

Professionsbezogenes Physiklernen im Lehramtsstudium: Entwicklung und Evaluation kumulativer Fachveranstaltungen

Tilman Steinmetz, Erich Staraschek

PSE Stuttgart-Ludwigsburg, Standort Pädagogische Hochschule Ludwigsburg, Reuteallee 46,
71634 Ludwigsburg

tilmann.steinmetz@ph-ludwigsburg.de

(Eingegangen: 28.04.2022; Angenommen: 02.03.2023)

Kurzfassung

Eine physikalisch-fachliche Professionalisierung gilt in der Physik-Lehramtsausbildung als notwendig. Physik-Lehramtsstudierende sollten dabei gezielt auf die inhaltlichen Anforderungen der Schule vorbereitet werden, was jedoch selten erreicht wird (vgl. DPG 2014). Für unsere Studie wurden drei Physikveranstaltungen für Lehramtsstudierende anhand eines zuvor entwickelten Modells zum kumulativen Physiklernen und -lernen konzipiert, die den fachlichen Professionsbezug gewährleisten sollen. Der Beitrag stellt die Entwicklung der Lehrveranstaltungen und deren Evaluation vor. Die Kurse wurden bei zwei Kohorten mit $N = 22$ angehenden Physiklehrkräften an der Pädagogischen Hochschule Ludwigsburg eingesetzt. Für die Evaluation wurden Daten zum physikalischen Fachwissen erhoben und in einer vergleichenden Längsschnittstudie explorativ ausgewertet. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Erwerb von schulrelevantem physikalischem Wissen in der Intervention effizient erfolgt. Somit kann die kumulative Physiklehre als Modell für die Entwicklung von professionsorientierten Physikkursen in der Lehramtsausbildung dienen.

Abstract

Professional content knowledge is increasingly becoming an issue in physics teacher education. This is because the physics teacher students are not well prepared for their professional roles and tasks in the classroom. In our study, three physics courses were designed based on a previously developed cumulative learning and teaching theory appropriate for physics teacher education students. This paper presents the results of the development and the research, including evaluation. The developed courses were implemented with two cohorts of $N = 22$ prospective physics teachers at the University of Education Ludwigsburg. For the evaluation, data on content knowledge were collected and exploratively analysed in a comparative longitudinal study. The results indicate that the acquisition of school-related knowledge is efficient in the intervention. Thus, cumulative instruction can serve as a model for other physics courses.

1 Einleitung

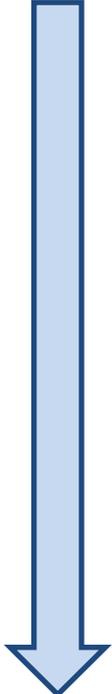
1.1 Professionsbezogenes kumulatives Lehren in Fachveranstaltungen des Physik-Lehramtsstudiums

Traditionelle physikalische Fachvorlesungen gehen oft von der folgenden impliziten Annahme aus: Das physikalische Wissen, das in der Schule gelehrt wird, sei „trivial“. Deshalb sollten Physik-Lehramtsstudierende nach einem Physikstudium in der Lage sein, sich das notwendige Schulwissen selbstständig und unaufwändig zu erschließen (in Anlehnung an Wu 2015, Folie 41). Es sei daher insbesondere nicht notwendig, im Studium eigene Lerngelegenheiten für den expliziten Erwerb von Schulwissen anzubieten. Diese Aussagen werden auch als *Trickle-down*-Annahme bezeichnet (vgl. Hoth et al. 2019, Kap. 2.1). Verschiedene empirische Studien zu den Inhaltsbereichen Mathematik und Physik weisen darauf hin, dass diese Annahme vermutlich falsch ist (z. B. Hoth et al.

2019). Das für das Lehren von Schulwissen notwendige Fachwissen kann demnach nicht – quasi nebenbei – anhand des universitären Wissens erworben werden; der Erwerb von schulrelevantem Fachwissen braucht eigene Lerngelegenheiten. Für viele angehende Lehrkräfte findet dieses Lernen derzeit erst im Rahmen des eigenen Physikunterrichts in der Schulpraxis und im Referendariat statt. Die in der Regel selbstständige Erarbeitung dieses schulrelevanten Fachwissens stellt dabei insbesondere im Referendariat eine zusätzliche Belastung für die Referendar/innen dar (vgl. Merzyn 2004, S. 86).

1.2 Das Projekt „Kumulatives Lehren und Lernen im Lehramtsstudium Physik“

Das Projekt „Kumulatives Lehren und Lernen im Lehramtsstudium Physik“ (wir werden im Folgenden verkürzt auch von der Intervention sprechen) setzt sich aus Entwicklungsarbeiten mit Umsetzung in der Lehre sowie aus der Evaluation zusammen (vgl.

Tab. 1: Das Projekt „Kumulatives Lehren und Lernen im Lehramtsstudium Physik“


Entwicklung	Entwicklung von Leitlinien für kumulatives Lehren im Lehramtsstudium Physik	Entwicklung dreier Lehrveranstaltungen anhand der Leitlinien durch Lehrpersonen der PH Ludwigsburg <ul style="list-style-type: none"> • Mechanikvorlesung • Physikalisches Praktikum zu mechanischen Schulexperimenten • Elektrodynamikvorlesung
	<i>Publikationen</i> John & Starauschek (2020)	Rubitzko et al. (2018,2019a,b), Starauschek et al. (2018)
Intervention	1. Erste Kohorte: Wintersemester 2016/17 bis Wintersemester 2017/18, 2. Zweite Kohorte: Wintersemester 2017/18 bis Wintersemester 2018/19	
Evaluation	Teilnehmende Beobachtung: „Wie wurden die kumulativen Leitlinien in den Veranstaltungen angewandt?“	Mixed-Methods-Studie <ul style="list-style-type: none"> • Quasi-experimentelle Vergleichsstudie zum physikalischen Fachwissenserwerb • Qualitative Studie zum Fachwissenserwerb mit Schulbuchaufgaben • Qualitative, retrospektive Interviewstudie mit Leitfadeninterviews zum Physiklernen in den drei obigen Veranstaltungen

Tab. 1). Die Entwicklungsarbeit bestand aus drei Schritten: 1) Die theoriebasierte Entwicklung und Formulierung von Leitlinien für die kumulative Lehre, 2) die Entwicklung der Lehre für drei physikalische Fachveranstaltungen für das Physik-Lehramt (Mechanikvorlesung, physikalisches Praktikum zu mechanischen Schulversuchen, Elektrodynamikvorlesung) anhand dieser Leitlinien sowie 3) die Durchführung dieser Lehrveranstaltungen. Zwei Lehrpersonen der PH Ludwigsburg setzten die Schritte 2 und 3 um. Im Rahmen der Evaluation wird u. a. untersucht, wie die Lehrpersonen die Intervention umsetzen und welche Wirkung dies auf den Fachwissenserwerb der Studierenden hat. Die Autoren waren nicht aktiv an der Lehre beteiligt, haben aber Entwicklungen der Lehre beratend unterstützt. Für Interventionen dieser Art gilt im Allgemeinen, dass sie immer auf zwei Ebenen stattfinden (vgl. Breuer et al. 2022). Die Lehrpersonen werden auf der ersten Ebene zu den Leitlinien geschult, die sie nicht selbst entwickelt haben, und interpretieren diese auf ihre Weise. Auf der zweiten Ebene findet die ‚eigentliche‘ Intervention bei den Lehramtsstudierenden statt. Damit wollen wir darauf hinweisen, dass es verschiedene Interpretations- und Umsetzungsmöglichkeiten der Leitlinien gibt. Genau genommen handelt es sich auf der Ebene der Lehrpersonen um einen zu untersuchenden Einzelfall. Lehrperson A war für die Mechanik und das Praktikum, Lehrperson B für die Elektrodynamik verantwortlich. Die drei Lehrveranstaltungen, die in den Bachelorstudiengang Physik-Lehramt für die Sekundarstufe 1 an der PH Ludwigsburg integriert sind, stellen also eine mögliche Umsetzung des intendierten kumulativen Lehrens dar. Leitlinien führen in der Regel eben nicht

zu eindeutigen Lehr-Lern-Arrangements; sie müssen aber, um eine rudimentäre erste Bewertung von deren Wirksamkeit vornehmen zu können, in den möglichen Lehr-Lern-Arrangements in ausreichender Zahl umgesetzt sein.

Die vorliegende Evaluation untersucht weiter die Wirksamkeit der entwickelten Lehrveranstaltungen für das Lernen der Studierenden. In der Regel ist bei der Evaluation von Interventionen eine Randomisierung der Stichproben nicht möglich (vgl. Bortz & Döring 2007, S. 113). Dies gilt auch für die vorliegende Studie, in der ein strenges quasi-experimentelles Studiendesign nicht umsetzbar war. Die Wirksamkeit der Intervention wurde deshalb mehrperspektivisch mit unterschiedlichen Studien in einem Mixed-Methods-Design untersucht (vgl. unterstes Feld in Tab. 1). Die vorliegende Veröffentlichung stellt Teilergebnisse der Mixed-Methods-Studie zu folgenden beiden Evaluationsfragen vor (in Tab. 1 grau hinterlegt):

1. *Wie wurden die Leitlinien in den physikalischen Fachveranstaltungen umgesetzt?*
2. *Wie hoch ist der Fachwissenszuwachs bei den teilnehmenden Studierenden im Vergleich zu Physik-Lehramtsstudierenden, die „traditionelle“ Fachvorlesungen besuchen?*

2 Stand der Forschung zur Lehramtsausbildung Physik

2.1 Professionswissen von angehenden Physiklehrkräften

Das für das Handeln einer Lehrkraft im Unterricht notwendige und erwerbbar Wissen wird in den Bildungswissenschaften und Fachdidaktiken als

Professionswissen bezeichnet (z. B. Abell 2007, Blömeke et al. 2015, van Driel et al. 2017). Es weist verschiedene Facetten auf (Shulman 1987). Die drei Facetten *Fachwissen*, *fachdidaktisches Wissen* und *psychologisch-pädagogisches Wissen* gelten dabei in der internationalen Forschung als besonders relevant für den naturwissenschaftlichen Unterricht in der Schule (z. B. Krainer et al. 2021). Diese drei Wissensfacetten – insbesondere aber das Fachwissen – sollten nach dem gegenwärtigen Konsens (vgl. Terhart 2000) und nach den ländergemeinsamen Standards zur Physiklehramtsausbildung der KMK überwiegend in der ersten Phase des Lehramtsstudiums erworben werden.

Bei der physikspezifischen Betrachtung der fachlichen Facette stellen sich zwei zentrale Fragen: 1) Welches physikalische Fachwissen ist für Physiklehrkräfte relevant? 2) Wie effizient wird dieses Wissen an Universitäten und Hochschulen erworben? Der Stand der Forschung unterscheidet hierbei die Wissensniveaus *Schulwissen* (SW), *vertieftes Schulwissen* (VSW) und *universitäres Wissen* (UW) (z. B. Riese 2009, Vogelsang et al. 2019). Die Dimensionen SW und UW sind i. d. R. curricular definiert und sollten deshalb in einer hierarchischen Beziehung zueinanderstehen. Das SW wird dabei häufig als das physikalische Wissen definiert, das nach den curricularen Vorgaben der deutschen Bundesländer bis zum Ende der Sekundarstufe 2 erworben sein soll (vgl. Vogelsang et al. 2019). Inhalte des UWs werden dagegen ausschließlich an Universitäten gelehrt, z. B. mathematische Formalismen zur Lösung theoretischer physikalischer Probleme. Für das VSW findet sich in der Literatur bislang über die fachdidaktischen Disziplinen hinweg keine einheitliche Definition. Beispielsweise werden im Projekt COACTIV (Mathematik, vgl. Baumert & Kunter 2006) u. a. die Niveaus „Beherrschung des Schulstoffs“ (entspricht dem SW) und „Tieferes Verständnis der Fachinhalte des Curriculums der Sekundarstufe“ (entspricht dem VSW, vgl. Krauss et al. 2008, S. 237) unterschieden. Vogelsang et al. (2019, S. 497) konkretisieren das VSW in der Physikdidaktik – im Vergleich zu COACTIV – mit den drei Merkmalen: „Erkennen von Herleitungs- und Lösungsansätzen, Identifizieren von Unterschieden und Gemeinsamkeiten physikalischer Konzepte, Umgang mit den Grenzen physikalischer Modelle“. Diese Merkmale bilden die Grundlage für die in diesem Artikel verwendete Operationalisierung des VSW. Dabei werden die Wissensniveaus insbesondere nicht als hierarchisch angenommen, d. h. das VSW ist nicht zwingend „zwischen“ dem SW und dem UW verortet. Die Besonderheit des VSW liegt darin, universitäres Wissen im Kontext von schulphysikalischen Phänomenen anwenden zu können – so sollte z. B. beim Thema der elektromagnetischen Induktion die Ableitung der Gleichung $U = \dot{\Phi}$ (U : elektrische Spannung; Φ : magnetischer Fluss) aus den Maxwellgleichungen vorgenommen werden können. Aus diesem Grund ist auch der Terminus

„Wissensniveau“ in Andeutung einer globalen hierarchischen Ordnung nicht angemessen; das VSW sollte daher als eigenständige Wissensqualität gegenüber den hierarchisch zuordenbaren Wissensniveaus SW und UW betrachtet werden. Die mit dem VSW verbundene Wissensqualität zeichnet sich z. B. dadurch aus, dass angehende oder ausgebildete Physiklehrer/innen „Inhalte aus dem universitären Wissen und dem Schulwissen miteinander in Verbindung [bringen können]“ (Woehlecke et al. 2017, S. 419). Woehlecke et al. (2017) bezeichnen das VSW dabei als „erweitertes Fachwissen für den schulischen Kontext“. Es schließt die Fähigkeiten ein, die mit den von Vogelsang et al. (2019) genannten Merkmalen verbunden sind. Das VSW gilt als berufsspezifisches Fachwissen von Lehrkräften, während das UW z. B. für angehende Physiker/innen berufsspezifisch werden kann.

Das SW ist aus Definitions- und Plausibilitätsgründen für den Physikunterricht relevant. Noch zu zeigen wäre, welche Relevanz das VSW und das UW für das Unterrichten aufweisen. Um deren Relevanz für den Physikunterricht zu zeigen, könnte sowohl ihr Einfluss auf die Unterrichtsqualität als auch auf den Lernzuwachs der Schüler/innen untersucht werden. Derartige direkte Effekte konnten bislang empirisch nicht nachgewiesen werden. Für spezifische Unterrichtssituationen weisen Studien jedoch auf eine hohe Relevanz eines (oft nicht näher bestimmten, aber curricular eindeutig vom SW abgrenzbaren) vertieften Fachwissens für die Qualität des physikalischen Schulunterrichts hin. Beispielsweise verfügen Physiklehrkräfte mit einem vertieften Fachwissen über ein breites Repertoire an Beispielen (Hashweh 1987) und finden eher angemessene Erklärungsmöglichkeiten (Kulgemeyer & Riese 2018). Zudem gilt das VSW insbesondere für den Aufbau von fachdidaktischem Wissen als relevant (z. B. Kirschner 2013, Kröger 2019, Kulgemeyer et al. 2020, Riese & Reinhold 2012). Die Rolle des UW für den Physikunterricht der Schule ist hingegen noch weitgehend unklar. Dabei sollte das UW nicht als vollständig irrelevant für Lehrkräfte angesehen werden (vgl. Riese 2010), denn ein hohes UW könnte durch Mediationseffekte mit anderen Variablen, z. B. dem fachdidaktischen Wissen, wirksam werden. Zusammenfassend betrachtet lässt sich nach dem Stand der Forschung dem SW und dem VSW aber eine höhere, d. h. eine unmittelbarere Relevanz für das professionelle Handeln im Schulunterricht zuordnen als dem UW. Dem hohen Stellenwert des SW und VSW in der physikdidaktischen Diskussion wird hingegen im Physiklehramtsstudium nicht oder nur selten Rechnung getragen (DPG 2014, Merzyn 2004, 2017). Dort steht das UW im Mittelpunkt. Dabei gehen Dozierende der Universität wie oben angesprochen oft implizit von einer *Trickle-down*-Wirkung aus (vgl. Hoth et al. 2019 sowie Wu 2015 für das Fach Mathematik).

Für das Physikstudium gibt es zumindest Indizien für eine fehlende *Trickle-down*-Wirkung. Angehende

Physiklehrkräfte greifen im Referendariat und zu Beginn ihrer Berufszeit häufig selbst noch auf schüler-typische physikbezogene Alltagsvorstellungen zurück (Abell 2007, van Driel et al. 2017). Zudem wird das schulrelevante Wissen überwiegend erst in den Phasen nach dem Studium erworben (Borowski et al. 2011, Schödl & Göring 2017). Hierzu korrespondierend bezeichnen ehemalige Physik-Lehramtsstudierende ihre Fachstudien retrospektiv häufig als unpassend für ihren Beruf (z. B. Merzyn 2004). Das physikalische Fachstudium für angehende Physiklehrkräfte erweist sich somit eher als wenig effektiv für den Aufbau von professionsrelevantem physikalischem Fachwissen. Dies hat auch strukturelle Gründe: Fachveranstaltungen des Lehramtsstudiums finden i. d. R. gemeinsam mit Fachstudierenden statt und sind an deren Ausbildung ausgerichtet; lehramtspezifische Aspekte des VSW oder das SW selbst werden dort nicht oder selten berücksichtigt (vgl. z. B. DPG 2006). Auf eine berufsspezifische Vermittlung des Fachwissens wird in der fachlichen Lehramtsausbildung also strukturell weitgehend verzichtet. Der Fachwissenserwerb erfolgt somit nicht professionsorientiert.

2.2 Unterschiede zwischen den Ausbildungsformen beim Physik-Lehramtsstudium in Deutschland

In Deutschland werden entsprechend seiner schulischen Strukturen Lehrkräfte für das Lehramt für Haupt- und Realschule (heute Sekundarstufe 1 [Sek1]) und für das Gymnasium (Sekundarstufe 2 [Sek2]) an den Hochschulen in unterschiedlichen Studiengängen ausgebildet. Sek1-Studierenden steht dabei i. d. R. etwa ein Drittel weniger Studienzeit für das Fach Physik zur Verfügung als Sek2-Studierenden (vgl. DPG 2014, S. 44 sowie exemplarisch die Studienordnungen für Baden-Württemberg: GBI 2015). Entsprechend erreichen Sek1-Studierende häufig ein geringeres Fachwissensniveau als Sek2-Studierende (Oettinghaus 2015, Woitkowski & Riese 2017). Diese Unterschiede im Fachwissenserwerb sind nach Riese (2009, S. 148) auf das geringere Angebot an Fachveranstaltungen im Sek1-Studium zurückführbar. Somit scheint die Effizienz des Fachstudiums beider Studiengänge vergleichbar zu sein. Das Sek2-Lehramtsstudium hat aber aufgrund des umfangreicheren fachlichen Lernangebots eine höhere Effektivität. Zudem liegen auch curriculare Unterschiede zwischen den Studiengängen vor. Diese zeigen sich darin, dass im Sek1-Studiengang i. d. R. keine Vorlesung zur theoretischen Physik angeboten wird und die physikalischen Inhalte mit elementarer Mathematik behandelt werden. Die Studierenden beider Studiengänge unterscheiden sich auch in ihren Persönlichkeitsmerkmalen. So haben Sek1-Studierende der Physik i. d. R. höhere (d. h. „schwächere“) Abiturnoten (Riese 2009, Schödl & Göring 2017, Woitkowski & Riese 2017) und fächerübergreifend schlechtere Voraussetzungen hinsichtlich ihrer

kognitiven Fähigkeiten (Eder et al. 2013, Neugebauer 2013).

In der Lehramtsausbildung in Deutschland liegen darüber hinaus auch strukturelle Unterschiede auf institutioneller Ebene vor: Sek1-Studiengänge werden in Baden-Württemberg an Pädagogischen Hochschulen, und in den anderen Bundesländern an den Universitäten angeboten. Da die hier vorgestellte Evaluation an einer Pädagogischen Hochschule (PH) durchgeführt wird, wollen wir mögliche institutionell bedingte Faktoren identifizieren, die einen Einfluss auf die Wirksamkeit der Lehre haben könnten. An Pädagogischen Hochschulen liegt die Lehrverantwortung in der Regel nicht in der Hand von Fachphysiker/innen, sondern bei Lehrpersonen, die oft selbst über eine Lehramtsausbildung verfügen. Dies ist kein Unterschied, der verallgemeinert werden kann, denn einige Pädagogische Hochschulen übertragen einen Teil der fachlichen Ausbildung an die Universitäten, während umgekehrt an Universitäten die Fachausbildung für den Sek1-Studiengang oft in der Verantwortung der Abteilungen für Physikdidaktik liegt. Aufgrund dieser hohen Varianz sind keine verallgemeinerbaren Aussagen zu Unterschieden der Ausbildungsformen möglich. Zudem liegt kein differenzierter Forschungsstand vor, mit Ausnahme der Studie von Riese (2010). In dieser Studie ist der um die Lernzeit korrigierte Fachwissenszuwachs an den PHen „deutlich höher“ und weist im Vergleich mit Haupt-Real-schul-Studiengängen an Universitäten eine „doppelte Effektstärke“ auf (Riese 2010, S. 31). Dies ist ein Hinweis auf eine mögliche höhere Effizienz der Sek1-Physiklehre an den Pädagogischen Hochschulen gegenüber der Sek1-Lehre an Universitäten. Dieser Forschungsstand ist aufgrund der noch dünnen empirischen Basis und der heterogenen Ausbildung daher ein vorläufiger.

3 Die Leitlinien für das kumulative Lehren im Lehramtsstudium Physik

Auf der Basis von lernpsychologischen Forschungsarbeiten zum kumulativen Lernen haben wir das Modell des „Kumulativen Physiklehrens und -lernens in der Lehramtsausbildung“ mit vier Leitlinien entwickelt. Dies ist ausführlich in einer eigenen Publikation beschrieben (John & Starauschek 2020). Unter einem Lehr- und Lern-Modell verstehen wir dabei ein Abbild der Struktur von lernwirksamen Lehr-Lern-Prozessen zum professionsorientierten Physiklernen an Hochschulen (für diesen Modellbegriff vgl. Tetens 2013, S. 51).

Kumulatives Lernen lässt sich pragmatisch vereinfachend definieren als Erwerb komplexer und überdauernder Wissensstrukturen durch inhaltlich aufeinander aufbauende Lerngelegenheiten (vgl. Lee 2012a, S. 887). Dieser Begriff des kumulativen Lernens geht in seinem Kern zurück auf Gagné (1968), wurde seitdem aber mehrfach überarbeitet und weiterentwickelt. Kumulatives Lernen gilt in der Didaktik als erstrebenswert, weil es die Bedeutung des Vorwissens

Tab. 2: Zusammenfassung der kumulativen Leitlinien (nach John & Starauschek 2020)

Kumulative Leitlinie	Kurzbeschreibung
Wiederholtes Aufgreifen	Beim Fortschreiten der Inhalte werden die Aspekte schulerelevanter physikalischer Grundkonzepte anhand der neuen Inhalte wiederholend konkretisiert.
Üben	Studierende sollen die Anwendung der Grundkonzepte aktiv üben, wenn ein neuer Inhalt behandelt wird.
Alltagsvorstellungen	Typische Alltagsvorstellungen von Studierenden sind zu berücksichtigen und zu explizieren.
Schulbezug	Lehramtsstudierende sollen üben, ihr vertieftes und oft formalisiertes Wissen im Kontext der Schulphysik anzuwenden, z. B. anhand typischer Schulbuchaufgaben.

für den Wissenserwerb per se betont und berücksichtigt (Weinert 1996, S. 12). In der genannten Arbeit (John & Starauschek 2020) geben wir einen Überblick unserer Synthese und Erweiterungen der Lernpsychologie des kumulativen Lernens. Sie führt zur Formulierung von vier Leitlinien (vgl. Tab. 2). Die Leitlinien bilden die Basis für die Entwicklung der evaluierten Lehrveranstaltungen.

Leitlinie 1 – Wiederholtes Aufgreifen von Grundkonzepten: Die kumulative Lerntheorie geht von der Annahme aus, dass fachliche Konzepte nicht anhand weniger Beispiele elaboriert werden können. Die sukzessive Elaboration kann aber unterstützt werden, wenn sie bei der Erarbeitung neuer Inhalte – bei von außen gestalteten und moderierten Lehr-Lern-Prozessen – immer wieder didaktisch herausgearbeitet und betont wird. Die erste Leitlinie beschreibt dieses Lehrprinzip als Wiederholtes Aufgreifen physikalischer Grundkonzepte. Ein Grundkonzept ist z. B. das Kraftkonzept. Für dieses Konzept lassen sich verschiedene allgemeine Aussagen formulieren (z. B. über die Stärke und Richtung von Actio/Reactio-Kräftepaaren, über die Impulserhaltung oder über die resultierende Kraft bei einem Wechselwirkungspartner), die in verschiedenen Anwendungs- oder Problemlösesituationen (z. B. das Pendel, das anfahrende Auto, die Ladung im elektrischen Feld eines Kondensators) erkannt und genutzt werden müssen. Die Leitlinie fordert, in neuen Anwendungsfällen des Curriculums wiederholt auf die elementaren Aussagen des Grundkonzepts einzugehen. Dies kann durch die Lehrperson erfolgen oder in Form einer Übung umgesetzt werden (Kombination mit Leitlinie 2).

Leitlinie 2 – Üben mit Grundkonzepten: Die kumulative Lerntheorie geht mit Lee (2012b) und Ausubel (1968) davon aus, dass ein abstraktes Konzept nur im Konkreten bedeutsam (*meaningful*) werden kann. Beispielsweise ist die Aussage „Energie ist in abgeschlossenen Systemen eine Erhaltungsgröße“ richtig

und akzeptabel, für Anfänger/innen aber erst einmal ohne weiterreichende Bedeutung. Eine Bedeutung erhält die Aussage, wenn sie bei physikalischen Erklärungen konkret angewandt wird und als allgemeingültig anzunehmendes Prinzip erkennbar wird (z. B. wenn plausibel demonstriert wird, dass die mechanische Energie bei einem idealen Pendel eine Erhaltungsgröße ist, sofern das Pendel ein abgeschlossenes System bildet)¹. Abstraktes Wissen, das nicht nur als auswendiggelerntes Wissen vorliegt, sondern wie von Lee gefordert im Konkreten erworben wird, ist aber auch immer in begrenztem Maße kontextbehaftet oder situiert (Anderson et al. 1996, S. 6). Wird beispielsweise das Actio/Reactio-Prinzip mit dem Standardbeispiel zweier sich abstoßender Skateboard-Fahrer/innen gelehrt, sollte demzufolge nicht davon ausgegangen werden, dass es von Lernenden sofort sicher beherrscht und ohne Weiteres auf andere Situationen übertragen werden kann. Deshalb genügen wenige Beispiele i. d. R. nicht, um die Anwendung eines abstrakten Konzepts im weiten Transfer verlässlich bewerkstelligen zu können. Neben dem Prinzip des wiederholten Aufgreifens hat dies zur Folge, dass Lernende die Anwendung des abstrakten, aber noch nicht elaborierten Wissens in vielen Problemlagen und Kontexten üben müssen. In den damit verbundenen Lernaktivitäten (Übungen) wenden Studierende diesem Lehrprinzip folgend die Grundkonzepte auf konkrete Beispiele an.

Leitlinie 3 – Alltagsvorstellungen: Wittrock (1989) erweitert in der Lernpsychologie das kumulative Konzept des Lernens um einen entscheidenden Aspekt: Alltagsvorstellungen, die eine fachlich richtige Bedeutungszuweisung erschweren, können auftreten und müssen ggf. beim Lehr-Lern-Prozess berücksichtigt werden. Hieraus folgt unser drittes kumulatives Lehrprinzip, typische Alltagsvorstellungen zu berücksichtigen. Dies gilt als zentrales Prinzip der Physikdidaktik und ist dort mit dem Begriff des

¹ Fachlich lässt sich anmerken, dass dies nur gilt, sofern das Pendel hinsichtlich der potenziellen und kinetischen Energie als abgeschlossenes System betrachtet wird. Das Pendel könnte auch (eher unüblich) als offenes System betrachtet werden: Wenn etwa nur die (kinetische) Energie des Pendels betrachtet wird, die dann periodisch zu- und abnimmt. Die Energie wechselt periodisch zwischen den Systemen gemeinsames Gravitationsfeld Erde und Pendelmasse hin und her. Diese fachliche Differenzierung illustriert die

oben aufgestellte Behauptung, dass nur eine wiederholte neue Bedeutungszuweisung des abstrakten Energiekonzepts an konkreten Phänomenen zum Lernerfolg führen kann, sofern der abstrakte Energieerhaltungssatz nicht nur auswendig gelernt werden soll. Den Energieerhaltungssatz zu „verstehen“ bedeutet also insbesondere, ihn fachlich sinnvoll anzuwenden zu können.

Conceptual Change verbunden (z. B. Strike & Posner 1982, zsf. Duit & Treagust 2003).

Leitlinie 4 – Schulbezug: Diese Leitlinie folgt nicht direkt aus der Lernpsychologie des kumulativen Lernens, sondern aus der direkten Forderung nach dem Professionsbezug. Die Leitlinie ist somit spezifisch für die Lehramtsausbildung im Allgemeinen und die Physik-Lehramtsausbildung im Besonderen. Ihre Notwendigkeit folgt aus der oben beschriebenen Beobachtung, dass Physik-Lehramtsstudierende schulrelevantes Fachwissen nicht oder nur ineffektiv an der Universität erwerben und die Physik-Fachvorlesungen deshalb oft als irrelevant erachten. Mit der Leitlinie ist in den Physik-Fachveranstaltungen die Anwendung des vertieften Wissens z. B. auch an schulrelevanten Themen vorzunehmen und zu üben (vgl. Leitlinie 2). In Hinsicht auf den späteren Beruf der Physiklehrkraft kann die angebotene Lernzeit damit besser genutzt und der kumulative Erwerb des Professionswissens unterstützt werden. Fachliche Schulbezüge sollen hergestellt werden, indem gezeigt wird, in welcher Art Aussagen der Schulphysik in der stark formalisierten universitären Physik formuliert – oder besser versteckt – sind. Dies kann sowohl exemplarisch als auch systematisch erfolgen. Das Ziel sollte sein, dass Lehramtsstudierende nicht nur über ein universitäres Wissen verfügen, sondern dass sie dieses Wissen auch für ihre professionell bestimmten schulischen Aufgaben nutzen können. Hier deutet sich das vertiefte Schulwissen an. Ein Beispiel: In der Physikausbildung der Universitäten werden schon früh generalisierte Koordinaten verwendet; die i. d. R. unbekanntes Zwangskräfte werden dabei eliminiert – sie verschwinden aus Sicht der professionellen Physik wunschgemäß. Aus Sicht der Schulphysik, die sich insbesondere mit der Entwicklung physikalischer Begriffe beschäftigen soll, ist dieses Verschwinden jedoch nicht wünschenswert. Ein Bezug zur Schulphysik entsteht, wenn qualitativ von der aufgrund der Zwangsbedingungen bekannten Bahn auf die resultierende Kraft geschlossen werden kann. Beispielsweise folgt beim Pendel aus der Kenntnis der Geschwindigkeitsänderung in Betrag und Richtung die resultierende Kraft. Damit lässt sich schließlich die Zwangskraft qualitativ bestimmen.

4 Evaluationsdesign und Methodik

4.1 Evaluationsgegenstand

Zwei Lehrpersonen der PH Ludwigsburg entwickelten – vereinfacht gesagt – ihre bereits vorhandenen Lehrveranstaltungen der Physik anhand der kumulativen Leitlinien (siehe Tab. 2) weiter. Zur Erinnerung: Die Lehrpersonen waren nicht an der Entwicklung der Leitlinien beteiligt. Die drei weiterentwickelten

Tab 3: Der Evaluationsgegenstand

	SWS ^a	Format	Semester
Mechanik	6	Vorlesung mit integrierter Übung	2.
Physikalisches Praktikum	2	Experimente zur Mechanik	3.
Elektrodynamik	6	Vorlesung mit integrierter Übung	4.

^a Semesterwochenstunden

physikalischen Fachveranstaltungen sind dem Bachelorstudiengang Physiklehramt für die Sekundarstufe 1 an der PH Ludwigsburg zugeordnet. Es handelt sich um die Vorlesungen zur Mechanik und Elektrodynamik sowie einem physikalischen Praktikum zu mechanischen Schulexperimenten (Tab. 3). Diese Lehrveranstaltungen werden von den Studierenden i. d. R. nacheinander im zweiten, dritten und vierten Fachsemester besucht. In der Elektrodynamikvorlesung kommen die Leitlinien nur bei passenden Gelegenheiten in den Übungen zur Anwendung, d. h. wenn dabei mechanische Grundkonzepte genutzt werden. Als Inhalt für die kumulativ zu lehrenden Grundkonzepte wurde aus zweierlei Gründen die Mechanik gewählt. Erstens wird die Mechanik in der Regel früh im Studium gelehrt. Vergleiche zwischen Hochschulen sind daher möglich, denn alle Studierenden sollten innerhalb der ersten beiden Semester eine Veranstaltung zur Mechanik besucht haben. Zweitens eignen sich die Konzepte der Mechanik besonders gut für kumulatives Lehren, da sie früh eingeführt und in vielen anderen inhaltlichen Kontexten angewendet werden.

Aufgrund dieser inhaltlichen Wahl liegt der Schwerpunkt des Evaluationsgegenstands auf dem Lehren und Lernen der Mechanik in der Hochschule. Zu Grundkonzepten wurden die Konzepte Energie, Impuls, Kraft, Drehimpuls und Drehmoment² bestimmt. Diese Konzepte haben eine eindeutige schulische, aber auch universitäre Relevanz. Weitere mechanische Grundkonzepte wären prinzipiell denkbar, diese sind jedoch i. d. R. entweder bereits intuitiv gut verständlich (z. B. das Konzept der Masse oder des Körpers), oder es handelt sich eher um Oberbegriffe als um Fachkonzepte (z. B. die sogenannten Basiskonzepte System und Wechselwirkung, vgl. dazu Schecker & Parchmann 2006, S. 62).

In der kumulativen Lehre sollen die mechanischen Grundkonzepte gemäß der ersten Leitlinie wiederholt aufgegriffen werden. Abbildung 1 deutet dies schematisch und exemplarisch an. In den Beispielen der

² Das Grundkonzept Drehmoment ist ein zentrales Konzept der Mechanik, das im Bildungsplan für die Sekundarstufe 1 oft nur implizit auftaucht. Der Bildungsplan Baden-Württemberg (2016, S. 23) sieht die Behandlung einfacher Maschinen vor. Das Drehmoment bildet ein dafür relevantes Hintergrundkonzept (Stichwort

vertieftes Schulwissen), das Lehrkräfte beim Lehren einfacher Maschinen beherrschen sollten. Ein Schulbezug zum Drehmoment ist z. B. über die Wippe oder den Hebel gegeben.

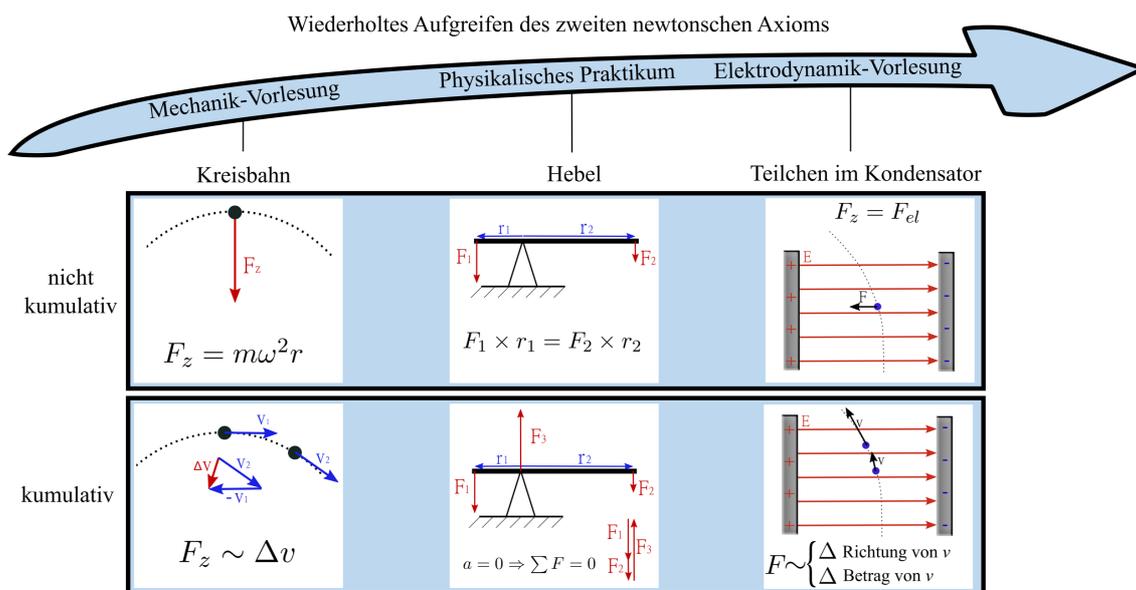


Abb. 1: Beispiel für Wiederholtes Aufgreifen: Vom kinematisch Beobachtbaren wird qualitativ auf die resultierende Kraft geschlossen, indem die Geschwindigkeitsänderung analysiert wird. Dies erfolgt in allen drei Veranstaltungen.

Abbildung wird das Grundkonzept Kraft in den drei Veranstaltungen kumulativ aufgegriffen, nachdem die newtonschen Axiome formal eingeführt wurden. Der kumulative Aspekt liegt dabei darin, in einem neuen inhaltlichen Anwendungsfall relevante Merkmale der newtonschen Axiome nochmals zu verdeutlichen, um die Elaboration zu unterstützen. In diesen Fällen ist dies der Zusammenhang zwischen resultierender Kraft und vektorieller Geschwindigkeitsänderung. In der Abbildung ist exemplarisch auch der typische, nicht-kumulative Fall dargestellt (oben): Häufig wird das Kraftkonzept nur formal angewandt, ohne das qualitative und i. d. R. von Studierenden noch nicht sicher beherrschte anschauliche Vorwissen zum Kraftkonzept zu aktivieren und anzuwenden. Eine Besonderheit der oben genannten Mechanikvorlesung besteht im Aufbrechen der üblichen Trennung von Vorlesung und Übung. Die Übungen sind stattdessen in die Vorlesung integriert, um die zweite Leitlinie zu berücksichtigen.

4.2 Evaluationsziel und Evaluationsfragen

Das Ziel der Weiterentwicklung der Lehrveranstaltungen sollte zunächst in der Verbesserung des professionsbezogenen Fachwissenserwerb im Bereich der Mechanik liegen. Mit der Evaluation wird deshalb untersucht, ob dieses Ziel für den hier zu untersuchenden Einzelfall erreicht wurde. Damit lässt sich folgende übergeordnete Evaluationsfrage formulieren:

Führen die nach kumulativen Leitlinien entwickelten Lehrveranstaltungen (Evaluationsgegenstand) zur Mechanik bei Studierenden zu einem höheren Zuwachs im Schulwissen und vertieften Schulwissen als sogenannte traditionelle Physik-Fachveranstaltungen?

Diese Frage wird im Rahmen einer größer angelegten Mixed-Methods-Evaluation untersucht (vgl. Einleitung, Tab. 1). In dieser Veröffentlichung werden zwei

Teile der Evaluation vorgestellt. Zunächst soll untersucht werden, wie die kumulativen Leitlinien von den Lehrpersonen in den Lehrveranstaltungen angewandt wurden. Im zweiten Schritt wird die Wirkung des Evaluationsgegenstands auf den Fachwissenszuwachs der Studierenden quasi-experimentell bestimmt. Dies führt zu folgenden konkreten Evaluationsfragen:

1. *Wie wurden die kumulativen Leitlinien in den Veranstaltungen angewandt?*
2. *Wie hoch ist der Fachwissenszuwachs im Schulwissen und vertieften Schulwissen im Bereich der Mechanik bei Studierenden, die die kumulativ weiterentwickelten Lehrveranstaltungen besuchen, im Vergleich mit Studierenden, die traditionelle Fachveranstaltungen besuchen?*

In der Diskussion erfolgt eine Einschätzung, inwiefern die Ergebnisse verallgemeinerbar sind.

4.3 Erste Evaluationsfrage: Design und Methode

Zur Beantwortung der ersten Evaluationsfrage wird erfasst, wie häufig die Leitlinien in den Lehrveranstaltungen angewandt wurden. In der Mechanikvorlesung kam die Methode der teilnehmenden Beobachtung zur Anwendung. Für die teilnehmende Beobachtung in der Mechanikvorlesung wird mit einem Beobachtungsbogen (siehe Anhang) während der Vorlesung erfasst, wann eine kumulative Leitlinie umgesetzt wird. Ein begleitendes Manual (siehe Anhang) formuliert Indikatoren und Merkmale, wie die Leitlinien in der Vorlesung erkannt werden können und zu dokumentieren sind. Beispielsweise ist bei der Nennung der Leitlinie Übungen anzugeben, welches Grundkonzept in welcher Übungsform umgesetzt wurde. Tabelle 4 zeigt ein Beispiel. Da jede Phase der Vorlesung mit einer PowerPoint-Präsentation unterstützt wurde, wird im Beobachtungsbogen zur

Tab. 4: Minimalbeispiel für den Beobachtungsbogen

Blatt Nr.:		Datum:						
Vorlesungs-kapitel	Wiederholtes Aufgreifen		Alltagsvorstellungen		Übung		Schulbezug	
	Folien-Nummer	Beobachtung in der Vorlesung:	Folien-Nummer	Beobachtung in der Vorlesung:	Folien-Nummer	Beobachtung in der Vorlesung:	Folien-Nummer	Beobachtung in der Vorlesung:
Starre Körper	6	Das Grundkonzept Kraft in Form des ersten newtonschen Axioms wird qualitativ für Rotationsbewegungen formuliert.	96	Typische Alltagsvorstellungen zum Drehmoment werden gezeigt	11	Peer-Instruction-Aufgabe zum Grundkonzept Drehmoment		
					13	Diskussionsaufgabe zum Drehmoment am einseitigen Hebel	13	Schultypische Aufgabe zum Grundkonzept Drehmoment an einem einseitigen Hebel

chronologischen Strukturierung die Foliennummer angegeben, bei der eine Anwendung der kumulativen Leitlinie erfolgte. Da die Übungen in die Mechanikvorlesung integriert sind, wird zudem die Zeitdauer erfasst, die die verschiedenen Phasen umfassen; zwischen den klassischen frontalen Vorlesungsphasen und den Übungsphasen ist zu unterscheiden. Die teilnehmende Beobachtung erfolgte durch dieselbe Person. Vierzig Prozent der Veranstaltungen unterlagen einer Beobachtung.

In den Veranstaltungen zum physikalischen Praktikum und zur Elektrodynamik wurden die Leitlinien bei der Formulierung von Übungsanleitungen und Übungsblättern angewendet. Deshalb wurde bei diesen Veranstaltungen keine teilnehmende Beobachtung durchgeführt, sondern die entsprechenden Dokumente inhaltsanalytisch in Anlehnung an die qualitative Inhaltsanalyse (Mayring 2010) ausgewertet.

4.4 Zweite Evaluationsfrage: Design und Methode

Design: Nach der zweiten Evaluationsfrage soll der Fachwissenszuwachs der Studierenden der Interventionsgruppe vergleichend untersucht werden. Dazu wird eine quasi-experimentelle, längsschnittliche Studie mit drei Messzeitpunkten durchgeführt (Prä-Post1-Post2). Als Vergleichsgruppe dient eine Stichprobe, die sich aus Physik-Lehramtsstudierenden verschiedener Hochschulstandorte in Deutschland zusammensetzt (vgl. Abschnitt 4.5).

Testinstrument: Das physikalische Fachwissen wird mit einem Paper-Pencil-Test von Vogelsang et al. (2019) erhoben. Das Instrument setzt sich aus 48 Single-Choice Items zum Inhaltsbereich Mechanik zusammen. Dabei werden die Skalen SW, VSW und UW unterschieden. Die Bearbeitungszeit beträgt

50 Minuten. Die Daten aus den Erhebungen von Interventions- und Kontrollgruppe wurden vom ProfileP+-Projekt (vgl. Enkrott et al. 2019, Vogelsang et al. 2019) ausgewertet und in Form von Summenscores auf Skalenebene zur weiteren Analyse zur Verfügung gestellt. Für eine Analyse der Testgüte wird deshalb auf die entsprechenden Veröffentlichungen verwiesen (Vogelsang et al. 2019, S. 484). Dort zeigt sich, dass ein dreidimensionales Rasch-Modell die Datenstruktur angemessen beschreibt, d. h. eine Differenzierung in die Wissensbereiche SW, VSW und UW ist möglich. Für die drei Messzeitpunkte werden jeweils zufriedenstellende EAP-Reliabilitäten im Bereich von 0.65-0.84 berichtet (Vogelsang et al. 2019, S. 484). Eine Ausnahme bildet das UW zum ersten Messzeitpunkt mit einer Reliabilität von 0.57. Die Autor/innen führen dies auf den ersten Messzeitpunkt zurück, bei dem kein Wissen in diesem Wissensbereich zu erwarten ist (Vogelsang et al. 2019, S. 484).

Ablauf: Bei der längsschnittlichen Erhebung des Fachwissens wird das Testinstrument zu drei Messzeitpunkten eingesetzt (Abb. 2). Die Messzeitpunkte liegen jeweils etwa ein Jahr auseinander. Die erste Erhebung fand in der ersten Vorlesungswoche des ersten Fachsemesters statt. Um alle Erstsemesterstudierende zu erreichen, wurde die Erhebung an der PH Ludwigsburg in einer Veranstaltung durchgeführt, die von den Studierenden i. d. R. im ersten Semester besucht wird. Die Organisation der Erhebungen bei der Vergleichsgruppe wurde durch das ProfileP+-Projekt koordiniert. Die Erhebungszeitpunkte beider Gruppen sind vergleichbar, da den Vorgaben des ProfileP+-Projekts gefolgt wurde. Die Interventionsgruppe setzt sich aus den Kohorten zweier Jahrgänge zusammen, deren Daten zu einem Datensatz

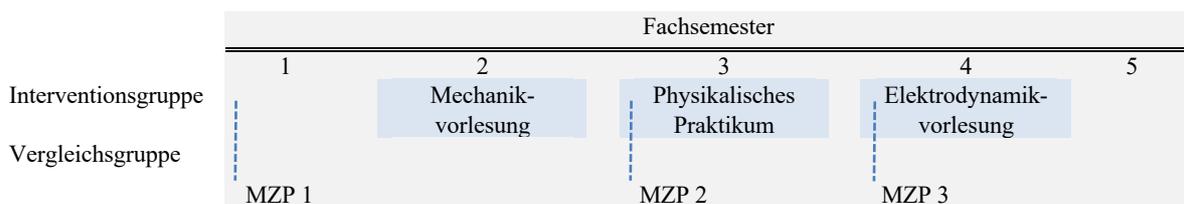


Abb. 2: Die nach den Leitlinien entwickelten Lehrveranstaltungen sind blau hinterlegt. Die Messzeitpunkte (MZP) liegen jeweils ein Jahr auseinander.

aggregiert sind. Der erste Messzeitpunkt der ersten (zweiten) Kohorte lag im Wintersemester 2016/17 (Wintersemester 2017/18). Die Lehrpersonen haben zwischen den Jahrgängen keine Änderungen an der Intervention vorgenommen. Bei der Vergleichsgruppe handelt es sich um eine Kohorte; der erste Messzeitpunkt lag im Wintersemester 2016/17.

4.5 Stichprobe

Die Interventionsgruppe (IG) umfasst $N = 22$ Studierende des Lehramtsstudiengangs Physik für die Sekundarstufe I der PH Ludwigsburg. Die Vergleichsgruppe (VG) setzt sich aus insgesamt $N = 665$ Studierenden des Physik-Lehramtsstudiengangs von zehn Hochschulstandorten in Deutschland und Österreich zusammen (Tab. 5). Die Studierenden der Vergleichsgruppe studieren das Physiklehramt für unterschiedliche Schularten; ein Großteil davon (ca. 90 %) belegt dabei das gymnasiale Lehramt. In diesem Merkmal unterscheidet sich die Vergleichsgruppe somit stark von der Interventionsstichprobe. Vorweg: Nach dem Stand der Forschung wäre zu erwarten, dass Physik-Lehramtsstudierende des gymnasialen Lehramts höhere Fachwissenszuwächse erreichen als Studierende des Sekundarstufen-1-Lehramts (vgl. Abschnitt 2). Da die Intervention zu einer Verbesserung des Lernerfolgs führen soll, würde der Effekt der Intervention in diesem Vergleich eher unterschätzt. Einer kursorischen Analyse der angebotenen Lernzeit zur Mechanik im Bachelor anhand der Credit Points (CP) im Modulhandbuch ergibt 12,0 CP bei der Interventionsstichprobe und 11,6 CP bei der Vergleichsstichprobe (Steinmetz 2021, S. 88). Die nominell vorgegebene Lernzeit zum Inhalt Mechanik ist somit vergleichbar.

Bei beiden Stichproben treten Stichprobenausfälle im Längsschnitt auf. Dabei sind die Ausfälle bei der Vergleichsgruppe besonders hoch (siehe Tab. 6). Von den insgesamt $N_{ges} = 665$ Proband/innen der Ausgangsstichprobe haben nur $N_{12} = 83$ an den ersten beiden und $N_{123} = 13$ auch an der dritten und somit an allen drei Erhebungen teilgenommen. Aufgrund der hohen Ausfälle handelt es sich bei der Vergleichsgruppe um keinen echten Längsschnitt. Da der

Vergleich aufgrund der Bedingungen der Intervention einen explorativen Charakter hat, können zur Abschätzung des Längsschnitts auch die Daten der unverbundenen Stichproben herangezogen werden; es handelt sich also um einen quasi-Längsschnitt.

5 Ergebnisse

5.1 Umsetzung der Leitlinien in der Mechanikvorlesung

Sichtstruktur: Die Mechanikvorlesung bestand aus klassischen Vortragsvorlesungen mit PowerPoint-Präsentationen und integrierten Übungen. Die Übungsphasen nahmen dabei etwa ein Drittel der Vorlesungszeit ein (Tab. 7, links).

Im Mittel wurden in jeder Vorlesung 4,3 Übungsaufgaben gestellt und bearbeitet. Diese Übungsaufgaben weisen die folgenden Formate auf (einige konkrete Beispiele folgen später):

- *Peer-Instruction mit Multiple-Choice-Aufgaben:* In Anlehnung an die Peer-Instruction-Methode von Mazur (2017 [1997], S. 10f.) werden in der Vorlesung Folien mit Multiple-Choice-Fragen eingeblendet. Die Studierenden beantworten die Fragen mit elektronischen Abstimmgeräten. Unmittelbar nach der Abstimmung wird die Verteilung der Antworten auf der PowerPoint-Folie angezeigt. Anschließend erhalten die Studierenden die Gelegenheit, ihre Sitznachbar/innen in einer Diskussionsphase von der Richtigkeit der eigenen Antwort zu überzeugen (*peer discussion*). Danach wird erneut abgestimmt; bleiben die Antworten der Studierenden überwiegend falsch, kann die Lehrperson gezielt auf Verständnisschwierigkeiten eingehen.
- *Worked-Example:* Nach der Methode von Sweller (2006) erhalten die Studierenden zunächst eine Beispielaufgabe mit einem Lösungsansatz zu einem bestimmten Aufgabentyp. Anschließend sollen die Studierenden wahlweise alleine oder in Partner/innenarbeit eine analoge Aufgabe bearbeiten. Eine Gruppe stellt ihre Lösungen vor.
- *Diskussionsaufgaben:* Die Studierenden erhalten qualitative Aufgabenstellungen, die in

Tab. 5: Stichprobenbeschreibung

	Alter			Abiturnote		Weibl.	Lehramt für ...
	N	MW	SD	MW	SD	%	
IG	22	22.0	4.0	2.5	0.6	36	Sek 1
VG	665	20.7	3.2	2.3	0.6	40	10 % Sek 1, 90 % Sek 2

Abkürzungen IG: Interventionsstichprobe, VG: Vergleichsgruppe, MW : Mittelwert, SD : Standardabweichung, Sek 1: Lehramt für Sekundarstufe 1 (Haupt-/Realschule), Sek 2: Lehramt für Sekundarstufe 2 (gymnasiales Lehramt)

Tab. 6: Anzahl Teilnehmender an den verschiedenen Messzeitpunkten

	N_{ges}	Stichprobengröße der Gesamtstichprobe			Stichprobengröße der verbundenen Stichprobe	
		N_1	N_2	N_3	N_{12}	N_{123}
IG	22	22	22	16	22	16
VG	665	378	372	65	83	13

N_{ges} : Größe der Gesamtstichprobe, N_i : Größe der Stichprobe zu MZP $i = \{1,2,3\}$; N_{12} : Verbundene Stichprobe zu MZP 1 und MZP 2; N_{123} : Verbundene Stichprobe zu MZP 1, MZP 2 und MZP 3

Kleingruppen von zwei bis vier Personen diskutiert werden sollen.

Am Häufigsten kamen die Diskussionsaufgaben zur Anwendung (1,9 Aufgaben pro Vorlesung), gefolgt von den Peer-Instruction-Aufgaben (1,6 Aufgaben pro Vorlesung) und den Worked-Examples (Tab. 7, rechts). Wir gehen damit davon aus, dass die kumulativen Leitlinien in der Vorlesung zur Mechanik mit integrierten Übungen umgesetzt wurden.

Tab. 7: Verteilung (links) und Häufigkeit der Übungsformate (rechts) in der Mechanikvorlesung

Zeitlicher Anteil		Häufigkeit der Übungsformen pro Vorlesung	
		MW (SD)	
Frontalvorlesung	67 %	Peer	1,6 (1,5)
Übungsphase	33 %	Instruction	
		Worked-Example	0,7 (1,4)
		Diskussion	1,9 (1,7)
		Summe	4,3 (3,1)

Kumulative Leitlinien in der Mechanikvorlesung: In Tabelle 8 ist die Häufigkeit der angewandten Leitlinien angegeben. Beispielsweise wurde pro Veranstaltung 1,5 Mal ein Schulbezug hergestellt. Mehrfachnennungen sind möglich; die Leitlinie Schulbezug wurde z. B. häufig bei typischen Übungsaufgaben aus der Schulphysik umgesetzt (vgl. auch Tab. 9, S. 12). Die hohen Standardabweichungen deuten an, dass der Ablauf der Vorlesungen variierte. Tabelle 9 zeigt exemplarisch, wie ein Vorlesungsabschnitt kategorisiert wurde (vgl. Beobachtungsbogen aus dem Anhang). Im Folgenden wird die Umsetzung jeder kumulativen Leitlinie mit einem typischen Beispiel illustriert.

i) *Ein Beispiel für die Leitlinie Wiederholtes Aufgreifen mechanischer Grundkonzepte (Abb. 3, Folie 5):* Die mechanischen Grundkonzepte werden in der Vorlesung eingeführt, z. B. das Kraftkonzept als dynamisches Kraftkonzept, und wie bekannt in den newtonschen Axiomen komprimiert dargestellt. Wiederholtes Aufgreifen bedeutet, ein Grundkonzept in einem neuen inhaltlichen Kontext sichtbar zu machen, indem es nicht nur formal und verkürzt verwendet, sondern wieder qualitativ und anschaulich angewandt wird. Die Vorlesungsfolie aus Abb. 3 zeigt ein Beispiel: Das zweite newtonsche Axiom wird beim Thema Kreisbewegungen erneut expliziert, indem der Zusammenhang von resultierender Kraft und vektorieller Geschwindigkeitsänderung anschaulich erläutert wird. Die Zentripetalkraft und die Zentripetalbeschleunigung werden dabei in der Vorlesung formal mathematisch abgeleitet und anschließend in Beispielen expliziert. Bei Folie 5 in Abb. 3 erfolgt zusätzlich eine qualitative Ableitung der Zentripetalkraft in Richtung und Betrag, indem Kraft und Geschwindigkeitsänderung in Beziehung gesetzt werden (auf der Folie

Tab. 8: Häufigkeit der Anwendung der kumulativen Leitlinien in der Mechanikvorlesung mit integrierten Übungen (Mehrfachnennungen pro Veranstaltung)

Kumulative Leitlinie	MW (SD)
Wiederholtes Aufgreifen	1,5 (1,9)
Alltagsvorstellungen	0,8 (1,5)
Variatenreiches Üben	4,3 (3,1)
Schulbezug	1,5 (2,3)

MW: Mittelwert, SD: Standardabweichung

nicht explizit sichtbar).³ Dies entspricht der Leitlinie des Wiederholten Aufgreifens nach folgendem, hier nur angedeutetem Schema: Eine resultierende Kraft führt zur Beschleunigung einer Masse in Richtung der resultierenden Kraft $\vec{a} = \frac{\vec{F}_{res}}{m} = \frac{\sum \vec{F}_v}{m}$. Im Spezialfall einer gleichförmigen Bewegung auf der Kreisbahn wird die Masse entlang der Bahn nicht schneller (der Geschwindigkeitsbetrag bleibt konstant), es ändert sich aber die Geschwindigkeitsrichtung. Somit muss der Beschleunigungsvektor an jedem Punkt der Bahn in Richtung Kreismittelpunkt zeigen. Für diesen Spezialfall wird die resultierende Kraft auch Zentripetalkraft genannt. Bei einer gleichförmigen Bewegung auf einer Kreisbahn wird auf eine Masse also immer eine Kraft in Richtung Kreismittelpunkt ausgeübt, die zur Änderung der Geschwindigkeitsrichtung führt. Eine solche Kraft kann z. B. über ein Seil auf die rotierende Masse ausgeübt werden oder bei einer Kurvenfahrt mit einem Fahrzeug von der Straße als Reibkraft.

In diesem Beispiel wurden das Beschleunigungskonzept (Änderung der Geschwindigkeitsrichtung) und das Kraftkonzept (die Beschleunigung ist proportional zur resultierenden Kraft) im Spezialfall der Kurvenfahrt qualitativ konkretisiert. Beide Grundkonzepte wurden also im Sinne der ersten Leitlinie wiederholt aufgegriffen.

ii) *Ein Beispiel für die Leitlinie variantenreiches Üben:* In der Vorlesung gibt es drei Übungsformate (Abschnitt 5.1): Peer-Instruction-, Worked-Examples- sowie Diskussionsaufgaben. Das Beispiel in Abb. 3, Folie 6 zeigt eine Multiple-Choice-Aufgabe, die nach der Methode der Peer-Instruction eine Peer-Discussion induzieren soll. Die Aufgabe fordert die Studierenden auf, im Anwendungskontext „Kreisbewegungen starrer Körper“ das zweite newtonsche Axiom anzuwenden. Die Aufgabe kann mit der Überlegung gelöst werden, dass der resultierende Kraftvektor im Falle einer Kreisbahn mit konstantem Geschwindigkeitsbetrag in die Kreismitte zeigt, weil sich die Geschwindigkeitsrichtung in diese Richtung ändert. Folie 6 in Abb. 3 enthält auch eine weiterführende offene Frage. Sie leitet zum Übungsformat Diskussionsaufgabe über. Mit ihr sollen die Studierenden das dritte newtonsche Axiom im Kontext der Kreisbewegung konkretisieren.

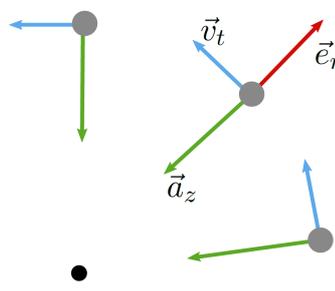
³ Die Anwendung der Leitlinie folgt nicht allein aus einer Analyse der Folie, weshalb eine ausführliche Beschreibung der Anwendung

aus der teilnehmenden Beobachtung zur Nachvollziehbarkeit notwendig ist.

Folie 5: Zentripetalkraft

Damit ein Körper der Masse m eine Kreisbahn mit Radius r und Geschwindigkeit v durchlaufen kann, ist eine Zentripetalkraft F_z erforderlich, die zur notwendigen Zentripetalbeschleunigung $\vec{a}_z = -r\omega^2\vec{e}_z = -v_t^2/r\vec{e}_z$ des Körpers führt.

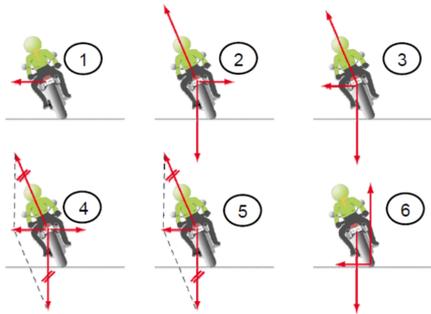
Mit dem zweiten newtonschen Axiom ergibt sich damit die benötigte Kraft zu $\vec{F}_z = m\vec{a}_z = -mr\omega^2\vec{e}_r = -mv_t^2/r\vec{e}_r$.



Folie 6: Peer-Instruction-Aufgabe

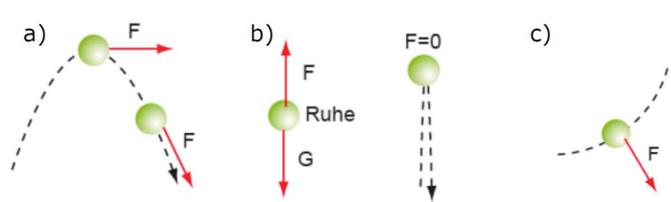
Welche Bilder zeigen sinnvolle Darstellungen von Kräften im Inertialsystem? Der Fahrer fährt eine Linkskurve mit konstantem Geschwindigkeitsbetrag.

Weiterführende Frage: Welches sind die Wechselwirkungspartner zu diesen Kräften?



Folie 27: Typische Alltagsvorstellungen

- Körper bewegen sich in Richtung der Kraft.
- Summe der Kräfte gleich null bedeutet Ruhe; Ruhe bedeutet, dass die Summe der Kräfte gleich null ist.
- Bei Kurvenbewegungen wirkt stets eine Zentrifugalkraft nach außen.



Folie 7: Schiefe Ebene

Für welche Alternative(n) würden Sie sich entscheiden? Diskutieren Sie auch die didaktischen Vor- und Nachteile.

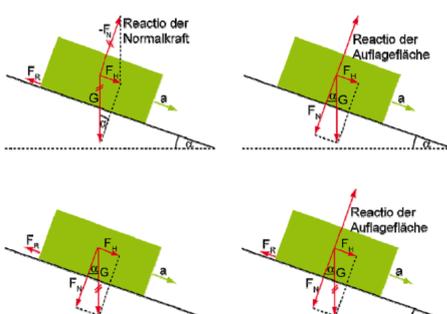


Abb. 3: Beispiele aus der Mechanikvorlesung zum Wiederholten Aufgreifen (Folie 5), Üben mit Peer Instruction (Folie 6), Alltagsvorstellungen (Folie 27) sowie Schulbezug (Folie 7)

Tab. 9: Auszug aus einer Kategorisierung der Vorlesung mit integrierten Übungen

Foliennummer	Kumulatives Lehrprinzip			
	Wiederholtes Aufgreifen	Alltagsvorstellung	Übung	Schulbezug
1			Diskussionsaufgabe (Kraft)	
5	Zweites newtonsches Axiom bei Kreisbewegungen (Kraft)			
6			Peer Instruction (Kraft)	Schultypische Aufgabe zur Vektordarstellung von Kräften (Kraft)
7				Beispielaufgabe zur Vektordarstellung von Kräften (Kraft)
27		Vorstellung: „Kräfte zeigen immer in Bewegungsrichtung“ (Kraft)		

Beispiel einer Kategorisierung aus der Vorlesung mit integrierter Übung zum Thema „Dynamik – Kraft und Bewegung“

iii) *Ein Beispiel für die Umsetzung der Leitlinie Alltagsvorstellungen:* Typische Alltagsvorstellungen werden in der Mechanikvorlesung mit zwei Methoden diskutiert. Die erste Methode besteht darin, typische Vorstellungen explizit zu zeigen. Dadurch erhalten die Studierenden die Gelegenheit, ggf. ihre eigenen Vorstellungen zu erkennen und zu reflektieren. Zum Beispiel wurden den Studierenden typische Vorstellungen zum Thema Kräfte gezeigt (vgl. Abb. 3, Folie 27). Diese Methode ist eher zeitökonomisch. Eine zweite Methode besteht darin, die Studierenden durch eine Übungsaufgabe gezielt mit einer möglichen Alltagsvorstellung zu konfrontieren. Die zweite Antwortmöglichkeit aus Abb. 3, Folie 6 wäre z. B. als Alltagsvorstellung plausibel: „Bei der Kurvenfahrt wird eine Kraft nach außen ausgeübt.“

iv) *Ein Beispiel für die Umsetzung der Leitlinie Schulbezug:* Die Studierenden bearbeiten in der Vorlesung Übungsaufgaben mit einem eindeutigen Bezug zur Schulphysik. Dies sind Aufgaben, die auch Schüler/innen im Physikunterricht gestellt werden könnten. Diese werden in der Vorlesung zusätzlich vertieft. Als Beispiel dient die schiefe Ebene; ein Standardbeispiel der Schulphysik (Abb. 3, Folie 7). Die Studierenden werden aufgefordert zu beurteilen, welche der Darstellungen eine fachlich und didaktisch sinnvolle Alternative darstellt. Unter fachlichen Gesichtspunkten ist z. B. zu beurteilen, ob das Modell des Massepunkts angewandt werden kann. Diese Aufgabe vertieft das Schulwissen: Kräfte bei der schiefen Ebene sollen richtig eingezeichnet (SW), die physikalische Modellgrenzen erkannt (VSW) und physikdidaktische Aspekte bedacht werden. Die Aufgabe ist als Diskussionsaufgabe formuliert.

5.2 Umsetzung der kumulativen Leitlinien im physikalischen Praktikum zu Schulversuchen der Mechanik

Die Versuchsanleitungen zu den Schulversuchen bilden bei der Praktikumsveranstaltung das Material der Analyse zur Bestimmung der angewandten Leitlinien. Insgesamt erhalten die Studierenden vier Versuche mit mechanischen Inhalten, die in Zweiergruppenarbeit mit festen Teams zu bearbeiten sind. Für die Versuche erhalten die Studierenden Versuchsanleitungen mit Aufgaben. Der Ablauf der Veranstaltung folgt einem festen Schema (Beispiele folgen unten):

(1) *Vorbereitungsphase (zu Hause):* Die Versuchsanleitung besteht aus dem Aufbau des Experiments sowie einer Verständnisaufgabe, die zu Hause schriftlich zu beantworten ist und in der Veranstaltung besprochen wird.

(2) *Experimentierphase (im Praktikum):* Das Experiment ist in zu zweit durchzuführen. Anschließend sollen die Studierenden ihre Experimente vorstellen.

(3) *Nachbereitungsphase mit Kontrollaufgaben (im Praktikum):* Nach der Durchführung erhalten die Studierenden Kontrollfragen, die typische Alltagsvorstellungen zur Thematik problematisieren.

(4) *Nachbereitungsphase mit schultypischen Aufgaben (im Praktikum):* Die Studierenden erhalten weitere Aufgaben zur Bearbeitung, die einen Bezug zum Experiment auf Schulniveau haben.

Die Phasen 2-4 erstrecken sich insgesamt über drei Veranstaltungstermine (3 Mal 90 Minuten). Die dabei durchgeführten Experimente fasst Tab. 10 zusammen; es sind die jeweiligen mechanischen Grundkonzepte angegeben. Die Anleitungen lassen dabei offen, wie die Messungen durchzuführen sind (z. B. ist von den Studierenden zu entscheiden, wie die Kräfte beim Fahrrad-Versuch gemessen werden könnten). Im

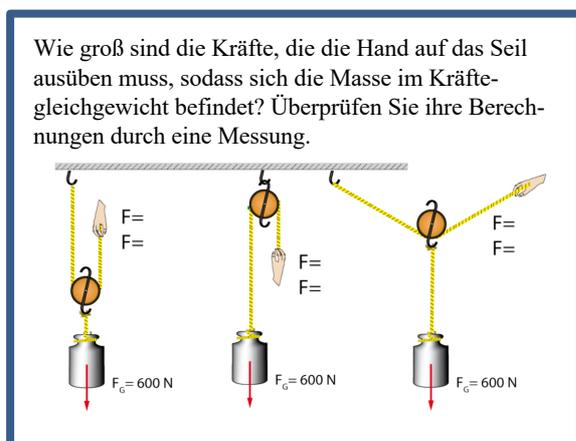
Tab. 10: Durchgeführte Versuche und kumulativ aufgegriffene Grundkonzepte im physikalischen Praktikum

Versuch	Beschreibung des Versuchs	Grundkonzepte
Fahrrad	Messung der Kraft, die bei der Beschleunigung eines Fahrrads aus der Ruhe mit verschiedenen Übersetzungen notwendig ist.	Drehmoment, Kraft, Energie
Stöße	Die Wirkung von elastischen und unelastischen Stößen zweier Modellfahrzeuge werden anhand von Geschwindigkeiten und Verformungen qualitativ untersucht. Dies erfolgt anhand von Videoaufnahmen.	Impuls, Kraft, Energie
Flaschenzug	Wirkende statische Kräfte an verschiedenen Punkten eines Potenzflaschenzugs werden gemessen.	Kraft, Energie
Hebel	Bei einem sogenannten Kellner-Korkenzieher sollen beim Öffnen einer Flasche die Kräfteverhältnisse gemessen werden.	Drehmoment, Kraft, Energie

Folgendes wird die Umsetzung der Leitlinien exemplarisch anhand typischer Beispiele beschrieben.

Ein Beispiel für die Leitlinien ‚Wiederholtes Aufgreifen‘ und ‚variantenreiches Üben‘: Die Vorbereitungsaufgaben zu den Experimenten enthalten Prompts (Aufforderungen) für eine qualitative Anwendung der mechanischen Grundkonzepte. Zum Beispiel lautet die Aufgabenstellung zur Vorbereitung auf das Hebeleperiment (siehe Tab. 10; das Prompt ist unterstrichen): *„Ein Korken wird mit einem Korkenzieher gezogen. Dabei bleibt die Flasche in Ruhe, der Korken soll sich gleichförmig bewegen und die Kraft, welche die Hand auf den Korkenzieher ausübt, soll möglichst klein sein. Klären Sie für den abgebildeten Zeitpunkt die Verhältnisse aller wesentlichen Kräfte. Fertigen Sie eine geeignete Skizze an und argumentieren Sie schriftlich. Gehen Sie bei Ihrer Argumentation auf die drei newtonschen Axiome ein.“* Durch diese Aufforderung erfolgt eine Fokussierung auf das Grundkonzept, das qualitativ anzuwenden ist und insofern im kumulativen Sinne zur Elaboration der Konzepte der Studierenden beitragen kann.

Ein Beispiel für die Anwendung der Leitlinie *Alltagsvorstellungen im Praktikum mechanische Schulversuche*: Die Kontrollfragen nach der Durchführung der Experimente enthalten immer die Aufforderung, zu verschiedenen Aussagen Stellung zu nehmen.


Abb. 4: Aufgabe aus dem Praktikum mechanische Schulversuche mit Schulbezug zum Experiment ‚Flaschenzug‘

Das folgende Beispiel bezieht sich auf ein Experiment zum Fahrradgetriebe (siehe Tab. 10): *„Welche der Aussagen zum Experiment sind richtig? 1) Die Kraft, die das Hinterrad auf die Straße ausübt, beschleunigt das Fahrrad samt Fahrer. 2) Während der Beschleunigungsphase des Fahrrads ändert sich der Impuls der Erde im Vergleich zum Impuls des Fahrrads praktisch nicht.“* Dabei werden typische Alltagsvorstellungen problematisiert, z. B. bei der ersten Aussage die Vorstellung einer Beschleunigungskraft des „aktiven“ Fahrzeugs.

Ein Beispiel für die Leitlinie *Schulbezug*: Zusätzlich zu den Kontrollaufgaben erhalten die Studierenden typische Aufgaben aus der Schulphysik der Sekundarstufe 1. Die Beispiele aus Abb. 4 behandeln einfache Flaschenzüge, wie sie auch in der Schule behandelt werden könnten.

5.3 Umsetzung der kumulativen Leitlinien in der Elektrodynamikvorlesung

Auch in der Elektrodynamikvorlesung werden – wenn passend – mechanische Grundkonzepte kumulativ aufgegriffen. Dies ist nur exemplarisch möglich, da eine Vorlesung zur Elektrodynamik die Anwendung mechanischer Inhalte zeitlich und inhaltlich beschränkt. Die Intervention findet nur in den Übungen zur Elektrodynamikvorlesung statt. Die entsprechenden Übungsaufgaben zur Vorlesung, die einen kumulativen Bezug zur Mechanik aufweisen, bilden deshalb das Material der Analyse. Die Studierenden erhalten insgesamt sechs Aufgaben zum Kraftkonzept im Anwendungskontext Elektrodynamik (Tab. 11). Abbildung 5 zeigt ein Beispiel: Das zweite und dritte newtonsche Axiom sollen bei geladenen Teilchen elementar angewandt werden. In traditionellen Fachveranstaltungen werden im Kontext der Elektrodynamik oft Bewegungsgleichungen für geladene Teilchen in elektromagnetischen Feldern aufgestellt, ohne qualitativ auf das Kraftkonzept einzugehen. Mit dem Beispiel aus Abb. 5 sind die Studierenden dazu aufgefordert, das Wechselwirkungsprinzip in diesem neuen fachlichen Kontext anzuwenden.

Protonen, einfach positiv geladene Deuteriumkerne und doppelt positiv geladene Heliumkerne wurden zu vier voneinander unabhängigen Anordnungen zusammengestellt. Auf der linken Seite sehen Sie die Pfeildarstellungen der Beschleunigungen von zwei Protonen im angegebenen Abstand als Folge der Coulombkräfte als Beispiel. Welches der Bilder rechts davon zeigt weitere richtige Darstellungen der Beschleunigungen?

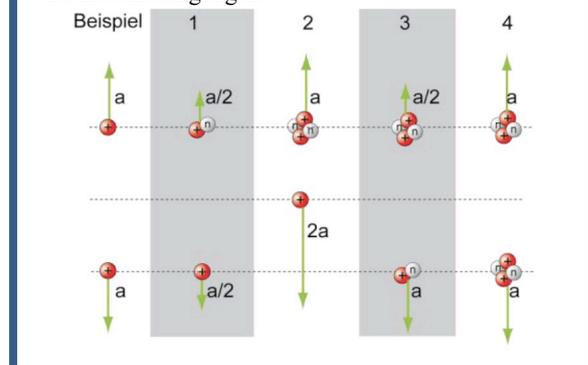


Abb. 5: Wiederholtes Aufgreifen des mechanischen Grundkonzepts Kraft in einer Übungsaufgabe zur Elektrodynamikvorlesung

Tab. 11: Übungsaufgaben in der Elektrodynamikvorlesung mit Grundkonzept Kraft

Aufgabe	Aspekt des Kraftkonzepts
(1) Coulombkräfte bei geladenen Teilchen	Wechselwirkungsprinzip, Actio/Reactio-Kräfte
(2) Beschleunigung als Folge von Coulombkräften	Beschleunigung bei Actio/Reactio-Paaren
(3) Elektrische Feldstärke an Oberflächen	Zweites newtonsches Axiom
(4) Feld einer geladenen Kugel	Zweites newtonsches Axiom und Impulsänderung
(5) Kräfte im Plattenkondensator	Zweites und drittes newtonsches Axiom
(6) Bahnkurven im elektrischen Feld	Zweites newtonsches Axiom und Impulsänderung

5.4 Ergebnisse der Vergleichsstudie zum Fachwissenserwerb

Interventions- und Vergleichsgruppe weisen im Längsschnitt über die ersten beiden Messzeitpunkte signifikante Fachwissenszuwächse in allen Skalen (SW, VSW und UW) auf (Tab. 12). Die Daten der Gesamtstichprobe (Gesamtheit aus Interventions- und Vergleichsgruppe) sind dabei auf den ersten Messzeitpunkt normiert ($MW = 1.00$, $SD = 0.20$).⁴ Aufgrund der geringen Stichprobengröße bei der Interventionsgruppe sind die Bedingungen für einen t-

Test nicht erfüllt (vgl. Clauß et al. 2011, S. 236). Deshalb wurde ein nicht-parametrischer Test für verbundene Stichproben (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen) verwendet. Die Vergleichsgruppe weist hohe Stichprobenausfälle auf (vgl. Abschnitt 4.6), weshalb bei ihr keine Paardifferenzen gebildet wurden. Stattdessen wurde bei der Vergleichsgruppe mit einem t-Test für unverbundene Stichproben gerechnet, d. h. die Daten der Vergleichsgruppe sind als quasi-Längsschnitt anzusehen.

Zu Beginn des Evaluationszeitraums (erster Messzeitpunkt [MZP]) unterscheiden sich die Gruppen in keiner Skala signifikant (Tab. 14). Damit scheint bei beiden Gruppen ein vergleichbares physikalisches Vorwissen vorhanden zu sein. Unterschiede zeigen sich jedoch bei einem Vergleich der längsschnittlichen Fachwissenszuwächse anhand der Effektstärken (Cohens d , vgl. auch Abb. 6, S. 16): Das SW nimmt bei der Interventionsgruppe zwischen den ersten beiden Messzeitpunkten stärker zu ($d = 1.2$) als bei der Vergleichsgruppe ($d = 0.8$).⁵ Auch nach dem zweiten Messzeitpunkt (d. h. nach der Mechanikvorlesung) nimmt das SW bei der Interventionsgruppe weiter zu ($d = 1.7$ von MZP1 zu MZP3, vgl. Tab. 13), wohingegen bei der Vergleichsgruppe nach dem zweiten Messzeitpunkt kein signifikanter Wissenszuwachs auftritt.

Auch das VSW wächst bei der Interventionsgruppe zunächst mit größerer Effektstärke an ($d = 0.8$) als bei der Vergleichsgruppe ($d = 0.4$). Es nimmt bei der Interventionsgruppe am MZP3 im Vergleich zum MZP2 leicht ab; diese Abnahme ist aber nicht signifikant, während es bei der Interventionsgruppe weiter zunimmt. Damit zeigt die Vergleichsgruppe am dritten Messzeitpunkt gemessen am MZP1 einen vergleichbaren Zuwachs der Testleistung wie die Interventionsgruppe ($d = 0.7$).

Das UW nimmt bei beiden Gruppen zunächst signifikant mit einer großen Effektstärke zu: mit $d = 0.9$ bei der Interventionsgruppe und $d = 0.8$ bei der Vergleichsgruppe. Dabei weist die Vergleichsgruppe nominell höhere Testleistungen auf. Nach dem zweiten Messzeitpunkt nimmt das UW bei beiden Gruppen weiter zu, bei der Vergleichsgruppe jedoch mit größerer Effektstärke: den ganzen Evaluationszeitraum zwischen MZP1 und MZP3 betrachtend mit $d = 0.9$ bei der Interventionsgruppe und $d = 1.3$ bei der Vergleichsgruppe.

Zusammenfassend gesagt, erwerben die Studierenden der Interventionsgruppe SW und VSW effektiv. Beim SW unterscheidet sich das Niveau beider Stichproben zum dritten Messzeitpunkt signifikant (Tab. 14). Auch die beiden Veranstaltungen nach MZP2 scheinen somit – anders als mögliche fachliche Veranstaltungen bei der Vergleichsgruppe – zum schulischen

⁴ In Absprache mit dem Projektpartner ProfileP+ wird auf eine Veröffentlichung der absoluten Werte verzichtet.

⁵ In Anlehnung an Cohen (1988) werden Effektstärken im Bereich $0.2 < d < 0.5$ als kleine Effekte, im Bereich $0.5 < d < 0.8$ als

mittlere Effekte und im Bereich $d > 0.8$ als große Effekte bezeichnet.

Tab. 12: Fachwissenszuwächse zwischen dem ersten und dem zweiten Messzeitpunkt

Interventionsgruppe (verbunden)									
Skala	MZP 1 (N=22)		MZP 2 (N=22)		Vergleich		Wilcoxon-Test		
	MW	SD	MW	SD	Δ	d	z	p	
SW	0.99	0.17	1.19	0.16	0.20	1.24	-3.38	.001	
VSW	1.02	0.22	1.20	0.24	0.18	0.80	-1.57	.010	
UW	0.94	0.19	1.12	0.23	0.18	0.87	-7.68	.005	

Vergleichsgruppe (quasi-Längsschnitt)									
Skala	MZP 1 (N=378)		MZP 2 (N=372)		Vergleich		t-Test		
	MW	SD	MW	SD	Δ	d	T	df	p
SW	1.00	0.20	1.13	0.21	0.13	0.65	8.9	748	<.001
VSW	1.00	0.20	1.08	0.23	0.08	0.37	5.1	748	<.001
UW	1.00	0.20	1.18	0.25	0.18	0.77	10.9	748	<.001

MW: Mittelwert, SD: Standardabweichung, Δ : Differenz der Mittelwerte, d : Effektstärke nach Cohen

Tab. 13: Fachwissenszuwächse zwischen dem ersten und dem dritten Messzeitpunkt

Interventionsgruppe (verbunden)									
Skala	MZP 1 (N=16)		MZP 3 (N=16)		Vergleich		Wilcoxon-Test		
	MW	SD	MW	SD	Δ	d	z	p	
SW	0.97	0.17	1.27	0.16	0.29	1.76	-3.57	<.001	
VSW	1.04	0.22	1.13	0.24	0.09	0.36	-1.06	.29	
UW	0.93	0.22	1.15	0.28	0.21	0.83	-2.21	.027	

Vergleichsgruppe (quasi-Längsschnitt)									
Skala	MZP 1 (N=378)		MZP 3 (N=65)		Vergleich		t-Test		
	MW	SD	MW	SD	Δ	d	T	df	p
SW	1.00	0.20	1.12	0.20	0.12	0.61	4.6	441	<.001
VSW	1.00	0.20	1.14	0.24	0.14	0.66	4.9	441	<.001
UW	1.00	0.20	1.27	0.24	0.27	1.28	9.5	441	<.001

MW: Mittelwert, SD: Standardabweichung, Δ : Differenz der Mittelwerte, d : Effektstärke nach Cohen

Tab. 14: Vergleich der Testleistungen beider Gruppen auf signifikante Unterschiede (t-Test)

Skala	Messzeitpunkt 1			Messzeitpunkt 2			Messzeitpunkt 3		
	T	df	p	T	df	p	T	df	p
SW	-0.230	398	.818	1.371	392	.189	2.784	79	<.01
VSW	0.453	398	.650	2.372	392	<.05	-1.149	79	.882
UW	-1.371	398	.171	-1.098	392	.273	-1.733	79	.087

T : Prüfgröße des t-Tests, df : Freiheitsgrad

Wissen beizutragen. Das VSW nimmt jedoch in den beiden Veranstaltungen nach MZP2 (physikalisches Praktikum und Elektrodynamik) ab. Der höhere Fachwissenszuwachs im UW der Vergleichsstichprobe ist plausibel, da sich die Vergleichsstichprobe überwiegend aus Sek-2-Lehramtsstudierenden zusammensetzt. In deren besuchten Fachvorlesungen dürfte das UW im Fokus liegen. Dieser Befund geht konform mit den Evaluationszielen einher. Bei der Vergleichsstichprobe stellt sich nach Datenlage insbesondere kein besonders hoher *Trickle-down*-Effekt von VSW und UW auf SW ein: Das VSW und UW nehmen zu, während das SW im Vergleich zum MZP 2 auf konstantem Niveau bleibt. Es bleibt offen, ob die Zunahme des VSW bei der Vergleichsgruppe ein *Trickle-down*-Effekt oder ein direkter Lerneffekt ist.

6 Zusammenfassung und Diskussion

6.1 Bewertung der Evaluationsergebnisse nach Datenlage

Mit dem Ziel, das Physik-Lehramtsstudium mehr an seiner Profession zu orientieren, haben John &

Staraschek (2020) theoriebasiert Leitlinien für die inhaltliche Ausrichtung der physikalischen Hochschullehre im Lehramtsstudium Physik entwickelt. Insbesondere sollte dabei schulisch relevantes, physikalisches Wissen

mit explizit daran ausgerichteten Lerngelegenheiten erworben werden. Die Evaluationsstudie untersucht zuerst, wie die Lehrpersonen der PH Ludwigsburg diese Leitlinien zur Weiterentwicklung ihrer Physikveranstaltungen nutzten und welche Wirkung diese Weiterentwicklung auf den physikalischen Fachwissenwerb der Studierenden hatte. Die folgende Diskussion konzentriert sich auf den zweiten Teil, weil aufgrund der Beobachtungsdaten davon ausgegangen wird, dass die Leitlinien ausreichend umgesetzt wurden. Der größte Teil der angebotenen Lehr- und Lernzeit – und damit der Schwerpunkt der Intervention – liegt dabei auf einer 6-SWS-Mechanikvorlesung mit integrierten Übungen. Die Daten zum Fachwissenwerb deuten darauf hin, dass die Intervention dort mit großem Effekt wirksam war: SW und VSW nehmen bei der Interventionsgruppe etwa mit doppelter

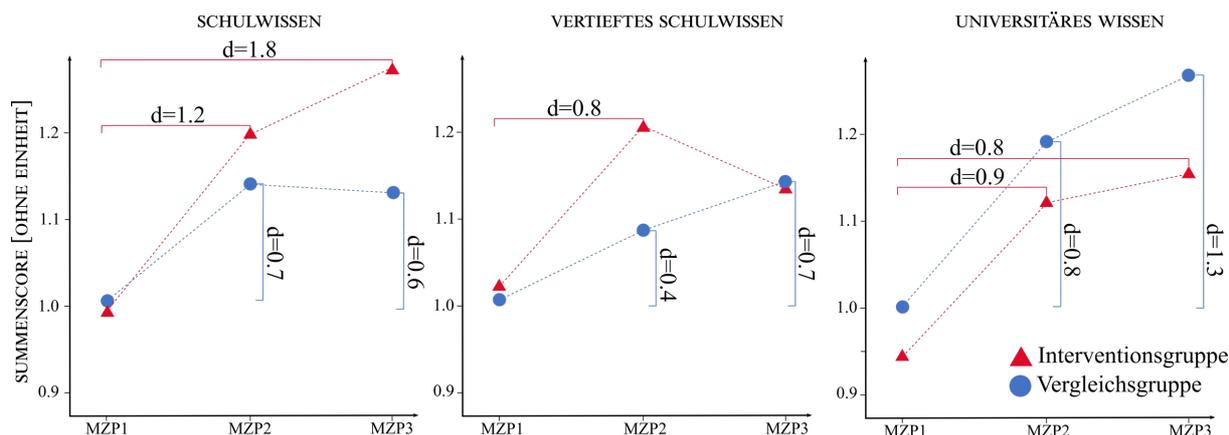


Abb. 6: Ergebnisse der Längsschnittstudie.
Effektstärken d nach Cohen sind nur für signifikante Fachwissenszuwächse angegeben.

Effektstärke im Vergleich mit der Vergleichsstichprobe zu. Auch nach der Mechanikvorlesung wächst das SW weiter an, d. h. die Intervention erweist sich auch in den beiden folgenden Veranstaltungen – einem Praktikum zu Schulexperimenten in der Mechanik sowie einer Elektrodynamikvorlesung – als wirksam für den Schulwissenserwerb. Als nicht wirksam erweisen sich diese beiden Folgeveranstaltungen hingegen beim VSW. Verbesserungen durch Maßnahmen, die das VSW stärker in den Fokus nehmen, wären deshalb erstrebenswert.

Damit erweist sich das kumulative Lehr- und Lernmodell als ein wirksamer Ansatz für eine professionsorientierte Physik-Lehrmatsausbildung. Die angebotene Lernzeit bei beiden Gruppen kann dabei als vergleichbar angesehen werden. Nach den gegenwärtigen Ergebnissen der Evaluationsstudie lautet die Empfehlung, die Intervention an der PH Ludwigsburg beizubehalten und auf andere Lehrveranstaltungen zu übertragen. Faktoren, die die Intervention begünstigt haben könnten, können nicht ausgeschlossen werden. Möglich wäre z. B. ein positiver Effekt der institutionellen Rahmenbedingungen einer Pädagogischen Hochschule auf die Intervention aufgrund des Fokus der Hochschule auf das Lehramt, da die Lehre u. U. einen höheren Wert haben könnte. Um eine Bewertung der Verallgemeinerbarkeit unseres Falles – auf der Ebene der Lehrpersonen liegt ja überwiegend ein Einzelfall vor, da der Schwerpunkt der Intervention von einer Person gestaltet wurde – vornehmen zu können (vgl. 6.3), wird zunächst die interne Validität diskutiert, d. h. inwieweit die Evaluationsergebnisse als kausaler Effekt der Intervention angesehen werden können (vgl. 6.2).

6.2 Interne Validität: Sind die Evaluationsergebnisse kausal auf die Wirkung der Intervention zurückführbar?

Ein Evaluationsergebnis gilt als intern valide, wenn es erstens keine Alternativhypothesen gibt, die das Ergebnis besser erklären, und es sich zweitens mit den theoretischen Erwartungen deckt (vgl. Bortz & Döring 2007, S. 53). Da die kumulativen Leitlinien

theoriebasiert entwickelt wurden – die angewandte Theorie basiert auf empirischen Arbeiten der Lernpsychologie –, kann Letzteres angenommen werden. Ein wichtiger Faktor, der die Ergebnisse beeinflussen könnte, sind Selektionseffekte; Stichproben in quasi-experimentellen Studiendesigns wie dem unsrigen sind nicht randomisiert. Bei der Evaluation wurden Vollerhebungen mit zwei Kohorten durchgeführt; dadurch dürften bei der Interventionsgruppe kaum Selektionseffekte für die Stichprobe auftreten. Die Stichprobe bildet die lokale Studierendenschaft ab.

Offen ist, inwieweit die Stichprobe für alle Pädagogische Hochschulen repräsentativ ist oder Standortunterschiede durchschlagen könnten. Für eine Repräsentativität spricht, dass die Gemeinsamkeiten zwischen den Standorten hoch sind. Für die unverbundene Vergleichsgruppe können Selektionseffekte im Prinzip ausgeschlossen werden, da die Proband/innen einen Querschnitt von zehn Hochschulstandorten abbilden. Ungeklärt bleibt, ob die universitäre Gruppe der Sek-1-Studierenden anderer Bundesländer mit der Interventionsgruppe vergleichbar ist.

Wie sind die Stichprobenausfälle im Längsschnitt zu bewerten? Die Ausfallrate bei der Interventionsgruppe beträgt zwar 0 % zwischen den ersten beiden Messzeitpunkten, jedoch 23 % zwischen erstem und drittem Messzeitpunkt. Die Daten der Interventionsstudie sind somit nur für den ersten Evaluationszeitraum ohne Einschränkung belastbar. Es zeigt sich weiter, dass die Stichprobenausfälle der Interventionsgruppe durch Studienabbrüche verursacht sind; daher sind die Ergebnisse auch für den zweiten Evaluationszeitraum als typisch zu bewerten. Bei der Vergleichsgruppe treten hingegen zwischen allen Messzeitpunkten sehr hohe Stichprobenausfälle auf. Die Ausfälle sind dabei teilweise „invers“, d. h. einige Studierende haben nur am zweiten und dritten, nicht aber am ersten Messzeitpunkt an der Erhebung teilgenommen. Ein Großteil der Proband/innen hat nur an einem der drei Messzeitpunkte an der Erhebung teilgenommen. Konkret: An den ersten beiden Messzeitpunkten nahmen 13 %, an allen drei 2 % der vollen Vergleichsstichprobe ($N = 665$) teil.

Aufgrund dieser hohen Ausfallrate wurde die Vergleichsstichprobe als quasi-Längsschnitt bewertet und dementsprechend statistisch untersucht, d. h. die Fachwissenszuwächse wurden anhand von Mittelwertvergleichen und nicht über die Bildung von Paardifferenzen bestimmt. Dies könnte zu einem Selektionseffekt geführt haben, der dadurch entsteht, dass schwächere Studierende, die später das Studium abgebrochen haben, im ersten Messzeitpunkt überrepräsentiert sind. Dies würde jedoch eher zu einer Überschätzung des Fachwissenszuwachses bei der Vergleichsstichprobe führen und steht somit nicht im Widerspruch zum zentralen Evaluationsergebnis.

Ein weiterer Stichprobeneffekt ist auf den Studiengang zurückzuführen: Ein Großteil der Studierenden der Vergleichsgruppe studiert gymnasiales Lehramt (ca. 90 %), während die Studierenden der Interventionsgruppe das Lehramt für Haupt- und Realschule studieren. Nach dem Stand der Forschung (Abschnitt 2) wäre ohne Intervention zu erwarten, dass Studierende des gymnasialen Lehramts höhere Fachwissenszuwächse auf allen Wissensniveaus aufweisen. Vor diesem Hintergrund wäre der deutlich höhere Fachwissenszuwachs im SW und VSW seitens der Interventionsgruppe als kausaler Effekt durch die Intervention ebenfalls eher unterschätzt. Auch dieser Effekt würde dem zentralen Evaluationsergebnis daher nicht widersprechen.

Einen weiteren Einfluss auf das Evaluationsergebnis und damit eine Relativierung der Wirkung des Modells könnte in der Überlagerung der Intervention mit anderen Faktoren guter Hochschul- oder universitärer Lehre liegen. Wir gehen davon aus, dass die Anwendung der kumulativen Leitlinien in einer Hochschul- oder universitären Lehre schon auf eine hohe Qualität trifft oder eine bessere induziert. Diese Annahme wollen wir für den Fall der möglichen induktiven Wirkung der Leitlinien kursorisch reflektieren. Dazu übertragen wir die Modelle guten Schulunterrichts auf eine gute universitäre Lehre – dieser Ansatz ist zumindest heuristisch akzeptabel. Für die Schule lassen sich in großer Übereinstimmung der bisherigen Forschung drei Basisdimensionen der Unterrichtsqualität identifizieren (z. B. Clausen et al. 2003, S. 138 sowie Steffensky & Neuhaus 2018). Gleichzeitig ist die genaue Operationalisierung der Basisdimensionen in den Studien unterschiedlich (Steffensky & Neuhaus 2018, S. 309). Weiterhin ist die Benennung der drei Basisdimensionen zum Teil ebenfalls uneindeutig, jedoch lassen sich die gemeinsamen Nenner erkennen. Wir benennen die drei

Teildimensionen mit den Termini (1) *Klassenführung*, (2) *kognitive Aktivierung* – in Übereinstimmung mit Steffensky & Neuhaus (2018, S. 302) – sowie in Anlehnung an Klieme et al. (2001) (3) *Lernendenorientierung* (im Original Schülerorientierung):⁶

(1) *Klassenführung*: Grob gesagt bedeutet dies, dass Lehrpersonen gut mit Störungen im Unterricht umgehen und dem Unterricht eine klare Struktur geben können. Da die universitäre Lehre mit Erwachsenen stattfindet, kann eine gute Klassenführung als gegeben angenommen werden. Diese Basisdimension sollte für eine gute Lehre eine untergeordnete Rolle spielen.

(2) *Kognitive Aktivierung*: Eine hohe kognitive Aktivierung sollte sowohl in den integrierten Übungen der Mechanikvorlesung als auch im Praktikum zur Mechanik der Interventionsgruppe durch die dort angewendeten Methoden gegeben sein. Auch dies wird durch die Leitlinien angeregt und induziert; insbesondere die Konfrontation mit den eigenen Alltagsvorstellungen. Traditionelle Physikveranstaltungen weisen typischerweise die Übungen als Tutorien aus. Demgegenüber bieten die integrierten Übungen der evaluierten Vorlesung den Studierenden zeitnah Gelegenheiten, die neuen Inhalte kognitiv zu verarbeiten. Dabei wurden drei Übungsformate genutzt: Peer-Instruction, Worked-Example sowie Diskussionsaufgaben mit Aufforderung zur Selbsterklärung. Alle drei Formate zeichnen sich durch eine hohe Wirksamkeit aus (Mazur 2017, Renkl et al. 2004, Slavin 1995, 2009) und gelten als kognitiv aktivierend. Insbesondere sollten bei allen drei Methoden mehr oder weniger Selbsterklärungen (z. B. Wylie & Chi 2014) induziert werden, die kognitiv aktivierend sind.

(3) *Lernendenorientierung*: Typische naturwissenschaftliche Lehrveranstaltungen an Universitäten gelten nicht als lernendenorientiert, sondern als inhaltsorientiert und lehrendenzentriert (vgl. Lübeck 2011). In dieser Intervention kann dagegen eine hohe Lernendenorientierung angenommen werden, da erstens die Leitlinien fordern, die Alltagsvorstellungen der Studierenden aufzuarbeiten und zweitens der Schulbezug den zukünftigen professionellen Bedürfnissen der Lernenden entspricht. Den Studierenden wird also ein Angebot unterbreitet, bei dem es um ihren zukünftigen Beruf geht und nicht nur um reine Fachlichkeit. Zudem können die Studierenden an ihren eigenen Alltagsvorstellungen arbeiten. Eine latente emotionale Dimension, die wir bisher nicht diskutiert und auch nicht untersucht haben, die aber insbesondere hier eine Rolle spielen könnte, ist eine mögliche

⁶ Steffensky & Neuhaus (2018, S. 302) bezeichnen die Dimension der Lernendenorientierung nach Sichtung der Literatur als emotionale Unterstützung (Unterrichtsklima). Zum einen ist nach unserer Einschätzung die Forschungslage zu den emotionalen Komponenten uneindeutig, auch wenn für uns der Einfluss des Faktors Emotionen und der Qualität der sozialen Beziehungen in den Lerngruppen selbst völlig plausibel ist. Zum anderen ist für uns die Bezeichnung Lernendenorientierung passender, da sie auf die Lehrendenperspektive fokussiert. Eine von den Lernenden wahrgenommene

Lernendenorientierung – populär gesagt: wenn Lernenden klar wird, dass es um sie geht – kann die Annahme dieses Angebots zu einer wahrgenommenen emotionalen Unterstützung führen. Da es darüber hinaus um alle Lernenden gehen soll, sollte sich dies im Unterrichtsklima widerspiegeln. Zusammenfassend gesagt: Hier soll es nur um eine argumentative Rechtfertigung einer Bezeichnung eines komplexen Phänomens gehen, das auch anders bezeichnet werden kann und wird.

empfundene Abwertung der Lehramtsstudierenden an den Universitäten durch die lehrenden und angehenden Fachphysiker/innen (vgl. Merzyn 2004 sowie für die MINT-Fächer insgesamt Carstensen et al. 2021), die an den Pädagogischen Hochschulen weniger verbreitet sein könnte. Dies erklärt aber nicht das Muster der Unterschiede im SW und UW.

Diese kursorische argumentative Analyse spricht dafür, dass die Umsetzung der Leitlinien in der Intervention auch die Qualität der Lehre nach den Basisdimensionen erhöht hat. Die Intervention könnte also zu einer guten Lehre beigetragen haben und einen Teil des Effekts erklären. Unbeantwortet ist die Frage, inwieweit sich die Merkmale guter universitärer Lehre in den traditionellen Fachvorlesungen der Vergleichsgruppe finden. Ungeachtet der Vielzahl der möglichen Faktoren gilt bei der Bewertung des Einflusses guter Lehre das schon Gesagte: Sie erklärt das Muster der Unterschiede im SW und UW zwischen den Gruppen ohne Zusatzannahmen nicht.

Die Unterschiede beim Fachwissenszuwachs im SW und VSW zwischen den Stichproben lassen sich mit der Annahme, dass die verfügbare Lehr- und Lernzeit bei der Intervention anders genutzt wurde, einfach erklären – eben für das intendierte Lernen von SW und VSW. Dies ist in der Umkehrung ein wichtiges Ergebnis, denn es bedeutet, dass das Lehren von universitärem Wissen nicht ausreichend effektiv zu einem hohen schulrelevanten Fachwissen führt und damit keine effektive *Trickle-down-Wirkung* vorliegt. Es wäre also empfehlenswert, das schulrelevante Fachwissen in einem Lehramtsstudium Physik stärker als Lehr- und Lernziel in den Fokus zu nehmen.

6.3 Externe Validität: Sind die Evaluationsergebnisse verallgemeinerbar?

Fragen der externen Validität untersuchen, ob die Intervention auch unter anderen Umständen wirksam wäre. Ein Aspekt der externen Validität ist dabei die sogenannte ökologische oder Situationsvalidität (vgl. Bortz & Döring 2007, S. 53). Die Intervention wurde unter den Normalbedingungen der universitären Lehre evaluiert – es liegt also insbesondere keine Variablenkontrolle vor, wie sie bei experimentellen Studien angewandt wird; damit ist die ökologische Validität nicht eingeschränkt.

Jede Intervention ist im Grunde eine zweistufige Intervention (in der Literatur auch als „doppelte Angebots-Nutzungsstruktur“ bezeichnet, vgl. Breuer et al.

2022, S. 9): Lehrende setzen ein „fremd-entwickeltes“ Lehr-Modell um. Somit sind nicht nur die Studierenden (erste Stufe), sondern auch die Lehrpersonen (zweite Stufe) Teilnehmende einer Intervention. Bei der vorliegenden Evaluationsstudie handelt es sich deshalb – wie oben schon angedeutet – genaue genommen um eine Fallstudie.⁷ Unsere doppelte Angebots-Nutzungsstruktur ist also insbesondere keine Besonderheit *dieser* Intervention.

Folgende Aspekte (oder Variablen) können für die Frage nach der Verallgemeinerbarkeit als relevant angenommen werden: die Institution (Universität oder Pädagogische Hochschule), die Lehrperson sowie der Studiengang (gymnasiales oder Haupt-/Realschul-Lehramt). Methodisch könnte der Einfluss dieser Variablen anhand einer quasi-experimentellen Studie mit mehrbenenanalytischem Design untersucht werden. Dies wäre jedoch aufgrund der verfügbaren kleinen Stichproben im deutschsprachigen Raum nicht oder nur sehr schwer umsetzbar.⁸ Allein die sogenannte 30x30-Regel [(30 Hochschulen/Lehrpersonen) x (30 Studierende pro Hochschule)] für den Stichprobenumfang für zwei Ebenen wäre nicht oder schwer erfüllbar. Zur Frage der Verallgemeinerbarkeit, d. h. inwiefern die Ergebnisse als extern valide gelten können, geben wir im Folgenden unsere Einschätzung ab. Darüber hinaus wären weitere Evaluationsstudien in anderen Settings insbesondere mit anderen Dozierenden an anderen Hochschulen notwendig.

Die Art der Lehre der Lehrpersonen ist mit folgender Begründung wahrscheinlich eng mit der Institution verbunden. Lehrpersonen an den Pädagogischen Hochschulen in Baden-Württemberg haben in der Regel einen Lehramts-Hintergrund und könnten damit eher Muster oder Schemata des schulischen Unterrichts auch in die Hochschullehre integrieren. Welchen Einfluss diese spezielle PH-Situation auf die Evaluationsergebnisse hat, kann in unserer Studie nicht abschließend geklärt werden, weil in der Vergleichsgruppe die Haupt-/Realschulstudierenden nicht eindeutig identifizierbar sind und es sich zudem um eine kleine Teilstichprobe handelt. Die spezifischen Fachvorlesungen für Lehramtsstudierende an der Pädagogischen Hochschule, die zudem in der Verantwortung des Fachbereichs der Physikdidaktik liegen, könnten die Intervention begünstigt haben. An Universitäten werden Lehramtsstudierende häufig gemeinsam mit Physikstudierenden ausgebildet. Die Lehrpersonen sind dort i. d. R. selbst ausgebildete

⁷ Es liegt damit das Erkenntnisproblem der Abduktion vor: Wie lässt sich ein einzelner Fall verallgemeinern? Die Annahme der Wirksamkeit des kumulativen Lehrmodells ist im Sinne der Abduktion eine erklärende Hypothese für das Anwachsen des schulischen Wissenszuwachses der Interventionsgruppe und damit auch für die Wirksamkeit der Umsetzung der Lehrprinzipien bei der Planung und Durchführung der Lehre. Die durch die Abduktion gewonnene und als richtig anzunehmende Hypothese ist durch Deduktionen und Induktionen weiter zu prüfen. In unserem Fall wären als Alternativhypothesen eine kognitiv aktivierende Lehre oder die Lernendenperspektive plausibel (vgl. obigen Haupttext).

⁸ Im gesamten deutschsprachigen Raum haben sich nach Düchs und Mecke (2020, S. 71) im Wintersemester 2019/20 und im Sommersemester 2020 insgesamt $N = 288$ Studierende für den Physik-Lehramtsstudiengang Sekundarstufe 1 und $N = 1979$ Studierende für den Physik-Lehramtsstudiengang Sekundarstufe 2 neu eingeschrieben. Dabei ist zu beachten, dass bei der Sekundarstufe 1 keine Vollerhebung stattgefunden hat; die Angabe stellt also eine untere Schranke dar. Die tatsächlichen Studierendenzahlen dürften aber in diesen Größenordnungen liegen.

Physiker/innen und haben keinen Lehramts-Hintergrund. Damit könnte die Problematik einhergehen, dass Lehrpersonen zunächst die Bereitschaft aufweisen müssen, ihre Lehrveranstaltungen für die spezifischen Bedürfnisse von Lehramtsstudierenden weiterzuentwickeln. Dabei könnte sich als problematisch erweisen, dass die Intervention einen Fokus auf schulrelevantes Fachwissen fordert und Schulbezüge einbezieht. Ein Konzeptwechsel bei Lehrpersonen hin zur Orientierung der Fachveranstaltung am Lehramtsberuf könnte deshalb eine Voraussetzung für eine erfolgreiche Anwendung der Intervention darstellen. Wir greifen mit dieser Aussage Ansätze der *Conceptual-Change*-Forschung auf, die am Ende ihrer Entwicklung in den Nullerjahren nach der Notwendigkeit des doppelten Konzeptwechsels – Schüler/innen auf der inhaltlichen Ebene und Lehrer/innen auf der Ebene der Unterrichtsgestaltung und der Haltung zum Unterricht – gefragt haben (Duit 2000). Auch der Studiengang spielt eine Rolle, da gymnasiale Lehramtsstudierende an den Universitäten zum Teil anders ausgebildet werden als Sek-1-Studierende, die oft (aber nicht immer) an der Universität eigene Fachvorlesungen hören. Zusammenfassend folgt daraus, dass die Intervention mit den Studierenden nicht ohne eine vorherige Intervention bei den Lehrpersonen umgesetzt werden kann. Dies ist eine bekannte Interventionsproblematik in der Lehre.

Die kumulativen Leitlinien sind allgemein formuliert und sollten deshalb nicht an eine methodische Umsetzung der Lehrpersonen gebunden sein. Anders formuliert: Wir erwarten, dass die kumulativen Leitlinien auch anders umgesetzt werden können als dies in der vorliegenden Intervention der Fall ist. Wir wollen mögliche Einflüsse methodischer Besonderheiten des evaluierten Falls reflektieren: Eine Besonderheit liegt in der Entscheidung der ersten Lehrperson, die Übungen in die Mechanikvorlesung zu integrieren. Dies könnte einen wesentlichen Teil zur kognitiven Aktivierung während der Vorlesung beigetragen haben. Demgegenüber gilt es an Universitäten als typisch, dass kognitiv aktiviertes Lernen im Wesentlichen nicht in der Vorlesung, sondern in Übungen oder beim eigenverantwortlichen Lernen zu Hause stattfindet. Dies geht aus einer eigenen kleinen Interviewstudie hervor (vgl. Steinmetz 2021, S. 165ff.) und kann plausibel als Folge einer traditionell stark inhaltsorientierten und kaum lernendenzentrierten universitären Lehre in den Naturwissenschaften interpretiert werden (vgl. dazu Lübeck 2011, S. 20). Integrierte Übungen sind zudem in kleineren Vorlesungen einfacher umsetzbar (an einer Mechanikvorlesung an der PH Ludwigsburg nehmen typischerweise 10 bis 20 Studierende teil). Es gäbe jedoch Möglichkeiten, kognitiv aktivierende Übungsaufgaben auch in großen Veranstaltungsformaten wirksam zu integrieren (z. B. mit der hier genutzten Peer-Instruction-Methode nach Mazur 2017, vgl. auch Riegler & Kautz 2021).

Im Zeitraum der beiden Veranstaltungen Praktikum und Elektrodynamik liegt bei der Interventionsstichprobe kein Zuwachs des vertieften Schulwissens vor. Eine Ursache könnte darin liegen, dass das wiederholte Aufgreifen der mechanischen Grundkonzepte in diesen Veranstaltungen überwiegend auf dem Niveau des Schulwissens stattfindet. Die beiden Beispiele aus der Intervention in Abbildungen 4 und 5 stützen diese Interpretation, denn zur Beantwortung dieser Aufgaben dürfte Schulwissen ausreichend sein. Daher könnte es empfehlenswert sein, Aufgaben stärker am vertieften Schulwissen orientiert zu entwickeln. Woehlecke et al. (2017, S. 418) formulierten für diesen Zweck erste Leitlinien, die allerdings sehr allgemein sind: 1) „Wissen über Konzepte und ihre Anwendung“, 2) „Wissen über Erkenntnisprozesse unter Einbezug von Theorie, Fachsprache, Erkenntnis- und Gültigkeitsprinzipien“ sowie 3) „Wissen, um sinnvoll und vorausschauend zu reduzieren“. Bislang finden sich in der Literatur keine konkreteren Beispiele, in denen diese Leitlinien angewandt wurden. Insofern besteht Entwicklungsbedarf. Im Fall der evaluierten Intervention betrifft dieser Bedarf Aufgaben zu mechanischen Grundkonzepten im Kontext der Elektrodynamik.

6.4 Zur Struktur des Fachwissens: Welches Wissen ist professionsrelevant?

Aus den Ergebnissen der Vergleichsgruppe lassen sich über die Evaluation hinausgehend weitere hypothetische Schlüsse über die Struktur des professionsrelevanten Fachwissens ziehen. Die beiden Wissensniveaus SW und UW entwickeln sich bei der Vergleichsgruppe nach Datenlage weitgehend unabhängig voneinander: Nach dem zweiten Messzeitpunkt ist – wie oben beschrieben – kein *Trickle-down*-Effekt beobachtbar (das UW nimmt mit mittlerer Effektstärke zu, das SW nimmt jedoch nicht zu). Umgekehrt scheint ein hohes SW auch keine Voraussetzung für den Erwerb von UW zu sein, denn das UW nimmt trotz eines verglichen mit der Interventionsgruppe eher geringen SW-Niveaus zu. Da es unter dem Niveau der Interventionsgruppe liegt, ist auch nicht von einem Sättigungseffekt auszugehen. SW und UW scheinen hier also in keiner strengen inklusiv-hierarchischen Beziehung zueinander zu stehen. Diese vermutete Unabhängigkeit kann anhand eines Beispiels plausibel gemacht werden: Mit universitärem Wissen kann die Bewegungsgleichung für einige mechanische Standardbeispiele (z. B. das Pendel) vergleichsweise unaufwändig aufgestellt und gelöst werden. Dazu ist physikalisches Wissen in vielen Fällen lediglich für das Aufstellen der Energieterme für kinetische und potenzielle Energie nötig (die Lagrange-Funktion lautet $L = T - V$, wobei T die kinetische und V die potentielle Energie sind); alles Weitere (das Lösen der Bewegungsgleichung) erfordert ausschließlich mathematische Fähigkeiten. Es ist also möglich, das Pendel ohne ein qualitatives Verständnis für die Kinematik und das Kraftkonzept zu „lösen“ und somit ohne ein für die Schulphysik relevantes Fachwissen.

Wie fügt sich hier das vertiefte Schulwissen ein? SW und UW sind curricular definiert (vgl. Abschnitt 2). Für das VSW existiert in der Literatur keine einheitliche Definition. Eine mögliche Definition könnte über die berufsspezifische Dimension erfolgen: Vertieftes Schulwissen ist das fachliche Wissen, das eine Physiklehrkraft für das Lehren von Schulwissen im Schulunterricht benötigt. Inhaltlich müsste SW somit eine Teilmenge des VSW sein. Demgegenüber scheint – wie oben dargelegt – SW nicht notwendigerweise eine Teilmenge des universitären Wissens zu sein, obwohl es sachlogisch aufeinander aufbaut. Da aber vermutlich mehr fachliches Wissen als Schulwissen nötig ist, um Schulwissen zu unterrichten, setzt sich vertieftes Schulwissen inhaltlich auch aus Aspekten des universitären Wissens zusammen. Inhaltlich lässt sich das vertiefte Schulwissen somit nicht eindeutig vom Schulwissen und universitären Wissen abgrenzen, weshalb eine rein inhaltliche Definition nicht sinnvoll erscheint. Dagegen enthält das vertiefte Schulwissen mit obiger berufsspezifischer Definition neben einer inhaltlichen auch eine anwendungsbezogene Dimension. Eine solche Dimension ist in den anderen Wissensniveaus nicht enthalten (auch nicht implizit), und sie ist charakteristisch für das vertiefte Schulwissen. Für den Beruf einer Physikerin oder eines Physikers wäre es z. B. nicht zielführend, ein vertieftes Schulwissen zu definieren, da die berufliche Anwendungssituation eine andere ist.

Die Schulphysik ist i. d. R. zunächst am konkreten Phänomen und nicht am abstrakten Allgemeinfall orientiert; Fachbegriffe und fachliche Konzepte sollten in der Schule somit in Bezug zu Phänomenen erworben und elaboriert werden. Vertieftes Schulwissen sollte eine Physiklehrkraft also dazu befähigen, ihr (oft formalisiertes) universitäres Wissen an den schulphysik-typischen Phänomenen anschaulich und fachlich richtig anwenden zu können (noch ohne fachdidaktische Entscheidungen einzubeziehen). Am schon genutzten Beispiel des Pendels: Das universitäre („Hintergrund“-)Wissen zu Zwangskräften könnte eine Physiklehrkraft, die über vertieftes Schulwissen verfügt, dazu nutzen, die Kinematik des Pendels qualitativ zu erklären. Zum Beispiel kann dann die Physiklehrkraft die Richtung der Beschleunigung oder resultierenden Kraft beim Pendel angeben – dies ist für Studierende oft keine triviale Problemstellung, und universitäres Wissen von angehenden Physiklehrkräften erweist sich für derartige Anwendungen somit häufig als „träge“. Diese Überlegungen stützen die kumulative Leitlinie des Schulbezugs, wonach die anschauliche Anwendung eines vertieften und formalisierten Wissens in schultypischen Aufgabenstellungen geübt werden sollte, damit das vertiefte, universitäre Fachwissen für Physiklehrkräfte kein träges Fachwissen bleibt.

Somit ergänzt das vertiefte Schulwissen die inhaltlichen Wissensniveaus SW und UW um die Dimension der berufsspezifischen Anwendung. Daraus folgt für die Lehre, dass der Erwerb von vertieftem Schulwissen erfolgen kann, indem die Anwendung von universitärem Wissen an schultypischen Aufgaben und mit für die Schule angemessenen Begriffen und Herangehensweisen geübt wird. Zum Beispiel gilt der physikalische Arbeitsbegriff als schwierig und wird deshalb – je nach Unterrichtskonzept – in der Schule eher vermieden. Dennoch sollten Physiklehrkräfte in der Lage sein, den Arbeitsbegriff richtig anzuwenden, da sie andernfalls keine professionellen fachdidaktischen Entscheidungen (z. B. die bewusste Nicht-Verwendung des Arbeitsbegriffs)⁹ treffen können.

6.5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Evaluationsergebnisse lassen die Bewertung zu, dass die Intervention, die die beiden Lehrpersonen in ihren Physikveranstaltungen an der PH Ludwigsburg umgesetzt haben, den Erwerb von SW und VSW effektiv unterstützt. Dabei wird in nennenswertem Umfang universitäres Fachwissen erworben, auch wenn keine Konzepte der theoretischen Mechanik gelehrt werden. Die Weiterentwicklung der Lehre kann und sollte beibehalten werden. Die hohe Effektivität der Intervention insbesondere für den Schulwissenserwerb führt zu dem Schluss, dass die kumulativen Leitlinien sowohl in anderen Veranstaltungen der PH als auch an Universitäten für den Sek-2-Studiengang umgesetzt werden könnten. Verschiedene Einzelstudien könnten dazu beitragen, die Reliabilität der Intervention mit dem Modell zum kumulativen Lehren und Lernen zu bestätigen oder die Umsetzung des Modells weiterzuentwickeln.

Um den Grenzen der quasi-experimentellen Vergleichsstudie entgegenzuwirken und die Wirksamkeit der Leitlinien besser nachvollziehen zu können, wurde für die Evaluation zusätzlich eine Interviewstudie mit den Studierenden der Interventionsgruppe zur Frage „Wie nehmen die Studierenden die mit den kumulativen Leitlinien verbundenen Lernangebote wahr?“ durchgeführt (vgl. dazu Tab. 1 in Abschnitt 1). Aus den Interviewdaten erhoffen wir uns Aufschluss darüber, zu welchen Lernprozessen die Angebote bei den Studierenden führen. Es wäre zu erwarten, dass die Wirksamkeit der Intervention nicht nur vom Lernangebot, sondern auch von individuellen Persönlichkeitsvariablen der Studierenden abhängt.

Unterstützende, lernendenorientierte Lehre wirft eine grundsätzliche pädagogische Frage auf: Wie viel Hilfe ist notwendig, wenn das Ziel auch das selbständige Lernen der Studierenden ist?

⁹ Eine solche Entscheidung wäre wiederum dem fachdidaktischen Wissen zuzuordnen. Für diese fachdidaktische Entscheidung ist ein

vertieftes Schulwissen zum Arbeitsbegriff eine notwendige Voraussetzung.

Deshalb wäre es wichtig – auch wenn dies schwierig ist – das Spannungsfeld zu untersuchen, ob die unterstützenden Angebote der kognitiv aktivierenden und lernendenorientierten Lehrformate das selbständige Lernen fördern oder behindern.

Die Intervention verfolgt zudem ein langfristiges Ziel: den Schulunterricht der angehenden Physiklehrkräfte zu verbessern. Schulwissen und vertieftes Schulwissen gelten dabei als relevant für guten Physikunterricht. Die Evaluationsergebnisse deuten an, dass die Intervention ein Fortschritt in Bezug auf die Professionalisierung darstellt. Noch zu zeigen wäre, ob sich dadurch auch die prognostizierten Verbesserungen in der Schulpraxis der angehenden Lehrkräfte zeigen. Für langfristige Auswirkungen von professionsbezogenen Interventionen im Studium liegt bislang noch kein belastbarer Forschungsstand vor. Deshalb ist eine Folgestudie geplant, mit der untersucht wird, inwiefern die Studierenden der Interventionsgruppe in ihrem Schulpraxissemester und im Referendariat von ihrem professionsbezogenen Fachwissen profitieren. Die Evaluationsstudie bildet somit eine Basis für weitere Untersuchungen zur fachlichen Professionalisierung von Physiklehrkräften.

Literatur

- Abell, S. K. (2007). Research on science teacher knowledge. In S. K. Abell & N. G. Ledermann (Hg.), *Handbook of Research in Science Education* (S. 1105-1149).
- Anderson, J. R., Reder, L. M. & Simon, H. A. (1996). Situated Learning and Education. *Educational researcher*, 25(4), 5-11.
<https://doi.org/10.3102/0013189X025004005>
- Ausubel, D. P. (1968). *Educational psychology: A cognitive view*. Holt, Rinehart and Winston.
- Baumert, J. & Kunter, M. (2006). Stichwort: Professionelle Kompetenz von Lehrkräften. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 9(4), 469-520.
- Bildungsplan (2016). *Gemeinsamer Bildungsplan der Sekundarstufe I, Physik*. Ministerium für Kultus, Jugend und Sport, Baden-Württemberg.
- Blömeke, S., Gustafsson, J.-E. & Shavelson, R. J. (2015). Beyond dichotomies. Competences viewed as a continuum. *Zeitschrift für Psychologie*, 223(1), 3-13.
- Borowski, A., Kirschner, S., Liedtke, S. & Fischer, H. E. (2011). Vergleich des Fachwissens von Studierenden, Referendaren und Lehrenden in der Physik. *PhyDid A – Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, 1(10), 1-9.
- Bortz, J. & Döring, N. (2007). *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler: Limitierte Sonderausgabe*. Springer-Verlag.
- Breuer, J., Vogelsang, C. & Reinhold, P. (2022). Nutzungsverhalten von Lehrkräften bei der Implementierung einer physikdidaktisch innovativen Unterrichtskonzeption. *ZfDN* 28(1).
<https://doi.org/10.1007/s40573-022-00138-5>
- Carstensen, B., Lindner, C. & Klusmann, U. (2021). Wahrgenommene Wertschätzung im Lehramtsstudium. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 1(14).
<https://doi.org/10.1024/1010-0652/a000337>
- Clausen, M., Reusser, K. & Klieme, E. (2003). Unterrichtsqualität auf der Basis hoch-inferenter Unterrichtsbeurteilungen. Ein Vergleich zwischen Deutschland und der deutschsprachigen Schweiz. *Unterrichtswissenschaft*, 31(2), 122-141.
<https://doi.org/10.25656/01:6775>
- Clauß, G., Finze, F.-R. & Partzsch, L. (2011). *Statistik für Soziologen, Pädagogen, Psychologen und Mediziner* (6. Auflage). H. Deutsch.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioural sciences*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- DPG (2006). Großmann, S., & Urban, K.: *Thesen für ein modernes Lehramtsstudium im Fach Physik: Eine Studie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft e.V.* Bad Honnef.
- DPG (2014). Großmann, S. & Hertel, I.: *Zur fachlichen und fachdidaktischen Ausbildung für das Lehramt Physik*. Bad Honnef: DPG.
- van Driel, J. H., Berry, A. & Meirink, J. (2017). Research on science teacher knowledge. In N. Lederman & S. K. Abell (Hg.), *Handbook of Research on Science Education* (S. 862-884). Routledge.
- Düchs, G. & Mecke, K. (2020). Konstanz trotz Corona: Statistiken zum Physikstudium an den Universitäten in Deutschland 2020. *Physik Journal*, 19(8/9), 70-75.
- Duit, R. (2000). Konzeptwechsel und Lernen in den Naturwissenschaften in einem mehrperspektivischen Ansatz. In R. Duit, v. Rhöneck (Hrg.) *Ergebnisse fachdidaktischer und psychologischer Lehr-Lern-Forschung*. Kiel, IPN: 77-103.
- Duit, R. & Treagust, D. F. (2003). Conceptual change: A powerful framework for improving science teaching and learning. *International Journal of Science Education*, 25(6), 671-688.
- Eder, F., Dämon, K. & Hörl, G. (2013). Universität oder Pädagogische Hochschule? Persönlichkeitsmerkmale als Prädiktoren für Niveau-Entscheidungen im Lehramtsstudium. *Zeitschrift für Bildungsforschung*, 3(1), 3-25.
- Enkrott, P., Buschhüter, D., Borowski, A. & Fischer, H. E. (2019). Modellierung und Entwicklung von Fachwissen angehender Physiklehrkräfte. In C. Maurer (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Bildung als Grundlage für berufliche und gesellschaftliche Teilhabe. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik Jahrestagung in Kiel 2018: Jahrestagung der GDGP in Kiel 2018* (S. 349-352). Universität Regensburg.
- Gagné, R. M. (1968). Contributions of learning to human development. *Psychological review*, 75(3), 177-191.

- GBI (2015). *Gesetzblatt des Kultusministerium Für Baden-Württemberg Nr. 13*.
- John, T. & Starauschek, E. (2020). Ein Modell für kumulatives Lehren im Lehramtsstudium Physik. *PhyDid A – Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, 19(1), 23-42.
- Hashweh, M. Z. (1987). Effects of subject-matter knowledge in the teaching of biology and physics. *Teaching and teacher education*, 3(2), 109-120.
- Hoth, J., Jeschke, C., Dreher, A., Lindmeier, A. & Heinze, A. (2019). Ist akademisches Fachwissen hinreichend für den Erwerb eines berufsspezifischen Fachwissens im Lehramtsstudium? Eine Untersuchung der Trickle-down-Annahme. *Journal für Mathematik-Didaktik*, 1-28.
- Kirschner, S. (2013). *Modellierung und Analyse des Professionswissens von Physiklehrkräften*. Logos Verlag Berlin GmbH.
- Klieme, E.; Schümer, G.; Knoll, S. (2001): Mathematikunterricht in der Sekundarstufe I: „Aufgabenkultur“ und Unterrichtsgestaltung. In: Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.): *TIMSS – Impulse für Schule und Unterricht. Forschungsbefunde, Reforminitiativen, Praxisberichte und Video-Dokument*. – Bonn, S. 43-57.
- Krainer, K., Even, R., Park Rogers, M. & Berry, A. (2021). Research on learners and teachers of mathematics and science: Forerunners to a focus on teacher educator professional growth. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 19(1), 1-19.
- Krauss, S., Neubrand, M., Blum, W., Baumert, J., Brunner, M., Kunter, M. & Jordan, A. (2008). Die Untersuchung des professionellen Wissens deutscher Mathematik-Lehrerinnen und-Lehrer im Rahmen der COACTIV-Studie. *Journal für Mathematik-Didaktik*, 29(3-4), 233-258.
- Kröger, J. (2019). *Struktur und Entwicklung des Professionswissens angehender Physiklehrkräfte*. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität Kiel.
- Kulgemeyer, C. & Riese, J. (2018). From professional knowledge to professional performance: The impact of CK and PCK on teaching quality in explaining situations. *Journal of Research in Science Teaching*, 55(10), 1393-1418.
- Kulgemeyer, C., Borowski, A., Buschhüter, D., Enkrott, P., Kempin, M., Reinhold, P., Riese, J., Schecker, H., Schröder, J. & Vogelsang, C. (2020). Professional knowledge affects action-related skills: The development of preservice physics teachers' explaining skills during a field experience. *Journal of Research in Science Teaching*, 57(10), 1554-1582.
- Kreutz, J., Leuders, T. & Hellmann, K. A. (2020). *Professionsorientierung in der Lehrerbildung: Kompetenzorientiertes Lehren nach dem 4-Component-Instructional-Design-Modell*. Springer VS.
- Lee, J. (2012a). Cumulative Learning. In N. M. Seel (Hg.), *Encyclopedia of the Sciences of Learning* (S. 887–893). Springer Science & Business Media. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1428-6_1660
- Lee, J. (2012b). *Cumulative Learning and Schematization in Problem Solving*. Dissertationsschrift, Universität Freiburg.
- Lübeck, D. (2011). Wird fachspezifisch unterschiedlich gelehrt? Empirische Befunde zu hochschulischen Lehransätzen in verschiedenen Fachdisziplinen. *Zeitschrift für Hochschulentwicklung*, 5(2), 7-24.
- Mayring, P. (2010). *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken* (11. Aufl.). Beltz.
- Mazur, E. (1997). *Peer instruction: A user's manual* (12. Auflage). Prentice Hall.
- Mazur, E. (2017). *Peer Instruction: Interaktive Lehre praktisch umgesetzt*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54377-1>
- Merzyn, G. (2004). *Lehrerausbildung – Bilanz und Reformbedarf* (2. Aufl.). Schneider-Verlag Hohengehren.
- Merzyn, G. (2017). Auf den Lehrer kommt es an. *PhyDid A – Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, 1(16), 67-80.
- Neugebauer, M. (2013). Wer entscheidet sich für ein Lehramtsstudium – und warum? Eine empirische Überprüfung der These von der Negativselektion in den Lehrerberuf. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 16(1), 157-184.
- Oettinghaus, L. (2015). *Lehrerüberzeugungen und physikbezogenes Professionswissen: Vergleich der Absolventinnen und Absolventen verschiedener Ausbildungswege im Physikreferendariat*. Dissertation. Berlin: Logos-Verlag.
- Renkl A., Schworm S., Hilbert T. S. (2004). Lernen aus Lösungsbeispielen: eine effektive, aber kaum genutzte Möglichkeit, Unterricht zu gestalten. In M. Prenzel & J. Doll (Hrsg.), *Bildungsqualität von Schule* (S. 77-92). Münster: Waxmann.
- Riegler, P. & Kautz, C. (2021). *Physik der Hochschullehre*. Physik Journal, 20(5), 43-47.
- Riese, J. (2009). *Professionelles Wissen und professionelle Handlungskompetenz von (angehenden) Physiklehrkräften*. Logos Verlag.
- Riese, J. (2010). Empirische Erkenntnisse zur Wirksamkeit der universitären Lehrerbildung-Indizien für notwendige Veränderungen der fachlichen Ausbildung von Physiklehrkräften. *PhyDid A – Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, 1(9), 25-33.
- Riese, J. & Reinhold, P. (2012). Die professionelle Kompetenz angehender Physiklehrkräfte in verschiedenen Ausbildungsformen. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 15(1), 111-143.
- Rubitzko, T., Laukenmann, M. & Starauschek, E. (2018). Kumulatives Lehren der Mechanik in der Lehramtsausbildung. In V. Nordmeier & H. Grötzebach (Hrsg.), *PhyDid B – Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung Würzburg 2018* (S. 111-123).

- Rubitzko, T., Laukenmann, M. & Starauschek, E. (2019a). Grundkonzepte der Mechanik in der Elektrodynamik kumulativ lehren. In C. Maurer (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Bildung als Grundlage für berufliche und gesellschaftliche Teilhabe. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik Jahrestagung in Kiel 2018* (S. 854-857). Universität Regensburg.
- Rubitzko, T., Laukenmann, M. & Starauschek, E. (2019b). Kumulatives Lehren und Lernen durch kognitiv aktivierende Aufgaben. In V. Nordmeier & H. Grötzebauch (Hrsg.), *PhyDid B – Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung Aachen 2019* (S. 79-82).
- Schecker, H. & Parchmann, I. (2006). Modellierung naturwissenschaftlicher Kompetenz. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 12(1), 45-66.
- Schödl, A. & Göhring, A. (2017). FALCO-P: Fachspezifische Lehrerkompetenzen im Fach Physik. *Falko: Fachspezifische Lehrerkompetenzen: Konzeption von Professionswissenstests in den Fächern Deutsch, Englisch, Latein, Physik, Musik, Evangelische Religion und Pädagogik*, 201.
- Shulman, L. (1987). Knowledge and teaching: Foundations of the new reform. *Harvard educational review*, 57(1), 1-23.
- Slavin, R.E. (1995). *Cooperative learning: Theory, research, and practice*. (2. Auflage). Boston: Allyn & Bacon.
- Slavin, R.E. (2009). Cooperative learning. In McCulloch, G. & Crook, D. (Hrsg.) *International Encyclopedia of Education*. Abington, UK: Routledge
- Starauschek, E., Rubitzko, T. & Laukenmann, M. (2018). Kumulatives Lehren und Lernen der Mechanik in der Lehramtsausbildung. In C. Maurer (Hrsg.), *Qualitätvoller Chemie- und Physikunterricht – normative und empirische Dimensionen: Jahrestagung der GDCP in Regensburg 2017* (Vol. 33, S. 146-149). Universität Regensburg.
- Steffensky, M., & Neuhaus, B. J. (2018). Unterrichtsqualität im naturwissenschaftlichen Unterricht. In Krüger, D.; Parchmann, I. & Schecker, H. (Hrsg.) *Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 299-313). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Steinmetz (2021). *Kumulatives Lehren und Lernen im Lehramtsstudium Physik. Theorie und Evaluation eines Lehrkonzepts*. Dissertationsschrift, Logos-Verlag Berlin.
- Strike, K. A. & Posner, G. J. (1982). Conceptual change and science teaching. *European Journal of Science Education*, 4(3), 231-240.
- Sweller, J. (2006). The worked example effect and human cognition. *Learning and instruction*, 16(2), 165-169.
<https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2006.02.005>
- Terhart, E. (2000). *Perspektiven der Lehrerbildung in Deutschland: Abschlussbericht der von der Kultusministerkonferenz eingesetzten Kommission*. Beltz.
- Tetens, H. (2013). *Wissenschaftstheorie: Eine Einführung*. München: CH Beck.
- Vogelsang, C., Borowski, A., Buschhüter, D., Enkrott, P., Kempin, M., Kulgemeyer, C., Reinhold, P., Riese, J., Schecker, H. & Schröder, J. (2019). Entwicklung von Professionswissen und Unterrichtsperformanz im Lehramtsstudium Physik. *Zeitschrift für Pädagogik* (4), 473-491.
- Weinert, F. E. (1996). Lerntheorien und instruktionsmodelle. In N. Birbaumer, D. Frey, J. Kuhl, W. Prinz & F. E. Weinert (Hg.), *Enzyklopädie der Psychologie: Bd. 2. Enzyklopädie der Psychologie: Psychologie des Lernens und der Instruktion* (S. 1-48). Hogrefe.
- Wittrock, M. C. (1989). Generative processes of comprehension. *Educational psychologist*, 24(4), 345-376.
- Woehlecke, S., Massolt, J., Goral, J., Hassan-Yavu, S., Seider, J., Borowski, A., Fenn, M., Kortenkamp, U. & Glowinski, I. (2017). Das erweiterte Fachwissen für den schulischen Kontext als fachübergreifendes Konstrukt und die Anwendung im universitären Lehramtsstudium. *Beiträge zur Lehrerinnen- und Lehrerbildung*, 35(3), 413-426.
- Woitkowski, D. & Riese, J. (2017). Kriterienorientierte Konstruktion eines Kompetenzniveaumodells im physikalischen Fachwissen. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 23(1), 39-52.
- Wu, H. (2015). *Textbook School Mathematics and the preparation of mathematics teachers*.
https://math.berkeley.edu/%7Ewu/Stony_Brook_2014.pdf [letztes Abrufdatum: 25.02.2021]
- Wylie, R., & Chi, M. T. H. (2014). The self-explanation principle in multimedia learning. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (S. 413-432). Cambridge University Press.

Danksagung

Das diesem Beitrag zugrundeliegende Vorhaben wird im Rahmen der gemeinsamen „Qualitätsoffensive Lehrerbildung“ von Bund und Ländern mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01JA1907B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Anhang

Für die Kategorisierung der Vorlesungsfolien zu den kumulativen Leitlinien in der Mechanikvorlesung wurde der folgende Beobachtungsbogen (Tab. A1) mit dem dazugehörigen Manual (Tab. A2) verwendet.

Tab. A1: Beobachtungsbogen (Ausschnitt)

Blatt Nr.:					Datum:			
Vorlesungs-Kapitel	Wiederholtes Aufgreifen		Alltagsvorstellungen		Übung		Schulbezug	
	Folien-nummer:	Beobachtung in der Vorlesung:	Folien-nummer:	Beobachtung in der Vorlesung:	Folien-nummer:	Beobachtung in der Vorlesung:	Folien-nummer:	Beobachtung in der Vorlesung:

Tab. A2: Manual zur Benutzung des Beobachtungsbogens aus Tab. A1

Kumulative Leitlinie	Indikatoren für eine Leitlinie	Ankerbeispiel
Wiederholtes Aufgreifen	Wird ein Aspekt eines der Grundkonzepte Impuls, Kraft, Drehmoment, Drehimpuls, Energie in einem neuen Themengebiet (d. h. nach der formalen Einführung) nochmal angewandt, indem das allgemeine Prinzip sichtbar gemacht wird? Der Aspekt des Grundkonzepts und die Art der Anwendung sind kurz zu erläutern.	<i>Folie 6, Kapitel Starrer Körper:</i> Das erste newtonsche Axiom wird im Themengebiet „Starre Körper“ wiederholt aufgegriffen, indem es durch folgenden Satz auf Drehbewegungen angewandt wird (paraphrasiert): „Analog zum ersten newtonschen Axiom bei Translationsbewegungen bewegt sich ein Körper mit konstanter Winkelgeschwindigkeit oder einer Winkelgeschwindigkeit von null, solange kein Drehmoment auf den Körper ausgeübt wird.“
Alltagsvorstellung	Wird eine typische Alltagsvorstellung thematisiert? Die Alltagsvorstellung sowie die Methode der Thematisierung sind kurz zu beschreiben.	<i>Folie 110, Kapitel Kraft und Bewegung:</i> Die Lehrperson sagt, dass die Vorstellung „Kräfte zeigen immer in Bewegungsrichtung“ eine häufig auftretende Fehlvorstellung ist, nachdem die Übungsaufgabe aus <i>Folie AA, Kapitel ZB</i> diese Vorstellung adressiert.
Übung	Erhalten die Studierenden Aufgaben, die sie während der Vorlesung bearbeiten sollen? Die Form der Übung (Peer Instruction, Worked Example, Diskussion) ist zu dokumentieren. Zudem ist anzugeben, welches Grundkonzept dabei angewandt werden sollte (die Grundkonzepte sind: Impuls, Kraft, Drehimpuls, Drehmoment, Energie).	<i>Folie 85, Kapitel Kraft und Bewegung:</i> Peer-Instruction-Aufgabe zum Grundkonzept Kraft.
Schulbezug	Wird ein Schulbezug hergestellt? Die Form des Schulbezugs ist zu dokumentieren. Folgende Schulbezüge sind möglich: 1) Ein für die Schulphysik typisches (und für die universitäre Physik eher untypisches) Beispiel wird besprochen (z. B. ein Problem mit lebensweltlichem Kontext, das nicht (nur) formal-mathematisch gelöst wird). 2) Eine schultypische Übungsaufgabe.	<i>Folie 103, Kapitel Kraft und Bewegung:</i> Im Kontext zum Kräftegleichgewicht wird eine Übungsaufgabe zum Schwimmen, Schweben, Sinken gestellt, die zudem qualitativ zu lösen ist. Der Kontext und die Art der Lösung sind schultypisch.