik-Vorkurs unter Verwendung der multimedialen VEMINT-Materialien. *Hochschuldidaktik im Dialog: Beiträge der Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Hochschuldidaktik (dghd) 2015*, 131, 13.

- Klein, P., Hahn, L. & Kuhn, J. (2021). Einfluss visueller Hilfen und räumlicher Fähigkeiten auf die graphische Interpretation von Vektorfeldern: Eine Eye-Tracking-Untersuchung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 27(1), 181–201.
- Klein, P., Küchemann, S., Brückner, S., Zlatkin-Troitschanskaia, O. & Kuhn, J. (2019). Student understanding of graph slope and area under a curve: A replication study comparing first-year physics and economics students. *Physical Review Physics Education Research*, 15(2), 020116.
- KMK. (2016). Bildung in der digitalen Welt. Strategie der Kultusministerkonferenz. <https://www.kmk.org/themen/bildung-in-der-digitalen-welt/strategie-bildung-in-der-digitalen-welt.html>.
- KMK. (2019). Ländergemeinsame inhaltliche Anforderungen für die Fachwissenschaften und Fachdidaktiken in der Lehrerbildung. (Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 16.10.2008 i. d. F. vom 16.05.2019). <https://www.kmk.org/themen/allgemeinbildende-schulen/lehrkraefte/lehrerbildung.html>.
- KMK. (2020). Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife. Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 18.06.2020.
- KMK. (2022). Abiturnoten im Ländervergleich. <https://www.kmk.org/dokumentation-statistik/statistik/schulstatistik/abiturnoten.html>.
- Koehler, M. & Mishra, P. (2009). What is technological pedagogical content knowledge (TPACK)? *Contemporary issues in technology and teacher education*, 9(1), 60–70.
- Koehler, M. J. & Mishra, P. (2005). Teachers learning technology by design. *Journal of computing in teacher education*, 21(3), 94–102.
- Koehler, M. J., Mishra, P., Hershey, K. & Peruski, L. (2004). With a little help from your students: A new model for faculty development and online course design. *Journal of Technology and Teacher Education*, 12(1), 25–55.
- Köster, H., Mehrtens, T., Brämer, M. & Steger, J. (2020). Forschendes Lernen im zyklischen Prozess–Entwicklung eines neuen Lehr-Lern-Formats im Studienfach Sachunterricht. In *Lehr-Lern-Labore* (S. 99–111). Springer.
- Krause, M. & Eilks, I. (2015). Lernen über digitale Medien in der Chemielehrerbildung. *CHEMKON*, 22(4), 173–178.
- Krause, M., Pietzner, V., Dori, Y. J. & Eilks, I. (2017). Differences and developments in attitudes and self-efficacy of prospective chemistry teachers concerning the use of ICT in education. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 13(8), 4405–4417.
- Kreijns, K., Van Acker, F., Vermeulen, M. & Van Buuren, H. (2013). What stimulates teachers to integrate ICT in their pedagogical practices? The use of digital learning materials in education. *Computers in human behavior*, 29(1), 217–225.

- Krofta, H., Fandrich, J. & Nordmeier, V. (2013). Fördern Praxisseminare im Schülerlabor das Professionswissen und einen reflexiven Habitus bei Lehramtsstudierenden? *PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.
- Kuba, R., Rahimi, S., Smith, G., Shute, V. & Dai, C.-P. (2021). Using the first principles of instruction and multimedia learning principles to design and develop in-game learning support videos. *Educational Technology Research and Development*, 69(2), 1201–1220.
- Kuhn, J. (2018). Smartphones, Tablets & Co. im Physikunterricht. 3, 10–13.
- Kuhn, J., Ropohl, M. & Groß, J. (2017). Fachdidaktische Mehrwerte durch Einführung digitaler Werkzeuge. In J. Meßinger-Koppelt, S. Schanze & J. Groß (Hrsg.), *Lernprozesse mit digitalen Werkzeugen unterstützen. Perspektiven aus der Didaktik naturwissenschaftlicher Fächer* (S. 11–32). Hamburg: Joachim Herz Stiftung.
- Lachmayer, S., Nerdel, C. & Prechtel, H. (2007). Modellierung kognitiver Fähigkeiten beim Umgang mit Diagrammen im naturwissenschaftlichen Unterricht (Modelling of cognitive abilities regarding the handling of graphs in science education). *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 13, 161–180.
- Ladel, S., Knopf, J. & Weinberger, A. (2018). *Digitalisierung und Bildung*. Springer.
- Lam, T. C. & Bengo, P. (2003). A comparison of three retrospective self-reporting methods of measuring change in instructional practice. *American Journal of Evaluation*, 24(1), 65–80.
- Lane, P. C., Cheng, P. & Gobet, F. (2000). CHREST+: A simulation of how humans learn to solve problems using diagrams.
- Langendorf, R., Merker, S., Hessman, F. & Schneider, S. (2021). Simulationsbasiertes Lernen im Astrophysik-Tutorium am Beispiel Schwarzkörper und Sternspektren. *PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*, 1.
- Langendorf, R. & Schneider, S. (2021). Technologiebezogene Professionalisierung in einem Astrophysik-Seminar. *Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, virtuelle Jahrestagung 2021*. Zur Veröffentlichung eingereichtes Manuskript.
- Langendorf, R., Schneider, S. & Hessman, F. (2022). Learning and teaching astronomy with digital tools promotes physics student teachers' digital competencies. *Astronomy Education Journal*. Zur Veröffentlichung angenommenes Manuskript.
- Langendorf, R., Schneider, S. & Klein, P. (2022). *Extracting information from the Hertzsprung-Russell diagram: An eye tracking study*. Zur Veröffentlichung angenommenes Manuskript.
- Lee, J., Cerreto, F. A. & Lee, J. (2010). Theory of planned behavior and teachers' decisions regarding use of educational technology. *Journal of Educational Technology & Society*, 13(1), 152–164.

- Lee, K. & Collaborators. (2022). Astronomy Education at the University of Nebraska-Lincoln. <https://astro.unl.edu/>.
- Leppink, J., Paas, F., Van der Vleuten, C. P., Van Gog, T. & Van Merriënboer, J. J. (2013). Development of an instrument for measuring different types of cognitive load. *Behavior research methods*, 45(4), 1058–1072.
- Lorenz, R., Bos, W., Endberg, M., Eickelmann, B., Grafe, S. & Vahrenhold, J. (2017). *Schule digital-der Länderindikator 2017. Schulische Medienbildung in der Sekundarstufe I mit besonderem Fokus auf MINT-Fächer im Bundesländervergleich und Trends von 2015 bis 2017*. Münster; New York: Waxmann.
- Lorenz, R., Endberg, M. & Eickelmann, B. (2017). Kapitel IV Unterrichtliche Nutzung digitaler Medien durch Lehrpersonen in der Sekundarstufe I im Bundesländervergleich und im Trend von 2015 bis 2017. *Schule digital-der Länderindikator*, 84.
- Matilsky, T. (2020). JS9: An interactive tool for teaching astrophysics. *The Physics Teacher*, 58(8), 602–603.
- Mayer, R. E. (2001). *Multimedia Learning*. Cambridge University Press.
- Mayer, R. E. (2005). Cognitive theory of multimedia learning. *The Cambridge handbook of multimedia learning*, 41, 31–48.
- Mayer, R. E. (2009). *Multimedia Learning* (2. Aufl.). Cambridge University Press.
- Mayor, M. & Queloz, D. (1995). A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, 378(6555), 355–359.
- Mayring, P. (2014). Qualitative content analysis: theoretical foundation, basic procedures and software solution.
- Mayring, P. (2019). Qualitative Inhaltsanalyse-Abgrenzungen, Spielarten, Weiterentwicklungen. 20(3), 15.
- Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest. (2020). JIM-Studie 2020. Jugend, Information, Medien. <https://www.mpfs.de/studien/jim-studie/2020/>.
- Meßinger-Koppelt, J. (2015). Kolleg Didaktik:digital. <https://www.joachim-herz-stiftung.de/was-wir-tun/naturwissenschaften-begreifen/naturwissenschaften-vermitteln/kolleg-didaktik:digital/>.
- Michalos, A. C. (1985). Multiple discrepancies theory (MDT). *Social indicators research*, 16(4), 347–413.
- Miles, R. (2007). A light history of photometry: from Hipparchus to the Hubble Space Telescope. *Journal of the British Astronomical Association*, 117, 172–186.
- 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. [Punya] & Koehler, M. J. (2006). Technological pedagogical content knowledge: A framework for teacher knowledge. *Teachers college record*, 108(6), 1017–1054.

- Nachtigall, V., Rummel, N. & Serova, K. (2018). Authentisch ist nicht gleich authentisch– Wie Schülerinnen und Schüler die Authentizität von Lernaktivitäten im Schülerlabor einschätzen. *Unterrichtswissenschaft*, 46(3), 299–319.
- NASA Exoplanet Archive. (2022). Exoplanet Plots, Confirmed Planets. <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/exoplanetplots/>.
- Niebert, K. & Gropengießer, H. (2014). Leitfadengestützte Interviews. In *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 121–132). Springer.
- Niedersächsisches Kultusministerium (Hrsg.) (2015). Kerncurriculum für das Gymnasium Schuljahrgänge 5-10: Physik. <http://www.cuvo.nibis.de>, Hannover.
- Niedersächsisches Kultusministerium (Hrsg.) (2017). Kerncurriculum für das Gymnasium - gymnasiale Oberstufe, die Gesamtschule - gymnasiale Oberstufe, das Berufliche Gymnasium, das Abendgymnasium, das Kolleg. – Physik. <http://www.cuvo.nibis.de>, Hannover.
- Paas, F. G. & Van Merriënboer, J. J. (1994). Instructional control of cognitive load in the training of complex cognitive tasks. *Educational psychology review*, 6(4), 351–371.
- Papanikolaou, K., Gouli, E. & Makri, K. (2014). Designing pre-service teacher training based on a combination of TPACK and Communities of Inquiry. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 116, 3437–3442.
- Percy, J. R. (2009). Why astronomy is useful and should be included in the school curriculum. *Teaching and Learning Astronomy: Effective Strategies for Educators Worldwide*, 10.
- Persike, M. & Friedrich, J.-D. (2016). Lernen mit digitalen Medien aus Studierendenperspektive. *Berlin: Hochschulforum Digitalisierung*.
- Pickering, E. C. (1887). The Henry Draper Memorial 1. *Nature*, 36(915), 31–34.
- Piper, S. (2014). *Exoplaneten. Die Suche nach einer zweiten Erde*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Podolefsky, N. S., Perkins, K. K. & Adams, W. K. (2010). Factors promoting engaged exploration with computer simulations. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 6(2), 020117.
- Puentedura, R. R. (2006). Transformation, Technology, and Education [Presentation]. <http://hippasus.com/resources/tte/>.
- Rachel, T. (2015). Simulation und Datenanalyse - Brücke über die Grenzen der Erkenntnis. <https://www.bmbf.de/de/simulation-und-datenanalyse-bruecke-ueber-die-grenzen-der-erkenntnis-1665.html>, BMBF.
- Rasband, W. & Collaborators. (2022). ImageJ. <https://imagej.nih.gov/ij/>.
- Redecker, C. et al. (2017). *European framework for the digital competence of educators: DigCompEdu*. Joint Research Centre (Seville site).

- Rehfeldt, D. & Nordmeier, V. (2019). Lehr-Lern-Labor-Seminare–Ein innovatives Lehrkonzept für die Lehrkräftebildung. *Verzahnung von Theorie und Praxis im Lehramtsstudium*, 27.
- Reinmann, G. (2005). Innovation ohne Forschung? Ein Plädoyer für den Design-Based Research-Ansatz in der Lehr-Lernforschung. *Unterrichtswissenschaft*, 33(1), 52–69.
- Reinmann, G. (2013). Didaktisches Handeln–Die Beziehung zwischen Lerntheorien und Didaktischem Design. *Lehrbuch für Lernen und Lehren mit Technologien*.
- Renkl, A. (1994). Träges Wissen: Die "unerklärliche" Kluft zwischen Wissen und Handeln.
- Renkl, A., Gruber, H., Weber, S., Lerche, T. & Schweizer, K. (2003). Cognitive Load beim Lernen aus Lösungsbeispielen. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie/German Journal of Educational Psychology*.
- Richtberg, S. (2018). *Elektronenbahnen in Feldern. Konzeption und Evaluation einer webbasierten Lernumgebung*. Logos Verlag Berlin.
- Richtberg, S. & Girwidz, R. (2013). Entdeckendes Lernen mit dem Computer. Möglichkeiten und Anforderungen von Animationen und Simulationen. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, (137), 14–17.
- Rodriguez Moreno, J., Agreda Montoro, M. & Ortiz Colón, A. M. (2019). Changes in teacher training within the TPACK model framework: A systematic review. *Sustainability*, 11(7), 1870.
- Rosenberg, J. M. & Koehler, M. J. (2015). Context and technological pedagogical content knowledge (TPACK): A systematic review. *Journal of Research on Technology in Education*, 47(3), 186–210.
- Rott, L. & Marohn, A. (2015). Inklusiven Unterricht entwickeln und erproben–Eine Verbindung von Theorie und Praxis im Rahmen von Design-Based Research. *Zeitschrift für Inklusion*.
- Russell, H. N. (1914). Relations Between the Spectra and other Characteristics of the Stars. II. Brightness and Spectral Class. *Nature*, 93(2323), 252–258.
- Rutten, N., Van Joolingen, W. R. & Van Der Veen, J. T. (2012). The learning effects of computer simulations in science education. *Computers & Education*, 58(1), 136–153.
- Sadaf, A., Newby, T. J. & Ertmer, P. A. (2012). Exploring pre-service teachers' beliefs about using Web 2.0 technologies in K-12 classroom. *Computers & Education*, 59(3), 937–945.
- Sailer, M., Murböck, J. & Fischer, F. (2017). Digitale Bildung an bayerischen Schulen–Infrastruktur, Konzepte, Lehrerbildung und Unterricht.
- Saw, K. G. (2017). Cognitive load theory and the use of worked examples as an instructional strategy in physics for distance learners: A preliminary study. *Turkish Online Journal of Distance Education*, 18(4), 142–159.



- Schaal, S., Spannagel, C. & Vogel, M. (2011). Mehr als eine Rechenmaschine-Computer im mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht. *Lehrbuch für Lernen und Lehren mit Technologien*.
- Schanze, S. & Girwidz, R. (2018). Lernen mit digitalen Medien. In *Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 177–192). Springer.
- Schaumburg, H., Gerick, J., Eickelmann, B. & Labusch, A. (2019). *Nutzung digitaler Medien aus der Perspektive der Schülerinnen und Schüler im internationalen Vergleich*.
- Schecker, H. & Wilhelm, T. (2018). Schülervorstellungen in der Mechanik. In H. Schecker, T. Wilhelm, M. Hopf & R. Duit (Hrsg.), *Schülervorstellungen und Physikunterricht* (Kap. 4, S. 63–88). Berlin: Springer-Verlag.
- Schiefner-Rohs, M. (2012). Verankerung von medienpädagogischer Kompetenz in der universitären Lehrerbildung. In *Jahrbuch Medienpädagogik 9* (S. 359–387). Springer.
- Schmid, U., Goertz, L., Radomski, S., Thom, S. & Behrens, J. (2017). *Monitor Digitale Bildung: Die Hochschulen im digitalen Zeitalter*. Bertelsmann Stiftung.
- Schmidt, D. A., Baran, E., Thompson, A. D., Mishra, P., Koehler, M. J. & Shin, T. 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*, 42(2), 123–149.
- Schnotz, W. & Bannert, M. (1999). Strukturaufbau und Strukturinterferenz bei der multimedial angeleiteten Konstruktion mentaler Modelle. In *KogWis99. Proceedings der* (Bd. 4, S. 85).
- Scholz, M. (2014). *Planetologie extrasolarer Planeten*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Scholz, M. (2018). *Die Physik der Sterne - Aufbau, Entwicklung und Eigenschaften*. Berlin: Springer-Verlag.
- Schrader, C. & Bastiaens, T. J. (2012). The influence of virtual presence: Effects on experienced cognitive load and learning outcomes in educational computer games. *Computers in Human Behavior*, 28(2), 648–658.
- Shah, P. & Miyake, A. (1996). The separability of working memory resources for spatial thinking and language processing: an individual differences approach. *Journal of experimental psychology: General*, 125(1), 4.
- Shulman, L. S. (1986). Those who understand: Knowledge growth in teaching. *Educational researcher*, 15(2), 4–14.
- Shulman, L. S. (1987). Knowledge and teaching: Foundations of the new reform. *Harvard educational review*, 57(1), 1–23.
- Sloan Digital Sky Survey. (2022). SDSS. <https://www.sdss.org/>.
- Sonntag, M., Rueß, J., Ebert, C., Friederici, K., Schilow, L. & Deicke, W. (2017). *Forschendes Lernen im Seminar*. doi:<http://dx.doi.org/10.18452/22104>

- Steffensky, M. & Parchmann, I. (2007). The project CHEMOL: Science education for children-Teacher education for students! *Chemistry Education Research and Practice*, 8(2), 120–129.
- Stiller, C., Allmers, T., Habigsberg, A., Stockey, A. & Wilde, M. (2020). Erkenntnisgewinnung in den Naturwissenschaften: Von der Hypothese zur Theorie. *PraxisForschung-Lehrer\*innenBildung. Zeitschrift für Schul-und Professionsentwicklung*. 2(2), 28–39.
- Strohmaier, A. R., MacKay, K. J., Obersteiner, A. & Reiss, K. M. (2020). Eye-tracking methodology in mathematics education research: A systematic literature review. *Educational Studies in Mathematics*, 104(2), 147–200.
- Sung, Y.-T., Chang, K.-E. & Liu, T.-C. (2016). The effects of integrating mobile devices with teaching and learning on students' learning performance: A meta-analysis and research synthesis. *Computers & Education*, 94, 252–275.
- Susac, A., Bubic, A., Kazotti, E., Planinic, M. & Palmovic, M. (2018). Student understanding of graph slope and area under a graph: A comparison of physics and nonphysics students. *Physical Review Physics Education Research*, 14(2), 020109.
- Susac, A., Bubic, A., Martinjak, P., Planinic, M. & Palmovic, M. (2017). Graphical representations of data improve student understanding of measurement and uncertainty: An eye-tracking study. *Physical Review Physics Education Research*, 13(2), 020125.
- Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving: Effects on learning. *Cognitive science*, 12(2), 257–285.
- Sweller, J. (2010). Element interactivity and intrinsic, extraneous, and germane cognitive load. *Educational psychology review*, 22(2), 123–138.
- Tampe, J. & Spatz, V. (2019). Entwicklungsprojekt: "Die experimentellen Methoden der Naturwissenschaften ganzheitlich begreifen und vermitteln". *PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*, 1.
- Tengler, K., Schrammel, N. & Brandhofer, G. (2020). Lernen trotz Corona. Chancen und Herausforderungen des distance learning an österreichischen Schulen: Chancen und Herausforderungen des Distance Learnings an österreichischen Schulen. *Medienimpulse*, 58(02), 37–Seiten.
- Thees, M., Kapp, S., Strzys, M. P., Beil, F., Lukowicz, P. & Kuhn, J. (2020). Effects of augmented reality on learning and cognitive load in university physics laboratory courses. *Computers in Human Behavior*, 108, 106316.
- Thompson, A. D. & Mishra, P. [Punya]. (2007). Editors' remarks: Breaking news: TPACK becomes TPACK! *Journal of Computing in Teacher Education*, 24(2), 38–64.
- Unsöld, A. & Baschek, B. (2002). *Der neue Kosmos: Einführung in die Astronomie und Astrophysik*. Springer-Verlag.

- Urhahne, D. & Harms, U. (2006). Instruktionale Unterstützung beim Lernen mit Computersimulationen. *Unterrichtswissenschaft*, 34(4), 358–377.
- Valtonen, T., Kukkonen, J., Kontkanen, S., Sormunen, K., Dillon, P. & Sointu, E. (2015). The impact of authentic learning experiences with ICT on pre-service teachers' intentions to use ICT for teaching and learning. *Computers & Education*, 81, 49–58.
- Van Joolingen, W. et al. (1999). Cognitive tools for discovery learning. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 10(3), 385–397.
- Van Merriënboer, J. J. & Sweller, J. (2005a). Cognitive load theory and complex learning: Recent developments and future directions. *Educational psychology review*, 17(2), 147–177.
- Van Merriënboer, J. J. & Sweller, J. (2005b). Cognitive load theory and complex learning: Recent developments and future directions. *Educational psychology review*, 17(2), 147–177.
- Venkatesh, V. & Bala, H. (2008). Technology acceptance model 3 and a research agenda on interventions. *Decision sciences*, 39(2), 273–315.
- 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.
- von Kotzebue, L. & Nerdel, C. (2012). Professionswissen von Biologielehrkräften zum Umgang mit Diagrammen Biology teachers' professional knowledge on handling with diagrams. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 18, 181–200.
- Wang, A. I. & Tahir, R. (2020). The effect of using Kahoot! for learning—A literature review. *Computers & Education*, 149, 103818.
- Wang, F. & Hannafin, M. J. (2005). Design-based research and technology-enhanced learning environments. *Educational technology research and development*, 53(4), 5–23.
- Wemyss, T. & van Kampen, P. (2013). Categorization of first-year university students' interpretations of numerical linear distance-time graphs. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 9(1), 010107.
- Wieman, C. E., Adams, W. K., Loeblein, P. & Perkins, K. K. (2010). Teaching physics using PhET simulations. *The Physics Teacher*, 48(4), 225–227.
- Wilhelm, T. & Hopf, M. (2014). Design-Forschung. In *Methoden in der naturwissenschafts-didaktischen Forschung* (S. 31–42). Springer.
- Wong, D., Mishra, P., Koehler, M. & Siebenthal, S. (2007). Teacher as filmmaker: iVideos, technology education, and professional development. *Technology in the college classroom*, 181–195.

- Zhang, J., Chen, Q., Sun, Y. & Reid, D. J. (2004). Triple scheme of learning support design for scientific discovery learning based on computer simulation: Experimental research. *Journal of Computer Assisted Learning*, 20(4), 269–282.
- Ziegler, C. C. (2006). Darstellung von Sternentwicklung mit der Programmiersprache Java.
- Zierer, K. (2020). Visible Learning 2020: Zur Weiterentwicklung und Aktualität der Forschungen von John Hattie. <https://www.kas.de/de/einzeltitel/-/content/visible-learning-2020>. Konrad Adenauer Stiftung.
- Zimmermann, F. (2022). *Entwicklung und Evaluation digitalisierungsbezogener Kompetenzen von angehenden Chemielehrkräften*. Logos Verlag Berlin GmbH.
- Zimmermann, F. & Melle, I. (2019). Designing a university seminar to professionalize prospective teachers for digitization in chemistry education. *Chemistry Teacher International*, 1(2).
- Zotti, G., Hoffmann, S. M., Wolf, A., Chéreau, F. & Chéreau, G. (2021). The Simulated Sky: Stellarium for Cultural Astronomy Research. *Journal of Skyscape Archaeology*, 6(2), 221–258. doi:[10.1558/jsa.17822](https://doi.org/10.1558/jsa.17822)

## 13.2 Abbildungen

<a href="#">2.1 Kognitive Überlastung (Cognitive Load Theory)</a>	11
<a href="#">2.2 Cognitive Theory of Multimedia Learning</a>	11
<a href="#">3.1 TPACK-Modell</a>	30
<a href="#">3.2 Dagstuhl-Dreieck</a>	34
<a href="#">3.3 Orientierungsrahmen DiKoLAN</a>	35
<a href="#">3.4 Theory of Planned Behavior</a>	42
<a href="#">4.1 Ablaufmodell zum Design-Based Research</a>	46
<a href="#">4.2 Modulbeschreibung zur Einführung in die Astrophysik</a>	52
<a href="#">4.3 Rahmenmodell der Lehrveranstaltung</a>	53
<a href="#">4.4 Entdeckung von Exoplaneten pro Jahr</a>	64
<a href="#">4.5 Masse-Radius-Diagramm für entdeckte Exoplaneten (NASA Exoplanet Archive, 2022)</a>	64
<a href="#">4.6 Transit-Lichtkurve von CoRoT-1 b</a>	65
<a href="#">4.7 Radialgeschwindigkeitskurve von 51 Peg</a>	67
<a href="#">4.8 Screenshot der Snap!-Simulation zum Transit</a>	68
<a href="#">4.9 Screenshot der GeoGebra-Simulation zur Radialgeschwindigkeit</a>	68
<a href="#">4.10 Hertzsprung-Russell Diagramm</a>	73
<a href="#">4.11 Screenshot der eingesetzten Simulation zum Hertzsprung-Russell-Diagramm in der Erarbeitungsphase 1.</a>	77

4.12 Screenshot der eingesetzten Simulation zur Sternentwicklung in der Erarbeitsphase 2.	77
5.1 Forschungsdesign	79
6.1 Ergebnisse der TPACK-Selbsteinschätzung	87
6.2 Ergebnisse zur Einstellung	88
6.3 Ergebnisse des Manipulation Check	92
7.1 Ergebnisse der TPACK-Selbsteinschätzung im zweiten Zyklus	98
7.2 Ergebnisse zur Einstellung im zweiten Zyklus	98
7.3 Ergebnisse des Manipulation Check im zweiten Zyklus	100
9.1 Forschungsdesign zum HRD	105
9.2 Ablauf der Stimulipräsentation	107
9.3 Beispiel für ein isomorphes Itempaar	109
9.4 Definition der AOIs	110
10.1 Deskriptive Ergebnisse zur Itembearbeitung	115
10.2 Lösungswahrscheinlichkeit der HRD- und xy-Items	116
10.3 Heatmaps von isomorphen Itempaaren	120
10.4 Leistungsschwache und leistungsstarke Gruppe	122
E.1 Deskriptive Darstellung der lernbezogenen Vorerfahrungen in der Schulzeit.	188
E.2 Deskriptive Darstellung der lernbezogenen Vorerfahrungen im Studium.	188
E.3 Deskriptive Darstellung der lehrbezogenen Vorerfahrungen im Studium.	188
E.4 Deskriptive Darstellung der Vorerfahrungen in der digitalen vernetzten Welt in der Schulzeit.	189
E.5 Deskriptive Darstellung der Vorerfahrungen in der digitalen vernetzten Welt im Studium.	189
E.6 Deskriptive Darstellung der lernbezogenen Vorerfahrungen in der Schulzeit.	190
E.7 Deskriptive Darstellung der lernbezogenen Vorerfahrungen im Studium.	190
E.8 Deskriptive Darstellung der lehrbezogenen Vorerfahrungen im Studium.	190
E.9 Deskriptive Darstellung der Vorerfahrungen in der digitalen vernetzten Welt in der Schulzeit.	191
E.10 Deskriptive Darstellung der Vorerfahrungen in der digitalen vernetzten Welt im Studium.	191

## 13.3 Tabellen

2.1 Überblick über Lerntheorien	9
2.2 ICAP-Modell	15
2.3 Gestaltungsprinzipien für digitalgestützte Lernumgebungen	22
3.1 Überblick über digitale Kompetenzrahmen	29
3.2 Empfehlungen zur technologiebezogenen Professionalisierung	41
4.1 Überblick über den DBR-Ansatz dieser Arbeit	48
4.2 Bausteine des Lehrkonzepts	55
4.3 Struktur der Astrophysik-Übung	60
4.4 Einordnung der adressierten digitalen Kompetenzen	63
4.5 Umsetzung von Fachinhalt 5	71
4.6 Umsetzung von Fachinhalt 8	76
5.1 Skalenübersicht	80
6.1 Wesentliche Stärken und Schwächen der Lehrveranstaltung	89
7.1 Evaluation im zweiten Zyklus	100
9.1 HRD-Items und isomorphe xy-Items	108
9.2 Skalenübersicht der HRD-Studie	111
9.3 Rotierte Komponentenmatrix der CL-Messung	112
10.1 Kognitive Belastung der HRD-Studie	117
10.2 Aufmerksamkeit der lokalen AOIs	118
10.3 Lernschwierigkeiten und Strategien im Umgang mit dem HRD	123
A.1 Zuordnung der adressierten Kompetenzen zu den digitalen Basiskompetenzen	161
D.1 Deduktive Kategorien zum Gesamteindruck	181
D.2 Deduktive Kategorien zu Stärken und Schwächen	182
D.3 Induktive Subkategorien (Stärken)	183
D.4 Induktive Subkategorien (Schwächen)	187
F.1 Induktive Kategorien zu Lernschwierigkeiten	193
F.2 Induktive Kategorien zu Strategien	196
F.3 Vergleich der TVD und TVC	209

## Teil V

# Anhang

## A Lernziele und adressierte digitale Basiskompetenzen

Im Folgenden werden die fachinhaltlichen Lernziele, die mit der Hausaufgabe und dem fachwissenschaftlichen Baustein pro Woche verbunden sind, aufgelistet. Die Nummerierung gibt dabei den entsprechenden Fachinhalt an, wie er in Tabelle [4.3](#) bereits aufgelistet wird.

Die Studierenden...

- 1 ...vergleichen das horizontale und äquatoriale Koordinatensystem.  
...erklären anhand der Rektaszension  $\alpha$  und der Deklination  $\delta$ , unter welchen Bedingungen ein Himmelsobjekt zu einer festen Zeit und von einer festen geographischen Breite beobachtbar ist.
- 2 ...analysieren den Reflexionsvorgang von Licht am Plan-, Parabol- und sphärischem Spiegel durch eine Modellierung und Idealisierung.  
...erläutern die Folgen für eine astronomische Beobachtung mit einem parabolischen und sphärische Spiegelteleskop, indem sie auf Abbildungsfehler eingehen.
- 3 ...beschreiben anhand des Newtonschen Gravitationsgesetzes die Form der Planetenbahn.  
...beschreiben die Änderung der Momentangeschwindigkeit eines Planeten als beobachtbare Konsequenz von Kepler 2.  
...ermitteln den Einfluss der Anfangsgeschwindigkeit eines Satelliten auf die Form seiner Keplerbahn.
- 4 ...stellen die Relativbewegung der vier Galileischen Monde zu Jupiter in Abhängigkeit der Zeit eindimensional dar und beschreiben den Einfluss des Jupiterumlaufs auf deren Rektaszension.  
...wenden Kepler 3 auf die Bewegung der Monde an.  
...leiten mit dem Newtonschen Gravitationsgesetz eine Formel zur Bestimmung der Jupitermasse her und bestimmen diese aus geeigneten Daten der Monde.  
...vergleichen Methoden zur Bestimmung der Mondumlaufzeiten hinsichtlich Genauigkeit und Praxistauglichkeit.
- 5 ...ermitteln den Einfluss von Planetenmasse  $m$ , Exzentrizität  $e$ , Orientierung der großen Halbachse  $\omega$ , Inklination  $i$  und großer Halbachse  $a$  auf die Radialgeschwindigkeit eines Exoplaneten.  
...ermitteln zur Transitmethode den Einfluss von Planetenradius  $r$  und Inklination  $i$  auf die Helligkeitskurve, die Transittiefe  $\Delta F$ , die Zeit des gesamten Transits  $t_{Tr}$  und die Zeit der totalen Bedeckungsphase  $t_T$ .  
...erklären die beobachteten Zusammenhänge physikalisch.

- ...beschreiben den Einfluss der Randverdunkelung und von Sonnenflecken auf die Lichtkurve der Transitmethode.
  - ...beschreiben den wissenschaftlichen Erkenntnisweg von einer astronomischen Beobachtung hin zu einer Lichtkurve.
  - ...erläutern, welche Art von Exoplaneten mit der jeweiligen Suchmethode besonders gut aufgespürt werden können.
  - ...erläutern die Vorteile der Kombination beider Suchmethoden für die wissenschaftliche Erkenntnisgewinnung.
- 6
- ...beschreiben den Zusammenhang der Peakwellenlänge  $\lambda_{max}$  eines Schwarzkörperspektrums mit dessen Temperatur  $T$  über das Wiensche Verschiebungsgesetz.
  - ...beschreiben den Zusammenhang des Gesamtstrahlungsstroms  $B$  eines Schwarzkörpers mit dessen Temperatur  $T$  über das Boltzman-Gesetz.
  - ...vergleichen ein theoretisches Schwarzkörperspektrum mit einem beobachteten Sternspektrum.
  - ...erläutern, dass der Farbindex  $(B - V)$  und die visuell wahrgenommene Farbe als Indikatoren für die Temperatur eines Sterns interpretiert werden können.
  - ...ermitteln die durch Wega kalibrierten absoluten Magnituden  $M_V$  und  $M_B$  eines Sterns aufbauend auf scheinbaren Helligkeitsmessungen in den Filtern  $V$  und  $B$ .
- 7 /
- 8
- ...erklären den Zusammenhang zwischen Leuchtkraft  $L$ , Radius  $R$  und Temperatur  $T$  eines Sterns über das Stefan-Boltzmann-Gesetz.
  - ...beschreiben und interpretieren ein klassisches Hertzsprung-Russell-Diagramm, indem sie zentrale Informationen entnehmen und Zusammenhänge darstellen.
  - ...beschreiben die Sternentwicklung im Hertzsprung-Russell-Diagramm.
  - ...vergleichen Entwicklungszeiten von Hauptreihensterne in Abhängigkeit ihrer Ausgangsmasse.
  - ...vergleichen Sternhaufen im Hertzsprung-Russell-Diagramm, um deren relatives Alter abzuschätzen.
- 9
- ...beschreiben den grundlegenden Ablauf einer Supernova.
  - ...leiten die Periode-Leuchtkraft-Beziehung von Cepheiden aus Messdaten empirisch her.
- 10
- ...beschreiben die Entfernungsbestimmung mit der trigonometrischen Parallaxe.
  - ...leiten mit Hilfe des Parallaxenwinkels  $\varphi$  eine Gleichung für den Abstand  $d$  eines Sterns zur Erde her.
  - ...bestimmen mit astrophysikalischen Messdaten die Entfernung zu Cepheiden.
  - ...stellen die Bedeutung des Entfernungsmoduls bei der Entfernungsbestimmung dar.
  - ...erläutern, warum sich Supernovae-1a als sogenannte Standardkerzen zur Entfernungsbestimmung eignen.



- 11 ...erläutern dass Hubble-Gesetz und die damit einhergehenden Erkenntnisse über das Universum.  
...beschreiben und vergleichen Modelle zur Expansion des Universums.

### Adressierte digitale Basiskompetenzen

Tabelle A.1: Zuordnung der digitalen Kompetenzen dK1 bis dK18 der entwickelten Astrophysik-Übung zu den digitalen Basiskompetenzen des Orientierungsrahmens DiKoLAN. Die digitalen Basiskompetenzen können über das Kürzel eindeutig identifiziert werden und eine Ausformulierung ist in Becker, Meßinger-Koppelt und Thyssen (2020, S. 28–41) zu finden.

digitale Kompetenz	Einordnung in DiKoLAN
dK1	SM.T.N4
dK2	SM.T.N3, SM.F.N5
dK3	SM.M.N1, SM.U.N1
dK4	SM.T.A1
dK5	SM.M.B1
dK6	/
dK7	/
dK8	KK.T.A1, KK.T.A5
dK9	P.U.A2
dK10	SM.U.A1
dK11	SM.U.B1
dK12	/
dK13	MD.F.A1
dK14	DV.T.N2, DV.T.B2, DV.T.A1
dK15	SM.F.N1, SM.F.N4
dK16	SM.T.N1
dK17	SM.F.N1, RB.F.N1, RB.F.A1
dK18	DO.T.A1

## **B Exemplarische Präsenzaufgaben**

Im Folgenden werden die Präsenzaufgaben für die zwei vorgestellten Übungssitzungen zu Exoplaneten (Fachinhalt 5) und dem Hertzsprung-Russell Diagramm (Fachinhalt 8) präsentiert. Diese wurden in dieser Form jeweils in beiden Zyklen eingesetzt. Die Präsenzaufgaben zum HRD sollen basierend auf den Erkenntnissen der empirischen Studie zu Lernschwierigkeiten im Umgang mit dem HRD überarbeitet werden, bevor sie außerhalb dieser Arbeit in einem dritten Zyklus erneut eingesetzt werden.

## Suchmethoden von Exoplaneten mit GeoGebra & Snap!

### Vorbemerkungen

Für die Bearbeitung von *Teil I* der Aufgaben verwenden Sie die dynamische Geometriesoftware *GeoGebra*, die Sie unter <https://www.geogebra.org/download> für eine Installation auf Ihrem Laptop finden oder unter <https://www.geogebra.org/classic> direkt im Webbrowser ausführen. In StudIP finden Sie eine Datei (*Vrad-Simulation.ggb*) mit der fertigen Simulation.

Für *Teil II* der Aufgaben verwenden Sie die visuelle Programmiersoftware *Snap!*, die Sie unter <https://snap.berkeley.edu> direkt im Webbrowser ausführen können. Auch hierfür finden Sie im StudIP eine Datei (*Transitsimulation.xml*) mit der fertigen Simulation.

### Teil I: Radialgeschwindigkeitsmethode mit GeoGebra

In der Simulation können Sie insgesamt sechs Parameter durch einen Schieberegler variieren. Mit dem Schieberegler *Zeit t* simulieren Sie die Dynamik des Systems. Die übrigen Schieberegler variieren physikalische Größen, die über die Zeit konstant sind. Die Radialgeschwindigkeit (Geschwindigkeitskomponente in Richtung des Beobachters) des Sterns wird in einer Lichtkurve aufgetragen. Achtung.: Beim Variieren der Inklination ändert sich die zweidimensionale Darstellung der Umlaufbahn nicht.

Zeit  $t$ , Planetenmasse  $m$ ,  
Länge der großen Halbachse  $a$ ,  
Exzentrizität  $e$ ,  
Orientierungswinkel der  
großen Halbachse  $\omega$  und  
Inklinationswinkel  $i$ .

### Aufgaben:

- 1) Machen Sie sich zunächst eigenständig mit der Funktionsweise der Simulation vertraut (unabhängige Größen, abhängige Größen, Repräsentationen, ...).
- 2) Untersuchen Sie anschließend den Einfluss der unabhängigen Größen auf die Radialgeschwindigkeit und skizzieren Sie jeweils die Radialgeschwindigkeitskurve. Erklären Sie die simulierten Beobachtungen physikalisch. Folgende Tabelle kann Ihnen dabei helfen:

Unabhängige Größe	Radialgeschwindigkeit	Verlauf der $v_{rad}$ -Kurve	Physikalische Erklärung
...	...	...	...

- 3) Die Radialgeschwindigkeitsmethode gehört zu den erfolgreichsten Verfahren zur Entdeckung von Exoplaneten. Erläutern Sie vor dem Hintergrund der Simulationsergebnisse kurz, welche Eigenschaften ein Exoplanet haben muss, damit er besonders gut mit dieser Methode aufgespürt werden kann.

Teil II: Transitmethode mit Snap!

Sie können mit der Simulation über Tasten, Buttons und per Mausklick interagieren (Planeten per Drag and Drop an eine andere Position bewegen). Die simulierten Messwerte werden für jeden Transit in einem separaten Fenster angezeigt und können als Tabelle exportiert werden, um sie beispielsweise in Excel für eine quantitative Auswertung zu nutzen. Die Simulation kann für drei unterschiedliche Sternmodelle durchgeführt werden: einheitliche Helligkeit sowie Beachtung der Randverdunkelung mit und ohne Sonnenflecken.

Sternmodell auswählen:  
Kostüm

Simulation vorbereiten: grüne  
Fahne

Planetenradius: Pfeiltasten  
rechts – links

Planetenhöhe: Pfeiltasten  
oben – unten

**Aufgaben:**

- 1) Machen Sie sich zunächst eigenständig mit der Funktionsweise der Simulation vertraut (unabhängige Größen, abhängige Größen, Repräsentationen, ...).
- 2) Untersuchen Sie anschließend den Einfluss der unabhängigen Größen auf die abhängigen Größen (a) Transittiefe  $\Delta F$ , (b) Zeitdauer des gesamten Transitvorgangs  $t_{Tr}$  sowie (c) Zeitdauer der totalen Bedeckungsphase  $t_T$  und skizzieren Sie jeweils die Helligkeitskurve. Erklären Sie die simulierten Beobachtungen physikalisch. Folgende Tabelle kann Ihnen dabei helfen:

Unabhängige Größe	Anhängige Größen	Verlauf der Helligkeitskurve	Physikalische Erklärung
...	...	...	...

*Zusatzaufgabe:* Vergleichen Sie den Einfluss der drei unterschiedlichen Sternmodelle auf den Verlauf der Helligkeitskurve.

- 3) Die Transitmethode gehört zu den erfolgreichsten Verfahren zur Entdeckung von Exoplaneten. Erläutern Sie vor dem Hintergrund der Simulationsergebnisse kurz, welche Eigenschaften ein Exoplanet haben muss, damit er besonders gut mit dieser Methode aufgespürt werden kann.

Einführung in die Astrophysik (Lehramt)  
Präsenzaufgaben: Hertzsprung-Russell Diagramm

## Hertzsprung-Russell Diagramm und Sternentwicklung

### Vorbereitung:

In dieser Übung werden Sie mit Java-Anwendungen arbeiten. Stellen Sie daher sicher, dass eine aktuelle Version der Java Runtime Environment auf Ihrem Laptop installiert ist (Version 5.0 oder höher). Die aktuelle Version ist kostenfrei unter <https://www.java.com/de/download/> erhältlich.

Laden Sie vor der Übungssitzung die folgenden Java-Anwendungen herunter und installieren Sie diese auf Ihrem Laptop:

- Die *javaHRD* Sternentwicklungssimulation unter <https://astro.uni-bonn.de/~javahrd/v071/javaHRD-v071.jar>. Falls Ihr Browser Java unterstützt, können Sie die Simulation alternativ auf <https://astro.uni-bonn.de/~javahrd/> abspielen.
- *Hipparcos ShowSky* Werkzeug unter <https://www.cosmos.esa.int/web/hipparcos/java-tools/show-sky>.

Einführung in die Astrophysik (Lehramt)  
Präsenzaufgaben: Hertzsprung-Russell Diagramm

### Teil I: Korrelationen zwischen Beobachtungsgrößen der Sterne

- 1) In Abbildung 1 ist ein typisches Hertzsprung-Russell Diagramm dargestellt.
  - a. Beschreiben Sie die Achsenbeschriftungen des HR-Diagramms.
  - b. Beschreiben Sie anschließend die Lage der Leuchtkraftklassen *Hauptreihe*, *Riesen* und *Weißer Zwerge*.
  - c. Formulieren Sie abschließend eine Vermutung für die Herkunft der verbalen Bezeichnungen der Leuchtkraftklassen.

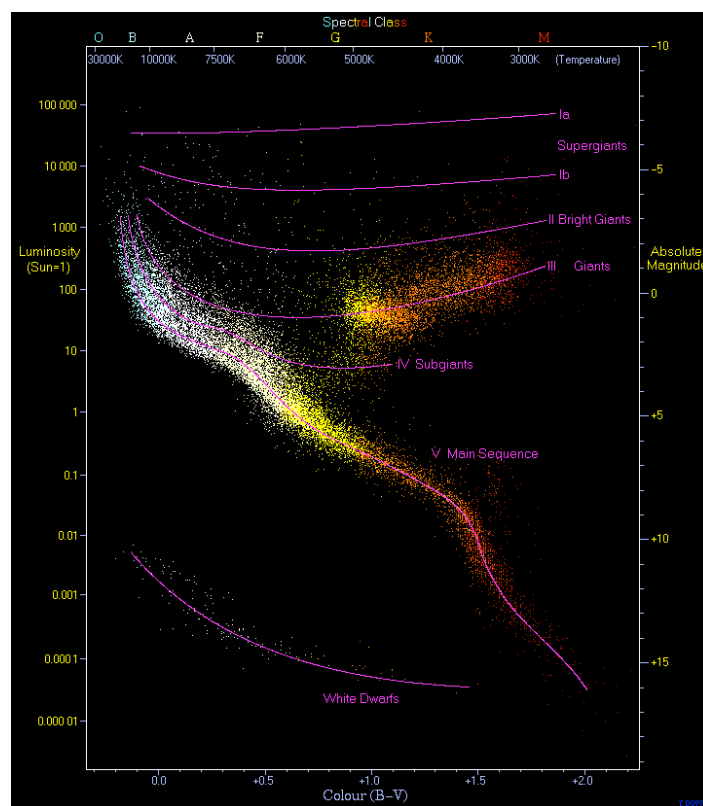


Abbildung 1: Hertzsprung-Russell Diagramm (Richard Powell - The Hertzsprung Russell Diagram, CC BY-SA 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1736396>).

Einführung in die Astrophysik (Lehramt)  
Präsenzaufgaben: Hertzsprung-Russell Diagramm

- 2) Unter folgendem Link finden Sie eine interaktive Darstellung des HR-Diagramms:  
<https://astro.unl.edu/mobile/HRdiagram/HRdiagramStable.html>

Machen Sie sich zunächst mit den Funktionen vertraut. Beschreiben Sie aufbauend auf der interaktiven Darstellung und Abbildung 1 qualitativ die Zusammenhänge zwischen folgenden Größen und erklären Sie diese jeweils durch ein Gesetz oder eine Formel (nutzen Sie hierfür auch Ihre Vorlesungsnotizen):

- a. Farbe bzw. Farbindex und Temperatur.
  - b. Magnitude und Leuchtkraft.
  - c. Leuchtkraft und Temperatur bei gleichbleibendem Radius.
  - d. Leuchtkraft und Radius bei gleichbleibendem Spektraltyp.
- 3) Begründen Sie mit dem Stefan-Boltzmann-Gesetz  $L = 4\pi R^2 F = 4\pi R^2 \sigma T_{eff}^4$ , dass die Linien gleichen Radius im Temperatur-Leuchtkraft Diagramm parallele Geraden sein müssen.

Einführung in die Astrophysik (Lehramt)  
Präsenzaufgaben: Hertzsprung-Russell Diagramm

Teil II: Sternentwicklung im HR-Diagramm

Öffnen Sie die Java-Simulation javaHRD-v071.jar wie in der Vorbereitung beschrieben. Machen Sie sich zunächst selbstständig mit der Simulation vertraut. Erkunden Sie insbesondere, welche Zusatzinformationen eingeblendet werden können. Notizen sind an dieser Stelle nicht nötig.

- 1) Untersuchen Sie mithilfe der Simulation die Entwicklung eines Sterns mit 1 Sonnenmasse. Beschreiben Sie den Entwicklungsweg im HR-Diagramm und geben Sie die Verweildauer des Sterns in den verschiedenen Phasen seiner Entwicklung an.
- 2) Vergleichen Sie die Verweildauer auf der Hauptreihe für Sterne mit verschiedener Masse. Gehen Sie dabei exemplarisch auf Sterne mit Ausgangsmassen von  $0,9 M_{\odot}$ ,  $1 M_{\odot}$ ,  $15 M_{\odot}$  und  $50 M_{\odot}$  ein.
- 3) Diskutieren Sie in Kleingruppen über Möglichkeiten, die Verweildauer auf der Hauptreihe zu nutzen, um das Alter eines Sternhaufens zu bestimmen.

In **Abbildung 2** und **Abbildung 3** ist jeweils ein HR-Diagramm für verschiedene Sternhaufen zu sehen. Beurteilen Sie begründet, welcher Sternhaufen älter ist.

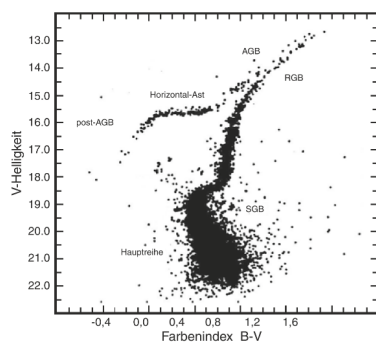


Abbildung 3: Kugelsternhaufen M3 (Scholz, 2018, S.180).

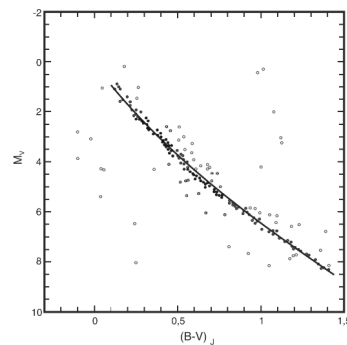


Abbildung 2: Offener Sternhaufen der Hyaden nach Daten des Hipparcos-Satelliten (Scholz, 2018, S.179).









**TK (pre, retrospective pre-mid, retrospective pre-post)**

Diese Skala erhebt die Wissenskomponente TK auf sechs Likert-Stufen von *1 - trifft überhaupt nicht zu* bis *6 - trifft voll und ganz zu*. Die sieben Items wurden von Schmidt et al. (2009) bzw. in übersetzter Form von Endberg (2019) adaptiert.

	1	2	3	4	5	6
Ich weiß, wie ich meine technischen Probleme im Umgang mit digitalen Medien selbst lösen kann.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Den Umgang mit digitalen Medien zu erlernen, fällt mir leicht.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich halte mich in Bezug auf wichtige Neuerungen im Bereich der digitalen Medien auf dem Laufenden.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich probiere häufig die Möglichkeiten digitaler Medien aus.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich kenne mich mit vielen verschiedenen digitalen Medien aus.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich besitze die nötigen technischen Fähigkeiten, um digitale Medien zu nutzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich habe genügend Gelegenheiten, mit verschiedenen digitalen Medien zu arbeiten.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**C.3 Vorerfahrungen****Lernbezogene Vorerfahrungen mit digitalen Medien (pre)**

Diese Skala erhebt die lernbezogenen Vorerfahrungen auf vier Likert-Stufen mit *1 - nie*, *2 - selten*, *3 - gelegentlich* und *4 - oft*. Die fünf Items wurden von Vogelsang et al. (2019) adaptiert.

Während meiner Schulzeit/ meines Lehramtsstudiums habe ich im Fach Physik...

	1	2	3	4
...Prozesse und Phänomene mit Hilfe von Computerprogrammen modelliert (z.B. Simulationen).	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...Tabellenkalkulationsprogramme (z.B. Excel) zur Bearbeitung von Aufgaben genutzt.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...mit Hilfe von digitalen Medien Texte verfasst.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...Erklärvideos oder -animationen zum Lernen genutzt (z.B. YouTube).	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...Lerninhalte mit digitalen Medien für andere aufbereitet.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

### Lehrbezogene Vorerfahrungen mit digitalen Medien (pre)

Diese Skala erhebt die lehrbezogenen Vorerfahrungen auf vier Likert-Stufen mit *1 - nie*, *2 - 1 Mal*, *3 - 2 bis 3 Mal* und *4 - mindestens 4 Mal*. Die fünf Items wurden von Vogelsang et al. (2019) adaptiert.

Während meines Lehramtsstudiums habe ich in Praxisphasen (z.B. Allgemeines Schulpraktikum) meinen Physikunterricht so gestaltet, dass die Schülerinnen und Schüler...

	1	2	3	4
...Prozesse und Phänomene mit Hilfe von Computerprogrammen modelliert (z.B. Simulationen).	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...Tabellenkalkulationsprogramme (z.B. Excel) zur Bearbeitung von Aufgaben genutzt.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...mit Hilfe von digitalen Medien Texte verfasst.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...Erklärvideos oder -animationen zum Lernen genutzt (z.B. YouTube).	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...Lerninhalte mit digitalen Medien für andere aufbereitet.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

### Vorerfahrungen in der digitalen vernetzten Welt (pre)

Diese Skala erhebt die Vorerfahrungen in der digitalen vernetzten Welt auf vier Likert-Stufen mit *1 - nie*, *2 - selten*, *3 - gelegentlich* und *4 - oft*. Die drei Items wurden aufbauend auf den drei Perspektiven des Dagstuhl-Dreiecks (Gesellschaft für Informatik e.V., 2016) selbst formuliert.

Während meiner Schulzeit/meines Lehramtsstudiums (allgemein, nicht ausschließlich auf Physik bezogen) habe ich mich damit befasst,...

	1	2	3	4
...welche digitalen Medien und Programme ich für ein vorgegebenes Ziel effektiv wie nutzen kann.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...wie unterschiedliche digitale Medien und Programme funktionieren.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...welche Auswirkungen unterschiedliche digitale Medien und Programme auf einzelne Personen oder die Gesellschaft haben können.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## C.4 Weiteres

### Angaben zur Person (pre bzw. post)

Diese Items wurden selbst formuliert.

Haben Sie im Zuge freiwilliger Zusatzleistungen oder im Wahlpflichtbereich während Ihres Studiums ein Modul belegt, bei dem digitale Medien besonders im Fokus standen?

- Ja, im Rahmen der Zertifikatslinie Lehramt Plus (Digitale Bildung).
- Ja, im Rahmen des Medienkompetenzzertifikat der ZESS.
- Ja, sonstiges.
- Nein.

Verfügen Sie bereits über Kenntnisse in einer Programmiersprache?

- Ja, Java/ JavaScript.
- Ja, C/C++.
- Ja, Python.
- Ja, Scratch/BYOB/Snap!.
- Ja, sonstiges.
- Nein.

In welchem Semester des Master of Education sind Sie immatrikuliert? \_\_\_\_\_

Welches Fach studieren Sie neben Physik? \_\_\_\_\_

Welchem Geschlecht ordnen Sie sich zu? \_\_\_\_\_

Wie alt sind Sie? \_\_\_\_\_ Jahre

Haben Sie die Prüfungszulassung bereits in einem vorherigen Semester erlangt?

- Ja.
- Nein.







**Feedback (post)**

	1	2	3	4	5	6
Die eingesetzten digitalen Anwendungen und Programme waren für meinen Lernerfolg hilfreich.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die eingesetzten digitalen Anwendungen und Programme waren auf den Fachinhalt abgestimmt.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die fachdidaktischen Bausteine waren für mich als angehende Lehrkraft hilfreich, weil ich mich dadurch umfassender mit Didaktik beschäftigte.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die fachdidaktischen Bausteine waren auf den Fachinhalt abgestimmt.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Pseudonymisierungscode (pre, mid, post)**

Geben Sie die ersten zwei Buchstaben des Vornamens Ihrer Mutter an. (Bsp.: <i>Ca</i> für Carmen.)	Geben Sie den Monat, in dem Ihr Vater geboren wurde, als Zahl an. (Bsp.: <i>04</i> für April.)	Geben Sie die ersten zwei Buchstaben Ihres Geburtsortes an. (Bsp.: <i>GÖ</i> für Göttingen.)



## D Qualitatives Erhebungsinstrument

### D.1 Interviewleitfaden

Folgender Interviewleitfaden wurde in den semistrukturierten Interviews im ersten Forschungszyklus eingesetzt.

*1. Leitfrage: Wie haben Sie die Lehrveranstaltung im letzten Semester erlebt?*

Mögliche Nachfragen:

- Was haben Sie über das Lehrkonzept gedacht, als es Ihnen zu Beginn der Lehrveranstaltung vorgestellt wurde?
- Wie würden Sie das Lehrkonzept in eigenen Worten zusammenfassen?

*2. Leitfrage: Bitte erzählen Sie von Ihren bisherigen Erfahrungen mit Physik-Übungen.*

Mögliche Nachfragen:

- Wie würden Sie Ihre Erfahrungen aus anderen Physik-Übungen mit denen aus dieser Lehrveranstaltung vergleichen?
- Welche Erwartungen hatten Sie im Vorhinein an diese Lehrveranstaltung?
- Inwiefern wurden diese Erwartungen erfüllt?

*3. Leitfrage: Inwiefern hat die Teilnahme an der Lehrveranstaltung Ihren Lernprozess beeinflusst?*

Mögliche Nachfragen:

- Wie sind Sie beim Lernen der Inhalte vorgegangen?
- Inwiefern haben Sie durch die Teilnahme an der Lehrveranstaltung etwas Neues gelernt?
- Wie waren Sie zu Beginn gegenüber der Lehrveranstaltung eingestellt?

*4. Leitfrage: Wie denken Sie darüber, digitale Werkzeuge als Lehrkraft zukünftig im Unterricht einzusetzen?*

Mögliche Nachfragen:

- Wie stellen Sie sich die Gestaltung Ihres Physikunterrichts in Zukunft vor?
- Wie gut fühlen Sie sich darauf vorbereitet?
- Inwiefern spielen Ihre Erfahrungen aus dem Studium dafür eine Rolle?

*Abschlussfragen:*

- Wie bewerten Sie die Lehrveranstaltung insgesamt?
- Was würden Sie an der Lehrveranstaltung für das nächste Jahr konkret verändern?

## **D.2 Deduktive und induktive Kategorien**

Im Folgenden werden die deduktiven Hauptkategorien sowie die induktiven Subkategorien der qualitativen Inhaltsanalyse vorgestellt. Die Ankerbeispiele stammen aus dem Datenmaterial der sechs Interviews im ersten Forschungszyklus.

Tabelle D.1: Erläuterung der deduktiven Kategorienbildung zur qualitativen Inhaltsanalyse: Gesamteindruck der Lehrveranstaltung.

Hauptkategorie	Definition	Ankerbeispiel	Kodierregel
sehr zufrieden	Die Lehrveranstaltung entspricht den Idealvorstellungen bzw. übertrifft diese sogar.		Im gesamten Interview tauchen nirgends negative Punkte im Hinblick auf die Lehrveranstaltung auf, gleichzeitig werden Lob und Zustimmung ausgesprochen und die Frage nach dem Gesamteindruck fällt eindeutig positiv aus.
zufrieden	Die Lehrveranstaltung entspricht wesentlich den bisherigen eigenen positiven Erfahrungen.	„[...] auf jeden Fall gut. [...] hätte ich vorher gewusst worauf es hinausläuft am Ende [...] , dann hätte ich glaube ich die Übung richtig gut gefunden. [...] weil ich noch mehr geschätzt hätte, was kommt.“	Im Vergleich zu teils/ teils überwiegen die positiven Punkte. Zudem: Eins der bei sehr zufrieden genannten Kriterien ist nicht erfüllt.
teils/ teils	Die Lehrveranstaltung entspricht den bisherigen eigenen positiven und negativen Erfahrungen.		Im gesamten Interview tauchen positive und negative Punkte im Hinblick auf die Lehrveranstaltung gleichermaßen auf, gleichzeitig wird auf Kritikpunkte und Lob eingegangen und die Frage nach dem Gesamteindruck fällt nicht eindeutig positiv oder negativ aus.
unzufrieden	Die Lehrveranstaltung entspricht wesentlich den bisherigen eigenen negativen Erfahrungen.		Im Vergleich zu teils/ teils überwiegen die negativen Punkte. Zudem: Eins der bei sehr unzufrieden genannten Kriterien ist nicht erfüllt.
sehr unzufrieden	Die Lehrveranstaltung entspricht in keinem Fall den Idealvorstellungen.		„Im gesamten Interview [tauchen] nirgends positive Punkte im Hinblick auf die Lehrveranstaltung [auf], gleichzeitig [werden] gravierende Kritikpunkte angeführt und die Frage nach dem Gesamteindruck [fällt] eindeutig negativ [aus].“ (Mayring, 2019, S. 12)

Tabelle D.2: Weitere Erläuterung der deduktiven Kategorienbildung zur qualitativen Inhaltsanalyse: Stärken und Schwächen der Lehrveranstaltung.

Hauptkategorie	Definition	Ankerbeispiel	Kodierregel
Stärke	Eine Eigenschaft der Lehrveranstaltung, die als besonders vorteilhaft empfunden wird.	„[...] das hat mir eigentlich gut gefallen. [...] Ja, also ich fand es spannend, das auf jeden Fall auszuprobieren.“ „Positiv überrascht trifft es glaube ich am besten. [...] es hat mir halt deutlich mehr zugesagt, dass halt auch [...] ein stärkerer Schulbezug hergestellt werden soll und halt auch wirklich didaktische Inhalte auch Schwerpunkt sein sollen.“	Der Aspekt wird eindeutig als positiv bewertet. Negative Argumente oder Beispiele werden dazu nicht geäußert. Eine neutrale Haltung (okay/ in Ordnung/ normal) wird dieser Kategorie nicht zugeordnet. Die Argumentation bezieht sich auf mehr als eine Situation (nicht nur ein Tool/ eine Aufgabenstellung/ eine Übungssitzung). Die Argumente werden im direkten Anschluss nicht durch eigene Aussagen relativiert oder entkräftet.
Schwäche	Eine Eigenschaft der Lehrveranstaltung, die als Mangel oder besonders nachteilig empfunden wird.	„Auf die Klausur tatsächlich sehr schlecht [...].“ „Also wenn es jetzt eine Klausur WÄRE, wäre das glaube ich mein großer Minuspunkt für die Übung.“	Der Aspekt wird eindeutig als negativ bewertet. Positive Argumente oder Beispiele werden dazu nicht geäußert. Eine neutrale Haltung (okay/ in Ordnung/ normal) wird dieser Kategorie nicht zugeordnet. Die Argumentation bezieht sich auf mehr als eine Situation (nicht nur ein Tool/ eine Aufgabenstellung/ eine Übungssitzung). Die Argumente werden im direkten Anschluss nicht durch eigene Aussagen relativiert oder entkräftet.

Tabelle D.3: Erläuterung der induktiven Subkategorien zur qualitativen Inhaltsanalyse bzgl. der Hauptkategorie Stärken der Lehrveranstaltung.

Subkategorie	Definition	Ankerbeispiel	Kodierregel
Praxiserfahrung im Schülerlabor	Aussagen, die sich allgemein auf die Entwicklung und Erprobung digitaler Lehr-Lern-Einheiten im XLAB beziehen.	„Ja der XLAB-Besuch ist tatsächlich etwas, was ich denke was ich länger im Gedächtnis behalten werde [...]. [...] Dem entsprechend ist das goldwert irgendwie, so etwas selbst durchzuführen.“	Bezieht sich auf Aussagen zur Praxiserfahrung im Großen und Ganzen. Ist von der XLAB-Betreuung durch die Übungsleitung zu unterscheiden.
XLAB-Betreuung	Aussagen, die sich explizit auf die Unterstützung der Studierenden in der XLAB-Praxisphase beziehen.	„Insofern wurde das ganze Projekt halt sehr gut begleitet und man hat sich nicht so allein gelassen damit gefühlt [...].“	Umfasst unterstützende Maßnahmen der Übung in den Phasen der Vorbereitung oder Nachbereitung, z. B. in Form von Präsenz- oder Hausaufgaben sowie Feedback.
Einsatz digitaler Tools	Aussagen, die sich auf die eingesetzten digitalen Werkzeuge und Programme beziehen.	„Also ich glaube es hat für mich [...], was die Simulationen anging, [...] was man jetzt bei Schülern glaube ich als entdeckendes Lernen bezeichnen würde, gefördert.“	Auch solche Aussagen, die sich auf den eigenen Lernprozess oder den Erkenntnisgewinn mit den digitalen Tools beziehen.
Gruppenarbeit für Präsenzaufgaben	Aussagen zur Erarbeitungsphase der Präsenzaufgaben in Kleingruppen.	„Mir hat es auch gefallen mit Breakouträumen, dass man irgendwie in Kleingruppen gearbeitet hat.“	Auch bezüglich Kommunikation.

Subkategorie	Definition	Ankerbeispiel	Kodierregel
Teamarbeit für XLAB-Kurse	Aussagen, die sich auf die Teamarbeit im Zuge der XLAB-Kurse beziehen.	„Das [im Team zu arbeiten] war auch irgendwie einfach für mich, ein bisschen schöner muss ich sagen.“	Umfasst Aussagen zur Bearbeitung oder Abgabe entsprechender Hausaufgaben im Team sowie dem gemeinsamen Unterrichten.
Lernen als angehende Lehrkraft	Aussagen, die sich auf die Erweiterung der eigenen Erfahrungen und Kompetenzen bezüglich dem Lehrberuf beziehen.	„Also auf jeden Fall meine Kompetenzen als Lehrkraft, da hat es mich auf jeden Fall weitergebracht.“	Aspekte wie eigene Handlungen oder Situationen oder Wissen etc., die als bedeutsam oder sinnvoll für den späteren Beruf als Lehrkraft angesehen werden. Aussagen über die eigenen Erfahrungen oder Kompetenzen. Auch Aussagen, bei denen kein expliziter Bezug zur Praxisphase im XLAB gemacht wird.
Workload	Aussagen zur Arbeitsbelastung.	„Oh der [zeitliche Arbeitsaufwand] war fand ich harmlos.“	Bezieht sich auf den mit der gesamten Übung verbundenen Arbeitsaufwand. Hierzu zählen keine einzelnen Hausaufgabenblätter oder Ähnliche einmalige Aspekte.
Parallelen zu anderen Didaktik-Modulen	Aussagen zu inhaltlichen Parallelen mit anderen Didaktik-Modulen.	„Das heißt es war jetzt dann auch so ein bisschen so [...] eine Ergänzung zueinander. Das fand ich dann nicht schlecht.“	Hierzu zählt insbesondere das Didaktik II Modul, das auch die Digitalisierung anspricht und ebenfalls im Wintersemester von den Studierenden belegt werden kann.
Vorbereitung auf die Hausarbeit	Aussagen bezüglich der Vorbereitung auf die Hausarbeit als Modulprüfung.	„Von daher fühle ich mich da auf jeden Fall gut darauf vorbereitet und glaube nicht, dass da wirkliche Probleme entstehen.“	Bezieht sich ausschließlich auf die Vorbereitung durch die Übung, nicht auf individuelle Vorbereitungen in Form von Selbstlernphasen.



Subkategorie	Definition	Ankerbeispiel	Kodierregel
Hausarbeit als Prüfungsformat	Aussagen zur Hausarbeit als Prüfungsformat des Moduls.	„Weil das [Prüfungsformat Hausarbeit] passt so einfach viel besser zu dem, was wir jetzt gelernt haben, als es in einer Klausur eventuell der Fall gewesen wäre.“	Zu unterscheiden von der Kategorie Vorbereitung auf die Hausarbeit.
Fachdidaktischer Anteil	Aussagen, die Bezug zum fachdidaktischen Teil der Übung nehmen.	„Also es war auf jeden Fall so im Vergleich zu den anderen Übungen so aus den fachwissenschaftlichen Modulen im Physik-Lehramtsstudium, war es auf jeden Fall sehr viel mehr auch lehramtsbezogen, was ich sehr gut fand.“	Umfasst insbesondere Aussagen zu den fachdidaktischen Bausteinen (Theorie-Input, Instruktionen, Diskussionen, etc.) der Übung.
Präsenzaufgaben	Aussagen über die wöchentlichen Präsenzaufgaben.	„Ich glaube, das war relativ angenehm an dieser Astrophysik-Übung, dass es halt nicht NUR dieses Lineare war, plus halt diese Präsenzübungen, die dann halt zum Teil dem Ganzen noch einmal so einen neuen Touch gegeben haben. [...] ja ich glaube, das war einfach erfrischend so.“	Diese unterscheiden sich von den wöchentlichen Hausaufgaben.

Subkategorie	Definition	Ankerbeispiel	Kodierregel
Hausaufgaben	Aussagen über die wöchentlichen Aufgaben in Form von Hausaufgaben.	„Aber vom Ding her hatte ich da erst einmal so das Gefühl, dass es sehr innovative Zettel waren, wo sich auf jeden Fall sehr viel Mühe gegeben wurde.“	Diese unterscheiden sich von den wöchentlichen Präsenzaufgaben. Keine Aussagen bezüglich der Arbeitsbelastung der Hausaufgaben. Aussagen beziehen sich bspw. auf die Gestaltung.
Kognitive Aktivierung	Aussagen zur kognitiven Aktivierung der Studierenden während der Übung.	„,[...] viele Übungen sind sehr einschläfernd, nicht kognitiv aktivierend. [...] in der Hinsicht hat die Übung vieles richtig gemacht.“	Bezieht sich nicht auf die Hausaufgaben, sondern ausschließlich auf Instruktionen etc. im Rahmen der wöchentlichen Übungssitzungen.
Übungsleitung	Aussagen zur Übungsleitung (Tutor, Tutorin).	„[...] aber genau, dann zwei Expert:innen, das fand ich doch auch ziemlich cool gemacht so.“	Umfasst auch das Verhalten der Übungsleitung.
erfüllte Erwartungen an das Lehramtsstudium	Aussagen über erfüllte Erwartungen dazu, was das Lehramtsstudium leisten sollte.	„Und irgendwie ist das ja auch etwas, was eigentlich das Lehramtsstudium leisten sollte.“	Die Aussagen beziehen sich beispielsweise auf die Erwartungen zur Gestaltung von Modulen, zur Kompetenzförderung oder zur Wissensvermittlung im Lehramtsstudium.

Tabelle D.4: Erläuterung der induktiven Subkategorien zur qualitativen Inhaltsanalyse bzgl. der Hauptkategorie Schwächen der Lehrveranstaltung.

Subkategorie	Definition	Ankerbeispiel	Kodierregel
Klausurvorbereitung	Aussagen bezüglich der Vorbereitung auf die Klausur als Modulprüfung.	„Insofern muss ich sagen, dass für eine Klausur mich die Übung sehr verwirrt hat, weil ich nicht wusste, wie bezieht sich das denn jetzt ein.“	Bezieht sich ausschließlich auf die Vorbereitung durch die Übung, nicht auf individuelle Vorbereitungen in Form von Selbstlernphasen.
Bezug zur Vorlesung	Aussagen zum Zusammenspiel der Übung mit der Vorlesung als gemeinsames Modul.	„,...[...] irgendwo hatte ich immer das Gefühl, dass es so ein bisschen die Vertiefung von der Vorlesung fehlt [...].“	Umfasst beispielsweise Aussagen zur zeitlichen Synchronisation der angesprochenen Fachinhalte oder dem Aufgreifen von Inhalten aus der Vorlesung durch die Übung. Zudem auch Aussagen dazu, wie gut Übung und Vorlesung als Modul zusammenpassen.
Bearbeitungszeit für Präsenzaufgaben	Aussagen bezüglich der zur Verfügung stehenden Bearbeitungszeit für Präsenzaufgaben.	„Dass mir in den Aufgaben teilweise Zeit gefehlt hat.“	Bezieht sich insbesondere auf die Erarbeitungsphasen in Kleingruppen während der Übung.
Klarheit und Transparenz	Aussagen bezüglich der transparenten und klaren Darstellung des Übungskonzepts.	„,...[...] dass man irgendwie ein bisschen klarer strukturieren sollte am Anfang, also die Struktur klarer machen sollte.“	Umfasst insbesondere Aussagen zur Klarheit von Zielen bzw. Lernzielen der Übung oder Unterschieden des neuen Lehrkonzepts zum gewohnten Konzept. Auch Aussagen zur transparenten Darstellung der Prüfungsanforderungen bzw. Prüfungsbedingungen.

## E Vorerfahrungen

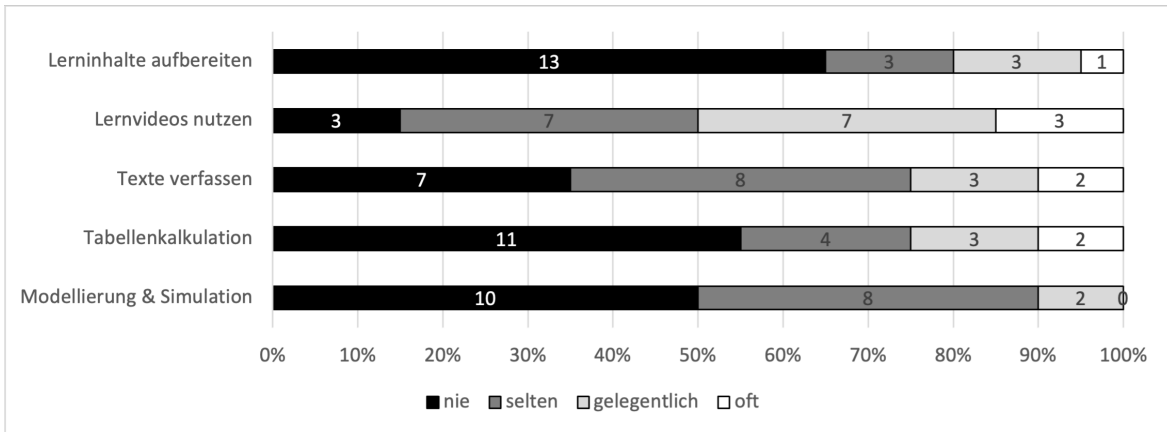


Abbildung E.1: Deskriptive Darstellung der lernbezogenen Vorerfahrungen in der Schulzeit.

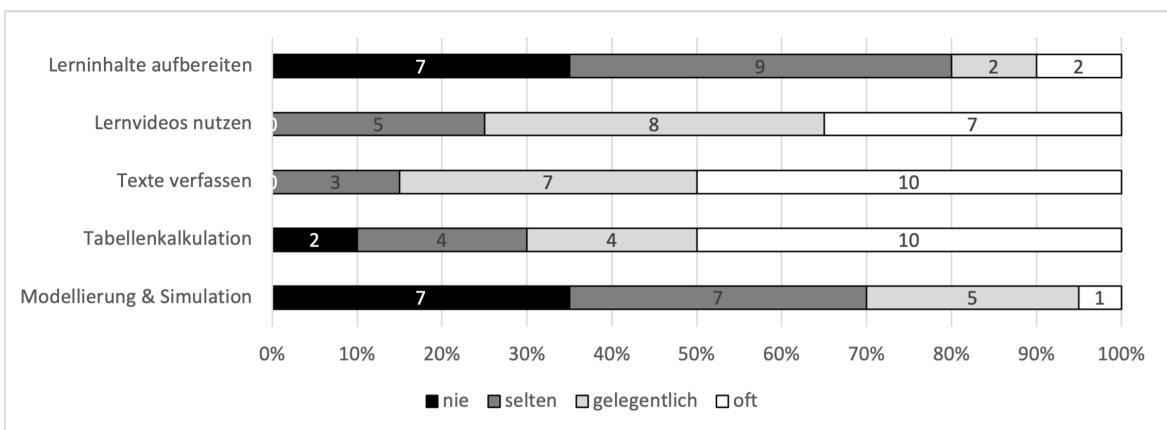


Abbildung E.2: Deskriptive Darstellung der lernbezogenen Vorerfahrungen im Studium.

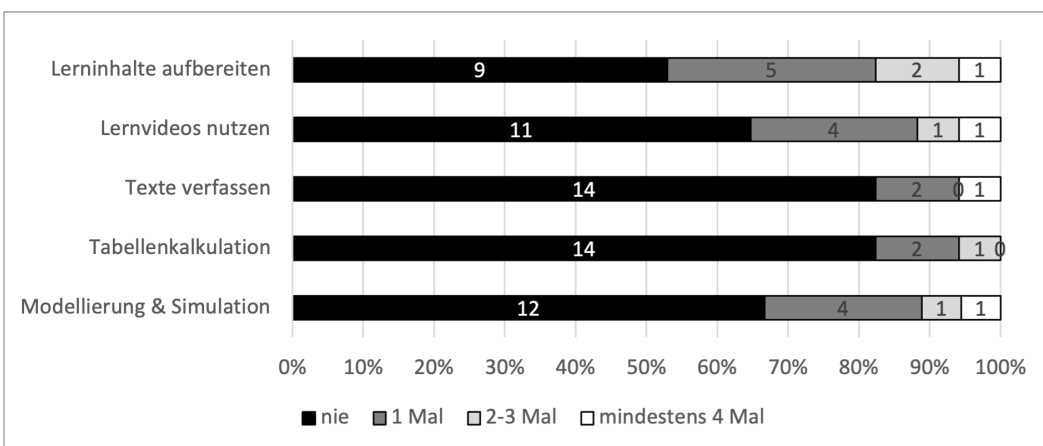


Abbildung E.3: Deskriptive Darstellung der lehrbezogenen Vorerfahrungen im Studium.

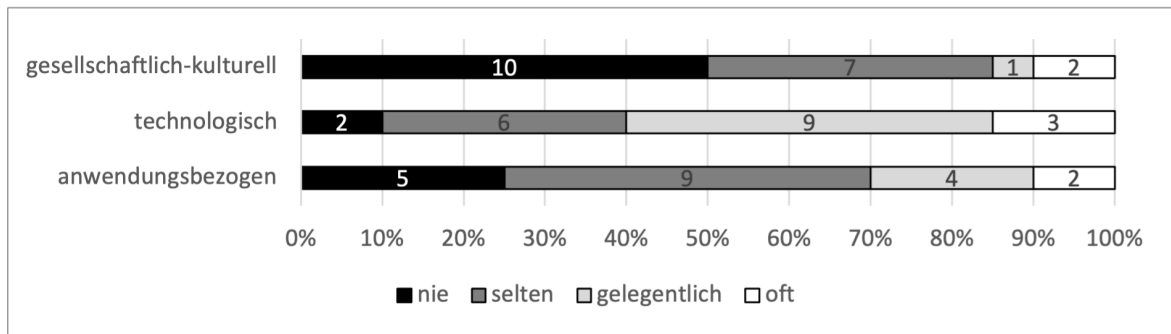


Abbildung E.4: Deskriptive Darstellung der Vorerfahrungen in der digitalen vernetzten Welt in der Schulzeit.

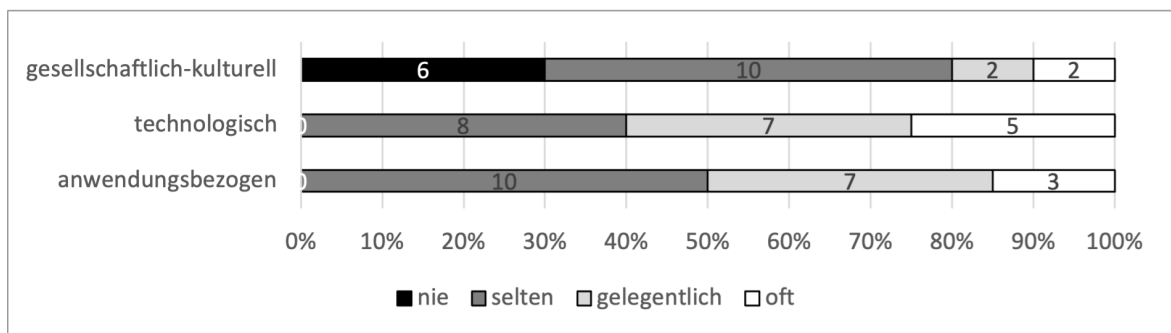


Abbildung E.5: Deskriptive Darstellung der Vorerfahrungen in der digitalen vernetzten Welt im Studium.

E.1 Zweiter Zyklus

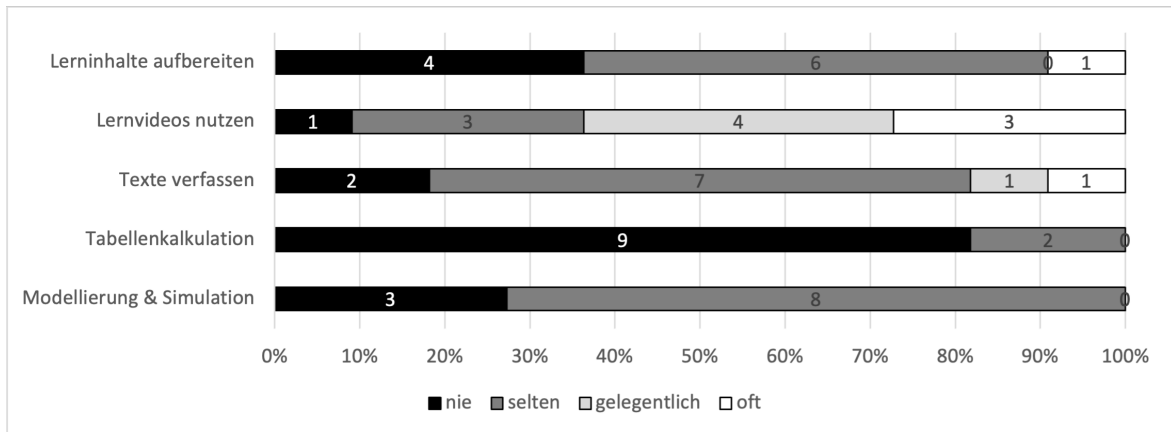


Abbildung E.6: Deskriptive Darstellung der lernbezogenen Vorerfahrungen in der Schulzeit.

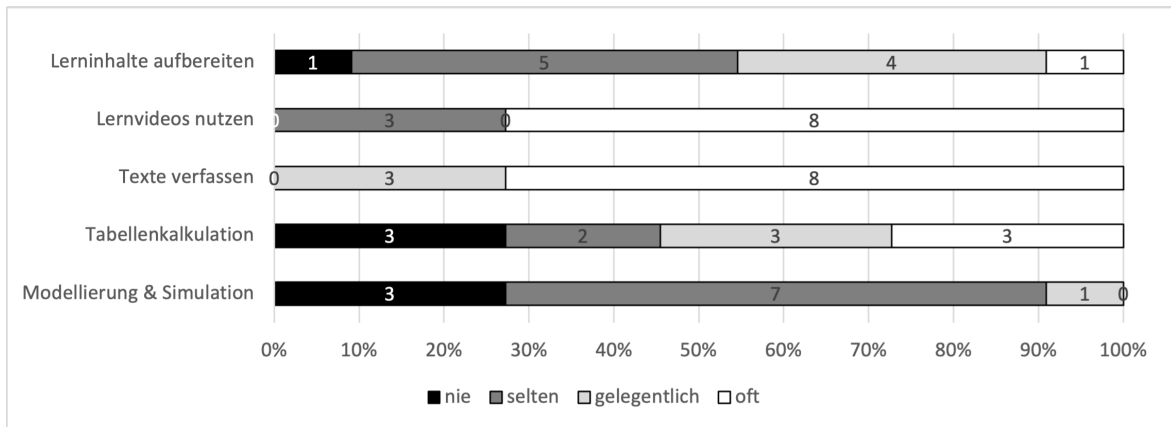


Abbildung E.7: Deskriptive Darstellung der lernbezogenen Vorerfahrungen im Studium.

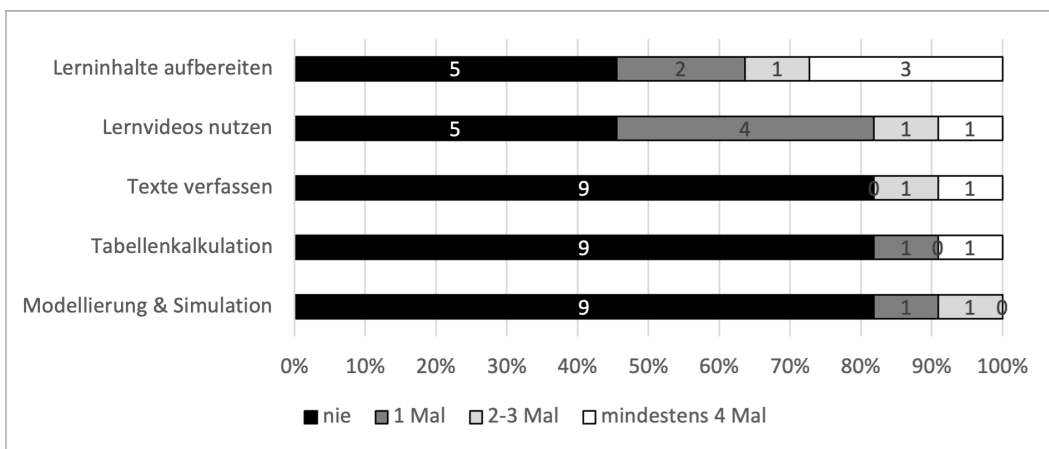


Abbildung E.8: Deskriptive Darstellung der lehrbezogenen Vorerfahrungen im Studium.

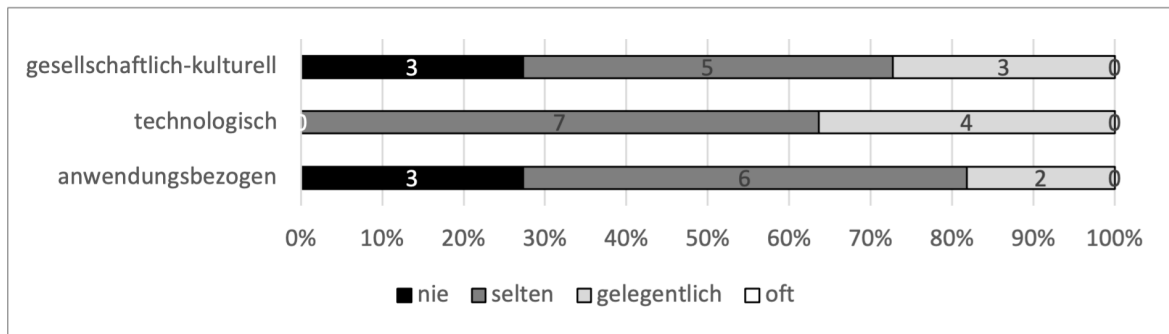


Abbildung E.9: Deskriptive Darstellung der Vorerfahrungen in der digitalen vernetzten Welt in der Schulzeit.

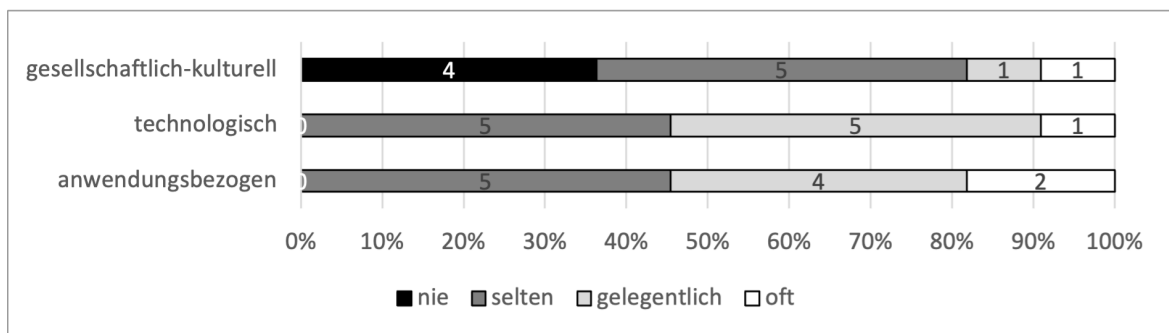


Abbildung E.10: Deskriptive Darstellung der Vorerfahrungen in der digitalen vernetzten Welt im Studium.

## F Erhebungsinstrumente der HRD-Studie

### F.1 Interviewleitfaden

Folgender Interviewleitfaden wurde in den semistrukturierten Interviews der Eye-Trackin Studie eingesetzt.

*1. Leitfrage: Erzählen Sie einmal, wie Sie die Bearbeitung der Aufgaben in dieser Studie erlebt haben.*

Mögliche Nachfragen:

- Können Sie die Situation beschreiben, in der Sie das HRD zum ersten Mal betrachtet haben?
- Wie sind Sie bei der Bearbeitung der Aufgaben vorgegangen?
- Wie sind Sie damit umgegangen, dass es Parallelaufgaben zwischen den zwei Übungsteilen gab?
- Können Sie beschreiben, wie sich ihr Verständnis/ Wissen im Laufe der Übung verändert hat?

*2. Leitfrage: Erzählen Sie bitte, inwiefern Ihnen der Umgang mit dem HRD leicht oder schwer gefallen ist.*

Mögliche Nachfragen:

- Inwiefern ist Ihnen am HRD etwas Unerwartetes oder Besonderes aufgefallen?
- Mit welcher Strategie haben Sie versucht, diese Belastung zu reduzieren oder mit diesem Problem umzugehen?
- Welche Maßnahmen hätten Ihnen hierbei geholfen oder Sie hierbei unterstützt?

### F.2 Induktive Kategorien



Tabelle F.1: Erläuterung der induktiven Kategorienbildung zur qualitativen Inhaltsanalyse: Lernschwierigkeiten im Umgang mit dem Hertzprung-Russell Diagramm.

Kategorie	Spezifizierung	Ankerbeispiel	Kodierregel
Achsenorientierung	Magnitude, Leuchtkraft, Temperatur	„Wo ich erst einmal gestolpert bin, [...] ist diese Sache mit der Temperatur, dass sie andersherum verläuft, als man erwarten würde.“	Hierzu zählen Aussagen über die Orientierung einer Achse, also die Richtung, mit der die Werte entlang der Achse zunehmen. Beachte: Die Spezifizierung <i>Magnitude</i> trifft auch für Äußerungen über die gegenteilige Orientierung zur parallel verlaufenden Leuchtkraftachse zu.
Achsenskalierung	Spektralklasse, Magnitude, Leuchtkraft, Temperatur	„Unerwartet fand ich, dass die Leuchtkraft nicht linear angegeben war, sondern logarithmisch gewachsen ist, [...] war es nicht wie üblich. Und das gleiche gilt auch für die Temperatur, dass diese beiden jeweils nicht immer den gleichen Wert mehr geworden sind, sondern logarithmisch.“	Hierzu zählen Aussagen über eine nicht lineare Skalierung der Achse (also z.B. logarithmisch oder intervallskaliert).
Physikalische Bedeutung/Definition	Spektralklasse, Magnitude, Leuchtkraft, Temperatur	„Was Magnitude ist, kann ich mir überhaupt nicht vorstellen.“	Hierzu zählen Aussagen über die Definition einer physikalischen Größe und deren physikalische Interpretation (z.B. Einheit, Eigenschaften, Bedeutung). Hierzu zählen auch Aussagen darüber, dass ein konkreter Fachbegriff bislang unbekannt war.

Kategorie	Spezifizierung	Ankerbeispiel	Kodierregel
Physikalische Zusammenhänge	quantitativ, qualitativ	„Aber die Verbindung zwischen den Achsen herzustellen, das war eher schwieriger.“	Hierzu zählen Aussagen über die dargestellten physikalischen Zusammenhänge, die sich konkret auf ausgewählte Größen beziehen können oder unspezifisch und allgemein sind.
Komplexität		„[...] , weil mir noch deutlich mehr Informationen gegeben waren als die, die ich letztendlich benötigt habe, und ich dann auch daran gedacht habe.“	Hierzu zählen unspezifische Aussagen zur Schwierigkeit, Informationsfülle oder Komplexität des Diagramms.
Diagrammeigenschaften	Koordinatenursprung, Achsen	4 „[...] , dass man keinen konkreten Nullpunkt ausmachen kann.“	Hierzu zählen Aussagen, in denen Bezug zu einem üblichen kartesischen Koordinatensystem hergestellt wird oder das HRD mit einem gewöhnlichen $x$ - $y$ -Diagramm verglichen wird.
Farbe	Hintergrund, Temperatur-Zusammenhang	„Anfangs haben mich die Farben dann noch abgelenkt wegen der Temperatur. Richtung rot wird es eher heiß, Richtung blau-lila eher kalt. Und dann halt mit der Zeit habe ich gemerkt, das ist totaler Quatsch und dass die Temperatur andersherum wächst.“	Hierzu zählen Aussagen zum kontraintuitiven Zusammenhang zw. Temperatur und Farbe, wie die Assoziation der Farbe Rot mit einer hohen Temperatur. Auch Aussagen zur Farbe im Hintergrund zählen hierzu.

Kategorie	Spezifizierung	Ankerbeispiel	Kodierregel
Unsichtbare Aspekte	Masse, Radius	„[...] und auch der Radius ist ja hier auch gar nicht mit drin abgebildet. Das ist ja auch die Sache, deswegen. Das musste man sich halt noch mal zusätzlich dazu denken. [...] Das war immer eine Schwierigkeit.“	Hierzu zählen Aussagen, in denen auf die fehlende Visualisierung des Radius oder der Masse als zentrale Sternparameter eingegangen wird.
Sternentwicklung		„Ich muss sagen, dass ich die Beschreibung von Spuren in diesem Diagramm, besonders von der Sonne, relativ schwierig fand, da man Kurven hatte, die eben nicht auf einem Weg verlaufen, sondern eben noch gesprungen sind.“	Hierzu zählen Aussagen über die Sternentwicklung als physikalische Bedeutung des HR-Diagramms. Das umfasst insbesondere Äußerungen zur Zeit als weitere Dimension im Diagramm.
Leuchtkraftklassen		„Es hat mich ein bisschen verwirrt, dass ein Feld halt nicht als oval angegeben ist, sondern so eine Linie, und das hat ein bisschen Verwirrung gestiftet.“	Hierzu zählen Aussagen über die Leuchtkraftklassen. Diese können sich auf ihre visuelle Darstellung im Diagramm sowie deren physikalische Bedeutung beziehen.

Tabelle F.2: Erläuterung der induktiven Kategorienbildung zur qualitativen Inhaltsanalyse: Strategien im Umgang mit dem Hertzsprung-Russell Diagramm.

Kategorie	Ankerbeispiel	Kodierregel
Identizieren und Ausblenden	„Und dann habe ich mir die Achsen rausgesucht, die jetzt meiner Meinung nach für diese Aufgabe wichtig sind. Wenn Sie jetzt um die Leuchtkraft ging, dann braucht man die Temperatur eventuell gar nicht ansehen.“	Hierzu zählen Aussagen darüber, dass aufgabenrelevante Informationen identifiziert und irrelevante bzw. redundante Informationen ignoriert werden.
Zusammenhänge verstehen	„Ich konnte mir dann irgendwann denken, dass es genau so wie Spektralklasse und Temperatur irgendwie Symmetrie haben, auch Leuchtkraft zur absoluten Magnitude eine Symmetrie haben muss.“	Hierzu zählen Aussagen über das Erkennen von Zusammenhängen zwischen den dargestellten Physikalischen Größen.
Reduktion der Achsen	„Ich streiche diese Achse mit der absoluten Magnitude und auch die Spektralklassen.“	Hierzu zählen Aussagen darüber, dass in horizontaler und vertikaler Richtung je nur eine Achse zur Aufgabenbearbeitung beachtet wird.
Räumliche Orientierung	„Ich habe probiert, es mir grafisch vorzustellen innerhalb des Diagramms.“ „Wo ich dann vergleichen muss, ist es höher, tiefer, ist es weiter links, weiter rechts als der?“	Hierzu zählen Äußerungen dazu, dass über die Position von Sternen im Diagramm qualitative Aussagen über deren Sternparameter gemacht werden, anstatt quantitative Aussagen durch die Betrachtung der Achsen zu treffen.
Farbe/ Leuchtkraftklassen ignorieren	„Ich glaube, die [Farbe] habe ich sehr ausgeblendet.“ [„Ich habe versucht, alles, was da so rein gemalt ist, ein bisschen auszublenden. [...] Ich bräuche die grauen Bereiche nicht.“	Zu diesen zwei Kategorien zählen Aussagen darüber, dass die Farbe oder die Leuchtkraft gezielt ignoriert wurden.

Kategorie	Ankerbeispiel	Kodierregel
Betrachten der Achsen	„Grundsätzlich schaue ich mir die Beschriftung der Achsen [an] und welche Werte mit welchen Einheiten dort sind.“	Hierzu zählen Aussagen darüber, dass die Achsen im Diagramm, wozu deren Beschriftung und deren Skala zählen, genau betrachtet wurden.
Kartesisches Koordinatensystem	„Ich habe mich bemüht, die Teil von diesen Diagrammen, die ich tatsächlich verstanden habe oder die ich ausreichend erfassen konnte, möglichst ähnlich zu gestalten oder mir möglichst Ähnlichkeiten zu finden mit dem bereits bekannten Diagramm.“	Hierzu zählen Aussagen, in denen das HRD mit einem üblichen x-y-Diagramm verglichen wird, um es verständlicher zu machen. Dazu zählen auch Aussagen darüber, dass der Umgang mit dem x-y-Diagramm auf das HRD übertragen wird.
Farbeals Orientierung	„Und die Farbe ist auch recht hilfreich, weil die Farbverläufe ja Parallelen zur senkrechten Achse darstellen. [...] so kann man leichter Werte ablesen.“	Hierzu zählen Aussagen darüber, dass die Struktur der Farbe im Hintergrund als eine Art Korrdinaten-gitter in vertikaler Richtung verstanden wird, um sich räumlich besser zu orientieren.

### **F.3 Fragebogen**

Auf den folgenden Seiten befindet sich ein Auszug aus dem dreiteiligen Fragebogen. Dieser beinhaltet in Teil II auch die 14 Items zum HR-Diagramm. Nicht abgebildet ist Seite 1 des Fragebogens, auf der die Studierenden über den Ablauf der Studie informiert wurden.

TEIL I

Zu Beginn interessieren wir uns für Ihre Einschätzung der fünf Aufgaben, die Sie soeben im Rahmen der Studie bearbeitet haben.

	trifft nicht zu					trifft zu				
Das Thema <i>x-y-Diagramm</i> , das in den Aufgaben behandelt wurde, war sehr komplex.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die in den Aufgaben behandelten Zusammenhänge habe ich als sehr komplex empfunden.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die in den Aufgaben behandelten Diagramme und Begriffe habe ich als sehr komplex empfunden.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Anweisungen innerhalb der Aufgaben waren sehr unklar.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Anweisungen waren beim ersten Lesen nicht verständlich.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Anweisungen waren voll von unklaren und unbekanntem Begriffen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Aufgabenbearbeitung hat mein Verständnis von Diagrammen verbessert.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Aufgabenbearbeitung hat mein Verständnis von den behandelten Zusammenhängen verbessert.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Aufgabenbearbeitung hat mein Verständnis von den Diagrammen und Begriffen verbessert.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Kreuzen Sie bitte die zutreffende(n) Aussage(n) an:

- Ich habe mich während der Schulzeit im Unterricht mit Astrophysik auseinandergesetzt.
- Ich habe im Studium eine Lehrveranstaltung über Astrophysik belegt.
- Ich habe mich privat mit Themen der Astrophysik näher befasst.
- Ich habe mich bisher nicht näher mit Astrophysik befasst.

Bevor Sie weitere Aufgaben am Computer bearbeiten, möchten wir gerne einige Fragen zu Ihrem Vorwissen stellen.

	trifft nicht zu					trifft zu				
Ich kenne die Bezeichnung <i>Hertzsprung-Russel Diagramm</i> bzw. <i>HRD</i> .	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich kann beschreiben, wie dieses Diagramm aussieht.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich habe mich bereits mit diesem Diagramm auseinandergesetzt (z.B. durch Aufgaben auf Übungszetteln, in Videos etc.).	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich kenne die physikalischen Eigenschaften von Sternen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich kann beschreiben, wie ein Stern entsteht und wie er sich weiterentwickelt.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich habe mich bereits mit der Sternentwicklung auseinandergesetzt (z.B. durch Aufgaben auf Übungszetteln, in Videos etc.).	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Jetzt wird die Aufgabenbearbeitung am Computer fortgesetzt.

TEIL II

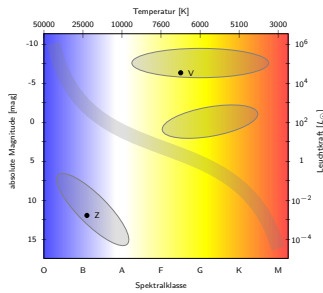
Anschließend interessieren wir uns für Ihre Einschätzung der vierzehn Aufgaben, die Sie soeben im Rahmen der Studie bearbeitet haben.

	trifft nicht zu					trifft zu				
Das Thema <i>physikspezifisches Diagramm</i> , das in den Aufgaben behandelt wurde, war sehr komplex.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die in den Aufgaben behandelten Zusammenhänge habe ich als sehr komplex empfunden.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die in den Aufgaben behandelten Diagramme und Begriffe habe ich als sehr komplex empfunden.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Anweisungen innerhalb der Aufgaben waren sehr unklar.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Anweisungen waren beim ersten Lesen nicht verständlich.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Anweisungen waren voll von unklaren und unbekanntem Begriffen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Aufgabenbearbeitung hat mein Verständnis von Diagrammen verbessert.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Aufgabenbearbeitung hat mein Verständnis von den behandelten Zusammenhängen verbessert.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Aufgabenbearbeitung hat mein Verständnis von den Diagrammen und Begriffen verbessert.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Geben Sie im Folgenden die Schwierigkeit jeder einzelnen Aufgabe zum HRD an.

Aufgabe 1

Ordnen Sie den markierten Sternen jeweils die Spektralklasse zu.



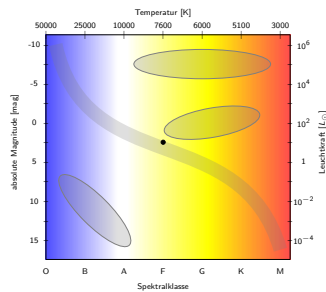
Weiter mit Leertaste

einfach       schwierig



Aufgabe 2

Beschreiben Sie, wie sich der Stern im Diagramm bewegt, wenn er bei konstanter Leuchtkraft heißer wird.

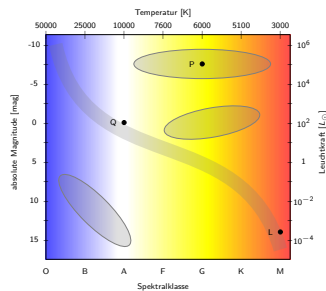


Weiter mit Leertaste

einfach       schwierig

Aufgabe 3

Sie sehen drei Sterne. Ordnen Sie deren Spektralklassen von kalt nach heiß. Beschreiben Sie Ihr Vorgehen.

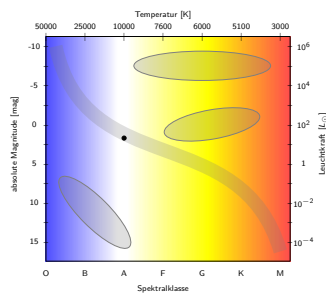


Weiter mit Leertaste

einfach       schwierig

Aufgabe 4

Erläutern Sie jeweils die Farbänderung des Sterns, wenn sich seine Temperatur (a) halbiert, (b) verdoppelt.

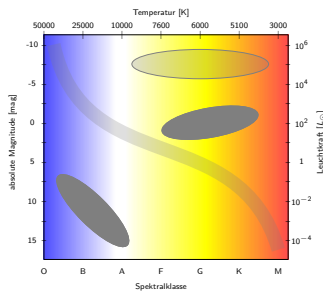


Weiter mit Leertaste

einfach       schwierig

Aufgabe 5

Erläutern Sie, in welchem dunkel markierten Bereich eher „rote Sterne“ bzw. „weiße Sterne“ zu finden sind. Begründen Sie, welcher der beiden Bereiche kälter ist.

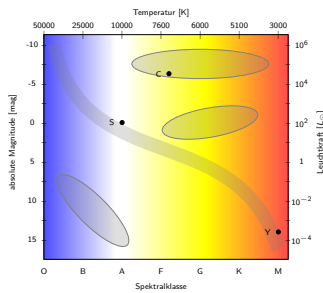


Weiter mit Leertaste

einfach       schwierig

Aufgabe 6

Die absolute Magnitude ist ein Maß für die Helligkeit. Je heller ein Stern ist, desto weiter oben befindet er sich im Diagramm. Bestimmen Sie den Stern mit der größten absoluten Magnitude und beschreiben Sie Ihr Vorgehen.

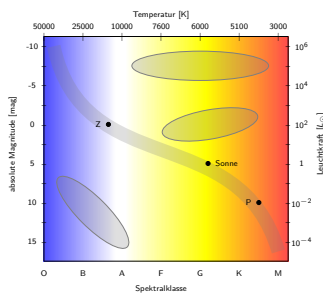


Weiter mit Leertaste

einfach       schwierig

Aufgabe 7

Die Leuchtkraft gibt die Strahlungsleistung des Sterns an. Vergleichen Sie die Leuchtkraft dieser zwei Sterne mit der Leuchtkraft der Sonne.

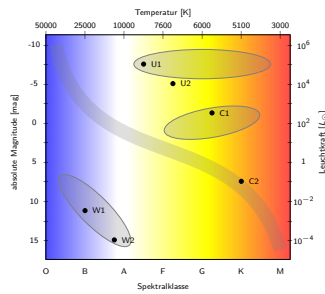


Weiter mit Leertaste

einfach       schwierig

Aufgabe 8

Erläutern Sie, bei welchem Sternepaar der absolute Unterschied bzgl. der Leuchtkraft am größten ist.

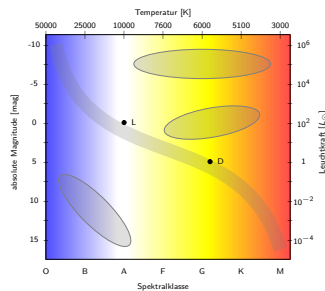


Weiter mit Leertaste

einfach       schwierig

Aufgabe 9

Ein Stern hat eine absolute Magnitude, die um 5 mag geringer als die eines Vergleichssterne ist. Beschreiben Sie, was dann für die Leuchtkraft des Sterns gilt.



Weiter mit Leertaste

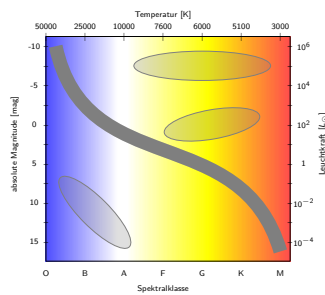
einfach       schwierig

Aufgabe 10

Betrachten Sie jetzt ausschließlich Sterne im dunkel markierten Bereich und beenden Sie folgenden Satz:

„Je heißer Sterne in diesem Bereich sind, desto...“

Formulieren Sie bis zu zwei Beziehungen.



Weiter mit Leertaste

einfach       schwierig

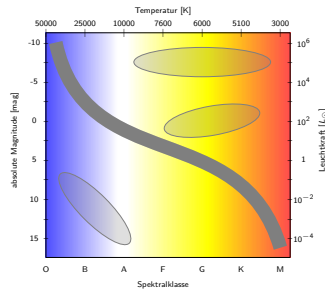
Aufgabe 11

Betrachten Sie erneut ausschließlich diesen Bereich. Hier gilt, dass die Leuchtkraft proportional zur Masse des Sterns ist:

$$L \sim m$$

Formulieren Sie eine Je-desto-Beziehung zwischen der Masse und der Temperatur.

Weiter mit Leertaste



einfach       schwierig

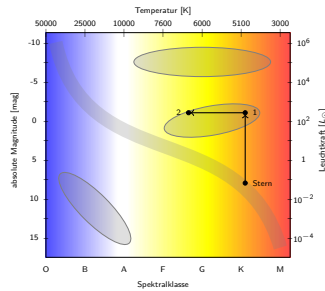
Aufgabe 12

Die Leuchtkraft von Sternen ist proportional zur Temperatur und dem Radius des Sterns:

$$L \sim T \cdot R$$

Ein Stern bewegt sich wie angegeben im Diagramm. Beschreiben Sie die Änderung seines Radius für beide Schritte.

Weiter mit Leertaste



einfach       schwierig

Aufgabe 13

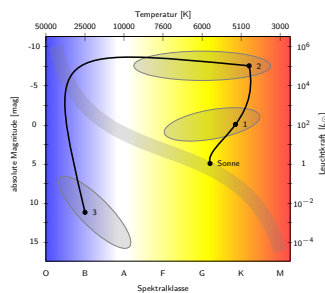
Die Eigenschaften eines Sterns ändern sich während seines „Lebens“ und bis zu dessen „Tod“. Hier ist die zukünftige Entwicklung der Sonne dargestellt.

Beschreiben Sie qualitativ, wie sich die Eigenschaften der Sonne im Laufe der Sternentwicklung ändern.

Zur Erinnerung:

$$L \sim T \cdot R$$

Weiter mit Leertaste



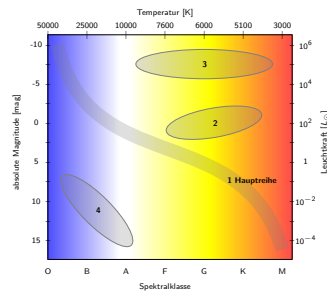
einfach       schwierig

Aufgabe 14

Das Leben eines Sterns beginnt auf der sog. Hauptreihe und besteht aus insgesamt vier Entwicklungsstufen. Beschreiben Sie die Entwicklung eines Sterns, indem Sie die folgenden Begriffe den charakteristischen Bereichen im Diagramm zuordnen:

- ▶ Weißer Zwerg
- ▶ Roter Riese
- ▶ Überriese

Weiter mit Leertaste



einfach       schwierig

TEIL III

Zuletzt möchten wir Sie um kurze Angaben zu Ihrer Person bitten.

Für welchen Studiengang sind Sie immatrikuliert?

- 2FB Physik (Lehramt)
- B.Sc. Physik
- Weder noch.

In welchem Semester sind Sie aktuell immatrikuliert? \_\_\_\_\_

Welches Geschlecht haben Sie? \_\_\_\_\_

Wie alt sind Sie? \_\_\_\_\_ Jahre

Mit welcher Note haben Sie die Hochschulzugangsberechtigung (z.B. Abitur) erhalten? \_\_\_\_\_

## F.4 Bewertungsschema der HRD-Items

Pro korrekter Aussage wurde ein Punkt vergeben und für jedes Item wurden daher insgesamt zwischen 1 (z.B. Item 11) und 4 Punkte (z.B. Item 12) vergeben. Im Folgenden werden die vier HRD-Items inklusive einer Musterlösung und deren Bewertung vorgestellt. Die Musterlösungen sind originale Aussagen von Studienteilnehmenden, die jeweils mit der maximalen Punktzahl bewertet wurden. Die fünf kontextfreien Items wurden analog zu dem jeweiligen isomorphen HRD-Item bewertet. Daher wird an dieser Stelle auf deren Beschreibung verzichtet.

1. Ordnen Sie den markierten Sternen jeweils die Spektralklasse zu.

**Lösung:** *Z zu B (1/2) und V zwischen F und G. (2/2)*

2. Beschreiben Sie, wie sich der Stern im Diagramm bewegt, wenn er bei konstanter Leuchtkraft heißer wird.

**Lösung:** *Der Punkt bewegt sich nach links (1/2) auf der gleichen Höhe. (2/2)*

3. Sie sehen drei Sterne. Ordnen Sie deren Spektralklassen von kalt nach heiß. Beschreiben Sie Ihr Vorgehen.

**Lösung:** *Die Spektralklassen von kalt nach heiß geordnet sind M, G und A. (1/2) Dabei schaut man sich die einzelnen Sterne an und beginnt mit dem kältesten, im Diagramm ganz rechts. (2/2)*

4. Erläutern Sie jeweils die Farbänderung des Sterns, wenn sich seine Temperatur (a) halbiert, (b) verdoppelt.

**Lösung:** *Aktuell hat der Stern eine Temperatur von 10.000 Kelvin und ist weiß. Wenn man diese Temperatur halbiert, wären wir bei 5.000. (1/3) Das wäre diesem Diagramm nach ungefähr im orangenen Bereich. (2/3) Und das Verdoppeln würde zu 20.000 Grad Kelvin führen, was dann nur eine kleinere Bewegung nach links wäre nur, da es logarithmisch anwächst. (+1) Aber es wäre ein leichter Blaustich, immernoch sehr hell weiß wie vorher. (3+1/3)*

5. Erläutern Sie, in welchem dunkel markierten Bereich eher „rote Sterne“ bzw. „weiße Sterne“ zu finden sind. Begründen Sie, welcher der beiden Bereiche kälter ist.

**Lösung:** *Im rechten Bereich sind eher rote Sterne zu finden und im linken Bereich eher weiße Sterne. (1/2) Und der rechte Bereich ist kälter, weil er im Diagramm weiter rechts liegt, wo die Temperatur eben niedriger ist. 2/2)*

6. Die absolute Magnitude ist ein Maß für die Helligkeit. Je heller ein Stern ist, desto weiter oben befindet er sich im Diagramm. Bestimmen Sie den Stern mit der größten absoluten Magnitude und beschreiben Sie Ihr Vorgehen.

**Lösung:** Der hellste Stern wäre am weitesten oben, dann wäre das der Stern C. Aber die größte Magnitude wäre für mich die größte Zahl und hier scheint es ja desto kleiner die Zahl, desto heller der Stern. (1/2) Deswegen würde ich mich hier für den Stern Y entscheiden, weil da einfach die Zahl größer ist. (2/2) Oben wäre -10, unten 15.

7. Die Leuchtkraft gibt die Strahlungsleistung des Sterns an. Vergleichen Sie die Leuchtkraft dieser zwei Sterne mit der Leuchtkraft der Sonne.

**Lösung:** Die Leuchtkraft von Z ist ungefähr 100 mal so groß wie die von der Sonne und die von P ist ungefähr 100 mal kleiner als die von der Sonne. (2/2) Anmerkung: Für einen qualitativen Vergleich (größer oder kleiner als) wird nur die halbe Punktzahl vergeben.

8. Erläutern Sie, bei welchem Sternepaar der absolute Unterschied bzgl. der Leuchtkraft am größten ist.

**Lösung:** Bei dem Sternepaar U1, U2 ist der absolute Unterschied bzgl. der Leuchtkraft am größten, (1/2) weil der Sprung von  $10^4$  nach  $10^5$  deutlich größer ist als der Sprung zwischen C1 und C2 zum Beispiel. (2/2)

9. Ein Stern hat eine absolute Magnitude, die um 5 mag geringer als die eines Vergleichssterne ist. Beschreiben Sie, was dann für die Leuchtkraft des Sterns gilt.

**Lösung:** Nimmt die absolute Magnitude um 5 Einheiten, um 5 mag ab, nimmt die Leuchtkraft um zwei Zehnerpotenzen zu. (2/2) Anmerkung: Für einen qualitativen Vergleich (größer oder kleiner als) wird nur die halbe Punktzahl vergeben.

10. Betrachten Sie jetzt ausschließlich Sterne im dunkel markierten Bereich und beenden Sie folgenden Satz: „Je heißer Sterne in diesem Bereich sind, desto...“ Formulieren Sie bis zu zwei Beziehungen.

**Lösung:** Je heißer die Sterne in diesem Bereich sind, desto geringer ist die absolute Magnitude. (1/2) Und je heißer Sterne in diesem Bereich sind, desto höher ist die Leuchtkraft der Sterne. (2/2)

11. Betrachten Sie erneut ausschließlich diesen Bereich.

Hier gilt, dass die Leuchtkraft proportional zur Masse des Sterns ist:  $L \propto m$ . Formulieren Sie eine Je-desto-Beziehung zwischen der Masse und der Temperatur.

**Lösung:** Je größer die Masse, desto höher ist auch die Temperatur des Sterns. (1/1)

12. Die Leuchtkraft von Sternen ist proportional zur Temperatur und dem Radius des Sterns:  $L \propto TR$ . Ein Stern bewegt sich wie angegeben im Diagramm. Beschreiben Sie die Änderung seines Radius für beide Schritte.

**Lösung:** Zunächst wird die Leuchtkraft stärker und die Temperatur bleibt gleich. (1/4)

*Deshalb muss der Radius größer werden. (2/2) Und anschließend wird die Temperatur höher und die Leuchtkraft bleibt gleich, (3/4) demnach muss der Radius wieder abnehmen. (4/4)*

13. Die Eigenschaften eines Sterns ändern sich während seines „Lebens“ und bis zu dessen „Tod“. Hier ist die zukünftige Entwicklung der Sonne dargestellt. Beschreiben Sie qualitativ, wie sich die Eigenschaften der Sonne im Laufe der Sternentwicklung ändern. Zur Erinnerung:  $L \propto TR$ .

**Lösung:** *Im ersten Schritt erhöht sich die Leuchtkraft der Sonne. Die absolute Magnitude nimmt ab, der Radius nimmt zu und die Temperatur nimmt leicht ab. (1/4) Im zweiten Schritt nimmt der Radius auch zu, die Leuchtkraft auch. Die Temperatur bleibt ungefähr konstant. Die absolute Magnitude nimmt auch ab. (2/4) Und im dritten Schritt verkleinert sich der Radius, die Leuchtkraft nimmt ab, die Temperatur erhöht sich und die absolute Magnitude erhöht sich auch (3/4). (4/4) Anmerkung: Die vierte Punkt wird für den Bezug zu allen drei Sternparametern ( $L, R, T$ ) in allen drei Schritten vergeben.*

14. Das Leben eines Sterns beginnt auf der sog. Hauptreihe und besteht aus insgesamt vier Entwicklungsstufen. Beschreiben Sie die Entwicklung eines Sterns, indem Sie die folgenden Begriffe den charakteristischen Bereichen im Diagramm zuordnen: – Weißer Zwerg – Roter Riese – Überriese.

**Lösung:** *Der erste Punkt, die Hauptreihe, ist ja schon gegeben. Dann Feld 2 würde ich den roten Riesen zuordnen. Das Feld 3 den Überriesen. Und das Feld 4 den weißen Zwergen. (2/2) Anmerkung: Ein Punkt wird für die korrekte Reihenfolge der Phasen und ein Punkt für die korrekte Zuordnung der Leuchtkraftklassen vergeben.*

## F.5 Eye-Tracking Daten



Tabelle F.3: Vergleich der Total Visit Duration (TVD) und Total Visit Counts (TVC) der isomorphen Itempaare hinsichtlich der globalen D-AOI (Diagramm) und T-AOI (Text). Für signifikante Unterschiede nach einer Bonferroni-Korrektur wird die Effektstärke  $d$  angegeben.

	gesamt			A1			A2			A6			A7			A8		
	HRD	xy	$d$	HRD	xy	$d$	HRD	xy	$d$	HRD	xy	$d$	HRD	xy	$d$	HRD	xy	$d$
TVD für D-AOI	76.35 (40.99)	51.50 (25.97)	0.94	16.70 (8.03)	10.84 (6.70)	0.84	11.34 (5.87)	8.25 (6.50)	...	13.33 (10.91)	6.90 (5.84)	0.65	13.57 (11.50)	9.43 (5.49)	...	21.41 (18.80)	16.08 (11.94)	...
TVD für T-AOI	25.11 (16.90)	18.51 (10.68)	...	1.86 (1.36)	1.17 (1.24)	...	3.31 (2.44)	5.95 (3.92)	0.68	12.99 (13.26)	4.64 (4.59)	0.62	3.20 (2.98)	2.13 (1.49)	...	3.74 (2.77)	4.62 (2.99)	...
TVC für T-AOI	17 (8)	16 (7)	...	2.86 (1.44)	2.00 (1.63)	...	3.40 (1.83)	4.31 (2.92)	...	5.54 (4,64)	2.40 (1.82)	0.69	2.37 (1.70)	3.29 (1.53)	...	2.77 (1.68)	3.74 (2.06)	...