

Ein Modell für kumulatives Lehren im Lehramtsstudium Physik

Tilmann John, Erich Starauschek

Pädagogische Hochschule Ludwigsburg
tilmann.john@ph-ludwigsburg.de

(Eingegangen: 08.01.2020; Angenommen: 25.11.2020)

Kurzfassung

Die physikalischen Fachkompetenzen, die angehende Physiklehrkräfte im Studium erwerben, passen oft nicht zu den Anforderungen des Physikunterrichts der Schule (Merzyn, 2017). Dies stimmt mit dem Befund überein, dass schulrelevantes Fachwissen erst im Referendariat erworben wird (Borowski et al., 2011). Zudem weisen Physiklehramtsstudierende auch nach dem Studium Alltagsvorstellungen auf (Abell, 2007). Das Modell *kumulatives Lehren und Lernen im Lehramtsstudium Physik* liefert Leitlinien, an denen Physiklehrveranstaltungen an der Hochschule ausgerichtet werden können, um eine mögliche Lösung für die benannten Probleme anzubieten. Ausgehend von lernpsychologischen Erkenntnissen zum kumulativen Lernen (Gagné, 1968; Ausubel, 1968; Wittrock 1974; Lee, 2012) wird ein verallgemeinerter Begriff des *kumulativen* Lernens entwickelt und für das Lernen und Lehren von Physik in der Lehramtsausbildung spezifiziert. Der Fokus liegt auf einer systematischen Wiederholung von physikalischen Grundkonzepten und einem expliziten Schulbezug. Die Studierenden reflektieren dabei auch ihre eigenen Alltagsvorstellungen. Damit soll ihnen der Aufbau eines schulbezogenen und damit professionsorientierten physikalischen Fachwissens und die Wahrnehmung der Relevanz dieser Fachausbildung für den zukünftigen Lehrberuf ermöglicht werden.

Abstract

In their university studies, students obtaining a degree in physics teaching for secondary schools do not acquire the physics content knowledge suitable for their profession (Merzyn, 2017). This observation corresponds with other research findings: Trainee teachers have to relearn the physics content that they are assigned to teach (Borowski et al., 2011), and even after their studies of physics, pre-service teachers use misconceptions when explaining physics (Abell, 2007). We have constructed a theoretical framework for a *Cumulative Physics Teacher Education* and formulated principles to design learning environments at the university level to overcome these problems. This framework and the underlying principles are based on research in learning psychology (Gagné, 1968; Ausubel, 1968; Wittrock, 1974; Lee, 2012). The focus of the framework is on the systematic repetition of physical basic concepts in various contexts and includes explicit references to secondary school-level physics content. In addition, the pre-service education students are requested to critically think through their own (mis-)conceptions about physics. The aim is to enable them to develop a school-related physics content knowledge for their profession. This should include the perception of the relevance of 'Cumulative Physics Teacher Education' for their professional development.

1. Stand der Forschung

1.1. Das fachlich-physikalische Professionswissen von Physiklehrkräften

Welche Fähigkeiten benötigt eine Lehrkraft für guten Unterricht? Um diese Kernfrage der empirischen Forschung zugänglich zu machen, ist es üblich, unabhängig von der Domäne unterschiedliche Kompetenzen zu definieren. Hierbei wird grob zwischen (1) den kognitiven Fähigkeiten und dem Professionswissen sowie (2) den volitionalen Fähigkei-

ten und Bereitschaften unterschieden (Weinert, 2001, S. 27 f.). Das Professionswissen für Lehrkräfte lässt sich in Anlehnung an Shulman (1987) in die drei Dimensionen Fachwissen, fachdidaktisches Wissen und pädagogisch-psychologisches Wissen unterteilen. Shulman nennt mehr als diese drei Dimensionen; die drei genannten gelten nach Baumert & Kunter (2006) als relevant. Wir wollen im Weiteren nur auf die Entwicklung des Fachwissens von angehenden Physiklehrkräften eingehen.

Die zentrale Rolle des Fachwissens ergibt sich aus einer Plausibilitätsbetrachtung, die aus einer normativen Setzung folgt: Sollen fachliche Inhalte eines Unterrichtsfachs gelehrt werden, sind hierzu bestimmte fachliche Kenntnisse notwendig. Partiiell offen ist die Frage, *welches* Fachwissen eine Lehrkraft konkret für einen *gelingenden* Unterricht benötigt. Um sich der Antwort zu nähern, wird das physikalische Fachwissen häufig in drei Dimensionen modelliert: Inhalt (z. B. Mechanik, Optik), Wissenskomplexität (z. B. in den Ausprägungen Faktenwissen, tieferes Verständnis) sowie die drei Niveaustufen Schulwissen, vertieftes Schulwissen, universitäres Wissen (vgl. z. B. Riese, 2009). Beim Lehramtsstudium Physik sollten mögliche schulische Inhaltsbereiche abgedeckt sein und ein vertieftes physikalisches Verständnis erreicht werden. Dabei ist noch zu klären, wie ein vertieftes Verständnis begrifflich befriedigend definiert werden kann und welchen Einfluss universitäres Wissen auf Unterrichtsprozesse hat. Wir werden uns später einem Versuch einer Definition der Vertiefung annähern. Besonders relevant für die Bewertung des physikalischen Wissens der Physiklehrkräfte sind aber folgende zwei Fragen:

1) *Wie wirkt sich das Fachwissen der Physiklehrkräfte auf das Lernen der Schülerinnen und Schüler aus?*

2) *Wie hängt das Fachwissen mit den Dimensionen fachdidaktisches und pädagogisch-psychologisches Wissen zusammen?*

Ad 1): Die empirischen Untersuchungen zum Einfluss des Fachwissens auf den Lernzuwachs der Schülerinnen und Schüler zeigen ein divergentes Bild (Abell, 2007). Die Metastudie von Hattie (2009) weist zwar einen kleinen Effekt für den Einfluss des Fachwissens der Lehrkraft aus, der Meta-Befund unterscheidet jedoch nicht nach Domäne oder Niveau des Lehrerwissens. Aus Plausibilitätsgründen kann daher probeweise gefolgert werden, dass nicht jedes physikalische Wissen für eine Lehrkraft wichtig ist. Relevant sollte aber wenigstens ein Fachwissen sein, das auf die Anforderungen des Schulunterrichts abgestimmt ist (vgl. Merzlyn, 2017, S. 77).

Ad 2): Das pädagogisch-psychologische Wissen, das für nicht fachbezogene Handlungen, z. B. die Klassenführung, als besonders relevant gilt (vgl. Kunter et al., 2014), kann nach dem Stand der Forschung als unabhängige Dimension für guten Unterricht angenommen werden. Dem Fachwissen wird hingegen die Rolle eines Moderators für den Erwerb fachdidaktischen Wissens zugeschrieben (Krauss et al. 2008; Riese & Reinhold, 2012). Das Fachwissen könnte daher indirekt relevant für die Unterrichtsqualität sein.

Was lässt sich aus dem kursorischen und heterogenen Stand der Forschung über die Bedeutung des physikalischen Fachwissens der Lehrerinnen und Lehrer für den Physikunterricht über eine professi-

ensorientierte Physikausbildung im Studium fordern? Eher wenig. Wir wählen daher andere Ansatzpunkte aus der Physikdidaktik und der Lernpsychologie.

1.2. Physikdidaktische Anforderungen an ein professionsbezogenes Fachstudium im Lehramt Physik

Als relevant gilt die Abstimmung des physikalischen Fachwissens auf die Anforderungen der Schule. Weil Lehramtsstudierende jedoch häufig mit Fachphysikstudierenden ausgebildet werden, findet diese Abstimmung nicht statt (vgl. Merzlyn, 2017). Borowski et al. (2011) zeigen dies für eine kleine Stichprobe: Angehende Lehrkräfte erwerben „schulrelevantes Fachwissen“ überwiegend erst im Referendariat. In diese Aussagen fügt sich die von der DPG¹ geforderte professionsorientierte Ausbildung für angehende Physiklehrkräfte (Großmann et al., 2014).

Als eine erste Annäherung an ein *abgestimmtes* oder *professionsorientiertes* Fachwissen kann das für den Unterricht inhaltlich relevante Wissen als eine Mindestvoraussetzung angesehen werden. Dieses schulrelevante Fachwissen wird von Riese et al. (2015) zu einem „vertieften Schulwissen“ erweitert. Grob gesprochen geht das vertiefte Schulwissen inhaltlich über das Schulcurriculum hinaus, es besteht aber noch ein klarer Bezug zu diesem. Riese et al. (2015) gehen über den einfachen fachlichen Fokus hinaus und modellieren vertieftes Schulwissen durch „folgende Fähigkeiten: (1) verschiedene Wege zur Lösung einer Aufgabe identifizieren und anwenden, (2) Lösung einer Aufgabe aus theoretischer Sicht planen, (3) Randbedingungen einer Schulaufgabe erkennen, (4) Aufgaben zielgruppengerecht vereinfachen, (5) Zusammenhänge, Gemeinsamkeiten und Unterschiede physikalischer Phänomene erkennen“ (ebd., S. 60). Die genannten Aspekte bilden einen ersten konkreteren Rahmen und führen zu dem Kriterium, schulrelevantes Wissen auch schon in einer professionsorientierten Fachausbildung aufzugreifen.

Die folgende Beispielaufgabe aus einem Physikschulbuch verdeutlicht das vertiefte Schulwissen (Bader, 2000, S. 46): „Ein Anhänger (1000 kg) soll auf einer Straße bei 15° Neigung mit $a = 1,0 \text{ m/s}^2$ bergauf gezogen werden. Welche Kraft ist nötig?“ Die direkte Lösung der Aufgabe gehört per definitionem Schulbuch zum Schulwissen.² Vertieftes Wissen liegt vor, wenn anhand der Zählung von oben z. B. (1) auch qualitativ argumentiert werden kann, warum die nötige Kraft dem zur Bewegungsrichtung tangentialen Anteil der vektoriellen Gewichtskraft entsprechen muss. (2) Sollte eine Skizze zur Aufgabe theoretisch so geplant werden, dass die mathema-

¹ Deutsche physikalische Gesellschaft

² Z. B. durch Einsetzen in die Formel $F = \sin(\alpha) m g$ mit dem Ergebnis $F = 2539 \text{ N}$.

tische Kräftezerlegung (tangente Sinus-Komponente und die normale Cosinus-Komponente der Gewichtskraft) ersichtlich wird; diese Kraftkomponenten repräsentieren keine eigenständigen Wechselwirkungen. (3) Randbedingungen der Aufgabe sind u. a., den Anhänger als Punktmasse zu modellieren, sodass keine Drehmomente entstehen, oder materialbedingte Reibungskräfte zu vernachlässigen. (4) Eine Lehrkraft sollte die Aufgabe bei Schülerinnen und Schülern der Mittelstufe nicht durch die mathematische Vektorschreibweise lösen, wie es an der Universität üblich ist. (5) Es kann der Zusammenhang zum Energiekonzept hergestellt werden oder z. B. diskutiert werden, ob durch die nötige Kraft Energie in den Körper gesteckt oder traditionell Arbeit am Körper verrichtet wird, obwohl die Summe der Kräfte am Anhänger gleich null ist.

Das vertiefte Schulwissen impliziert, dass Lehrkräfte ihre eigenen Alltagsvorstellungen, die in der Schulphysik relevant sind, erkannt haben sollten. Abell (2007) kommt in einem Übersichtsartikel zum Fachwissen von Physiklehrkräften zu einem anderen Schluss: „*The overall finding [...] in physics is that teachers' misunderstandings mirror what we know about students.*“ (vgl. ebd., S. 1117). Wir nehmen an, dass diese Aussage auch für angehende Physiklehrkräfte in Deutschland gültig ist. Alltagsvorstellungen bei sich zu erkennen, sollte deshalb als ein eigener Teilaspekt eines professionsbezogenen Fachwissens aufgefasst werden. Dies erfordert die explizite Auseinandersetzung der Studierenden mit den eigenen Fehl- oder Alltagsvorstellungen.

Die gemeinsame Ausbildung, die an den Fachphysikerinnen und -physikern orientiert ist, bringt ein weiteres Problem mit sich: Lehramtsstudierende nehmen im Studium eine Distanz zu ihrem späteren Berufsfeld wahr, weil i. d. R. kein Bezug darauf genommen wird. Dies führt nach Heublein et al. (2010) zu einer geringen Studienmotivation und zu Studienabbrüchen. Daher ist die Ermöglichung der Wahrnehmung der Relevanz der Physikfachausbildung von Lehramtsstudierenden für ihre zukünftige Arbeit in der Schule eine weitere Anforderung an ein professionsbezogenes Physikstudium.

Aus dem Gesagten folgen drei Mindestanforderungen an eine professionsbezogene Physikfachausbildung: (1) die stärkere Fokussierung auf ein *vertieftes Schulwissen*, (2) die Auseinandersetzung mit den eigenen Alltagskonzepten zur Physik und (3) die Unterstützung der Wahrnehmung der Relevanz der Fachausbildung für den Physiklehrerberuf. Wie kann ein professionsorientiertes Fachwissen zur Physik aufgebaut werden, das den genannten Anforderungen genügt? Hierzu benötigen wir noch ein (empirisch fundiertes) Modell zum Lernen.

2. Kumulatives Lernen

Es überrascht, dass angehende Lehrkräfte nach erfolgreichem Bestehen der universitären Physikprüfungen kein ausreichendes schulelevantes Fachwis-

sen entwickelt haben sollen. Die fehlende explizite Verbindung zwischen universitärem und schulisch relevantem physikalischem Wissen könnte dies erklären. Verbindendes – kumulatives – Lernen könnte dies verändern. Um ein Modell *kumulativen Lehrens und Lernens* für die Lehramtsausbildung im Fach Physik zu entwickeln, wurden zunächst relevante Theorien aus der Lernpsychologie aufgearbeitet. In der Analyse der Literatur haben sich vier Theorien als geeignet erwiesen, die trotz unterschiedlicher Ansätze einen gemeinsamen Nenner haben, der als *kumulativer Kern des Lernens* bezeichnet werden kann. Dieser geht über das einfache *Verbinden* von Lehrinhalten hinaus, insbesondere über das einfache additive Anhäufen von Wissens-elementen. Um diesen Kern zu bestimmen, werden analysiert: a) Gagnés (1968) Modell des kumulativen Lernens, b) Ausubels (1968) Subsumtionstheorie, c) Wittrocks (1974) generatives Lehren und Lernen und d) Lees (2012) Modell des kumulativen Lernens. In einem zweiten Schritt (s. Abschnitt 3) wird auf Basis der psychologischen Modelle ein Modell kumulativen Lernens und kumulativen Lehrens für die Lehramtsausbildung Physik vorgestellt, welches unsere drei bisherigen Forderungen einschließt. Wir entwickeln ein pragmatisches Modell, das sich an der Anwendbarkeit in der Praxis orientiert, und illustrieren dies mit Beispielen. Für detailliertere Ausführungen zu den Lernprozessen und weitergehende theoretische und empirische Begründungen für das kumulative Lernen verweisen wir auf Lee (2012).

2.1. Lernpsychologische Ansätze zum kumulativen Lernen

a) Gagnés (1968) Modell des kumulativen Lernens: Eine zu erlernende komplexe Fähigkeit kann prinzipiell in aufeinander aufbauende, weniger komplexe Fähigkeiten zerlegt werden. Diese Fähigkeiten lassen sich nach Gagné in der Regel hierarchisch anordnen: „Das Erlernen der intellektuellen Fertigkeiten [...] besteht im Wesentlichen im Kombinieren dieser vorauszusetzenden Fertigkeiten, die früher erlernt wurden“ (Gagné, 2011 [1968], S. 141). Wir zählen zu den kognitiven Fertigkeiten auch den Umgang mit physikalischen Konzepten. Ein mögliches Beispiel aus der Physik: Die Kinematik und ihre Begriffe sollten vor dem dynamischen Zugang zum Kraftbegriff *verstanden* worden sein – also insbesondere die Beschleunigung als Geschwindigkeitsänderung³. Diese *Fähigkeitsteile* bezeichnet Gagné (1968, S. 189) als „Entitäten“. Der schrittweise Erwerb der hierarchisch angeordneten Entitäten wird als kumulative Lernsequenz bezeichnet

³ Diese hierarchische Kette ist für einen Sachverhalt nicht immer eindeutig. Geht man bei der newtonschen Dynamik etwa vom Impuls als fundamentaler Größe aus, so ist ein Beschleunigungsbegriff nicht notwendig. Dies zeigt die Grenze der allgemeinen Lernpsychologie und die Notwendigkeit zumindest einer Art von Physikdidaktik.

(vgl. ebd., S. 189), die Lernende durchlaufen müssen. Der kumulative Effekt besagt, dass Lernende durch diesen Prozess, den Gagné Lerntransfer nennt, ihr Wissen generalisieren können. Es werden Verbindungen zwischen den Entitäten als verallgemeinerbare Zusammenhänge hergestellt. In unserem Fall: Immer wenn sich die Geschwindigkeit eines Gegenstandes verändert, wirkt eine resultierende Kraft und umgekehrt. Gagné (1968) konstatiert, dass der Mechanismus des Lerntransfers wenig verstanden ist („[...] a little understood, but nevertheless dependable, mechanism of learning transfer“, ebd., S. 189). Die Generalisierung von Wissen als Ergebnis des Lerntransfers erfolgt durch die Lernenden selbst und ist daher abhängig von ihren kognitiven Fähigkeiten. Den Vorgang, in dem Wissens Elemente aufeinander aufbauen (hierarchisches Lernen) und in Beziehung zueinander gesetzt werden (Lerntransfer), bezeichnet Gagné als kumulatives Lernen. Werden dagegen keine Verbindungen zwischen erworbenen Wissens Elementen und neuen - jedoch keine neue Erkenntnis mit sich bringenden - Lerninhalten hergestellt, so spricht man in der Bildungswissenschaft häufig in Abgrenzung zum kumulativen Lernen von einem additiven Wissenserwerb (vgl. Baumert et al., 1998, S. 122). Im obigen Beispiel zum Kraftkonzept wird z. B. die Wenn-dann-Relation nicht hergestellt, wenn die Verbindung nicht ausreichend oft gelingt und zur Verallgemeinerung führt. Oder sie kann nicht stattfinden, wenn nur ein statisches Kraftkonzept zur Verfügung steht. Dann wären Kinematik und Kraftkonzept additives Wissen.

Aus seinen Analysen zum kumulativen Lernen leitet Gagné eine spezifische Instruktionsmaßnahme ab. Sie besteht darin, den zu erwerbenden Inhalt in hierarchisch aufeinander aufbauende Fähigkeiten – oder Entitäten – zu zerlegen, die in einer bestimmten Abfolge zu erwerben sind. Gagné denkt die Lernhierarchien kleinschrittig, weil es damit dem Lernenden ermöglicht werden soll, die Zwischenschritte in einen Zusammenhang zu bringen.

Wir deuten ein Beispiel aus der Physik an, das die Grenzen von Gagné's hierarchischem Ansatz zeigt: Um zu lernen, dass Licht eine elektromagnetische Welle sein kann, ist es sinnvoll, erstens die Eigenschaften einer mechanischen, transversalen Welle zu kennen und notwendig, zweitens die elektrischen und magnetischen Felder sowie die Phänomenologie von Licht zu verstehen. Für einen gelingenden Lerntransfer – ausgehend von der mechanischen Welle – müssen die konzeptuellen Sachstrukturen (Gemeinsamkeiten und Unterschiede) der mechanischen Welle sowie der elektrischen und magnetischen Felder deutlich werden, z. B. dass bei einer mechanischen Welle Massen schwingen (bei der elektromagnetischen Welle schwingen die Feldstärken, deren Werte an einem ortsfesten Punkt periodisch

zu- und abnehmen).⁴ Dann können auf dieser Basis die gemeinsamen physikalischen Größen, z. B. Wellenlänge oder Intensität, abstrahiert werden. In Gagné's Modell erfolgt die Bedeutungskonstruktion (und damit der Gagné'sche Lerntransfer) als eine implizite Folge der durchlaufenen Lernhierarchie (hier mechanische vor elektromagnetischen Wellen).

b) Ausubels (1968) Subsumtionstheorie greift die Idee der hierarchischen Ordnung auf, hebt aber die Erzeugung von Bedeutung im *meaningful learning* und die Rolle des Vorwissens heraus. Die Theorie gründet in der Annahme, dass Konzepte⁵, die aus Lernerfahrungen konstruiert werden, in kognitiven Strukturen⁶ hierarchisch geordnet sind: Je allgemeiner ein Konzept ist, desto weiter oben steht es in der Wissenshierarchie. Spezielle Konzepte sind hierarchisch tiefer angeordnet und damit weniger inklusiv (vgl. Ausubel, 1968, S. 92). Neue Erfahrungen oder Informationen werden entweder in bestehende kognitive Strukturen eingeordnet, oder das bestehende Konzept wird durch neue Strukturen erweitert.⁷ Ausubel nennt diese Prozesse Subsumtionsprozesse. Der Lernprozess findet somit immer durch Anknüpfen an das Vorwissen statt. Es ist sozusagen nicht möglich, ein Konzept zu lehren, ohne dass Lernende auf ihr Vorwissen zurückgreifen. Die Anknüpfung kann jedoch von unterschiedlicher Qualität sein: Sie kann durch oberflächliche Assoziationen erfolgen oder bedeutsam sein. Ausubel unterscheidet deshalb

⁴ Vgl. 2.1. d).

⁵ Konzepte sind Wissensinhalte, mit denen Wahrnehmungen und Gegenstände des Denkens in Gruppen oder Kategorien geordnet werden können. Das Konzept des Apfels ist z. B. ein einfaches Konzept. Ein komplizierteres steckt hinter folgender Frage: An welchen Kriterien erkennen wir, dass auf einen bewegten Körper eine Kraft wirkt? Werden diese definiert (z. B. wenn ein Körper aus der Ruhe in eine Bewegung oder aus einer Bewegung zur Ruhe kommt, während der Fahrt schneller oder langsamer wird, oder eine Richtungsänderung der Bewegung stattfindet) und mit einem Terminus bezeichnet, so lässt sich präziser auch von einem Begriff sprechen, z. B. hier dem dynamischen Kraftbegriff. Synonym lässt sich von einem Schema sprechen (die genannten Sätze zur Bewegungsänderung definieren das Schema), hier dem dynamischen Kraftschema: Die Bewegung eines Körpers wird mit den Konzepten (oder Kriterien) des vorhandenen Schemas beurteilt, um zu entscheiden, ob eine Kraft auf den bewegten Körper wirkt. Dabei können unterschiedliche Begriffe oder Schemata zu einem Aspekt einer *Wirklichkeit* oder einem *Phänomen* existieren. Die Termini Konzept und Begriff werden auch synonym verwendet, obwohl ein Begriff in der Regel auf mehreren Konzepten fußt (z. B. Seel, 2003; Renkl, 2015).

⁶ Kognitive Strukturen lassen sich konkreter als mentale Repräsentationen denken. Diese umfassen propositionale und pikturale Repräsentationen sowie mentale Modelle. Konzepte als einfache und Schemata als übergeordnete Strukturen lassen sich mental propositional repräsentieren und extern explizieren, z. B. als Text. Der Terminus kognitive Struktur ist oft ein Synonym zum Terminus mentale Repräsentationen.

⁷ Dies erinnert an Piagets Assimilation und Akkommodation. Wir haben unsere theoretische Auswahl trotzdem nicht erweitert, da Piagets Ideen in den gewählten Konzepten mehr oder weniger enthalten sind; wir beweisen dies hier nicht. Piagets Terminologie hingegen verwenden wir weiter unten in unserer Synthese der bisherigen kumulativen Lerntheorien (s. 2.1. d).

meaningful learning und *rote learning*. Dabei bedeutet *meaningful learning*:

„*Substantive and nonarbitrary incorporation of a potentially meaningful learning task into relevant portions of cognitive structure so that new meaning emerges, implies that newly-learned meaning becomes an integral part of a particular ideational system.*“ (ebd., S. 108).

Die phänomenologisch erkennbaren Merkmale von *meaningful learning* sind dabei neue Bedeutungen, die bislang im Vorwissen nicht vorhanden waren. Hingegen besteht *rote learning* (Auswendiglernen) aus oberflächlichen Assoziationen, die willkürlichen Charakter haben können. Dies führt zu Wissensseinheiten, die unverbunden existieren, aber zusammengehören sollten (vgl. ebd., S. 109). Kernaussage des ausubelschen Modells ist nach unserem Verständnis: Bedeutungsvoll wird Lernen, wenn durch die Erweiterung der Wissensstruktur die Erkenntnis neuer Zusammenhänge möglich und die neuen Zusammenhänge z. B. in einer Kommunikation erkennbar werden. Ein *meaningful concept* zeichnet sich durch Anwendung des abstrakten Konzepts auf Beispiele aus. Z. B. wird ein *meaningful concept* der newtonschen Axiome dazu führen, dass Lernende bei einer beschleunigten Bewegung (in einem Inertialsystem) eines Körpers immer nach einem zweiten Körper suchen, der sich ebenfalls beschleunigt bewegt oder verformt. *Rote learning* führt hingegen nur zur Kenntnis einiger Beispiele, in denen zwei Körper beteiligt sind, oder das dritte newtonsche Axiom wird als nicht allgemeingültig interpretiert.⁸

Ausubels Theorie führt zu folgendem Instruktionkonzept: *Meaningful learning* kann unterstützt werden, indem Lernende bereits vorhandenes Vorwissen, z. B. Schemata, aktivieren und diese Schemata durch die neuen Informationen reorganisieren. Dazu können z. B. *advance organizer* eingesetzt werden, oder Schülervorstellungen expliziert und mit physikalischen Konzepten und Beobachtungen verglichen werden⁹. Anschließend soll das erarbeitete Wissen

⁸ Sowohl *meaningful learning* als auch *rote learning* nutzen Verknüpfungen (metaphorische oder graphische). Wir können sie in ihrer *Qualität* unterscheiden. Allgemein ist es schwierig, *meaningful* zu definieren (bedeutungsvoll für wen und was?). Bei institutionalisierten Lehr-Lern-Prozessen können wir die Bezeichnung kumulativ immer in Bezug auf ein intendiertes Lehr- oder Lernziel präzisierend definieren. Dies impliziert auch den Standard fachlicher Richtigkeit. Der Merksatz „Blau bricht“ kann einfach gelernt und reproduziert werden. Vielleicht hat dieser Merksatz für Lernende sogar eine physikalische Bedeutung. Die Alliteration „B-B“ kann dabei zu einer stabilen Verknüpfung im Gedächtnis führen. Aber der Merksatz kann unverbunden zur Physik bleiben. Dies wäre *rote learning* und oberflächliches Wissen. *Meaningful* wäre z. B. eine Aussage über den Zusammenhang zwischen Lichtbrechung und der *Farbe* des Lichts, nachdem z. B. die Lichtbrechung auch mit rotem Licht gezeigt und die Unterschiede der beiden Lichtbrechungen diskutiert wurden.

⁹ Als ein Kennzeichen des erfolgten *meaningful learnings* kann das Generieren von eigenen Beispielen und Analogien zu Konzepten und Begriffen durch den Lernenden gelten. Menschen

durch Wiederholung und Übung gefestigt werden (vgl. ebd., S. 277 f.). Wiederholung und Übung sind dabei keine spezifisch kumulativen Elemente und lassen sich auch aus anderen Lerntheorien ableiten.

Voraussetzung für das *meaningful learning* ist nach Ausubel (1968) eine fachlich gut organisierte und stabile Wissensbasis, die bessere Anknüpfungspunkte im Subsumtionsprozess bietet als eine unklare und chaotisch organisierte Wissensbasis (vgl. ebd., S. 128). Somit hat die Qualität des Vorwissens einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität des weiteren Lernens – Lernen hat somit über längere Zeiträume auch einen kumulativen Charakter im Sinne Gagnés, da sich eine hierarchische Wissensstruktur durch die Entwicklung abstrakter, übergeordneter Konzepte oder Schemata findet.

Übertragen auf das Physiklehren müsste also sichergestellt werden, dass für das Erlernen neuer Inhalte das dafür notwendige (fachlich-korrekte oder phänomenologisch korrekt strukturierte) Vorwissen auch wirklich verfügbar ist, damit ein bedeutungserzeugendes Lernen überhaupt stattfinden kann. Am Beispiel des dynamischen Kraftbegriffs: Hat der Lernende den Beschleunigungsbegriff als Geschwindigkeitsänderung tatsächlich konzeptualisiert und kann diesen in beliebigen Situationen anwenden, oder hat er – in den Worten von Walter Jung – „den Begriff ausschließlich als Antwort gelernt“ (Jung et al., 1981, S. 193), und misst ihm damit keine physikalische Bedeutung bei?

c) Wittrocks (1974) generatives Lehren und Lernen geht wie Ausubel (1968) von der Grundannahme aus, dass Lernende Bedeutung erzeugen, indem neue Informationen mit bestehendem Wissen verknüpft werden. Dies erfolgt im Wesentlichen in zwei Schritten. Zunächst werden Informationen selektiv wahrgenommen. Die selektive Wahrnehmung wird dabei durch das Langzeitgedächtnis getriggert. In einem zweiten Schritt werden die neuen Informationen mit dem Langzeitgedächtnis verbunden und dabei Bedeutungen erzeugt oder konstruiert, die dem Lerner plausibel erscheinen. Diese Bedeutung wird wieder im Langzeitgedächtnis gespeichert. Wittrock (1974) bezeichnet diesen Vorgang als generativ: „[...] *people tend to generate perceptions and meanings that are consistent with their prior learning*“ (ebd., S. 41). Nach Kourilsky & Wittrock (1992) werden neue Inhalte bevorzugt mit vorhandenen Vorstellungen verknüpft. Das Vorwissen besteht beim Physiklernen oft aus physikalisch inadäquaten Alltagsvorstellungen. Somit können auch Alltagsvorstellungen *kumulativ* erweitert werden. Im Vergleich zu Ausubel reicht es also nicht aus, Vorwissen zu aktivieren. Im Sinne der Physik *falsches* Vorwissen muss als solches erkannt und in den Lernprozess einbezogen werden. Aus der physikdi-

sollten dann mit einer Reihe von unbekanntem Situationen in der Welt umgehen können.

daktischen Perspektive ist dies, da physikalisch korrektes Vorwissen in der Regel nicht vorliegt und Alltagsvorstellungen nur unsystematisch mit physikalischen Modellen übereinstimmen, ein Dilemma, ein Vorwissensdilemma. Dies ist die bekannte zentrale Schwierigkeit des *conceptual change* (vgl. z. B. Duit, 1993).

Wittrock (1989, 1991) entwickelt aus seinem Modell Implikationen für eine generative Lehre. Seel (2003, S. 157) fasst dieses Modell wie folgt zusammen: (1) Eingehen auf das Vorwissen und die Alltagsvorstellungen der Lernenden, (2) Zentrierung der Aufmerksamkeit auf die bedeutsamen Elemente der Lerninhalte, (3) Beziehungen zwischen den zu lernenden Inhalten und dem bestehenden Wissen erzeugen. Die Elemente (1) und (3) entsprechen den instruktionalen Maßnahmen Ausubels. Wittrocks Erkenntnis der selektiven Wahrnehmung auf Basis des Vorwissens führt zu einem neuen instruktionalen Element: die Fokussierung auf einen bestimmten Kern der Lerninhalte als Voraussetzung für einen gelingenden Lernprozess. Implizit kommen hier fachdidaktische Dimensionen ins Spiel: die Frage der fachlichen Richtigkeit bei der Elementarisierung bzw. der didaktischen Reduktion, die zu den Grundfragen der Fach- bzw. Physikdidaktik gehören, und die Fokussierung auf das Wesentliche.

d) Lees (2012) Modell des kumulativen Lernens, das als Synthese der bisherigen Ergebnisse zum kumulativen Lernen auf einer breiten theoretischen Analyse und auf eigenen Studien basiert, setzt die *kumulative* und die *strukturierende Natur* des Lernens als universell gegeben voraus. *Kumulative Natur* des Lernens bedeutet, dass Lernende die Informationen ihrer Umgebung in Bezug auf die vorhandenen kognitiven Strukturen verarbeiten und interpretieren. Lee greift damit Wittrock (1974) und Ausubel (1968) auf: Wahrnehmung und Langzeitgedächtnis beeinflussen die Verarbeitung von Informationen. Aufgrund der *strukturierenden Natur* des Lernens entwickeln Lernende ihre kognitiven Strukturen – synonym: ihr Wissen – durch Prozesse der Assimilation und Akkommodation weiter (vgl. Lee, 2012, S. 34); Gagnés (1968) Lerntransfer bedeutet dann: Der Mensch ist fähig, konkretes und spezifisches Wissen in abstrakten Mustern zusammenzufassen. In Ausubels Worten: Lernende entwickeln ihr Wissen weiter, indem sie ihnen relevant erscheinende Informationen in vorhandene kognitive Strukturen integrieren oder neue kognitive Strukturen erzeugen, z. B. Konzepte, Schemata, mentale Modelle.

Lee charakterisiert Wissen mit zwei Dimensionen in den Ausprägungen Abstraktheit/Konkretheit (*abstractness/concreteness*) und Verallgemeinerbarkeit/Spezifität (*generality/specifity*) (Lee, 2012,

S. 43).¹⁰ Beim kumulativen Lernen entsteht durch Konstruktion¹¹ aus konkretem und spezifischem Wissen abstraktes und verallgemeinertes Wissen. Wissen ist damit hierarchisch angeordnet, dabei ist das konkret-spezifische Wissen dem abstrakten und verallgemeinerbaren Wissen untergeordnet. Abstraktes Wissen enthält im Gegensatz zu konkretem Wissen nur wenige Details. Konkretion ist daher notwendig, um einen tatsächlichen Gegenstand bestimmen zu können: Z. B. kann die Aufforderung „Bringen Sie mir den (physikalischen) Körper“ ohne nonverbales Zeigen zu einem fast beliebigen Ergebnis führen. „Bringen Sie mir die kleine, rote Metallkugel“ führt dagegen zu dem gewünschten Ergebnis. Umgekehrt: Die konkrete Beobachtung „Das Fadenpendel führt eine gleichförmige Schwingung durch, bei welcher die Rückstellkraft proportional zur Auslenkung ist“ kann abstrahiert werden zu „Das Fadenpendel ist ein harmonischer Oszillator“. Abstrakte Sätze oder Formeln und Gleichungen können in der Lehre auch vorgegeben sein, müssen dann aber an Beispielen konkretisiert werden.¹²

In den abstrakten Konzepten liegt eine große Stärke, weil ein Schema existiert. Wird z. B. ein System als harmonischer Oszillator beschrieben, so gibt es eine Kreisfrequenz ω_0 und damit die Frage, welche physikalischen Größen in ω_0 eingehen. Übertragungen des harmonischen Oszillators auf konkrete physikalische Systeme führen auch zur Verallgemeinerung: Fadenpendel, Federpendel, Schwingungen eines zweiatomigen Moleküls sind (unter bestimmten Bedingungen) harmonische Oszillatoren. Verallgemeinerung und Abstraktion verlaufen im Lernprozess also parallel (vgl. Lee, 2012, S. 52). Verallgemeinertes, abstraktes Wissen wird im Lernprozess durch Inferenz – z. B. aufgrund analoger Strukturen – aus einzelnen Wissensteilen aufgebaut.

Das Kumulieren und Strukturieren von Wissen kann insbesondere durch angeleitete Abstraktion und Konkretisierung, sowie Verallgemeinerung und Spezifizierung unterstützt werden. Im Kern entspricht dies lernpsychologischem Standardwissen (z. B. Stern & Schumacher, 2004): „Man kann [Menschen] lediglich beim Erwerb und der Anwen-

¹⁰ Inwieweit dieses eher einfache System ausreicht, um physikalisches Wissen zu kategorisieren oder zu modellieren, ist für uns eine offene Frage.

¹¹ D. h., Lernende führen kognitive Prozesse durch, über die sie reflektieren können. Diese kognitiven Prozesse können sich in ihrer ‚Qualität‘ unterscheiden und zu *meaningful* oder *rote learning* führen.

¹² Diese Aussage bietet Gelegenheit für ein weiteres Beispiel zum Unterschied zwischen *meaningful* und *rote learning* in der Domäne Physik: Wenn „ $F = m a$ “ vorgegeben ist, ist das für Novizen zunächst kein abstraktes Wissen, sondern im Gegenteil sehr konkretes Wissen, weil sich ein Novize an der Oberfläche dieser Formel festhalten kann, um dann zwei Werte einzusetzen, um den dritten zu berechnen. Die Konkretisierungen müssen hier auf der qualitativen Ebene stattfinden: Welche Phänomene gehören zur newtonschen Gleichung?

derung von Wissen unterstützen. [...] Intelligent wird Wissen durch seine Anwendung in unterschiedlichen Kontexten.“¹³ (ebd., S. 125 f.). Lees Modell konkretisiert die Unterschiedlichkeit der Kontexte dieser Aussage. Implizit findet sich in ihr auch Gagnés Einschätzung der fehlenden Kenntnis vom Mechanismus des Zustandekommens des Transfers wieder. Zusätzlich zu den genannten Instruktionsmaßnahmen für kumulatives Lernen weist Lee (2012) darauf hin, dass sich Bewertungen (das *assessment*) auf die übergeordneten Konzepte und nicht nur auf die Reproduktion von Wissen beziehen sollten. Zudem erwiesen sich die kognitiven Lernstrategien von Mayer (1984) – (Re-)Organisation, Wiederholung und Elaboration – als förderlich bei der Strukturierung des Wissens.

2.2. Diskussion und Synthese der vorgestellten Modelle: kumulatives Lernen und Lehren

a) Kumulatives Lernen: Den *pragmatischen Kern* kumulativen Lernens beschreiben wir wie folgt: Kumulatives Lernen bezeichnet die systematische Entwicklung von komplexen kognitiven Fähigkeiten auf Basis von *gut beherrschten* untergeordneten Fähigkeiten. Kumulatives Lernen findet damit über *große* Zeitskalen statt. Einzelne Lerngelegenheiten sollen daher über einen längeren Zeitraum systematisch ineinandergreifen, wodurch Lernende Regeln, Konzepte oder Schemata als übergeordnete Struktur ausbilden können. Dieses systematische Ineinandergreifen der Lerngelegenheiten ist Aufgabe einer kumulativ gestalteten Lehre (siehe unten). Die Ausbildung der übergeordneten Strukturen bezeichnen die Autoren in ihren jeweiligen Modellen als Lerntransfer (Gagné), Subsumtion und *meaningful learning* (Ausubel), Bedeutungskonstruktion (Wittrock) sowie Abstraktion und Verallgemeinerung (Lee). Hierbei sind Inferenzprozesse notwendig, z. B. über Analogiebildung (vgl. Lee 2012b, S. 889), sowie die Wiederholung und eine Variation in der Wiederholung. Dieses Lernen soll zu kumulierten oder, in einer anderen Terminologie, intelligenten Wissens- bzw. Fähigkeitssystemen der Lernenden führen.¹⁴ Auf das Vorhandensein einer kumulierten Wissensstruktur lässt sich schließen, wenn Menschen z. B.

fachlich und logisch richtig argumentieren, Argumentationslücken erkennen und Analogien verwenden. Speziell für die Physik ist die Fähigkeit, physikalische Prozesse richtig begründet qualitativ und quantitativ vorherzusagen, ein wichtiges Bewertungskriterium. Das Nennen von Beispielen zu abstrakten Wissens-elementen ist ein weiteres Kriterium, um kumulierte Wissensstrukturen zu erkennen. Kumulatives Lernen ist auch per se additiv erweiternd, denn das Wissen nimmt zu. Wir wollen einen Terminus *kumulativ-additiv* jedoch vermeiden, um eine semantische Überschneidung mit dem additiven Lernen zu umgehen.

b) Kumulatives Lehren: Kumulatives Lernen erfordert in allen Modellen eine Systematik von Lerngelegenheiten. Alle Modelle heben die Bedeutung von stofflich-hierarchischen Strukturierungsmaßnahmen als *erstes Kriterium* kumulativer Lehre hervor. Im didaktischen Jargon ist dies das Feld der didaktischen Rekonstruktionen mit ihren Elementarisierungen und didaktischen Reduktionen. Das *zweite Kriterium*, das Einbeziehen des Vorwissens und der Alltagsvorstellungen im Speziellen, ist nur bei Wittrock explizit formuliert, aber für das Physiklernen hochrelevant. *Drittens* sollte speziell der Transfer durch die Lehre unterstützt werden. Wir konkretisieren diese Kriterien:

(1) *Strukturierungsmaßnahmen:* Das Vorwissen der Lernenden ist die Grundlage für einen gelingenden Lernprozess und damit auch die Grundlage für Strukturierungsmaßnahmen. Auf einer großen Zeitskala, z. B. die eines schulischen Bildungszeitraums, aber auch über einen halbjährigen Kurs, zeigt sich eine Verwandtschaft zu Bruners (1960) Spiralcurriculum. Bruner geht davon aus, dass undifferenzierte, stabile und fachlich korrekte Konzepte durch geplantes regelmäßiges Aufgreifen im Lehr-Lern-Prozess elaboriert werden sollen. Dies soll Lernende bei der Organisation des Wissens unterstützen, während gleichzeitig die Komplexität des Wissenssystems zunimmt (Bruner, 1960, S. 52). Wir sehen eine Verwandtschaft mit dem Wiederaufgreifen von zentralen Konzepten bzw. Leitideen im Sinne Wittrocks. *Die Identifikation von zentralen Konzepten bzw. Leitideen und die Planung des regelmäßigen Aufgreifens sind daher originär inhaltliche Strukturierungselemente kumulativen Lehrens.*

(2) *Vorwissen:* Alltagsvorstellungen können mit Wittrock zu einem Vorwissensdilemma führen. Zum kumulativen Lehren gehört im Fall der Physik die Gestaltung der *Auseinandersetzung mit eigenen Alltagsvorstellungen.*

(3) *Transfer:* Der Aufbau eines abstrakten Konzepts oder Schemas geht nach Gagné mit einem vertikalen Lerntransfer einher. Allein hieraus ergibt sich: Konzepte und Schemata sollten in verschiedenen Kontexten angewandt werden, um die analogen Strukturen zu erkennen (s. o.). Dies entspricht Lee (s. 2.1. d): Es sind unterschiedliche Beispiele notwendig,

¹³ Der Terminus Kontext wird vielfältig verwendet und weist unterschiedliche Schichten auf: Ein Gegenstand tritt dabei immer in einem Zusammenhang auf und der Zusammenhang kann unterschiedlich sein. Der harmonische Oszillator kann als abstraktes physikalisches Modell im Kontext der Physik verwendet werden und z. B. im Phasenraum als weiterem Zusammenhang diskutiert werden. Auch die Konkretisierungen als Fadenpendel, Hemmpendel oder Molekülschwingung können als Kontext bezeichnet werden – sie heißen auch Anwendungen. Anwendungen in Technik und Lebenswelt heißen ebenfalls Kontexte. Zu unterscheiden ist dies von sinnstiftenden Kontexten nach Muckenfuß, die Lernende als hilfreich und wertvoll für ihre gegenwärtige und künftige Lebenssituation bewerten.

¹⁴ Wir benutzen die Termini Wissen und kognitive Fähigkeit eher synonym. Für kumuliertes Wissen ist dies korrekt, da kumuliertes Wissen ja heißt, dass es angewandt werden kann.

um zu abstrahieren und zu verallgemeinern. Der fachlich-inhaltliche Kontext ist also zu variieren wie im obigen Beispiel des harmonischen Oszillators. Ein Fadenpendel findet sich auch in technischen oder Lebensweltkontexten, z. B. in einem sehr hohen Wolkenkratzer oder als Uhr. Auch aus diesen Kontexten soll abstrahiert und verallgemeinert werden. Letzteres ist damit auch mit *Wiederholungen und Üben* verbunden.

Dabei lassen sich zwei Arten von Wiederholungen unterscheiden (vgl. auch Peschek, 1989): Wiederholungen auf einer ersten Ebene haben das Ziel, Routinen einzuüben (z. B. das wiederholte Üben der mathematischen Ableitung von Polynomfunktionen). Bei der zweiten Ebene liegt die Betonung auf der Anwendung der zugrunde liegenden Leitidee (am Beispiel der Ableitung wäre die Leitidee der Differentialquotient; seine wiederholte Anwendung an verschiedenen Funktionen sollte zu einem tieferen Verständnis der mathematischen Ableitung führen und nicht nur zur Stärkung von Routinen auf der ersten Ebene). Die Abgrenzung zum Üben als Standardmaßnahme der pädagogischen Psychologie ist nicht eindeutig: Üben bedeutet dort die Stärkung, Automatisierung und Feinabstimmung von bereits erworbenen Fertigkeiten (vgl. Renkl, 2015, S. 17).

Traditionell werden die zu erlernenden Inhalte, z. B. die newtonschen Axiome, anhand mehrerer Phänomene erklärt und formuliert. Die Lehre der newtonschen Axiome gilt damit als abgeschlossen und es wird erwartet, dass sie für Lernende *funktionierendes Werkzeug* sind, um z. B. die dynamischen Bewegungen von geladenen Teilchen in der Elektrodynamik zu beschreiben. Für eine kumulative Lehre in unserem Sinn ist der Abstraktionsprozess der Lernenden damit aber nicht abgeschlossen. Hieraus folgt, dass auch in den nachfolgenden Themengebieten (der Elektrodynamik oder schon innerhalb der Mechanik bei Stoßprozessen) etwa das dritte newtonsche Axiom wieder explizit diskutiert werden sollte, z. B. beim Flug des Elektrons durch den elektrischen Kondensator.¹⁵

Natürlich spielen bei den Lernprozessen weitere Faktoren eine Rolle, z. B. die kognitive Aktivierung, die Gestaltung des Lernmaterials oder der Medien (Texte und Bilder) sowie der Umgang mit Fehlern und das damit verbundene Feedback.

¹⁵ Kommentar: Ein Schritt zur Ausbildung einer abstrakten, übergeordneten kognitiven Struktur, z. B. des Schemas zum dritten newtonschen Axiom, ist das Herausarbeiten von zentralen Gemeinsamkeiten: zwei Körper, zwei Bewegungen, zwei Kräfte, bei unterschiedlichen Massen unterschiedliche Beschleunigungen. Dies ist auch der Schritt zur Dekontextualisierung oder Verallgemeinerung. Der Punkt, an dem Lernende diese Schemata außerhalb der Lernerrolle beim ‚Problemlösen‘ anwenden können, sollte dabei erreicht werden.

3. Das Modell ‚kumulatives Lehren und Lernen für das Lehramtsstudium Physik‘

Das Synthesemodell soll für das Physiklernen im Lehramtsstudium spezifiziert werden. Ziel soll es sein, mit dessen Hilfe den Aufbau eines physikalischen Wissenssystems durch Lehre so zu unterstützen, dass angehende Physiklehrkräfte als Vorbereitung für das Referendariat damit *verlässlich umgehen* können. Dies bedeutet, dass sie sich schulische Inhalte des Physikunterrichts selbstständig *schnell und unkompliziert* aneignen können – insbesondere *schon Gewusstes* aktualisieren – und für schulrelevante physikalische Probleme aus dem Stand im Unterricht über verschiedene Lösungswege verfügen oder selbst ad hoc Lösungen generieren können (vgl. 1.2.). Wir fordern daher zusätzlich zur bisherigen Synthese (s. 2.2. b): Die Hochschullehre sollte eine explizite Verbindung zur Schulphysik herstellen. Nicht nur aus lernpsychologischer, auch aus physikdidaktischer Sicht soll der Fokus auf der Wiederholung von physikalischen Grundkonzepten liegen, die für schulisches Physiklernen eine hohe Relevanz haben, z. B. das Kraftkonzept oder das Actio-Reactio-Schema. Wir werden uns insgesamt auf die Mechanik einschränken, da unser Modell in der Lehre der Mechanik umgesetzt und evaluiert werden soll.

Unser Modell der kumulativen Lehre, das kumulatives Lernen von Physik im Lehramtsstudium Physik unterstützen soll, weist fünf Dimensionen auf:

- i. wiederholtes Aufgreifen von physikalischen Grundkonzepten;
- ii. die Berücksichtigung der Alltagsvorstellungen der Studierenden, die mit den Grundkonzepten verbunden sind;
- iii. das wiederholende Anwenden der Grundkonzepte in variablen Kontexten.

Dabei bezieht sich i. auf Wiederholungen der Grundkonzepte über den gesamten, i. d. R. längeren Lehrgang – in unserem Fall werden dies drei Semester sein. Der Punkt iii. hingegen ist eine Forderung zur Ausgestaltung einzelner Zeitpunkte im Lehrgang: Wird z. B. der harmonische Oszillator gelehrt, so wären gemäß i. in diesem fachlichen Kontext alle newtonschen Axiome wiederholend zu diskutieren; Punkt iii. fordert weiter, dass zum harmonischen Oszillator auch mehrere Anwendungsaufgaben zu stellen sind. Bei diesen kann ggf. bei der einen oder anderen Aufgabe wiederum Punkt i. erfüllt werden. Diese ‚Designprinzipien‘ greifen ineinander und sind nicht mechanistisch anzuwenden.

Für die Zielgruppe der Physikstudierenden folgt als viertes Kriterium

- iv. eine schulbezogene Fachausbildung Physik.

Eine zusätzliche fünfte Dimension ist eine Projektion in die Zukunft und könnte die Selbstwirksamkeitserwartungen beeinflussen: Studierende sollen die physikalisch-fachliche Lehre erstens als relevant

für den Lehrerberuf wahrnehmen und zweitens als relevant für ihre eigene professionsbezogene Entwicklung bewerten (also z. B. „Ich sehe, dass ich das erworbene physikalische Wissen in meinem zukünftigen Beruf einsetzen kann.“). Kumulatives Lernen in der Physiklehrer*innen-Ausbildung sollte daher den Studierenden

v. die Wahrnehmung und positive Einschätzung der Entwicklung der eigenen Fähigkeiten, Physik zu unterrichten, ermöglichen und damit ihre Professionalisierung unterstützen.

Dies sollte durch den Schulbezug möglich sein. Punkt v. bezieht sich auf die Bewertung des Lernens in den Lehr-Lern-Arrangements für den künftigen Beruf. Das Modell liefert Kriterien für die Hochschullehre der Lehramtsausbildung Physik. Diese werden in den nächsten Abschnitten erläutert und mit Beispielen aus der Mechanik illustriert. Tabelle 1 zeigt unser Modell im Überblick.

i. Wiederholtes Aufgreifen von physikalischen Grundkonzepten

Lernen kann unterstützt werden, wenn auf zentrale Inhalte (bei Wittrock Leitideen genannt) fokussiert wird. In unserem Fall der schulbezogenen Mechanik sind die Leitideen die physikalischen Grundkonzepte Energie, Kraft, Impuls, Drehmoment, Drehimpuls. Die Notwendigkeit der Veränderung von Lehr-Lern-Arrangements in der Hochschule deutet sich in einer älteren Studie an: Das Kraftkonzept wird i. d. R. in der Vorlesung zur Mechanik gelehrt und kann in der Elektrodynamik vorausgesetzt werden. Wiesners (1994) empirische Untersuchung bezweifelt Letzteres. Auch Physikstudierenden sei z. B. nicht klar, dass mit \vec{F} in $m\vec{\dot{x}} = \vec{F}$ die resultierende Kraft gemeint ist. Typisch sei auch eine Verwechslung von Actio-Reactio-Kräften mit den Kräftepaaren an einem Körper im Kräftegleichgewicht. Die Grundkonzepte sollten daher in und nach der Mechanik wiederholt explizit dargestellt werden. Es sollte u. a. auch in der Elektrodynamik, z. B. beim Aufstellen der Bewegungsgleichungen von elektrisch geladenen Teilchen in elektrischen und magnetischen Feldern, noch einmal elementar wiederholt und reflektiert werden, z. B.: *Gilt das dritte newtonsche Axiom Actio/Reactio für das Elektron im elektrischen Feld eines Kondensators? Welches ist der zweite Körper? Oder für das Grundkonzept Impuls: Wird ein Elektron im elektrischen Feld eines Kondensators beschleunigt, so wächst sein Impuls. Wo kommt dieser Impuls her?* Innerhalb der Mechanik und über die Themen hinweg werden dabei abstrakte Schemata konkretisiert und Verallgemeinerungen ermöglicht, also das kumulierte Lernen im engeren lernpsychologischen Sinn. Das wiederholte Aufgreifen der Grundkonzepte kann in der Vorlesung oder in den Übungen erfolgen (s. o.).

ii. Berücksichtigung der Alltagsvorstellungen der Studierenden

In der Physiklehrer*innen-Ausbildung sollte ein Konzeptwechsel angestrebt werden, der häufig nicht durch die Schule erfolgt. Damit haben die Studierenden auch die Möglichkeit, die Rolle ihrer zukünftigen Schülerinnen und Schüler einzunehmen und damit deren Schwierigkeiten *nach-* bzw. *vorzuerleben*. Wir gehen hier nicht auf die als bekannt vorauszusetzende physikdidaktische Literatur ein.

iii. Wiederholendes Anwenden der Grundkonzepte in variablen Kontexten

Das *variable* oder auch *intelligente* Üben hat beim kumulativen Lernen die Funktion, die Lehramtsstudierenden zur flexiblen Anwendung der abstrakten und allgemeinen Grundkonzepte zu befähigen (s. o.). Beispielsweise sollte auch in der Hochschullehre die newtonsche Gleichung anhand von verschiedenen Kontexten erklärt werden: So könnte in einigen Aufgaben einer Übung von der Beobachtung der Beschleunigung eines Körpers auf die resultierende Kraft geschlossen werden, die auf den Körper folglich ausgeübt werden muss. In einigen anderen Aufgaben der gleichen Übung könnte aus allen Kräften, die auf einen Körper ausgeübt werden, die resultierende Kraft bestimmt und somit die Beschleunigung vorhergesagt werden. Beide Perspektiven finden sich im Gesetz von Newton. Dieser Perspektivenvergleich kann wiederum auch im Sinne von i. über den gesamten Lehrgang wiederholt werden.

iv. Schulbezogene Fachausbildung

Angehende Physiklehrkräfte beziehen das im Hochschulstudium erworbene physikalische Wissen nicht auf die Schulphysik (s. 1.2.): Die Fähigkeit, den Lagrange-Formalismus zur Aufstellung von Bewegungsgleichungen anzuwenden, bedeutet z. B. nicht zwingend, die mechanischen Grundkonzepte flexibel anwenden zu können. Der Lagrange-Formalismus erlaubt eine formale Lösung schwieriger mechanischer Probleme. Für die Entwicklung der Fähigkeit, Anfängerinnen und Anfängern physikalisches Grundwissen zu vermitteln, spielt er eine eher untergeordnete Rolle. An diesem Beispiel lässt sich verstehen, dass Merzyn (2017) die Probleme von Referendarinnen und Referendaren sowie jungen Lehrkräften im Unterricht auch auf „unpassende Fachkompetenz“ zurückführt (vgl. ebd., S. 77). Angehende Lehrkräfte sollten also lernen, die erworbenen Inhalte des Physikstudiums mit den Schulinhalten in Verbindung zu bringen: Das Konzept des Drehmoments wird z. B. universitär als abstrakter Pseudovektor $\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$ eingeführt, in der Schule hingegen als Spezialfall des Hebels. Das *vertiefte Schulwissen* zum Drehmoment sollte es erlauben, die Bedingungen zu kennen, unter denen der Hebel in der Schule unterrichtet wird, also den Hebel aus dem Kreuzprodukt herzuleiten oder beim zweiseitigen Hebel (z. B. einer Wippe) in der Schule zu erklären, weshalb sich die Drehmomente ausgleichen,

obwohl die Kräfte auf beiden Seiten des Hebels nach unten zeigen.

v. Wahrnehmung der Relevanz für die Lehrkräfteprofessionalisierung

Bei der Spezifikation des Modells zum kumulativen Lehren und Lernen der Physik in der Lehramtsausbildung sollte, wie gesagt, die Relevanz, die Lehramtsstudierende dem eigenen Lernen für die Entwicklung ihrer Professionalität als Lehrerinnen und Lehrer zuschreiben, eine Rolle spielen. Dieser Aspekt lässt sich u. a. auch mit dem Kompetenzmodell von Baumert & Kunter (2006) begründen, welches das Belief-System einer Lehrperson einbezieht. Für eine angehende Physikerin oder einen angehenden Physiker ergibt sich die Bedeutung des Physikstudiums meist von selbst: Jeder grundlegende physikalische Bereich ist im Prinzip wichtig.

Für Physik-Lehramtsstudierende ist dies schwieriger zu erkennen. Dafür sprechen zwei weitere Quellen: Dies ist erstens die Studie von Heublein et al. (2010), die Studienabbrüche mit einer fehlenden Professionsorientierung im Lehramtsstudium in Verbindung bringt. Zweitens berichtet Haak (2016), dass sich Lehramtsstudierende auch in Fachveranstaltungen „stärkere Bezüge zum späteren Beruf [wünschen]“ (ebd., S. 21). Diese Problematik scheint tief in die Institution der universitären Physiklehramtsausbildung hineinzureichen: Merzyn (2004) beschreibt die alte Debatte, welche Rolle die Profession in der Physiklehramtsausbildung spielen sollte, und damit, *welches* Fachwissen Lehramtsstudierende beherrschen sollten. Die Institution der Hochschule macht in ihrer Lehre häufig nicht sichtbar, worin die Bedeutung der Fachveranstaltung für die zukünftige Lehrprofession besteht. Unser Ansatz der kumulativen Lehre soll daher die Bedeutung

Dimension des Modells	Theoretische Begründung aus den lernpsychologischen Theorien zu kumulativem Lernen	Ziele der Fachausbildung durch kumulatives Lernen	Umsetzung in die kumulative Lehre
i. wiederholtes Aufgreifen von physikalischen Grundkonzepten	<ul style="list-style-type: none"> – Rückgriff auf das Vorwissen bei der Erarbeitung neuer Inhalte mit strukturierenden Elementen (hier: Grundkonzepte) – Transfer: Das Vorwissen kann nach und nach verallgemeinert und erweitert werden, wenn gezielt und wiederholt darauf aufgebaut wird. 	<ul style="list-style-type: none"> – Aufbau von tragfähigem, fachlich richtigem Wissen zu physikalischen Grundkonzepten 	<ul style="list-style-type: none"> – gezieltes Wiederaufgreifen der Grundkonzepte und Explizierung der zentralen Aspekte
ii. Berücksichtigung der Alltagsvorstellungen	<ul style="list-style-type: none"> – Auseinandersetzung mit eigenen Alltagskonzepten auch nach der Schule notwendig, da dieser Teil des Vorwissens sind (Vorwissensdilemma lösen) 	<ul style="list-style-type: none"> – Sensibilisierung für eigene Alltagsvorstellungen und deren Reflexion 	<ul style="list-style-type: none"> – Aufgaben anbieten, die eine Konfrontation mit oder das Aufgreifen von Alltagsvorstellungen ermöglichen
iii. Wiederholen des Anwendens der Grundkonzepte in variablen Kontexten	<ul style="list-style-type: none"> – Konkretisieren der Leitidee in unterschiedlichsten Kontexten in Form von Übungen – Abstrahieren von konkret-spezifischem Wissen (entspricht der Dekontextualisierung) – Verallgemeinern und spezifizieren 	<ul style="list-style-type: none"> – Aufbau von flexibel anwendbarem – also nicht trägem – Wissen 	<ul style="list-style-type: none"> – Ein breites Spektrum kontextbasierter Aufgaben anbieten
iv. Schulbezogene Fachausbildung	<ul style="list-style-type: none"> – Beziehungen zwischen Hochschulwissen und Schulinhalten herstellen 	<ul style="list-style-type: none"> – Aufbau eines Fachwissens, das den Anforderungen der Schule entspricht 	<ul style="list-style-type: none"> – Aufgaben anbieten, die explizit die Verbindung von Hochschulwissen und typischen Schulinhalten zeigen
v. Wahrnehmung der Relevanz für die Lehrkräfteprofessionalisierung	<ul style="list-style-type: none"> – Professionsbezogene Wahrnehmungen und Relevanzzuschreibungen beeinflussen die Studienmotivation. 	<ul style="list-style-type: none"> – Stärkung der Selbstwirksamkeitserwartungen von Lehrerinnen und Lehrern – Überwindung der wahrgenommenen Distanz vom Studium zum Berufsfeld 	<ul style="list-style-type: none"> – schulrelevante Kontexte und Aufgaben verwenden

Tab. 1: Modell des kumulativen Lehrens und Lernens in der Lehramtsausbildung Physik

des (universitären oder vertieften) Fachwissens für die Schule wahrnehmbar machen. Die Punkte ii. bis iv. können den Schulbezug inhaltlich herstellen. Eine wahrgenommene Relevanz sollte nach Deci et al. (1991, 1994) das Lernverhalten positiv beeinflussen.

4. Ein Beispiel: Kumulatives Lehren und Lernen von Drehimpuls und Drehmoment

In der Lehramtsausbildung Physik sind Drehimpuls und Drehmoment relevante Inhalte und Grundkonzepte für die Dynamik der Drehbewegungen. Die wenigen Arbeiten zu diesem Thema weisen auf Lernschwierigkeiten bei Studierenden hin (z. B. Rimoldini & Singh, 2005; Kautz, 2014). Die Anwendung des Modells des kumulativen Lehrens soll an diesem Beispiel exemplarisch erläutert werden, um auch an einem wenig beforschten Grundkonzept zu illustrieren, wie das Modell in eine Intervention umgesetzt werden kann. Eine ausführlichere Darstellung einer kumulativen Lehre, die auf dem vorgestellten Modell basiert, findet sich in Rubitzko et. al. (2018).

Wir gehen zunächst davon aus, dass das Drehmoment in der Vorlesung erläutert, formal definiert und an einem Beispiel veranschaulicht wurde. Als Beispiel diene die Einführung nach Demtröder (2008, S. 67): Das Vektorprodukt $\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$ für eine Punktmasse m wird Drehmoment genannt. Die Punktmasse hat dabei einen Drehimpuls $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$ bezogen auf einen festgelegten Punkt. Dann ist das wirkende Drehmoment gleich der zeitlichen Änderung des Drehimpulses.

Die Aspekte i. bis v. des Modells kumulativer Lehre (s. 3.3.) sind dabei nicht als zeitliche Abfolge zu verstehen. Zudem können die verschiedenen Dimensionen des Modells methodisch auch in Kombinationen auftreten, beispielsweise kann die Maßnahme i. (Wiederholtes Aufgreifen der Grundkonzepte) entweder in der frontalen Vorlesungsphase stattfinden oder in Form von Übungen. Der zweite Fall stellt eine Kombination der Maßnahmen i. und iii. dar. Nach obiger Einführung der Konzepte Drehmoment und Drehimpuls folgen mögliche Alltagsvorstellungen und das Üben in variablen Kontexten. Anschließend wird das Konzept des Drehmoments im Kontext anderer Lehrinhalte wiederholend und explizierend aufgegriffen.

Zu (ii) *Berücksichtigung der Alltagsvorstellungen der Studierenden*: Die Alltagsvorstellungen zu Drehbewegungen, Drehimpuls und Drehmomenten sind mit Ausnahme des Kraftbegriffsclusters bei Kreisbewegungen sowie Schwierigkeiten im Umgang mit der Zentrifugalkraft wenig untersucht (Rimoldini & Singh, 2005, S. 1). Es lässt sich aber über die Analogie von Kraft und Drehmoment etwas aussagen. Studierende sprechen z. B. analog zum *Kraft haben* vom *Drehmoment haben*. Eine mögliche kumulative Lehrmaßnahme könnte Übungsphasen während der Vorlesung umfassen, welche die Methode der *peer*

instruction nach Duncan & Mazur (2005) nutzen. Dort erhalten die Studierenden in der Vorlesung Verständnisaufgaben im Multiple-Choice-Format – also physikalisch falsche und richtige Aussagen zum Drehmoment. Nach der Einschätzung der Aussagen auf Richtigkeit können anschließend Fehlvorstellungen diskutiert werden.

Zu (iii) *Wiederholendes Anwenden*: Die Studierenden sollen die Grundkonzepte anwenden. Diese Aufgaben sollten so gestaltet sein, dass in verschiedenen Kontexten das Grundkonzept als Leitidee zur Lösung verwendet werden kann. Dabei sollten verschiedene Aspekte des Grundkonzepts aufgezeigt werden. In den folgenden drei Beispielen sind dies der Zusammenhang zwischen Drehmoment und Drehimpuls, der Wechselwirkungsaspekt des Drehmoments und das resultierende Drehmoment.

Abbildung 1: a) zeigt eine Kurvenfahrt. Es handelt sich um eine Drehbewegung, bei der der Betrag der Geschwindigkeit konstant bleibt, ihre Richtung sich jedoch ändert. Eine qualitative Anwendung des Drehimpulskonzepts beinhaltet die Beschreibung der Größe im Verlauf der Kurvenfahrt: *Wie ändern sich die Größen \vec{p} , \vec{r} und \vec{L} und deren Beträge in geraden und gekrümmten Abschnitten der Fahrt?* Analog bedeutet das für das Drehmoment: *Wie muss sich das resultierende Drehmoment ausgehend von der Kenntnis über $\vec{L}(t)$ während der Kurvenfahrt verhalten?* Daran schließt sich an: *Welche Kräfte müssen also auf das Auto ausgeübt werden, um das Drehmoment zu realisieren?*

Abbildung 1: b) zeigt die Kreisbewegung einer Punktmasse mit zunächst konstantem Drehimpuls. Der Anwendungskontext ist jetzt physikalisch abstrakt. Wieder wird nach der Änderung des Drehimpulses und dem Drehmoment gefragt: *Wie ändert sich der Drehimpuls (in Betrag und Richtung), wenn das Drehmoment einmal durch den Kraftstoß F_1 und einmal durch den Kraftstoß F_2 ausgeübt wird?*

Das Beispiel zu Abbildung 1: c) soll eine physikalische Messung des Drehmoments mit Hilfe des Wechselwirkungsprinzips thematisieren. Eine

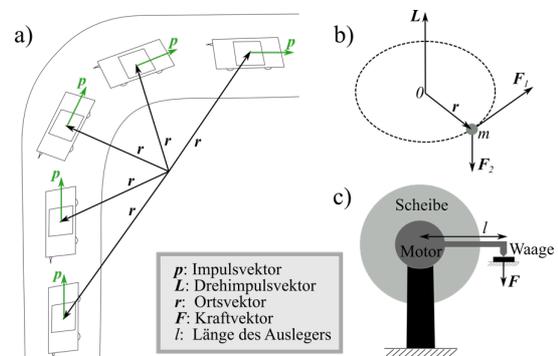


Abb. 1: a) Kurvenfahrt, b) Drehbewegung einer Punktmasse, c) Messung des Drehmoments mit einer Waage

Scheibe wird mit einem Elektromotor zum Drehen gebracht. Das Motorgehäuse ist ebenfalls drehbar gelagert. Ein horizontaler Ausleger der Länge l ist fest mit dem Motorgehäuse verbunden und liegt auf einer Waage: *Wie kann mit dieser Anordnung das Drehmoment bestimmt werden, das der Motor auf die Drehscheibe ausübt?* Das Konzept *resultierendes Drehmoment* kann analog zu einer resultierenden Kraft konkretisiert werden: Nach einiger Zeit stellt sich bei konstanter Motorleistung und damit konstant gemessener Auflagekraft F eine konstante Winkelgeschwindigkeit der Scheibe ein. Es ist zu diskutieren, welche weiteren Drehmomente im Realexperiment auf die Scheibe ausgeübt werden, wodurch das resultierende Drehmoment gleich null wird.

Schulbezug (iv): Zielsetzung dieses Teilaspekts der kumulativen Lehre ist es, den Studierenden explizit zu zeigen, wie das universitäre oder vertiefte Wissen mit der Schulphysik zusammenhängt. Ein klassisches Beispiel aus der Schule ist die Wippe als zweiseitiger Hebel: *Wie folgt dieser aus dem universitären Wissen des Drehmoments als Vektorprodukt?* Nach Riese et al. (2015) müssen Lehrkräfte u. a. „Randbedingungen einer Schulaufgabe erkennen [und] Aufgaben zielgruppengerecht vereinfachen [können]“ (S. 60), wenn sie über „vertieftes Schulwissen“ verfügen. Dies ist bei der Wippe die Frage, warum ihre Modellierung bei symmetrischer Massenverteilung selbst als masselos angenommen werden kann. Oder die Frage: *Welche relevanten Kräfte müssen bei der Modellierung der Wippe als zweiseitiger Hebel gezeigt werden?* Häufig werden bei einer Wippe wie in Abb. 2 nur die Kräfte \vec{F}_1 und \vec{F}_2 eingezeichnet. In diesem Fall würde bei konsequenter Anwendung des Kraftkonzepts folgen, dass die Wippe mit einer resultierenden Kraft $\vec{F}_1 + \vec{F}_2$ nach unten beschleunigt werden müsste. Die Kraft \vec{F}_3 ist also notwendig, um ein Kräftegleichgewicht der Wippe zu erreichen.

Weiter ergibt sich erst aus einer Vektoraddition der Drehmomente, dass die Wippe auch rotativ ihre Bewegung nicht ändert, weil das resultierende Drehmoment verschwindet. Aus der Vektoraddition kann der Spezialfall des Hebelgesetzes, wie er in der Schule angewandt wird, abgeleitet und den Studierenden explizit gezeigt werden, wie sich die Schulphysik aus dem universitären Wissen ergibt.

Zu (i) Wiederholtes Aufgreifen des Konzepts Drehmoment: Wurde das Drehmoment über den Massepunkt eingeführt, so kann es bei der Mechanik des starren Körpers wieder aufgegriffen und diskutiert werden.¹⁶ Dort werden neuartige Phänomene mit

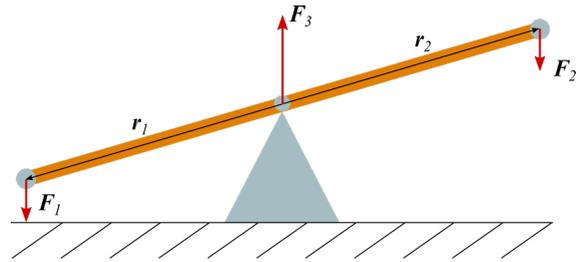


Abb. 2: Wippe als zweiseitiger Hebel

dem gleichen Konzept bearbeitet. Wiederholtes Aufgreifen bedeutet auch hier, explizit zu zeigen, wie sich mit dem Drehmomentkonzept diese Phänomene elementar beschreiben lassen. Ein Beispiel wären Phänomene, in welchen bei der Rotation eines starren Körpers um eine feste Achse der Drehimpulsvektor nicht mit der Drehachse übereinstimmt (Unwucht). Der Drehimpulsvektor ändert sich dann periodisch; es muss also ein resultierendes Drehmoment existieren, was zu explizieren ist: *Wie sieht dieses Drehmoment genau aus und welches sind die beiden wechselwirkenden Körper?*

Auch beim Magnetismus wird wieder das Drehmoment verwendet (z. B. Eichler et al., 2016, S. 221): „In einem homogenen (räumlich konstanten) Feld wirkt auf den Dipol nur ein Drehmoment, aber keine resultierende Kraft: $\vec{M} = \mu_0 \vec{m} \times \vec{H}$.“ Das Grundkonzept des Drehmoments wird dort formal verwendet, jedoch nicht mehr expliziert. Bislang wurde das Drehmoment bei Körpern diskutiert, die durch ein Lager eine feste Drehachse hatten. Beim magnetischen Dipol ist die Drehachse frei. Wiederholtes Aufgreifen des Grundkonzepts bedeutet, nochmals zu fragen (Abb. 3): *Welche Beziehung besteht zu $\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$? Welche Bewegung führt der Dipol aus? Gibt es einen Wechselwirkungspartner, auf den im Sinne von Actio/Reactio ebenfalls ein Drehmoment ausgeübt wird? Gibt es ein analoges mechanisches System?*

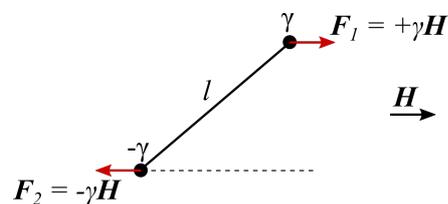


Abb. 3: Magnetischer Dipol mit Ladung γ

5. Zusammenfassung und Diskussion

Der Stand der physikdidaktischen Forschung (s. 1) führt zur begründeten Hypothese, dass weder die Schule noch ein Hochschulstudium angehenden Physiklehrerinnen und -lehrern zu einem für die Schule angemessenen Fachwissen für das Referendariat verhilft. Konkret sollte diese Fachwissensba-

¹⁶ Lernpsychologisch arbeiten wir mit einer Analogie: Der starre Körper wird mathematisch aus einzelnen Massepunkten aufgebaut. Wichtig als Element der kumulativen Lehre ist die Explizierung dieser Physik des einfachen Massepunktes. In der Sprache des Analogielernens meint das die Verbindung von Bildbereich und Zielbereich.

sis angehende Physiklehrkräfte dazu befähigen, im Unterricht

- (1) grundlegende physikalische Begriffe und Konzepte fachlich richtig zu erklären,
- (2) diese im Unterricht an Standardbeispielen reproduzierend und reorganisierend anzuwenden – anders gesagt: dort einen nahen Transfer zu vollziehen –, und
- (3) im Rahmen der Schulphysik auch neue physikalisch-fachliche Probleme zu lösen – anders gesagt: dort einen weiten Transfer zu vollziehen – und so ihre Wissensbasis selbständig zu elaborieren.

Dieses Wissen – oder Wissenssystem – kann in unterschiedlichen Terminologien als nicht träge, intelligent, verfügbar oder tragfähig charakterisiert werden. In der Literatur findet sich u. a. diese Reihe von Bezeichnungen, die sich u. U. in Nuancen, Schwerpunktsetzungen und im Fokus unterscheiden, aber den gleichen Kern fassen wollen. Es ist unsere Auffassung, dass diese Art Wissen oder funktionierendes Wissenssystem als Disposition zur physikalisch-fachlichen Kompetenz von Lehrpersonen wesentlich beiträgt oder diese sogar bestimmt. Sie ist aber keine hinreichende Bedingung für Performanz, wie es ja die weinertsche Kompetenzdefinition zum Ausdruck bringt, wohl aber mit den drei obigen Forderungen eine notwendige Bedingung. Das Ziel eines Hochschulstudiums Lehramt Physik sollte folglich die Entwicklung eines der Schule angemessenen, tragfähigen physikalisch-fachlichen Wissenssystems sein. Die Alternative bestünde darin, den angehenden Physiklehrerinnen und -lehrern diese Entwicklung wie bisher als zusätzliche Aufgabe im Referendariat zu überlassen und sich im Physikstudium nicht oder wenig darum zu kümmern.

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines erweiterten pragmatischen Modells des kumulativen Lehrens von Physik im Lehramtsstudium, bestehend aus Kriterien, die das kumulative Physiklernen für angehende Physiklehrerinnen und -lehrer ermöglichen sollen. Zu diesem Zweck haben wir die einschlägige, auch ältere psychologische Literatur noch einmal rezipiert und mit einer aktuellen psychologisch ausgerichteten Synthese zum kumulativen Lernen verglichen.

Die Ansätze zum kumulativen Lernen zeigen in einigen empirischen Studien positive Effekte, auch wenn wir dies nicht explizit und in aller Breite dargestellt haben. Wir verweisen hier auf die Arbeit von Lee (2012), aber auch auf die einschlägigen Lehrbücher der Psychologie. Viele grundsätzliche Ergebnisse und Aussagen zum kumulativen Lernen entsprechen lernpsychologischem Standardwissen (s. insbesondere Seel, 2003). Dieses bezieht sich inhaltlich in der Regel auf einzelne und begrenzte Lerneinheiten. In der lernpsychologischen Literatur finden sich zudem oft nur einfache Wissenssysteme, an denen Abstraktion und Verallgemeinerung erläutert werden, z. B. das Konzept *Baum* oder *Musikin-*

strument. Seel (2003, S. 24) weist über diese Begrenzung hinaus: „Lernen ist kumulativ, insofern es zum Aufbau komplexer und überdauernder Wissensstrukturen und mentaler Modelle beiträgt.“ Kumulatives Lernen erfolgt also über lange Zeiträume, wenn komplexe Wissenssysteme wie das physikalisch-fachliche Wissen einer Physiklehrerin oder eines Physiklehrers aufgebaut werden sollen. Es stellt sich dabei die Frage, wie verschiedene Lerneinheiten ineinandergreifen müssen, damit in einer Lerneinheit erworbene Wissens Elemente nicht isoliert bleiben. Wir wollen für unser Modell die Aspekte kumulatives Lernen, kumulatives Lehren und kumuliertes Wissen begrifflich unterscheiden. Unser Modell ist im Kern domänenspezifisch und fachdidaktisch ausgerichtet.

Der erste Schritt der Anwendung des Modells beim Design eines Lehrgangs besteht in der originär physikdidaktischen Bestimmung der fachlichen Leitideen oder Grundkonzepte. Um es noch einmal klar zu sagen: Die Grundkonzepte sollen dabei nicht nur etikettierende Oberbegriffe (wie z. B. das Konzept *System* in den Basiskonzepten) sein, die sehr heterogene Inhalte umfassen (vgl. z. B. Schecker & Parchmann, 2006, S. 62). Grundkonzepte wie das Kraft- oder Impulskonzept sind für das Physiklernen zentral, da sie auch in der Schule zur Lösung physikalischer Problemstellungen notwendig sind. Damit kommen in unserem Modell sowohl die stoffliche physikdidaktische Dimension als auch die Adressierung, hier der Professionsbezug des Lehramtsstudiums, ins Spiel.

Bei den physikalischen Grundkonzepten ist die Hierarchisierung klar zu erkennen: Die newtonsche Gleichung etwa muss nach unserem Modell systematisch qualitativ und quantitativ in verschiedenen Kontexten angewandt und immer wieder expliziert werden. Hier zeigt sich das bekannte Wechselspiel des kumulativen Lernens und Lehrens, das ein abstraktes Prinzip konkret anwendet, aus verschiedenen Konkretisierungen abstrahiert und verallgemeinert sowie spezifiziert.

Wir fassen in Tabelle 2 auf Seite 15 die rezipierten lernpsychologischen Ansätze noch einmal vergleichend zusammen und ordnen diese nach dem kumulativ-kognitionspsychologischen Aspekt und dem physikdidaktischen Lehraspekt.

Auch die lernpsychologische Synthese Lees ist aus Sicht der Physikdidaktik nicht vollständig. Die psychologische Forschung hat insbesondere mit den Arbeiten von Wittrock schon früh die Problematik der Alltagsvorstellungen erkannt. Die psychologischen Arbeiten stimmen in den Grundzügen mit den physikdidaktischen Diskussionen überein, insbesondere diejenigen zum *conceptual change* (z. B. Duit, 1995). Lees Synthese berücksichtigt das wittrocksche Vorwissensdilemma nicht. Sie stellt hingegen klar dar, dass kumulatives Lernen über Vorstellungen zum einfachen Anknüpfen an Vorwissen und

dessen Verknüpfen hinausgeht – selbst dann, wenn kein Vorwissensdilemma vorliegt –, und Abstrahierung sowie Verallgemeinerung bedeutet, und damit mit Übung, Wiederholung und Elaboration einhergeht.

Kumulatives Lernen wird in vielen fachdidaktischen Diskursen verwendet, um auf die Notwendigkeit hinzuweisen, dass verschiedene Aspekte fachlicher Konzepte kognitiv zu verbinden sind. Wir möchten auf die potenzielle Gefahr hinweisen, kumulatives Lernen nicht als zu einfachen Verknüpfungsbegriff zu interpretieren, der ein eher kategoriales oder assoziatives Verknüpfen impliziert. Beispielsweise¹⁷ findet für Neumann et al. (2008) kumulatives Lernen statt, wenn einzelne Wissens Elemente zu einem komplexen Wissenssystem verknüpft werden. Dies geschieht dort über Leitideen, die eine Hierarchie aufbauen: Ein Fakt, mehrere Fakten, ein Zusammenhang, mehrere Zusammenhänge.

Warum besteht die Gefahr, ein zu einfaches Verknüpfungskonzept anzuwenden? Erstens impliziert das hierarchische Modell, dass Lernen und Wissensstrukturen auf richtigen Fakten und Zusammenhängen basieren. Ein Vorwissensdilemma beim Lernprozess wird nicht thematisiert; für eine Vermessung von richtigen Wissensstrukturen ist dies auch nicht notwendig, wohl aber für Lehr-Lern-Prozesse. Zweitens sollte das Bild des Verknüpfens nicht die notwendige Behandlungstiefe im Umgang mit physikalischen Tiefenstrukturen unterschlagen. Beispielsweise ist eine Kenntnis des Zusammenhangs zwischen Kraft und Energie über den Arbeitsbegriff noch keine tiefe Elaboration des Zusammenhangs beider Konzepte.

Bei der Verwendung des Begriffs des kumulativen Lernens sollte also in Hinsicht auf die Lehr- und Lernprozesse berücksichtigt werden, dass *Verknüpfungen* das Ergebnis eines langen, kognitiven Prozesses sind. Die kumulative Lehre bildet dann einen Rahmen, der Regeln oder Designprinzipien angibt,

¹⁷ Weitere Beispiele für die Verwendung dieses Verknüpfungskonzepts finden sich in Freiman (2001, S. 1): „Unter kumulativem Lernen versteht man einen Lernprozess, bei dem bereits vorhandene Wissens Elemente in hohem Maß zum Ausgangspunkt für neu hinzugekommenes Wissen gemacht werden und gleichzeitig das neue Wissen möglichst vielfältig mit dem vorhandenen verknüpft wird.“ Siehe auch bei Wadouh, Sandmann & Neuhaus (2009, S. 71): „Sowohl bei Ausubel als auch bei Wittrock stehen die Verknüpfung der einzelnen Wissens Elemente und das Vorwissen der Schüler im Vordergrund sinnvoller Lehr-Lernprozesse. [...] Sollen Lerninhalte längerfristig behalten und ein tiefergehendes Verständnis erreicht werden, ist es zudem notwendig, dass sie vom Lernenden intensiv elaboriert werden. Dies beinhaltet, dass Konzepte verknüpft und Zusammenhänge hergestellt werden.“ Und nicht zuletzt beachte auch Bohm (2017, S. 33): „Durch die zunehmende Komplexität der Begriffsnetze ergibt sich ein kumulativer Wissenserwerb: Je mehr konstituierende Fachbegriffe und (Fach)-Konzepte miteinander verknüpft werden können, desto komplexer und differenzierter ist der Wissenserwerb. Die Verknüpfung von Zusammenhängen zwischen Begriffen und Konzepten erfolgt durch das Bilden von individuellen Wissensnetzen.“

wie diese Prozesse über längere Zeiträume unterstützt werden können.

Auch das Konzept der *learning progressions* knüpft an den kumulativen Lerntheorien an; dies betrifft insbesondere die Sequenzierung von Lernwegen nach Gagné anhand von zentralen *core ideas* (Duschl, Schweingruber & Schouse, 2007), die den Grundkonzepten entsprechen. Das vorgestellte Konzept der kumulativen Lehre kann auch im Sinne der *learning progressions* genutzt werden. Jedoch wird dabei kein linearer Verlauf von Lernwegen anhand hierarchischer Wissensstufen vorgezeichnet. Stattdessen soll kumulatives Lernen u. a. durch verstreut wiederholendes Üben der Grundkonzepte über einen Zeitraum von mehreren Semestern auch als Bestandteil der Vorlesungen mittelfristig zum Aufbau eines stabilen schulrelevanten Wissens zu physikalischen Grundkonzepten beitragen. Ob hier Strukturen erkennbar oder bedeutsam sind, bleibt eine offene Frage.

Unsere Auffassung von kumulativem Lernen und Lehren zielt auf die Physikausbildung von Lehramtsstudierenden. Was bestimmt die Adressierung an Physiklehramtsstudierende? Es sind dies der Schulbezug und die Professionalisierung von Physik Lehrkräften. In Anlehnung an den Begriff der Salienz (Stroebe, Jonas & Hewstone, 2013) sollen Lehramtsstudierende Gelegenheit erhalten, die Relevanz der Fachausbildung Physik für ihre eigene Lehrprofessionalisierung zu erkennen. Diese Aussage wäre als Forderung bei einem bestehenden professionsorientierten Studium vermutlich obsolet; als Kriterium der Adressierung ist es aber aktuell zu beachten. Im Sinne des vertieften Lernens von Marton et al. (1993) lässt sich die Wahrnehmung der Relevanz weiterentwickeln: Studierende sollen nicht nur die Relevanz der Lehre für ihre Professionalisierung wahrnehmen, sondern auch subjektiv deren Bedeutsamkeit für die Entwicklung der eigenen Professionalität erkennen. Hier schlägt die Forderung der Adressierung eine Brücke zu den personenbezogenen Merkmalen, die wir bisher nicht einbezogen hatten. Im Kompetenzmodell nach Baumert & Kunter (2006) sind diese ja dem Belief-System einer Lehrkraft zugeordnet. Es ist also sinnvoll, ein Modell kumulativen Lernens über den fachlichen Aspekt hinaus zu erweitern.

Die Analyse des Lernens und Lehrens in der Lehramtsausbildung Physik unter dem Aspekt des kumulativen Lernens führt also zu einem notwendig spezifischen Modell des kumulativen Lehrens für die Lehramtsausbildung Physik. Es bietet einen Rahmen mit Regeln oder Designprinzipien, anhand deren Lehrveranstaltungen in der Hochschullehre der Lehramtsausbildung Physik theoriegeleitet entwickelt oder weiterentwickelt werden können.

	Kumulativer Aspekt	Anforderungen an die Lehre
Gagné	<ul style="list-style-type: none"> – Aus der Hierarchie von Wissensselementen (Fähigkeitselementen) folgt ein schrittweise ablaufender Wissenserwerb. – Im Gegensatz zum additiven Lernen findet ein Lerntransfer statt, wenn Gemeinsamkeiten verschiedener Anwendungsbereiche einer Hierarchieebene auf die nächste Ebene abstrahiert werden. 	<ul style="list-style-type: none"> – Die aufeinander aufbauenden Wissensselemente eines physikalischen Konzepts sind zu identifizieren und die Lerngelegenheiten entsprechend hierarchisch zu sequenzieren. – Das erfordert eine der jeweiligen Hierarchiestufe angemessene Elementarisierung der physikalischen Inhalte.
Ausubel	<ul style="list-style-type: none"> – Die Wissenshierarchie ist inklusiv, d. h., eine neue Bedeutung, die aus einer gegebenen Information erzeugt wird, wird auf Basis des Vorwissens gebildet. Das Vorwissen ist deshalb der entscheidende Faktor für bedeutungsvolles Lernen. – Daraus folgt, dass Übung und Wiederholung zum Elaborieren des (fachlich richtigen) Vorwissens zentral sind. – Im Gegensatz dazu ist <i>rote learning</i> die aus fachlicher Perspektive willkürliche oder zufällige, weil rein assoziative Wissensaneignung. 	<ul style="list-style-type: none"> – Die Lehre ist an das vorhandene Vorwissen anzupassen, da <i>meaningful learning</i> nur auf Basis von vorhandenem Vorwissen stattfinden kann. – Übungen und Wiederholungen sind dabei wichtige Maßnahmen für das Elaborieren des (fachlich richtigen) Wissens im langfristigen, kumulativen Lernprozess.
Wittrock	<ul style="list-style-type: none"> – Informationen werden zunächst auf Basis des Langzeitgedächtnisses selektiv wahrgenommen. Anschließend kann eine bewusste Informationsverarbeitung stattfinden, in der die neue Information mit früheren Lernerfahrungen verglichen wird. – Frühere Lernerfahrungen können aber auch falsch interpretierte Schlussfolgerungen (Alltagsvorstellungen) enthalten und zum Vorwissensdilemma führen. 	<ul style="list-style-type: none"> – In Erweiterung der vorigen Punkte sind physikspezifische Alltagsvorstellungen der Studierenden zu berücksichtigen (hierfür existieren wiederum verschiedene Methoden). – Leitideen (bzw. physikalische Grundkonzepte) können die Lernenden dabei unterstützen, während der bewussten Informationsverarbeitung auf die korrekten fachlichen Konzepte zu fokussieren.
Lee	<ul style="list-style-type: none"> – Lernen wird durch die beiden Prozessdimensionen (mit jeweils zwei Ausprägungen) <i>Abstraktion/Konkretisierung</i> sowie <i>Verallgemeinerung/Spezifizierung</i> beschrieben. 	<ul style="list-style-type: none"> – Die Prozesse des Anwendens (Konkretisieren und Spezifizieren) sind ebenso wie die Prozesse des theoretischen Abstrahierens und Verallgemeinerns unter Anleitung zu üben. – Die zentralen Lernstrategien sind dabei: Reorganisation, Wiederholung, Elaborieren. – Rückmeldungen mit auf übergeordnete Konzepte Bezug nehmender Bewertung (<i>assessment</i>) unterstützen diese Prozesse.

Tab. 2: Sich ergänzende Aspekte der kognitionspsychologischen Ansätze des kumulativen Lernens und deren Bedeutung für die Physikdidaktik

Die kumulative Lehre umfasst die fünf genannten Aspekte: i. Wiederholtes Aufgreifen von physikalischen Grundkonzepten; ii. deren Üben in verschiedensten Kontexten; iii. die Berücksichtigung der Alltagskonzepte der Studierenden, die mit den Grundkonzepten verbunden sind; iv. eine schulbezogene Fachphysikausbildung; v. die Ermöglichung einer positiven Einschätzung der Entwicklung der eigenen Fähigkeiten, Physik zu unterrichten, um damit die Lehrerprofessionalisierung der Studierenden zu unterstützen.

Unser Modell lässt sich auch für andere Domänen oder Adressaten diskutieren. Ziffer iii. ist relevant, wenn die Domäne Vorwissensdilemmata aufweist. Dies ist in der Physik der Fall. Für eine professionsorientierte Lehre für Physikerinnen und Physiker genügen die Ziffern i. bis iii. Spezialisieren sich diese, wie es z. B. bei Meteorologen zutrifft, so kann Ziffer iv. entsprechend ergänzt werden. Im Falle der Physikstudierenden muss keine eigene Ziffer v. als

leitendes Merkmal formuliert werden. Jedoch stellt v. ein Kriterium dar, um zu entscheiden, ob die Physikstudierenden die Lehre im Sinne einer Physik-Professionalisierung wahrnehmen. Unser Modell ist auch für andere Adressaten tragfähig, z. B. für Studierende im Nebenfach Physik oder Schülerinnen und Schüler. Ziffer iv. könnte für Letztere als *physikalische Bildung* formuliert werden, wobei das Problem erst einmal in der Präzisierung derselben liegt. Kriterium v. spielt in allen Fällen eine eigene Rolle, die über den Erwerb von Wissen als Domänenwissen hinausgeht. In der Physikdidaktik hat Muckenfuß (1995) hierfür aus Perspektive der Schülerinnen und Schüler den Begriff Sinnstiftung vorgeschlagen: Für wie bedeutsam halten Schülerinnen und Schüler Physikunterricht, um die eigene Lebenswelt jetzt und in Zukunft besser zu verstehen und Probleme lösen zu können? Unser Modell ist also auch an andere Adressatinnen und Adressaten adaptierbar.

Wurden Elemente der kumulativen Lehre bereits in Physik-Studiengängen ein- und umgesetzt? Die Lehre in Physik ist traditionell in Vorlesungen und Übungen zweigeteilt. Dabei lösen die Studierenden in den Übungen angeleitete Aufgaben (vgl. Haak, 2016). Es werden überwiegend lösungsorientierte Rechenaufgaben eingesetzt; eine vertiefte Auseinandersetzung mit den Inhalten oder den zugrunde liegenden Konzepten findet oft nicht statt (vgl. Wahle, 2017; Woitkowski, 2018). Wahle fordert, dass die Übungen stattdessen „einen Fokus auf Konzepte“ haben sollten (2017, S. 14). Auch diese Untersuchungsergebnisse korrespondieren mit unseren Analysen und Forderungen. Massolt & Borowski (2018) untersuchen darüber hinaus die Relevanzwahrnehmung von schulrelevanten Übungsaufgaben durch Lehramtsstudierende.

Mit Hilfe des vorliegenden Modells wurde ein Lehrkonzept entwickelt, das in bestehende Lehrveranstaltungen und Übungen zur Mechanik sowie in Experimentalübungen zur Mechanik und Elektrodynamik integriert wurde (Rubitzko et al., 2018). Dieses Lehrkonzept wird begleitend evaluiert (John & Starauschek, 2017).

Unser Modell ist sowohl theoretisch als auch normativ basiert. Qualitative und quantitative Untersuchungen sollen evaluative Hinweise erbringen, ob unser Modell zu besseren Lernergebnissen führt und die Wahrnehmung der Studierenden die Intentionen widerspiegelt oder sogar eine Rolle für die Lernergebnisse spielt. Dies wird nicht im Rang einer kontrollierten experimentellen Studie geschehen; eine solche ist aus ethischen und praktischen Gründen über einen langen Zeitraum nicht möglich. Die Intervention wurde durchgeführt, die Untersuchungsergebnisse liegen vor und werden in naher Zukunft publiziert. Kleinere Beiträge finden sich in Tagungsbänden (John & Starauschek, 2018; John & Starauschek, 2019). Darüber hinaus ist unsere Evaluationsstudie über acht Jahre angelegt, sodass wir mit Interviews und teilnehmenden Beobachtungen untersuchen können, ob die Studierenden ihre physikalischen Grundkonzepte so entwickelt haben, dass diese im Referendariat keine Hürde mehr darstellen.

6. Addendum: Kumulierte physikalische Wissenssysteme oder physikalische Kompetenzen?

Unser Ansatz zum kumulativen Physiklehren und -lernen geht begrifflich von (erlernbaren und zu erlernenden) physikalisch-fachlichen Fähigkeiten¹⁸ aus, die über eine beobachtbare flexible und nicht träge Anwendung von physikalischem Wissen in einem Grundstudium Lehramt Physik charakterisiert werden können. Dies sind insbesondere die darin integrierten, gängigen Themen der Schulphysik. Die

¹⁸ Wir verwenden das Wort *Fähigkeiten* in einem *common-sense*-Sinn: Gemeint sind z. B. qualitatives physikalisches Beschreiben oder Modellieren, Formelrechnen, Experimentieren. Der *common sense* gelte im Folgenden auch beim Terminus *Problem*.

physikalisch-fachlichen Fähigkeiten schließen das physikalische Problemlösen ein und sollen die fachlichen Voraussetzungen schaffen, die gängigen physikalischen Themen in der Schule zu unterrichten.¹⁹ Dafür haben wir den Begriff *kumuliertes Wissen oder kumuliertes Wissenssystem (von Individuen)* entwickelt. Wir wollen in diesem Addendum erläutern, weshalb wir in unserem Ansatz wenig von Kompetenzen sprechen, obgleich der Terminus *Kompetenz*, die definitorischen Annäherungen an ihn und seine Verwendung in den Bildungsdiskursen als *state of the art* gilt.

Unser Begriff deckt sich mit Weinert²⁰, da die Voraussetzung von Kompetenz die (kognitive) Fähigkeit ist, bestimmte Probleme lösen zu können. Dabei sind diese Probleme bezogen auf die Domäne und einen Vorwissensstandard i. d. R. nach ihrem Schwierigkeitsgrad klassifizierbar. Diese Klassifikation nach Schwierigkeitsgraden spiegelt sich implizit in den Definitionen von (domänenspezifischen) Kompetenzniveaus. Wir wollen über die üblichen Kompetenzniveaus hinausgehen und teilen Probleme (unabhängig von ihrer Domäne) in zwei Klassen ein: Die erste Klasse umfasst *Routineprobleme* – also definierte Probleme, die mit prinzipiell bekannten Prozeduren lösbar sind, z. B. die Reparatur des platten Fahrradreifens oder die Berechnung der monatlichen Quadratmetermiete aus Jahresmiete und Mietfläche. Die zweite Klasse umfasst Probleme mit Unwägbarkeiten – also *offene Problematiken*, z. B. die Probleme bei der Apollo-13-Mission. Diese Klassifikation ist nicht zwingend trennscharf: Konkrete Routineprobleme können beim Anwenden von Lösungsroutinen in offene Problematiken übergehen und offene Problematiken sich als Routineprobleme entpuppen. Bei jeder Problemlösung muss also vorläufig eingeschätzt werden – i. d. R. in Abhängigkeit von den Problemkontexten mit seinen Akteurinnen

¹⁹ Diese Aussage weist Definitionslücken auf: Welche Schule? Welches Curriculum? Welche Realisierung des Grundstudiums? Welche Probleme? Welche Fähigkeiten? Diese Lücken entfalten nur begrenzte Wirkungen. In den Teilsystemen des sozialen Systems *Schule* haben sich in den Domänen z. B. Curricula oder Lehrpläne herausgebildet, die im sozialen System *Schule* tradiert werden. Damit lassen sich konkrete Definitionen finden, wenn Lehr- oder Unterrichtssituationen bestimmt sind, z. B. ein fünfminütiger Einstieg in das Thema *Hebel* in einer bestimmten Klasse.

²⁰ Die zurzeit in den Bildungswissenschaften gängige Auffassung von Kompetenz (z. B. Baumert & Kunter, 2006) geht auf Weinert (2001) zurück; Kompetenz wird dort anhand der „Problemlösung in variablen Situationen“ erkannt, das heißt in unsere bisherige Sprache übersetzt: Mehrere enge und weite Transfers von einer Problemlösestrategie oder mehreren Problemlösestrategien lassen sich in variablen Aufgabenkontexten im Studium beobachten. Nach Weinert – zur Erinnerung – sind Kompetenzen „die bei Individuen verfügbaren oder durch sie erlernbaren kognitiven Fähigkeiten und Fertigkeiten, um bestimmte Probleme zu lösen, sowie die damit verbundenen motivationalen, volitionalen und sozialen Bereitschaften und Fähigkeiten, um die Problemlösungen in variablen Situationen erfolgreich und verantwortungsvoll nutzen zu können“ (Weinert, 2001, S. 27 f.).

und Akteuren –, ob es sich um ein Routineproblem oder um eine offene Problematik handelt.²¹

Mit dieser Klassifikation stellt sich die Frage nach der Lehrbarkeit vom Problemlösen. Routineprobleme lassen sich im Prinzip lehren: Es gibt prozedurale Standards, die Menschen in einer konkreten Situation mehr oder weniger gut erreichen können. Bei Routineproblemen ließe sich damit zwischen hohen und niedrigen Kompetenzen unterscheiden. Bei offenen Problematiken, z. B. dem Definieren von Problemen oder Aussagen über deren Lösbarkeit, ist das Lehren und Üben möglich, die Einschätzung der wirklichen Kompetenz aber schwierig, da nur aus einer zukünftigen erfolgreichen Praxis retrospektiv auf den Kompetenzerwerb geschlossen werden kann. Die Probleme selbst aber können unbestimmt sein. Hier beginnt das Grenzland zwischen Fachleuten sowie sogenannten Spitzenkönnern und -könnern.

Wir wollen zuerst ohne unsere Klassifizierung der Probleme argumentieren, um unseren vorsichtigen Umgang mit dem Terminus „Kompetenz“ im Fall der fachlich-physikalischen Ausbildung im Lehramtsstudium zu begründen: Wir bevorzugen bei Lehramtsstudierenden anstelle von fachlich-physikalischen Kompetenzen den Terminus *kumuliertes physikalisches Wissen* (oder *Wissenssystem*), da sich die Kontexte *Lehramtsstudium Physik* und *Physikunterricht* unterscheiden. Insbesondere unterscheiden sich deren Probleme, auch wenn es um gemeinsame fachlich-physikalische Kerne geht. Im Physikstudium stehen die fachlich-physikalischen Lösungen von physikalischen Problemen im Vordergrund, im Physikunterricht der Unterricht. Man könnte jetzt mit Weinert trotzdem von physikalisch-fachlichen Kompetenzen²² sprechen – das Argument wären die variablen Situationen Studium und Schule –, zu denen in der Schule weitere Kompetenzen hinzutreten müssen, um den Physiklehrerberuf auszuüben. Die physikalisch-fachlichen Fähigkeiten sind nach diesen Überlegungen eine notwendige, aber keine hinreichende Voraussetzung für den Physiklehrerberuf (vgl. auch Baumert & Kunter, 2006, S. 496). Diese begriffliche Aussage bestätigt sich im aktuellen Stand der Forschung: Ein Zusammenhang zwischen dem *content knowledge* und gutem Lehrerhandeln oder guten Leistungen von Schülerinnen und Schülern hat sich bislang in der Domäne Physik nicht bestätigt, kann aber auch nicht sicher ausgeschlossen werden (z. B. Vogelsang, 2014, S. 502). Die Verwendung von *Kompetenz* in der Bezeichnung *physikalisch-fachliche Kompetenzen*, die im

Physiklehrerstudium erworben werden sollen, impliziert aber gerade das Hinreichende auch für den Physikunterricht, der Terminus *Wissen* hingegen das Notwendige. Das *kumulierte Wissen* schließt dabei die (kognitiv) flexiblen, nicht trägen Fähigkeiten zur Lösung schulrelevanter physikalischer Probleme in verschiedenen fachlichen Kontexten ein. Die fachlich-physikalischen Probleme können also in die Probleme des Physikunterrichts eingebettet angesehen werden. Deren fachliche Lösung ist aber nur ein Faktor im Unterrichtsgeschehen.

Wir beziehen unsere Problemklassifikation in die weitere Argumentation ein. Die intendierten physikalisch-fachlichen Probleme der Schule lassen sich vermutlich in guter Näherung als endlicher Problemraum annehmen. Es wären damit überwiegend Routineprobleme. Auf der anderen Seite sind die Probleme, die eine Lehrperson im Physikunterricht zu lösen hat, prinzipiell offene Problematiken, da es sich bei Unterricht um ein soziales Geschehen handelt – auch wenn Schülerinnen, Schüler und Lehrperson im Verlauf des Unterrichts gemeinsam das Lernen fördernde oder hindernde Routinen entwickeln. Da die fachlich-physikalischen Fähigkeiten bezogen auf die Schule also überwiegend Routineprobleme darstellen, ist dies für uns ein weiterer Grund, von Wissen zu sprechen. Die für den Physikunterricht charakteristischen, offenen Problematiken, auf die die Kompetenz von Lehrerinnen und Lehrern abzielen muss, sind damit eben nicht gemeint.²³ Unsere einfache Kategorisierung von Problemen steht dieser Argumentation nicht im Weg. Es lassen sich zwischen den beiden genannten weitere Klassen definieren.

Unsere Argumentation kommt zu dem gleichen Schluss wie der Ansatz von Kompetenz als Handlungsdisposition²⁴: Aus fachlich-physikalischen Kompetenzen im Studium kann dabei nicht zwangsläufig auf Kompetenzen in Lehr-Lernsituationen geschlossen werden (Klieme et al., 2003, S. 15). Die kumulierten (physikalischen) Wissenssysteme allein wären damit keine (professionell-unterrichtlichen) Handlungsdispositionen für konkreten Physikunterricht. Auch hier gilt: Als Teil und Voraussetzung dieser professionell-unterrichtlichen Kompetenzen ist das kumulierte physikalische Wissenssystem als

²¹ Die Klassifikation von Problemen und Problemlösungen ist komplexer, z. B. die Einbeziehung von Zeitdruck und Komplexität oder auch aufzubringender Kreativität. Mit Problemen beschäftigen sich alle Wissenschaften und als eine Wissenschaft vom Problemlösen die Psychologie (z. B. Dörner, 1987).

²² Dies wären fachlich-physikalische Kompetenzen im Physiklehrerstudium und zum Bestehen des Physiklehrerstudiums.

²³ Möglich wäre es auch, von Kompetenzen zu sprechen, die im Prinzip immer vorhanden sind. Hier wird der Einsatz der Fähigkeit, z. B. einen Text vorzulesen, von der Volition bestimmt: *Ich will den Text jetzt nicht lesen, die Klasse ist unruhig*. Jedoch entspricht dies nicht der weinertschen Kompetenzdefinition, da die immer vorhandene Kompetenz auf die kognitiven Fähigkeiten (oder das Wissen) zurückgeführt wird und nicht flexibel angewendet werden muss. Es bleibt die Frage nach der Gültigkeit der Annahme dieses stabilen Wissens.

²⁴ Diese Handlungsdispositionen verwandeln sich dann in kontextspezifische, kognitive Leistungsdispositionen (Klieme & Leutner, 2006) und nehmen damit die Gefahr einer weiteren Verkürzung von Kompetenz auf fachliches Aufgabenlösen in Kauf. Auch hier wäre das kumulierte Wissenssystem eine Weiterentwicklung und Präzisierung des Aufgabenlösens.

notwendig anzusehen.²⁵ Wir halten auch daher unsere Sprechweise vom kumulierten physikalischen Wissen als Teil der Kompetenz von Physiklehrerinnen und -lehrern für sinnvoll. In der Logik eines Kompetenzmodells ist sie dann eine Voraussetzung für zukünftiges Lehrerhandeln.

Zwei letzte Anmerkungen: 1) Kumulierte Wissenssysteme sind als dynamische Systeme zu konzeptualisieren, da der Zugriff auf sie u. U. situativ eingeschränkt erfolgt; sie sind auch dem Vergessen unterworfen und offen für eine Weiterentwicklung. 2) Eine Kompetenz lässt sich aber leicht als Personenmerkmal verstehen, das über große biografische Zeithorizonte stabil bleibt und bleiben soll.²⁶ Dekonstruieren wir diese mögliche semantische Verschiebung versuchsweise: Mit dem Reden von Kompetenz geht dann das Versprechen oder die Annahme von stabilen Fähigkeiten einher, die unabhängig von äußeren Umständen bestehen bleiben sollen. Dies entspricht den bildungspolitischen Wünschen nach der Berechenbarkeit von Bildungsprozessen. Bei der Lese- und Schreibkompetenz oder einfachen mathematischen Kompetenzen ist dies wohl möglich, vermutlich auch, weil diese in unserer Lebenswelt zeitlebens eingefordert und geübt werden. Die meisten domänenspezifischen kumulierten Wissenssysteme bedürfen aber i. d. R. einer andauernden Praxis; bei physikalischen Wissenssystemen ist dies ein beruflicher Bezug, der aber nur bei einer Minderheit der Menschen einer Gesellschaft vorausgesetzt werden kann. Sonst findet Vergessen statt. Damit wäre das *träge physikalische Wissen* eher der Normal- oder Normzustand.

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

²⁵ In eine ähnliche Richtung geht Tenorth (in der Tradition des Expertiseansatzes) mit den Termini *Expertise* und *Wissen*: Wissen, das sind „dezidiert theoretische, disziplinär geordnete und separierte Wissensbestände“ (Tenorth, 2006, S. 589). Expertise ist dann die situative Umsetzung dieses Wissens. In allen bisherigen Definitionen geht es also um die domänenspezifische, situative Anwendung von vorhandenem Wissen oder vorhandenen Fertigkeiten, um mehr oder weniger offene Probleme zu lösen oder problematische Situationen zu bewältigen. Dass die Anwendung von Wissen – entgegen intuitiver Annahmen – problematisch sein kann, soll ein Alltagsphänomen verdeutlichen: In einer bestimmten sozialen Situation finden Sie z. B. nicht die notwendige passende sprachliche Formulierung – es fehlen Ihnen die Worte –, die Ihnen eine Stunde später jedoch einfällt. Sie besitzen zwar die Sprachfähigkeit, können Sie aber situativ nicht anwenden. Hier wird eine Problematik der Kompetenzdefinition noch einmal anders deutlich: Sie könnten auch als sprachkompetent, aber z. B. als nicht sprachperformant bezeichnet werden. Nach Weinert wären Sie aber gerade nicht (sprach-)kompetent, jedoch vielleicht kompetent, eine soziale Situation schlagfertig zu beeinflussen.

²⁶ In den 90er Jahren wurden die Kompetenzen aus den Schlüsselqualifikationen entwickelt, die als zu statisch angesehen wurden.

01JA1907B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Wir danken auch den beiden Gutachter:innen für ihre Sorgfalt und die unterstützenden Hinweise.

7. Literatur

- Abell, S. K. (2007). Research on science teacher knowledge. In S. K. Abell & N. G. Ledermann (Hrsg.). *Handbook of Research in Science Education*, 1105–1149.
- Ausubel, D. P. (1968). *Educational psychology: A cognitive view*. New York: Holt, Rinehart and Winston. [Deutsche Ausgabe: Ausubel, D. P., Novak, J. P. & Hanesian, H. (1980). *Psychologie des Unterrichts*, Bd. 1. Weinheim: Beltz. Ausubel, D. P., Novak, J. P. & Hanesian, H. (1981). *Psychologie des Unterrichts*, Bd. 2. Weinheim: Beltz.]
- Bader, F. (2000). *Physik 12/13 Gymnasium Sek II*. Hannover: Schroedel Verlag.
- Baumert, J., Bos, W. & Watermann, R. (1998). *TIMSS/III: Schülerleistungen in Mathematik und den Naturwissenschaften am Ende der Sekundarstufe II im internationalen Vergleich: Zusammenfassung deskriptiver Ergebnisse*. Berlin: Max-Planck-Institut für Bildungsforschung.
- Baumert, J. & Kunter, M. (2006). Stichwort: Professionelle Kompetenz von Lehrkräften. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 9(4), 469-520.
- Bohm, B. C. (2016). *Konzepte der Politik: Theoretische Grundlagen und unterrichtspraktische Herausforderung. Eine empirische Interventionsstudie*. Berlin, Freie Universität Berlin, Dissertation. <http://d-nb.info/1090877862/>
- 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.
- Bruner, J. S. (1960). *The process of education*. Cambridge: Harvard University Press.
- Deci, E. L., Eghrari, H., Patrick, B. C. & Leone, D. R. (1994). Facilitating internalization: The self-determination theory perspective. *Journal of Personality*, 62(1), 119-142.
- Deci, E. L., Vallerand, R. J., Pelletier, L. G. & Ryan, R. M. (1991). Motivation and education: The self-determination perspective. *Educational Psychologist*, 26(3-4), 325-346.
- Demtröder, W. (2008). *Experimentalphysik 1: Mechanik und Wärme* (5. Auflage). Berlin Heidelberg New York: Springer.
- Duit, R. (1993). Alltagsvorstellungen berücksichtigen. *Praxis der Naturwissenschaften Physik*, 6(42), 7-11.
- Duit, R. (1995). Zur Rolle der konstruktivistischen Sichtweise in der naturwissenschaftsdidaktischen Lehr- und Lernforschung. *Zeitschrift für Pädagogik*, 41(6), 905-923.

- Dörner, D. (1987). *Problemlösen als Informationsverarbeitung*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Duncan, D. & Mazur, E. (2005). *Clickers in the classroom: How to enhance science teaching using classroom response systems*. San Francisco: Pearson Education.
- Duschl, R. A., Schweingruber, H. A. & Shouse, A. W. (2007). *Taking science to school: Learning and teaching science in grades K-8, 2*. Washington, DC: National Academies Press.
- Eichler, H. J., Kronfeldt, H.-D. & Sahn, J. (2016). *Das neue physikalische Grundpraktikum* (3. Auflage). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Freiman, T. (2001). Kumulatives Lernen im Biologieunterricht. *Praxis der Naturwissenschaften – Biologie in der Schule*, 50(7), 1.
- Gagné, R. M. (1968). Contributions of learning to human development. *American Psychological Association. Reprint of: Psychological review*, 75(3), 177-191.
- Gagné, R. M. (2011). *Die Bedingung des menschlichen Lernens*. Münster: Waxmann Verlag.
- Großmann, S. & Hertel, I. (2014). *Zur fachlichen und fachdidaktischen Ausbildung für das Lehramt Physik*. Bad Honnef: DPG.
- Haak, I. (2016). Was macht eine gute Übung aus? Ein Vergleich von Vorstellungen zum physikalischen Übungsbetrieb. *die hochschullehre*, 2, 1-25.
- Hattie, J. (2009). *Visible learning: A synthesis of 800 meta-analyses on achievement*. New York: Routledge.
- Heublein, U. Hutzsch, C., Schreiber, J., Sommer, D. & Besuch, G. (Hrsg.) (2010). *Ursachen des Studienabbruchs in Bachelor- und in herkömmlichen Studiengängen*, Bd. 2. HIS: Hochschul-Informations-System GmbH.
- John, T. & Starauschek, E. (2017). Kumulatives Physiklehren und -lernen im Lehramtsstudium – Evaluation eines Lehrkonzepts. In C. Maurer (Hrsg.), *Qualitätsvoller Chemie- und Physikunterricht – normative und empirische Dimensionen*, 38, 150-153.
- John, T. & Starauschek, E. (2018). Kumulatives Lehren und Lernen im Lehramtsstudium Physik: Entwicklung eines Modells zur professionsorientierten Fachausbildung von Physiklehrkräften. In V. Nordmeier & H. Grötzebauch (Hrsg.), *Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung Würzburg 2018*. Berlin: PhyDid B.
- John, T. & Starauschek, E. (2019). Wie wird kumulatives Lehren im Physikfachstudium erlebt? Ergebnisse einer Interviewstudie. In C. Maurer (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Bildung als Grundlage für berufliche und gesellschaftliche Teilhabe*, 39, 365-368.
- Jung, W., Wiesner, H. & Engelhardt, P. (1981). *Vorstellungen von Schülern über Begriffe der Newton'schen Mechanik*. Bad Salzdetfurth: Verlag Barbara Franzbecker.
- Kautz, C. (2014). *Verständnisschwierigkeiten und Fehlvorstellungen in Grundlagenfächern des ingenieurwissenschaftlichen Studiums*. Lehre an Hochschulen für angewandte Wissenschaften, Herausforderungen und Lösungsansätze, Report – Beiträge zur Hochschuldidaktik 44.
- Klieme, E. et al. (2003). *Zur Entwicklung nationaler Bildungsstandards*. Bonn: Bundesministerium für Bildung und Forschung.
- Klieme, E. & Leutner, D. (2006). Kompetenzmodelle zur Erfassung individueller Lernergebnisse und zur Bilanzierung von Bildungsprozessen. Beschreibung eines neu eingerichteten Schwerpunktprogramms der DFG. *Zeitschrift für Pädagogik*, 52(6), 876-903.
- Kourilsky, M. & Wittrock, M. C. (1992). Generative teaching: An enhancement strategy for the learning of economics in cooperative groups. *American Educational Research Journal*, 29(4), 861-876.
- 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.
- Kunter, M., Seiz, J. & Baumert, J. (2014). Die Bedeutung des pädagogisch-psychologischen Wissens von angehenden Lehrkräften für die Unterrichtsqualität. *Zeitschrift für Pädagogik*, (60.2), 184-201.
- Lee, J. (2012a). *Cumulative Learning and Schematization in Problem Solving*. Universität Freiburg.
- Lee, J. (2012b) Cumulative Learning. In: Seel (Hrsg.) (2012), *Encyclopedia of the Sciences of Learning*, 887-893.
- Marton, F., DallAlba, G. & Beaty, E. (1993). Conceptions of learning. *International Journal of Educational Research*, 19(19), 227-300.
- Massolt, J. & Borowski, A. (2018). Increasing the Perceived Relevance of University Physics Problems by Focusing on School-Related Content Knowledge. *heiEDUCATION Journal. Transdisziplinäre Studien zur Lehrerbildung*, 1-2, 99-125.
- Mayer, R. E. (1984). Aids to text comprehension. *Educational Psychologist*, 19, 30-42.
- Merzyn, G. (2004). *Lehrerbildung – Bilanz und Reformbedarf*. Überblick über die Diskussion. Baltmannsweiler: 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.
- Muckenfuß, H. (1995). *Lernen im sinnstiftenden Kontext: Entwurf einer zeitgemäßen Didaktik des Physikunterrichts*. Berlin: Cornelsen.
- Neumann, K., Fischer, H. E. & Sumfleth, E. Vertikale Vernetzung und kumulatives Lernen im Chemie- und Physikunterricht. In Eva-Maria

- Lankes (Hrsg.) (2008), *Pädagogische Professionalität als Gegenstand empirischer Forschung*, 141-152. Münster: Waxmann Verlag.
- Peschek, W. (1989). Abstraktion und Verallgemeinerung im mathematischen Lernprozess. *Journal für Mathematik-Didaktik*, 10(3), 211-285.
- Renkl, A. Lernen. In E. Wild & J. Möller (Hrsg.) (2015), *Pädagogische Psychologie*. Berlin, Heidelberg: Springer. 1-24.
- Riese, J. (2009). *Professionelles Wissen und professionelle Handlungskompetenz von (angehenden) Physiklehrkräften*. Berlin: Logos Verlag.
- Riese, J. & Reinhold, P. (2012). Die professionelle Kompetenz angehender Physiklehrkräfte in verschiedenen Ausbildungsformen. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 15(1), 111-143.
- Riese, J., Kulgemeyer, C., Zander, S., Borowski, A., Fischer, H. E., Gramzow, Y. & Tomczyszyn, E. (2015). Modellierung und Messung des Professionswissens in der Lehramtsausbildung Physik. *Zeitschrift Für Pädagogik*, 61, 55-79.
- Rimoldini, L. G. & Singh, C. (2005). Student understanding of rotational and rolling motion concepts. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, 1(1), 1-9.
- Schecker, H. & Parchmann, I. (2006). Modellierung naturwissenschaftlicher Kompetenz. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 12(1), 45-66.
- Seel, N. M. (2003). *Psychologie des Lernens: Lehrbuch für Pädagogen und Psychologen*. München: Reinhardt.
- Stroebe, W., Jonas, K. & Hewstone, M. (2013). *Sozialpsychologie: Eine Einführung*. Berlin: Springer.
- Shulman, L. (1987). Knowledge and teaching: Foundations of the new reform. *Harvard educational review*, 57(1), 1-23.
- Stern, E. & Schumacher, R. (2004). Intelligentes Wissen. *Universitas*, 59(602), 121-134.
- Tenorth, H. E. (2006). Professionalität im Lehrberuf. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 9(4), 580-597.
- Wadouh, J., Sandmann, A. & Neuhaus, B. (2009). Vernetzung im Biologieunterricht – deskriptive Befunde einer Videostudie. *Zeitschrift Für Didaktik Der Naturwissenschaften*, 15, 69-87.
- Wahle, M. (2017). Traditionelle Übungen vs. Gruppenübungen in naturwissenschaftlichen Fächern. *die hochschullehre*, 3, 1-15.
- Weinert, F. E. Vergleichende Leistungsmessung in Schulen – eine umstrittene Selbstverständlichkeit. In F. E. Weinert (Hrsg.) (2001), *Leistungsmessung in Schulen*. 17-31. Weinheim: Beltz.
- Wiesner, H. (1994). Verbesserung des Lernerfolgs im Unterricht über Mechanik. Schülervorstellungen, Lernschwierigkeiten und fachdidaktische Folgerungen. *Physik in der Schule*, 32(4), 122-127.
- Wittrock, M. C. (1974). Learning as a generative process. *Educational psychologist*, 11(2), 87-95.
- Wittrock, M. C. (1989). Generative processes of comprehension. *Educational psychologist*, 24(4), 345-376.
- Wittrock, M. C. (1991). Generative teaching of comprehension. *The Elementary School Journal*, 92(2), 169-184.
- Woitkowski, D. (2018). Physikalische Denk- und Arbeitsweisen erlernen. Herausforderung LehrerInnenbildung. *Zeitschrift zur Konzeption, Gestaltung und Diskussion*, 1, 1-16.