

Kumulatives Lehren der Mechanik in der Lehramtsausbildung

Thomas Rubitzko*, Mathias Laukenmann*, Erich Starauschek*

*Pädagogische Hochschule Ludwigsburg, Reuteallee 46, 71634 Ludwigsburg
rubitzko@ph-ludwigsburg.de, laukenman@ph-ludwigsburg.de, starauschek@ph-ludwigsburg.de

Kurzfassung

Kognitiv aktivierende Lehr- und Übungsformen, die wiederkehrend physikalische Grundkonzepte der Mechanik wie das Kraftkonzept oder die Erhaltungssätze für Energie, Impuls und Drehimpuls in wechselnden Kontexten aufgreifen, sollen kumulatives Lernen der Mechanik bei Lehramtsstudierenden unterstützen und im besten Fall optimieren. Zu den kognitiv aktivierenden Hochschullehrformen zählen wir z.B. die Mazursche Peer Instruction, Diskussionen in Kleingruppen oder Worked Examples. Diese Übungsformen sind in eine Vorlesung integriert, die medial einfach und zugleich theoretisch fundiert unterstützt, soziale Interaktion zwischen den Teilnehmern zulässt und eine Fragekultur fördert.

Kumulatives Lernen soll Physiklehramtsstudierenden insbesondere in Unterrichtssituationen zu verlässlich abrufbaren und flexibel anwendbaren mentalen Repräsentationen dieser Grundkonzepte verhelfen. Neben dem wiederholten Aufgreifen der Grundkonzepte der Mechanik im Rahmen einer mehrsemestrigen Reihe von Veranstaltungen zur Mechanik orientieren wir uns deshalb auch an den bekannten Schülervorstellungen zur Mechanik, die auch bei den Studierenden vorhanden sind, diagnostiziert und mit den Studierenden reflektiert werden.

Wir werden das entwickelte Veranstaltungsformat exemplarisch vorstellen. Wir folgen forschungsmethodisch dem Design-based Research Ansatz. Die mehrfachen Entwicklungs-, Erprobungs- und Evaluationszyklen sollen zum Einen die eigene Lehre verbessern und zweitens zu einem Prototyp für effektive Hochschullehre im Lehramtsstudium Physik führen, der an anderen Hochschulen adaptiert werden kann.

Zudem stellen wir erste Evaluationsergebnisse der Einschätzung der Lernwirksamkeit der ergriffenen Maßnahmen durch die Studierenden vor, die den eingeschlagenen Weg bestätigen. Unser Projekt ist Teil der Qualitätsoffensive Lehrerbildung.

1. Die Entwicklung von Veranstaltungen zum kumulativen Physiklehren und -lernen: Leitlinien und Prozess

1.1. Der Ausgangspunkt und die Grundkonzepte der Mechanik

Angehende Lehrerinnen und Lehrer können Physik nur unterrichten, wenn sie über korrektes Wissen von physikalischen Grundkonzepten wie beispielsweise dem Konzept der Kraft verfügen und diese Konzepte verlässlich in Unterrichtskontexten anwenden können. Physikalische Grundkonzepte werden aber oft erst im Referendariat erworben (Borowski et al., 2011). Dieses Ergebnis der Hochschullehre erscheint angesichts der Verwendung der zeitlichen Ressourcen in der zweiten Phase der Lehramtsausbildung nicht effizient, da dort der Fokus der Lehrerprofessionalisierung auf der Unterrichtspraxis, d.h. bei konkreten Elementarisierungen, der Unterrichtsvorbereitung oder dem Classroom Management liegen sollte.

Viele Problem- und Aufgabenstellungen im Bereich der klassischen Experimentalphysik – nicht nur der Mechanik – lassen sich durch die bewegliche Verwendung weniger physikalischer Grundkonzepte

lösen. Diese Grundkonzepte sind auch Ausgangspunkt für physikalisch adäquate Elementarisierungsprozesse im späteren Unterrichtsalltag. Wir haben am Beispiel der Mechanik ein Lehrformat entwickelt, um dem oben genannten Problem entgegen zu wirken und den Physiklehramtsstudierenden einen flexiblen Umgang zu vermitteln. Zu den Grundkonzepten der Mechanik zählen wir die Konzepte von Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung und deren Zusammenhänge, das Konzept der Kraft und die damit verbundenen Newtonschen Axiome, das Konzept des Drehmoments sowie die mit den Erhaltungsgrößen Energie, Impuls und Drehimpuls verbundenen Konzepte. Sie unterscheiden sich also wesentlich von den ‚Basiskonzepten‘ der KMK-Richtlinie (KMK, 2005).

1.2. Vorarbeiten

Wir wollten die Idee des kumulativen Lehrens und Lernens an der Pädagogischen Hochschule im Lehramtsstudium Physik umsetzen und begannen mit den Veranstaltungen zur klassischen Mechanik: eine Einführungsvorlesung mit integrierten Übungen, Schulexperimente zur Mechanik und das Aufgreifen mechanischer Konzepte in der Einführungsvorle-

sung Elektrodynamik. Die an der PH Ludwigsburg über mehrere Jahre entwickelte Vorlesung zur Mechanik von Raimund Girwidz, zu der ein Foliensatz vorlag, war Grundlage der neu und weiter entwickelten Lehrveranstaltungen. Um das Erlernen der unterrichtsrelevanten physikalischen Grundkonzepte zu fördern, wurden die Veranstaltungen auch schon vor der Qualitätsoffensive zum Teil über einen erfahrungsbasierten Diskurs Jahr für Jahr überarbeitet und weiterentwickelt. Etliche Umstellungen der Prüfungsordnungen führten zwangsläufig zu Veränderungen in der Lehre im Bereich der klassischen Mechanik, die erhebliche Schwankungen in der Zahl der Semesterwochenstunden (SWS) ausgleichen mussten. Die bisherigen aufeinander folgenden Überarbeitungszyklen erbrachten

- a) punktuelle inhaltliche Umstellungen (Experimente, Kontexte und Anwendungen),
- b) Vorlesungsfolien, die Bilder in einheitlichem Stil enthalten. Die Foliengestaltung orientiert sich konsequent an den Kriterien der Cognitive Load Theorie (Chandler & Sweller, 1991) und der Multimediatheorie von Mayer (2001),
- c) schrittweise Reduktion der mathematischen Anteile und im Gegenzug die Ausweitung des qualitativen Physikverstehens.

Wie sind diese Vorarbeiten zu bewerten? Die hochschulinternen Evaluationen zeigten eine subjektiv hoch eingeschätzte Lehrqualität durch die Studierenden. Als externe summative Evaluation kann die Untersuchung der CK und PCK von Riese & Reinhold (2010) angesehen werden. Hier haben die Studierenden der Pädagogischen Hochschulen Baden-Württembergs im deutschlandweiten Vergleich überdurchschnittliche Werte im CK erreicht, und damit auch die Studierenden der PH Ludwigsburg.

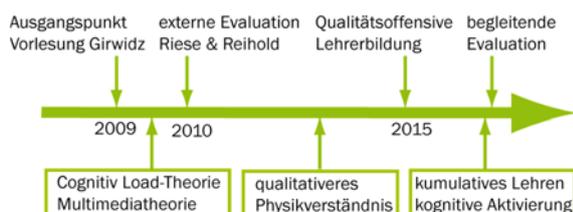


Abb. 1: Zeitschiene zum Design-based-Research Prozess

1.3. Aktuelle Entwicklungsschritte im Prozess des Design-based Research

Wir greifen im Augenblick die im Ausgangspunkt formulierte Diagnose und Kritik auf und versuchen Ideen des Kumulativen Lernens (z.B. Gagné, 1968) umzusetzen. Dafür wurde eine speziell auf das Lehramtsstudium Physik zugeschnittenes Konzept kumulativen Lernens entwickelt (John & Staraschek, 2018). Um die Lernprozesse im Allgemeinen zu stützen, wird bei der Entwicklung der Lehrveranstaltungen insbesondere der Aspekt der kognitiven Aktivierung (z.B. Renkl, 2011) berücksichtigt und diskutiert.

Das beschriebene Projekt ist Teil des Verbundprojekts Lehrerbildung Plus der Professional School of Education (PSE) Stuttgart Ludwigsburg im Rahmen der „Qualitätsoffensive Lehrerbildung“. Diese Finanzierung erlaubt auch eine unabhängige Evaluation.

Ziel ist neben der kriteriengeleiteten Verbesserung der Lehre vor Ort die Entwicklung eines Prototyps einer effektiven Hochschullehre für das Physiklehramtsstudium, der an anderen Standorten an die dortigen Bedingungen adaptiert werden kann.

Der zyklische Wechsel zwischen einem theoriegeleiteten Design von Lernumgebungen mit empirischer Forschung folgt den Ansätzen zum Design-based Research (Design Based Research Collective, 2003 sowie Reinmann, 2005). Wir folgen weiter Wilhelm & Hopf (2014), die in ihren Entwicklungsarbeiten für schulisches Physiklernen als Ausgangspunkt ein praxisrelevantes Problem sehen, das im Sinne des Design-based Research Ansatzes mit einem langfristigen zyklischen Entwicklungs- und Forschungsprozess zumindest teilweise oder ganz gelöst wird. Die Lösung soll sowohl praktisch umsetzbar sein – in unserem Fall eine Hochschulveranstaltungsreihe zur Mechanik – sowie Antworten z.B. in Form begründeter Heuristiken auf Grundlagenfragen liefern. Unsere Frage: Wird der Ansatz kumulativen Lehrens lernwirksam? Z.B.: Zeigen sich Entwicklungen im Fachwissen? Verändern sich Schülervorstellungen der Studierenden? Wird die Selbstwirksamkeit als zukünftige Lehrperson beeinflusst? Mehr hierzu bei (John & Staraschek, 2017).

1.4. Designprinzipien

Euler (2014) schlägt für Entwicklungen, die dem Design-based Ansatz folgen, als Rahmen für die Entwicklungsarbeit Designprinzipien zu formulieren, um damit auch den Anspruch der „Theoriegeleitetheit“ – oder zumindest einer Kriteriengeleitetheit – einzulösen. Um unser praxisrelevantes Problem zu lösen, nämlich das ‚habituierte Erlernen‘ mechanischer Grundkonzepte zu fördern, folgen wir vier Prinzipien, die noch genauer erklärt werden:

- a) Kumulatives Lehren und Lernen als übergeordnete, domänenspezifisch ausgeprägte Strategie am Modell von John & Staraschek (2018) orientiert.
- b) Kognitive Aktivierung (Renkl, 2011) als domänenunspezifische Strategie eingesetzt. Darunter Übungsformen wie Worked Examples oder Diskussionen in Kleingruppen.
- c) Elementarisierung der physikalischen Grundkonzepte in der Hochschulausbildung von Physiklehrern wie dies beispielsweise von Girwidz & Berger (2011) für Unterricht im Allgemeinen vorgeschlagen wird.
- d) Eine Frage- und Gesprächskultur als Teil der sozialen Interaktion, die in der Hochschullehre

empirisch als effektiv identifiziert wurde (Schneider & Preckel, 2017).

Diese Designprinzipien wurden nicht vollständig präskriptiv festgelegt, sondern während der Entwicklungsarbeit modifiziert und ergänzt. Dies ist im Design-based Research Ansatz möglich.

2. Kumulatives Physiklehren und -lernen im Lehramtsstudium Physik

Das erste Designprinzip basiert auf Ansätzen zum kumulativen Lernen, die in der Literatur unter verschiedenen Aspekten diskutiert wurden (s. John & Starauschek, 2018). John & Starauschek (2017) haben für das Lehramtsstudium Physik ein Modell entwickelt, das insbesondere explizit zwischen kumulativen Lernen – das in einem gewissen Grad immer stattfindet – und kumulativen Lehren unterscheidet, und zu einem physikdidaktisch intendierten, im Sinne der Schulphysik vollständigem, physikalisch richtigem, stabilen – d.h. verlässlich aus dem Langzeitspeicher des Gedächtnisses abrufbar – und flexibel einsetzbaren – d.h. insbesondere bei Problemlösesituationen im Physikunterricht – Wissenssystem führen soll. Für die Entwicklung der Lehre der genannten Hochschulveranstaltung zur Mechanik bedeutet dies

- wiederholend innerhalb und über drei Lehrveranstaltungen hinweg die Grundkonzepte der Mechanik aufzugreifen; den Studierenden wird Gelegenheit gegeben, durch wiederholtes Anknüpfen an ihr Vorwissen ihre Wissensbasis auszubauen. Der Aspekt des kumulativen Lehrens in seinem Wortsinn.
- vielfältige Anwendungs- und Übungskontexte für die Grundkonzepte der Mechanik bereitzustellen und damit insbesondere (verteilt) zu üben; damit sollen die Studierenden letztendlich auch dekontextualisierte Grundkonzepte entwickeln.
- die Berücksichtigung schulischer Kontexte und der Alltagsvorstellungen zur Mechanik; den Studierenden soll so ermöglicht werden, sich mit ihren eigenen Präkonzepten auseinanderzusetzen.
- Rückmeldeverfahren, um den Studierenden zu signalisieren, ob sie die Grundkonzepte der Mechanik ‚verstanden‘ oder ihre Alltagsvorstellungen im Sinne eines Conceptual Change weiterentwickelt haben.

Dies entspricht den ersten vier Kriterien des Modells von John & Starauschek (2017).

2.1. Die Veranstaltungsreihe

Das kumulative Lehren der Grundkonzepte der Mechanik erfolgt über ein Spiralcurriculum, das die Inhalte der „Grundvorlesung zur klassischen Mechanik mit integrierten Übungen“ (2. Semester) in den Veranstaltungen in nachfolgenden Semestern aufgreift; dies sind die „Schulversuche zur Mechanik“ (3. Semester) und die „Vorlesung mit integrierten

Übungen zur Elektrodynamik“ (4. Semester). Wir beschreiben diese Veranstaltungen kurz:

2.1.1. Vorlesung zur klassischen Mechanik mit integrierten Übungen (6 SWS)

Die Grundvorlesung mit integrierten Übungen, d.h. in die Vorlesungen sind Übungsphasen mit unterschiedlichen Lehr-Lern-Arrangements eingebettet, umfasst folgende Themen: Kinematik, Kraft und Bewegung, Energie und Impuls, Drehmoment und Drehimpuls, beschleunigte Bezugssysteme, Fluidmechanik und harmonische Schwingungen.

2.1.2. Schulversuche zur Mechanik (1 SWS)

In dieser Experimentalübung werden die mechanischen Grundkonzepte wiederholt und anhand von fünf schulnahen experimentellen Anwendungskontexten (Flaschenzüge, Hebel am Korkenzieher, Fahrradtrieb, Unfälle, Fahrzeuge mit eigenem Antrieb) vertieft. Diese Veranstaltungen werden vor- und nachbereitet (Einzelarbeit). Die Veranstaltungen beginnen mit einer Phase der Diskussion und des Experimentierens in Zweierteams, darauf folgen klärenden Gesprächen in der Gesamtgruppe. Dieser Zweischritt wiederholt sich in einer Veranstaltung in der Regel mehrmals (Rubitzko et al., 2018).

2.1.3. Vorlesung zur klassischen Elektrodynamik mit integrierten Übungen (6 SWS)

In der Vorlesung zur Elektrodynamik werden die Grundkonzepte der Mechanik anhand weniger Themen Coulombgesetz, Energie des elektrischen Feldes, Teilchen in Feldern, Lorentzkraft explizit wiederholt, d.h. z.B. bei einem Elektron, das durch einen Kondensator fliegt, wird das Prinzip von Actio und Reactio diskutiert. Die Gesetzmäßigkeiten der Elektrodynamik bleiben aber im Vordergrund. In etwa zehn Prozent der Vorlesungszeit werden die Grundkonzepte der Mechanik erneut aufgegriffen.

2.2. Das erste Newtonsche Axiom als Beispiel für kumulatives Lehren

Im Folgenden beschränken wir uns auf die Beschreibung des inhaltlichen kumulativen Aufbaus zur Vermittlung der Grundkonzepte der Mechanik. Exemplarisch wurde als Teil des Kraftkonzepts das erste Newtonsche Axiom gewählt. Abbildung 2 zeigt das Spiralcurriculum.

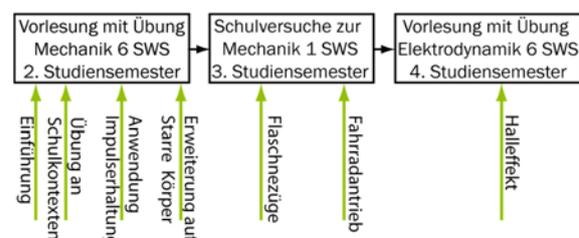


Abb. 2: Veranstaltungen, in welchen Grundkonzepte der Mechanik (hier Newton I) gelehrt oder punktuell aufgegriffen werden.

2.2.1. Vorgabe der expliziten Lehrziele

Zu Beginn des Lehr-Lern-Prozesses erhalten die Studierenden eine Liste, auf der die Lehrziele für den folgenden Abschnitt explizit genannt sind. Dies soll den Studierenden nicht zuletzt die Möglichkeit geben, ihr Vorwissen zu aktivieren. Für das erste Newtonsche Axiom sind dies unter anderem:

- Das erste Newtonsche Axiom sprachlich formulieren können.
- An Beispielen erkennen, dass Newton I Aussagen zur Ruhe (gleichförmigen Bewegung) eines Körpers während eines definierten Zeitintervalls und nicht zur Ruhe in einem bestimmten Zeitpunkt trifft.

2.2.2. Einführung eines Begriffes

Zur Einführung eines Begriffes wird in der Regel ein Axiom oder eine Definition – hier eine an Newton angelehnte Formulierung seines ersten Axioms- in sprachlicher und gegebenenfalls mathematischer Form angeboten. Dies wird anhand eines Beispiels - hier der Brückenanalogie von Galilei - erläutert, wie dies zu verstehen ist, für welche Fälle dies gilt und welche Einschränkungen da sind.

Einführungsfolie zum ersten Newtonschen Axiom

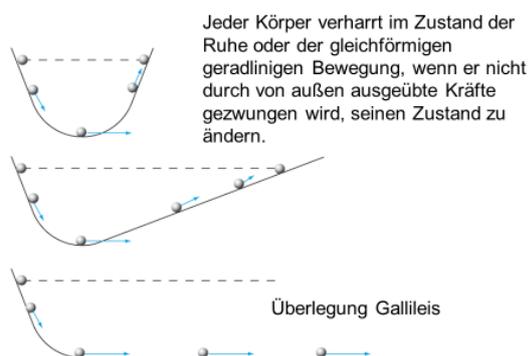


Abb. 3: Einführungsfolie zum Ersten Newtonschen Axiom

2.2.3. Aufbau des Begriffes über schulnahe Kontexte unter Berücksichtigung bekannter Schülervorstellungen

Verschiedene schulnahe Anwendungskontexte sollen zum Aufbau der Konzepte führen. Zum ersten Newtonschen Axiom sind dies das Bremsen und Anfahren mit nicht angeschnallten Fahrern von Autos und Motorrädern, oder das Tragen einer Kiste Mineralwasser mit konstanter Geschwindigkeit.

Des Weiteren werden abstrakte Fragen auf Konzeptebene gestellt - in unserem Beispiel (Abbildung 4) eine Multiple-Choice-Aufgabe-, über die in der Regel auch Schülervorstellungen thematisiert werden (vgl. hierzu Wiesner & Schecker, 2011 sowie Hestenes et al., 1992):

Peer Instruction zum ersten Newtonschen Axiom

Nennen Sie sich gegebenenfalls ein Gegenbeispiel dazu....

- Ist ein Körper gerade in Ruhe, ist die Summe aller ausgeübten Kräfte gleich Null.
- Verändert ein Körper seine Geschwindigkeit nicht, ist die Summe aller ausgeübten Kräfte gleich Null.
- Ist die Summe aller ausgeübten Kräfte gleich Null, so ist der Körper in Ruhe.
- Ist die Summe aller ausgeübten Kräfte nicht gleich Null, so ist der Körper nicht in Ruhe.

Abb. 4: Multiple Choice Aufgabe, mit eingeforderter Begründung zum ersten Newtonschen Axiom

Eine Steigerung der Schwierigkeit für die Studierenden besteht bei Aufgaben darin, aus verschiedenen denkbaren Lösungsansätzen den Geeigneten herauszufinden. So werden nach der Einführung aller drei Axiome sowohl Aufgaben mit Körpern, auf welche die Summe aller ausgeübten Kräfte nicht Null ist und solche bei der Newton I als Ansatz gewählt werden kann, gestellt.

Dies gilt beispielsweise für Aufgaben mit Seilen und Rollen, die auch im Physikunterricht der Sekundarstufe I behandelt werden können. Dabei werden die bekannten Fehlansätze thematisiert- beispielsweise das Misskonzept der losen und festen Rolle: „Eine feste Rolle lenkt die Kraft um, eine lose Rolle halbiert die Kraft“ (Muckenfuß, 1994) – als auch im Sinne des kumulativen Lehrens das erste Newtonsche Axiom als Ansatz genutzt werden: Für jede Rolle, die in Ruhe bleibt, muss die Summe aller Kräfte, die auf die Rolle ausgeübt wird, Null sein.

Peer Instruction zu Seilen und Rollen

Die Gewichte üben Kräfte von 12 N auf das Seil aus und sind in Ruhe. Seile, Rollen und Kraftmesser seien masselos. Welche Angaben bei den Kraftmessern sind ungefähr richtig?

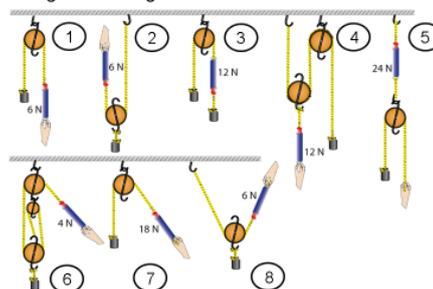


Abb. 5: Multiple Choice Aufgabe zu Seilen und Rollen

Die Studierenden sollen auch mit mathematischen Repräsentation umgehen. Sie bekommen daher wie zu jedem anderen Themenbereich Rechenaufgaben aus dem Standardwerk Physik für Wissenschaftler und Ingenieure von Tipler et al. (2015) gestellt – mit den jeweiligen Lösungen. Für die Studierenden besteht die Möglichkeit, diese Aufgaben im angebo-

tenen Tutorium mit einer studentischen Tutorin zu besprechen.

2.2.4. Umsetzungsvorschläge für die Schule und Schülervorstellungen

Am Ende eines jeden Kapitels der Vorlesung werden gemäß dem Modell des kumulativen Lehrens Bezüge zur und mögliche Vorgehensweisen in der Schule (beispielsweise auf den Begriff des „Trägheitsgesetzes“ zu verzichten und Newton I als Spezialfall von Newton II aufzufassen) und die einschlägigen Schülervorstellungen (Wiesner & Schecker, 2011 sowie Hestenes et al., 1992) anhand einiger Folien diskutiert.

Schülervorstellungen im Zusammenhang mit Newton I

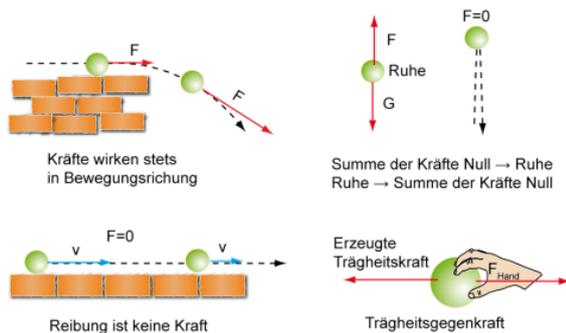


Abb. 6: Schülervorstellungen als Thema der Fachvorlesung

2.2.5. Vertiefung und Erweiterung des Kraftkonzepts in der Vorlesung zur klassischen Mechanik mit integrierten Übungen am Beispiel des ersten Newtonschen Axioms

Im späteren Verlauf der Vorlesung werden die Konzepte nun in weiteren auch ferneren Kontexten angewandt. So wird das erste Newtonsche Axiom im Sinne des ersten Aspekts des kumulativen Lehrens aufgegriffen. Diese erfolgt beispielsweise bei den Themen Fluidmechanik, Schwimmen und Schweben, wobei explizit das Kräftegleichgewicht zwischen Auftrieb und Gewichtskraft, sowohl beim Schwimmen als auch beim Schweben im Wasser herausgearbeitet wird.

Im Kapitel „Starre Körper“ wird das erste Newtonsche Axiom in einer Analogie aufgegriffen: „Jeder Starre Körper verharrt bezüglich der Rotation im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Drehbewegung, wenn er nicht durch Drehmomente gezwungen wird, seinen Zustand zu ändern.“ Dies bringt neben der Wiederholung im Sinne des kumulativen Lehrens die Einbettung in einen neuen innerphysikalischen Kontext mit sich.

Diese Analogie lässt sich fortsetzen. Danach wird der Ansatz für die Drehmomente für starre Körper auf reale Hebel angewendet. Dabei sind die Körper nicht nur bezüglich der Rotation in Ruhe (respektive in gleichförmige Bewegung) zu bringen, sondern

auch bezüglich der Translation, nämlich durch Kräfte, die auf das Lager wirken.

Einzeichnen von Kräften auf ruhende Körper

Zeichnen Sie die Drehachse und die Kräfte so ein, dass die Schubkarre bezüglich Rotation und Translation in Ruhe bleibt.

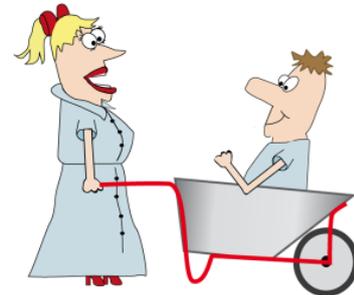
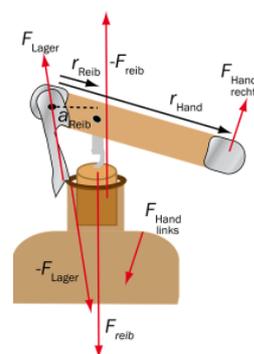


Abb. 7: Anwendung zur Erweiterung des Ersten Newtonschen Axioms auf Starre Körper

2.2.6. Aufgreifen des Kraftkonzepts in der Veranstaltung Schulversuche zur Mechanik

In der Veranstaltung Schulversuche zur Mechanik wird Newton I – neben den anderen Aspekten des Kraftkonzeptes – explizit anhand von experimentellen Fragestellungen zu Flaschenzügen, zur Grenzggeschwindigkeit von Fahrrädern und wieder wie oben zu Drehmomentgleichgewichten und Kräftegleichgewichten bei Hebeln, wie sie bei Korkenziehern, Zugbrücken oder Nussknackern auftreten, und damit in schulnahen Kontexten angewendet.

Ausschnitt aus einer Musterlösung (Kellnerkorkenzieher)



Der Korken bewegt sich unbeschleunigt, die Flasche ist in Ruhe.

Das heißt, auf jeden beteiligten Körper (Flasche und Korkenzieher samt Korken) muss nach Newton I die Summe der Kräfte (vektoriell) gerade Null sein.

Überdies muss die Summe der Drehmomente Null sein, welche die ausgeübten Kräfte erzeugen, damit analog zu Newton I keine Rotationsbeschleunigung auftritt...

Abb. 8: Ausschnitt aus einer Musterlösung zu Newton I in den Schulversuchen zur Mechanik (Rubitzko, et al. 2018).

2.2.7. Aufgreifen des Kraftkonzepts in der Vorlesung zur klassischen Elektrodynamik mit integrierten Übungen

Die mechanischen Grundkonzepte werden nun auch in der Elektrodynamik angewandt. Beispielsweise tritt bei der Herleitung der Hallspannung ein Kräftegleichgewicht auf. Hier lassen sich im Sinne des kumulativen Lehrens die mechanischen Grundkonzepte noch einmal wiederholen, und z.B. der Unterschied zum dritten Newtonschen Axiom explizieren.

3. Kognitive Aktivierung

Neben dem kumulativen Lehren wollen wir gezielt Lehr-Lern-Arrangements und Instruktionen einsetzen, die wir geeignet halten, um die Studierenden kognitiv zu aktivieren. Dies ist eine domänenunspecifische Strategie, um Lehr-Lernprozesse zu fördern. Wir beziehen uns bei unseren Beispielen auf die Vorlesung zur klassischen Mechanik mit integrierten Übungen. Wir verwenden den Begriff der kognitiven Aktivierung im Sinne von Renkl (2011) und sprechen davon, wenn die mentale Aktivität auf die zentralen Konzepte des Lernbereichs fokussiert werden und es deshalb zu einem Lernfortschritt kommt. Die kognitive Aktivierung zielt deshalb auf den Aufbau geeigneter mentaler Repräsentationen der mechanischen Grundkonzepte beziehungsweise auf einen damit verbundenen Conceptual Change.

Wir beschreiben im Folgenden anhand von Beispielen drei von uns ausgewählte Methoden, um eine kognitive Aktivierung bei den Studierenden zu initiieren:

- Peer Instruction
- Diskussion von Aufgaben mit qualitativem Schwerpunkt in Kleingruppen
- Worked Examples

3.1. Peer Instruction

Die Peer Instruction ist ein von Eric Mazur (1997) vorgeschlagenes Verfahren zur Hochschullehre im Bereich der Physik. Mazurs Evaluationsergebnisse erlauben den Schluss, dass beim Konzeptionellen Verständnis der Physik bessere Ergebnisse zu erzielen sind als mit einer traditionellen Vorlesung. Wir setzen das Verfahren in seinen Kernpunkten folgendermaßen um:

- Den Studierenden werden auf Folien schnell zu beantwortende Fragen gezeigt; meist im Multiple-Choice-Format. Mit Hilfe eines kleinen Senders haben die Studierenden über Funk die Möglichkeit, direkt und anonym ihre Antwort auf den Rechner zu übertragen, auf dem die Folienpräsentation läuft.
- Für jede Antwort wird in der Folienpräsentation gezeigt, wie viele Studierenden diese gewählt haben.
- Die Studierenden diskutieren nun aufgrund dieser Information mit ihrem Partner und geben ihre gemeinsame Antwort erneut ein.
- Auch diese Antwortverteilung wird angezeigt und die Ergebnisse erneut im Plenum diskutiert.
- Abschließend wird die richtige Antwort gezeigt. Unstimmigkeiten im Plenum, wenn notwendig, mit Unterstützung des Lehrenden geklärt.

Peer Instruction zum dritten Newtonschen Axiom

Es wird in allen vier Situationen zum Unfall kommen. Währenddessen treten Kräfte auf. Welche der Zeichnungen könnten die Kräfte zu einem beliebigen Zeitpunkt während des Zusammenstoßes zeigen?

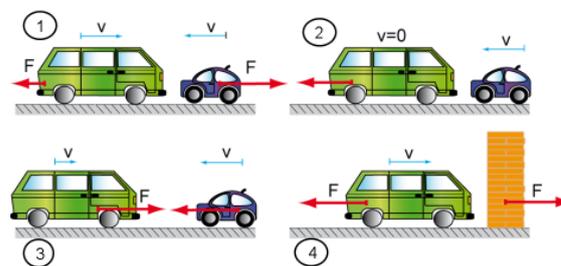


Abb. 9: Folie zur Peer Instruction

In der Vorlesung werden mit den Folien oft Präkonzepte oder Lernschwierigkeiten aufgegriffen. Im obigen Beispiel sind dies Fehlkonzepte zu Actio und Reactio oder zur Vorstellung, dass nur aktive Körper Kräfte ausüben können. Die Aufgaben bieten auch die Möglichkeit, neu erworbenes Wissen anzuwenden. So bekommen die Studierenden eine zeitnahe Rückmeldung, ob sie die zu lernenden Inhalte bereits anwenden können. Die Anonymität erlaubt Äußerungen, ohne sich exponieren zu müssen. Damit ist eine klare Trennung von Leistungsraum und Lernraum (Weinert, 1999) für die Studierenden offensichtlich. Die Peer Instruction ist häufig auch mit Demonstrationsexperimenten verbunden – In diesem Beispiel werden danach über ein Messerfassungssystem die wechselseitigen Kräfte auf zwei zusammenstoßende Fahrzeuge unterschiedlicher Masse und Geschwindigkeit aufgezeichnet und graphisch dargestellt und so die theoretischen Vorhersagen experimentell überprüft.

Einige praxisbezogene Bemerkungen: Das Abstimmingsystem „Edivote 100“, mit welchem wir arbeiten, hat im Gegensatz zu anderen Systemen den Vorteil, dass die Ergebnisse direkt in den Powerpoint-Folien angezeigt werden. Ein Vorgehen, bei dem die Studierenden einfache Kärtchen mit Ziffern hochhalten, ist abgesehen von der fehlenden Anonymität, wesentlich einfacher zu gestalten und in der Praxis unkomplizierter umzusetzen. Dies empfehlen wir nicht zuletzt aus Kostengründen für eine Neukonzeption in anderen Hochschulen. Einen Zugriff über einen Server über die eigenen Smartphones der Studierenden halten wir aus Datenschutzgründen zumindest für bedenklich.

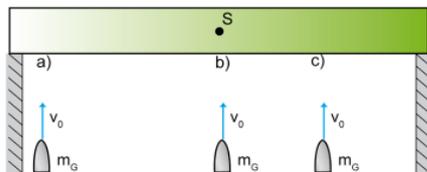
3.2. Diskussionen von Aufgaben in Kleingruppen

Die Kleingruppenarbeit führt im Mittel ebenfalls zu einem erhöhten Wissenserwerb (Springer et al., 1999). Da hier auch Erklärungen und Lösungsvorschläge sprachlich produziert werden, ordnen wir sie den Selbsterklärungen zu, auch wenn die Adressaten der Erklärungsversuche andere Personen sind.

Da das verständliche, fachlich korrekte sprachliche Formulieren physikalischer Zusammenhänge – ein

Aspekt des physikalischen Erklärens – für uns ein wichtiges Lehrziel für Lehramtsstudierende ist, versuchen wir es durch das Anregen von Diskussionen in Kleingruppen zu fördern. Als Gesprächsanlässe dienen Problemstellungen, die eine richtige Lösung ohne den Einsatz von Mathematik in wenigen Argumentationsschritten ermöglichen. Dabei werden die wesentlichen Grundkonzepte genannt, um eine fokussierte Informationsverarbeitung zu gewährleisten.

Gruppendiskussion zu Energie, Impuls & Drehimpuls



In eine auf einem Gestell liegende Latte, wird geschossen, so dass die Kugel stecken bleibt. Beim ersten Versuch trifft sie in Punkt a, beim zweiten in b, und beim dritten in c auf.

Ordnen Sie die Versuche nach der Steighöhe des Massenmittelpunktes.
Fundieren Sie Ihre Ergebnisse mit Überlegungen zu den Erhaltungssätzen von Energie, Impuls und Drehimpuls.

Abb. 10: Folie zur Diskussion einer Aufgabe in Kleingruppen

Abb. 10 zeigt ein typisches Beispiel für eine ‚Erkläraufgabe‘. Der Ansatz der Impulserhaltung führt zur Lösung. Andere Ansätze lösen das Problem nicht; sie führen aber zu Nutzung physikalischer Prinzipien und Problemlösungen. Implizit decken diese Aufgaben in einigen Kriterien des Modells des kumulativen Lehrens und Lernens ab. Wird z.B. die Energieerhaltung diskutiert, so lässt sich unter anderem argumentativ belegen, dass die Kugel in der Mitte eine größere Eindringtiefe erreichen muss als diejenige am Rand. Zu dieser Aufgabe gibt es auch eine filmische Sequenz von Müller (2013) im Internet.

3.3. Worked Examples

Worked Examples gelten in ihrer kognitiv aktivierenden Wirksamkeit als belegt (Sweller et al., 1998 sowie Renkl 2002); und unterstützen im Mittel den intendierten Wissenserwerb. Das von uns gewählte Ablaufschema ist an Ideen von Renkl & Schworm (2002) zum Arbeiten mit vorgegebenen Lösungsbeispielen (Worked Example) orientiert, bei dem mehrere Lösungsbeispiele angeboten werden. In der Vorlesung mit den integrierten Übungen wird die Arbeit mit solchen Lösungsbeispielen regelmäßig eingesetzt, wenn die Studierenden Lösungsstrategien für Problemstellungen nach einem bestimmten Muster erlernen sollen. Z.B. beim Freischneiden oder dem Umgang mit den Erhaltungssätzen von Energie, Impuls und Drehimpuls. Dazu müssen physikalische Begriffe schon bekannt sein, nicht aber deren konkrete Anwendungen in diesen bestimmten Situationen.

Worked Example Freischneiden – 3. Kräfte einzeichnen

Sie zeichnen die Kräfte als Pfeile ein, die von außen auf das jeweilige System ausgeübt werden. Kräfte, die nur innerhalb des Systems ausgeübt werden oder auf Körper außerhalb des von Ihnen gewählten Systems ausgeübt werden, lassen Sie weg.

Zeichnen Sie die Beschleunigungen, die Sie erwarten, ebenfalls als Pfeile ein.

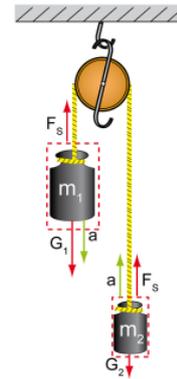


Abb. 11: Dritte von fünf Folien aus einem Worked Example zum Freischneiden

Die Studierenden erhalten eine Aufgabe, die mit einem bestimmten Verfahren zuverlässig zu lösen ist (in unserem Beispiel das Freischneiden bei einer Atwoodschen Fallmaschine, orientiert am Vorgehen von Müller (2009), s. Abb. 11).

- Die Studierenden bekommen zwei ähnliche Aufgaben, welche mit der gleichen Lösungsstrategie lösbar sind. Für beide Aufgaben liegen Musterlösungen vor; die Einzelschritte enthalten Kommentare zum Vorgehen.
- Die Studierenden sollen sich zuerst an beiden Aufgaben die Lösungsstrategie ohne Zuhilfenahme der Musterlösungen erklären. Dann sollen die Studierenden beide Aufgaben – allein oder im Team - nochmals lösen.
- Die Studierenden lösen nun eine zu beiden Beispielaufgaben analoge Aufgabe ohne vorgegebene Lösung gemeinsam analog zur Musterlösung.
- Sich aus der Diskussion ergebende Fragen zum Vorgehen und zum Lösungsprinzip werden nochmals im Plenum diskutiert und die Ergebnisse sowohl von den Beispielaufgaben als auch von den selbst zu lösenden Aufgaben in der Regel experimentell überprüft
- Um das Verfahren einzuüben werden weitere ähnliche Aufgaben gestellt, die außerhalb der Veranstaltungszeit in der nächsten Woche gelöst werden sollen, um das Verfahren zu automatisieren.

4. Elementarisierung von Grundkonzepten der Mechanik für die Hochschulausbildung von Physiklehrern

Im schulischen Bereich – bei den ersten Schritten zum Aufbau eines Wissenssystems Physik – ist die Frage der Elementarisierung eine der zentralen Fragen der Physikdidaktik (Girwitz & Berger, 2011). Grundlegende Aussagen der Physik sind abhängig von der Zielsetzung der Vermittlung auszuwählen, adressatengerecht zu vereinfachen, sodass Wissensbausteine zu Physik aufgebaut werden können, z.B. der Begriff der Geschwindigkeit oder der Tempera-

tur. Dieser Aufbau ist durch die Wahl geeigneter methodische Maßnahmen in Abhängigkeit von der Lerngruppe zu flankieren. Es ist eine offene Frage, inwieweit dies auch in der Hochschullehre zu geschehen hat. Ausgehend von unseren Erfahrungen und der Literatur (siehe zusammenfassend John & Staraschek, 2017), aus denen wir schließen, dass unsere Studierende wenig ausgereiftes physikalisches Wissen aus der Schule mitbringen, haben wir die Entscheidung getroffen, auch in unserer Hochschullehre die Frage der Elementarisierung bei der inhaltlichen Gestaltung zu berücksichtigen. Wir nehmen die Gültigkeit der Gütekriterien für die Schule an: fachgerecht und anschlussfähig soll die Elementarisierung sein, adressatengerecht und zielgerecht (vgl. hierzu Bleichroth 1991 sowie Girwitz & Berger, 2011.). Als Unterschied zum Schulunterricht erachten wir für Lehramtsstudierende nicht nur die Kenntnis der Physik, sondern auch das Wissen über mehrere mögliche Elementarisierungen als ein wichtiges Ziel für Lehramtsstudierende.

Am Beispiel des ersten Newtonschen Axioms wurde schon implizit angedeutet, wie sich eine Sinnlichkeit Schritt für Schritt aufbauen lässt. Nachfolgend soll für die anderen Grundkonzepte der Mechanik skizziert werden, wie „Stolpersteine“ (vgl. Wilhelm, 2018) auch in der Hochschullehre zu verhindern sind. Wir dokumentieren unsere Ansätze möglichst nachvollziehbar, ohne ein Lehrbuch zu schreiben, da die meisten Schritte schon aus der Literatur bekannt sind.

4.1. Kraft und Bewegung

Vor der Einführung des Kraftbegriffs wird in der Mechanik die Kinematik thematisiert, bei der die Zusammenhänge von Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung als vektorielle Größen dargestellt werden. Hierbei werden vor allem zweidimensionale Bewegungen diskutiert (z.B. Kurvenfahrten, Würfe oder ein Fadenpendel). Graphische Repräsentation wie, Vektordarstellungen von Orten, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen (vgl. hierzu unter anderem Wilhelm & Heuer, 2002) oder das Überführen von zeitabhängigen Verläufen dieser Größen in Diagrammen sollen das Verständnis auch der mathematischen Zusammenhänge unterstützen.

Unsere Einführung des Kraftbegriffs orientiert sich an einer Übersetzung der Originalversionen der Newtonschen Axiome und erfolgt damit dynamisch, wie beispielsweise von Wiesner (1994) gefordert, und nicht statisch.

Zentral ist dabei das zweite Newtonsche Axiom. Unser Umgang mit Newton II orientiert sich an Ansätzen für Schulunterricht von Wiesner et al. (2016), ohne allerdings die Begriffe Zusatzgeschwindigkeit oder Tempo explizit zu verwenden. Wir schätzen diese zusätzlichen Begriffen für die Hochschullehre als nicht gewinnbringend ein. Wir formulieren beispielsweise:

„Die Änderung der Geschwindigkeit (als vektorielle Größe) weist in die Richtung der Vektorsumme aller auf den Körper ausgeübten Kräfte und ist zu deren Betrag proportional.“

Daneben werden auch folgende äquivalente Darstellungen von Newton II zumindest kurz angesprochen:

„Der Kraftstoß ist proportional zur Geschwindigkeitsänderung ($\int F dt = m \Delta v$).“

„Die Kraft, die auf einen Körper ausgeübt wird, ist proportional zur zeitlichen Änderung seines Impulses.“

Die Verwendung solcher äquivalenter Formulierungen soll kognitive Flexibilität fördern, indem in verschiedenen Anwendungskontexten sofort eine geeignete, auch mathematisch orientierte Repräsentation zur Verfügung steht (Spiro et al., 1988). Weil Studierende selbst später als Lehrer elementarisieren müssen, sind wir der Meinung, dass es sinnvoll ist, einige der in der Fachdidaktik diskutierten alternativen Elementarisierungen im Sinne einer professionorientierten Physiklehrerausbildung schon in den Fachvorlesungen anzusprechen.

Wir führen Newton I nach Newton II ein (vgl. hierzu auch Wilhelm, 2018 a). Weil wir Newton I als Spezialfall von Newton II für Körper betrachten wollen: Werden keine Kräfte ausgeübt so ändert sich der Bewegungszustand des Körpers in einem beliebigen Zeitintervall nicht, und vice versa.

Newton I wird oft als Trägheitsprinzip bezeichnet. Der Begriff der Trägheit erscheint uns in Bezug auf Newton I als obsolet und führt eher zur Vorstellung von Kräften, die auf einen Körper wirken und der Bewegung entgegenwirken – ‚die Trägheit als ‚Ding‘ oder ‚Akteur‘ hat einen Einfluss auf die Bewegung‘ – ‚die Trägheit wirkt der Änderung entgegen‘ (vgl. beispielsweise Wiesner & Schecker, 2011). Vielmehr verstehen wir die (träge) Masse als Proportionalitätsfaktor zwischen Beschleunigung und Kraft insbesondere bei Newton II. (hierzu auch Wilhelm, 2018 a).

Zudem wird betont, dass Newton I letztlich nur Aussagen zu „Vorgängen“ macht– Wenn die Summe der ausgeübten Kräfte Null ist bedeutet dies zum einen „in Ruhe bleiben und nicht nur momentan in Ruhe sein“, oder sich (über einen Zeitraum hinweg) mit konstanter Geschwindigkeit bewegen. (Vergleich Lehrziel zu Newton I). Umgekehrt bleibt die Geschwindigkeit eines Körpers über ein Zeitintervall gleich, so ist die Summe der auf den Körper ausgeübten Kräfte Null.

Um das Wechselwirkungsprinzip bei Kräften (Newton III) zu betonen formulieren wir orientiert an Rincke (2005):

Wenn Körper A eine Kraft auf Körper B Körper ausübt, dann übt Körper B eine dem Betrage nach gleich große, entgegengesetzte Kraft auf Körper A aus.

Um Vorhersagen für die Veränderung von Bewegungszuständen bei Körpern zu treffen, auf die Kräfte ausgeübt werden, favorisieren wir die Methode des Freischneidens, wie sie bei Müller (2009) explizit eingeführt wird und in der ingenieurwissenschaftlichen Literatur üblich ist. Dabei ist es wesentlich, das System, respektive den Körper, klar zu identifizieren, und nur die Kräfte einzuzeichnen, die von Körpern oder Feldern außerhalb des Systems auf den Körper ausgeübt werden. Daraus folgen dann die Bewegungsgleichungen.

4.2. Die Erhaltungsgrößen Energie, Impuls und Drehimpuls

Die Erhaltungssätze von Energie, Impuls und Drehimpuls sind wichtige Werkzeuge zur Lösung von physikalischen Problemen. Während der Impuls als eher leicht zugängliche Größe gilt, erweist sich die Energie als schwieriger, weil sie mit verschiedenen, nur eingeschränkt tauglichen Alltagskonzepten behaftet ist. Wiesner & Waltner (2009) schlagen vor, im Schulunterricht Energie (analog hierzu Impuls und Drehimpuls) als Bilanzgröße, die Systeme charakterisiert, zu elementarisieren. Wir greifen diese Idee auf, auch wenn diese Entscheidung nur bedingt empirisch begründet werden kann, und verwenden explizit Feynmans (2015) „unzerstörbare Bauklötzchen“ als Analogon zur Energie. Wie auch Müller (2009) dies ähnlich vorschlägt ist dabei wesentlich stets vor dem Bilanzieren zu klären:

- Welcher Vorgang wird von welchem bis zu welchem Zeitpunkt betrachtet?
- Was wird genau als System betrachtet, d.h. wo sind die Systemgrenzen, und tritt Energie über diese Systemgrenzen?
- Wo steckt die Energie?

Es stellt sich die Frage nach der Einführung von „Energieformen und der Energieumwandlung“. Duit (2007) sieht diese als einen Aspekt neben Energie-transport, Erhaltung und Energieentwertung bei der Elementarisierung der Größe Energie an.

Wir halten die Unterteilung in Energieformen und die daraus resultierenden Energieumwandlungen letztlich für obsolet. Aus Gründen der Anschlussfähigkeit bedienen wir uns dennoch der gängigen Begriffe potentielle Energie und kinetische Energie als „Energieformen“, die einem System zugeschrieben werden, und den Prozessgrößen Arbeit und Wärme, um Transporte über Systemgrenzen hinweg zu charakterisieren. Dabei hoffen wir, dass unsere Studierenden durch die Verwendung der Analogie Feynmans trotzdem erkennen, dass es nur „eine physikalische Größe Energie“ oder nur „eine Energie“ gibt.

Analog wird mit den Größen Impuls und Drehimpuls verfahren: Überlegungen zum Prozess, der stattfindet, zu den betrachteten Systemen, zu externen und internen Kräften respektive Drehmomenten. Allerdings sind bei Impuls und Drehimpuls noch der

vektorielle Charakter zu berücksichtigen und beim Drehimpuls Überlegungen zur Festlegung des Koordinatenursprungs zu treffen.

4.3. Drehmoment beim starren Körper als Analogon zur Kraft

Wesentlich beim Konzept des Drehmoments ist für uns die bekannte Analogiebildung zwischen Rotationsbewegung und Translationsbewegung. Dazu gehören die Analogierelationen zwischen Masse und Trägheitsmoment, Kraft und Drehmoment und den zugehörigen kinematischen Größen Ort und Winkel, Geschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit sowie Beschleunigung und Winkelbeschleunigung. Analog zu Newton I und Newton II lassen sich auch hier Sätze zur Rotationsbewegung formulieren. Und wieder analog werden Verfahren erläutert, wie man durch die Addition und das Verschieben von Kräften am starren Körper zu Kräftepaaren kommt, die zu einer Winkelbeschleunigung des freien Körpers führen und zu Kräften, deren Wirkungslinie durch den Massenmittelpunkt geht und zu Translationsbeschleunigungen führen.

Abschließend für alle Grundkonzepte: Wir erachten für das Verständnis von Physik und für die Fähigkeit, Physik zu vermitteln, auch mathematische Repräsentationen für notwendig. Aber ohne eine vorhergehende Entwicklung von physikalischen Begriffen, einer qualitativen Beschreibung von Zusammenhängen zwischen physikalischen Größen und Vorgängen. Ohne diese qualitative Ebene bleibt eine mathematische Repräsentation ohne nennenswerte Relevanz für das spätere Physiklehren an der Schule. Dies entspricht einer Forderung Wagenscheins (1968) und ist keinesfalls neu, aber angesichts der Ausbildung an Hochschulen im Bereich des Lehramtes Physik ein wohl immer noch sehr aktueller Teil seiner Kritik.

5. Förderung der Frage- und Gesprächskultur

In einer Metastudie zur Effektivität von Hochschullehre nennen Schneider und Preckel (2017) eine Reihe von Maßnahmen, deren positive Wirksamkeit hinsichtlich der Lernförderlichkeit des Wissenserwerbs für verschiedene Studieninhalte mit großen Effektstärken belegt ist - darunter die soziale Interaktion. Ein Bereich davon ist die Förderung der Frage- und Gesprächskultur, die letztlich auch einen Teil zur Kognitiven Aktivierung beiträgt.

Zusätzlich zu den geschilderten kommunikativen Elementen in den Lehr-Lern-Arrangements haben wir versucht, die Kommunikation zwischen Dozent und Studierenden zu gestalten. Der Gesprächsstil, die Möglichkeit, Fragen zu stellen und die Tatsache, nicht über Lernschwierigkeiten der Studierenden hinwegzugehen, werden als wesentliche Elemente zur Effizienzsteigerung in der Hochschullehre genannt (Feldmann 1989). Deshalb wurden die Studierenden regelmäßig am Ende von gelehrten Sinneinheiten aufgefordert, Fragen zu Unklarheiten und

Nichtverstandenen zu stellen. Es wurde aus Sicht des Lehrenden bei den Gesprächen auf eine symmetrische Gesprächsführung geachtet; Fehler im Denken oder in den Vorstellungen wurden aus seiner Wahrnehmung als notwendig akzeptiert. Da oft auch Lehramtsstudierende ihre Probleme beim Verständnis scheinbar einfacher Inhalte vor der ganzen Gruppe nicht äußern, wurde abgemacht, dass der Dozent am Ende der Veranstaltung eine Viertelstunde im Vorlesungsraum bleibt und für fachliche (und organisatorische) Fragen zur Verfügung steht. Dieser Termin wurde von einzelnen Studierenden oder noch häufiger von kleinen Studierendengruppen wahrgenommen.

Um den Studierenden die Möglichkeit des Austauschs mit einer fachlich kompetenten Studierenden zu ermöglichen, wurde ein Tutorium mit zwei SWS eingerichtet. Die Idee: Gesprächsbarrieren zu verringern.

6. Erste basale Evaluation und Zwischenbilanz zur Entwicklung

Um den Bericht abzuschließen, wollen wir über einige einfache Evaluationselemente berichten, um angesichts der Komplexität der Entwicklung eine erste Orientierung über die Einschätzung der Maßnahmen zu erhalten. Dabei werden die basale Evaluation der Vorlesung, die im Sommersemester 2017 gelesen wurde und deren Ergebnisse vorgestellt, diskutiert und Implikationen aufgezeigt. Abschließend erfolgt eine Zwischenbilanz zur Entwicklungsarbeit mit kurzem Ausblick

6.1. Evaluationskriterien der ersten begleitenden Evaluation

Als erste orientierende Evaluation wurde die Wahrnehmung der Veranstaltungselemente durch die Studierenden erhoben und deren Einschätzung, wie die Veranstaltungselemente den eigenen Lernprozess unterstützt haben.

6.2. Stichprobe

Fünfzehn weibliche und sieben männliche Studierende haben im zweiten Durchlauf im Sommersemester 2017 regelmäßig an der sechsstündigen Veranstaltung teilgenommen (im Mittel waren sie 83 % der Zeit anwesend). Die Stichprobe umfasst Studienanfänger (erstes und zweites Semester) und fortgeschrittene Studierende im höheren Semester, die schon einmal eine Einführung in die Mechanik gehört haben. Sie studieren in unterschiedlichen Studienordnungen, insbesondere unterscheiden sich Hauptfach- und Nebenfachstudierende. Die Stichprobe ist daher als heterogen anzusehen.

6.3. Erhebungsmethode

In der Mitte des Semesters (Sommersemester 2017) wurde im offenen Format gefragt: „Welche Elemente (z.B. methodische oder didaktische Maßnahmen) in der Veranstaltung Mechanik (Vorlesung mit integrierten Übungen) unterstützen oder behindern Ihren Lernfortschritt besonders? Nennen Sie höchstens

fünf, und begründen Sie bitte jede Nennung mit einem Satz.“ Die Antworten wurden nach Oberflächenmerkmalen (Wortidentitäten und Synonyme) sortiert und dann nach semantischen Bedeutungen zusammengefasst. Danach wurden die Kategorien gebildet und bezeichnet. Ein Beispiel: Die Nennung „übersichtliche Folien“ mit der Begründung „Die Inhalte sind klar dargestellt und sind dementsprechend sehr zugänglich und verständlich“ wird der Kategorie „(bebilderte) Folienpräsentation“ zugeordnet. Aus den Kategorien wurden in einem zweiten Schritt Items mit fünfstufiger Likertskala mit den Polen stimme [gar nicht/völlig] zu gebildet. Sie folgen dem Schema „X“ hat mir beim Lernen geholfen, z.B. „Die bebilderte Folienpräsentation hat mir beim Lernen geholfen.“ Diese Items wurden den Studierenden am Ende des Semesters in schriftlicher Form vorgelegt.

Außerdem wurde der Standardfragebogen zur Erfassung der Lehrqualität der Pädagogischen Hochschule Ludwigsburg eingesetzt, um eine Einordnung der Studierendeneinschätzung bezüglich anderer Lehrveranstaltungen innerhalb der Hochschule zu ermöglichen. Das Instrument besteht aus 13 Items mit einer fünfstufigen Likertskala mit den Polen Stimme zu und Stimme nicht zu. Das seit Jahren an unserer Hochschule eingesetzte Instrument umfasst fünf Faktoren: Subjektive Lehrqualität, Emotionale Bewertung, Anforderungsniveau, Lernfortschritt und Partizipationsmöglichkeit. Diese werden mit Werten von eins bis fünf versehen, wobei fünf die höchst mögliche Ausprägung der Kategorie ist.

6.4. Ergebnisse

Die offenen Antworten ließen sich in zwölf Kategorien ordnen. Tabelle 1 zeigt die genannten Oberflächenmerkmale der Veranstaltung Mechanik mit integrierten Übungen. Darunter auch die drei Maßnahmen zur kognitiven Aktivierung.

Kategorie (beschrieben in Kapitel)	M	SD
Experimente	4.9	0.3
Peer Instruction (3.1)	4.8	0.5
Gesprächsatmosphäre (5)	4.8	0.4
Folienpräsentation (1.2)	4.7	0.7
Möglichkeit für Rückfragen (5)	4.6	0.8
Alltagsbeispiele (2.2)	4.6	0.6
Schulbezug (2.2)	4.6	0.6
Diskussionsaufgaben (3.2)	4.5	0.8
Häusliche Übungen (2.2)	4.3	0.9
Worked Example (3.3)	3.9	1.0
Genannte Lehrziele (2.2)	3.5	1.2
Rechenaufgaben (2.2)	3.3	1.2
Tutorium (2.2)	3.2	1.5

Tabelle 1: Mittelwerte und Standardabweichungen zugeordnet zu den Kriterien der Entwicklung (Range von 1-5)

Tabelle 2 zeigt die Werte der subjektiven Einschätzungen der Studierenden aus den allgemeinen Evaluationskriterien.

Kategorie	M	SD
Subjektive Lehrqualität	4.8	0.3
Emotionale Bewertung	4.6	0.5
Anforderungsniveau	4.2	0.7
Lernfortschritt	4.8	0.4
Partizipationsmöglichkeit	4.3	0.8

Tabelle 2: Mittelwerte und Standardabweichungen zugeordnet zu den Kategorien des Ludwigsburger Lehrqualitätserfassung (Range von 1-5)

6.5. Diskussion und Implikationen

Die Interventionselemente werden in der offenen Befragung von den Studierenden genannt und anschließend im geschlossenen Antwortformat mit Deckeneffekten als hilfreich für das eigene Lernen eingeschätzt. Wir schließen daraus, dass unsere theoriegeleitete Intervention zumindest aus der subjektiven Sicht der Studierenden gelungen ist. Diese Hypothese ist mit objektiven Daten in der unabhängigen Evaluation (siehe John & Starauschek, 2017) zu untermauern.

Die genannten didaktisch-methodischen Elemente passen zu den Ergebnissen von Schneider & Preckel (2017). Dort zeigen in der Hochschullehre „kooperative Lernformen“ und „Rückmeldungen“ große Effektstärken. Ebenso theoriekonform (siehe Schneider & Preckel, 2017) erweisen sich die beispielsweise an der Multimediatheorie orientierten Folienpräsentationen als hilfreich.

Als unerwartete Kategorie zeigen sich die Experimente. Experimente sollen im Schulunterricht in geeigneter Form unter anderem durch Problemstellung, Hypothesenbildung und anschließende Darstellung, Interpretation und Verallgemeinerung der Ergebnisse eingebettet werden (vgl. hier beispielsweise Tesch & Duit, 2004). Obwohl dies nicht präskriptiv in unseren Leitkriterien festgelegt wurde, wurden retrospektiv betrachtet nahezu alle Experimente in dieser Art durchgeführt. Dies werden wir in der nächsten Veranstaltung vertiefen und weitere Aufgaben damit unterstützen.

Das freiwillige Tutorium wurde sehr unterschiedlich bewertet; es zeigt sich die größte Standardabweichung (s. Tab. 1). Die Ursache ist vermutlich in der Beobachtung zu finden, dass nur ein Drittel der Studierenden dieses Angebot wahrgenommen hat – diese Studierenden haben das Tutorium gut bewertet.

Die genannten Lehrziele haben die Studierenden vermutlich deshalb als eher schwach bewertet (s. Tab. 1), weil sie sich erst im Oktober auf Prüfungen vorbereiten und nicht geprüft wurden. Wir können nicht beurteilen, ob sie bei der kognitiven Aktivierung hilfreich waren. Aus Gesprächen wissen wir,

dass sich die Studierenden wünschten, am Ende jeden Kapitels noch eine Zusammenfassung zu erhalten.

Aus den Ergebnissen zum Fragebogen der Ludwigsburger Lehrevaluation lassen sich folgende Schlüsse ziehen. Insgesamt sind auch bei diesem Fragebogen Deckeneffekte zu verzeichnen. Das Anforderungsniveau wird als verhältnismäßig hoch erlebt. Dies steht im Gegensatz zu sonstigen Veranstaltungen an unserer Hochschule. Dort gehen als von den Studierenden sehr gut bewertet Veranstaltungen meist mit einem eher mittleren Anspruchsniveau einher. Es ist anzunehmen, dass die vorgenommene Elementarisierung für eine Hochschulveranstaltung nicht zu einer Verflachung führte, sondern zur Verständlichkeit eines anspruchsvollen Stoffes.

6.6. Zwischenbilanz zur Entwicklung und Evaluation

Offen bleibt die Frage nach der Charakterisierung des Entwicklungsprozesses. Inwieweit können wir die Theorieleitung als überwiegend operational wissenschaftlichen Prozess betrachten oder wie weit spielen eher unbestimmte als kreativ oder schöpferisch zu bezeichnende Prozesse eine entscheidende Rolle (vgl. hierzu Reinmann, 2014). Hier traten Konflikte auf. So mussten einerseits Lösungen für unbefriedigend erlebte Lehrsituationen oder auch organisatorische Widrigkeiten erfahrungsbasiert, pragmatisch, schnell und situativ gefunden werden, um die Lehre zu gewährleisten. Diese Einflussfaktoren sind nicht wirklich im Sinne einer strengen Empirie zu kontrollieren – was in komplexen Lehr-Lernsituationen so auch nicht notwendig ist. Auf der anderen Seite sollten die Lehrbedingungen möglichst konstant gehalten werden, und die Lehre war so weit wie möglich zu standardisieren und tradierbar zu machen: z.B. ob die Umsetzung der Prinzipien kumulativen Lernens bei der Entwicklung der Lernumgebung immer wieder bewusst kontrolliert wird. Dies wird Teil einer unabhängigen Evaluation.

Unsere Entwicklung im Durchgang Sommersemester 2018 wird auch aus einer von der Entwicklung unabhängigen Perspektive untersucht und damit evaluiert. Die Evaluationskriterien dieser Evaluation sind unter anderen die Entwicklung des physikalischen Fachwissens, insbesondere in Hinsicht auf die mechanischen Grundkonzepte, und die subjektiven Einschätzungen der Fähigkeit, Physik in der Schule zu unterrichten, die antizipierte Lehrerselbstwirksamkeit (vgl. John & Starauschek 2017). Die dabei gewonnenen Ergebnisse können zu einer erneuten Überarbeitung der Lehrveranstaltungsreihe der Mechanik führen. Im Anschluss daran sollen Teile der Veranstaltung – auch als Prototyp – Lehrenden und Studierenden, z.B. als Sammlung von Übungsaufgaben über das beschriebene Beispiel hinaus öffentlich zugänglich gemacht werden.

7. Literatur

- Borowski, A.; Kirschner, S.; Liedtke, S. & Fischer, H.E. (2011). Vergleich des Fachwissens von Studierenden, Referendaren und Lehrenden in der Physik. *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* 1 (10), 1-9.
- Chandler, P. & Sweller, J. (1991). Cognitive load theory and the format of instruction. *Cognition and Instruction*, 8, 293-332.
- Design-Based Research Collective (DBRC) (2003). Design-Based Research: An Emerging Paradigm for Educational Inquiry. *Educational Researcher*, 32 (1), 5-8.
- Duit, R. (2007). Energie - Ein zentraler Begriff der Naturwissenschaften und des Naturwissenschaftlichen Unterrichts. *Naturwissenschaften im Unterricht. Physik*, 18 (102), 4-8.
- Euler, D. (2014). Design Principles als Kristallisationspunkt für Praxisgestaltung und wissenschaftliche Erkenntnisgewinnung. In: D. Euler & P. Sloane (Hrsg.), *Design-Based Research*. Stuttgart: Franz Steiner, 97-112.
- Feldman, K. (1989). The association between student ratings of Specific instructional dimensions and student achievement. *Research in Higher Education*. 30 (6), 583-645.
- Feynman, R. P.; Leighton, R. B. & Sands, M. (2015). *Feynman-Vorlesungen über Physik: Mechanik*. München: De Gruyter Studium.
- Gagné, R. (1968). Contributions of Learning to Human Development. *Psychological Review*, 75, 177-191.
- Girwidz, R. & Berger, R. (2011). Elementarisierung. In: M. Hopf; H. Schecker & H. Wiesner (Hrsg.), *Physikdidaktik kompakt*. Freising: Aulis, 72-77.
- Girwidz, R. (2002-2007). Unveröffentlichte Folien zur Vorlesung „Mechanik“ an der Pädagogischen Hochschule Ludwigsburg.
- Hestenes, D.; Wells, M. & Swackhamer, G. (1992). Force concept inventory. *The Physics Teacher* 30, 141-166.
- John T. & Starauschek E. (2018). Kumulatives Lehren und Lernen im Lehramtsstudium Physik. Entwicklung eines Modells zur professionsorientierten Fachausbildung von Physiklehrkräften. Didaktik der Physik Frühjahrstagung Würzburg 2018. *PhyDid B*.
- John, T. & Starauschek, E. (2017). Kumulatives Physiklehren und -lernen im Lehramtsstudium - Evaluation eines Lehrkonzepts. In C. Maurer (Ed.), *Qualitätvoller Chemie- und Physikunterricht - normative und empirische Dimensionen*, 33, 150-153.
- Kultusministerkonferenz (Hrsg.) (2005). *Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss*. München: Luchterhand.
- Mayer, R. (2001). *Multimedia learning*. New York, NY; US: Cambridge University Press.
- Mazur, E. (1997). *Peer Instruction: A User's Manual*. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.
- Muckenfuß, H. (1994). Die „lose Rolle“: Ein „Misskonzept“ der Fachdidaktik? *Naturwissenschaften im Unterricht. Physik*, 5 (42), 27-30.
- Muller, D. (2013). Bullet block Experiment. <https://www.youtube.com/watch?v=vWVZ6APXM4w> (abgerufen April 2018).
- Müller, R. (2009). *Klassische Mechanik: Vom Weitsprung zum Marsflug*. Berlin: De Gruyter.
- Reinmann, G. (2005). Innovation ohne Forschung? Ein Plädoyer für den Design-Based Research Ansatz in der Lehr-Lernforschung. *Unterrichtswissenschaft* 1, 52-69.
- Reinmann, G. (2014). Welchen Stellenwert hat die Entwicklung im Kontext von Design Research? Wie wird Entwicklung zu einem wissenschaftlichen Akt? In: D. Euler & P. Sloane (Hrsg.), *Design-Based Research*. Stuttgart: Franz Steiner, 63-78.
- Renkl, A. (2002): Learning from worked-out examples: Instructional explanations supplement self-explanations. *Learning & Instruction* 12, 149-176.
- Renkl, A., & Schworm, S. (2002). Lernen, mit Lösungsbeispielen zu lehren. In: M. Prenzel & J. Doll [Hrsg.], *Bildungsqualität von Schule: Schulische und außerschulische Bedingungen mathematischer, naturwissenschaftlicher und überfachlicher Kompetenzen*. Weinheim: Beltz, 259-270.
- Renkl, A., (2011). Aktives Lernen: Von sinnvollen und weniger sinnvollen theoretischen Perspektiven zu einem schillernden Konstrukt Unterrichtswissenschaft. 39 (3), 197-212.
- Riese, J. & Reinhold, P. (2010). Die Wirksamkeit verschiedener Lehramtsstudiengänge Physik im Vergleich. Vortrag GDCP-Jahrestagung in Potsdam September 2010
- Rincke K. (2005). Vom Kraft Haben zum Kraft-Ausüben. Ein fachsprachenorientierter Zugang zum Kraftbegriff. *Unterricht Physik*, 16, Heft 87, 28-31.
- Rubitzko, T.; Laukenman, M. & Starauschek E. (2018). Kumulatives Lehren und Lernen in der Lehramtsausbildung am Beispiel der Veranstaltung „Schulversuche zur Mechanik“ (im Druck).
- Schneider, M. & Preckel, F. (2017). Variables associated with achievement in higher education: A systematic review of meta-analyses. *Psychological Bulletin*, 143, 565-600.
- Spiro, R. J., Coulson, R. L., Feltovich, P. J. & Anderson, D. K. (1988). Cognitive flexibility theory: advanced knowledge acquisition in ill-structured domains. In: V. Patel (Hrsg.), *Tenth annual conference of the cognitive science society Hillsdale, N.J.: Lawrence Erlbaum*. 375-383.
- Springer, L.; Stanne, E. S. & Donovan, S. (1999). Effects of Small-Group Learning on Undergraduates in Science, Mathematics, Engineering, and Technology: A Meta-Analysis. *Review of Educational Research* 69 (1), 21-51.
- Sweller, J.; van Merriënboer, J.; Paas, F. (1998): Cognitive architecture and instructional design. In: *Educational Psychology Review* 10, 251-296.

- Tesch, M. & Duit, R. (2004). Experimentieren im Physikunterricht – Ergebnisse einer Videostudie. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*; 10, 51-69.
- Tipler, P; Mosca, G. & Wagner, J. (2015). *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*. Berlin Heidelberg: Springer Spektrum
- Wagenschein, M. (1968). *Verstehen Lehren*. Weinheim: Beltz.
- Weinert, F. E. (1999). Bedingungen für mathematisch-naturwissenschaftliche Leistungen in der Schule und die Möglichkeiten ihrer Verbesserung. In Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg (Hrsg.), *Weiterentwicklung des mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterrichts*. Stuttgart: MKJS Baden-Württemberg.
- Wiesner, H. & Schecker, H. (2011). Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten. In: M. Hopf, H. Schecker & H. Wiesner (Hrsg.), *Physikdidaktik kompakt*. Freising: Aulis, 34-47.
- Wiesner, H. & Waltner, C. (2009). Energie als Bilanzgröße. *Praxis der Naturwissenschaften Physik in der Schule* 58 (3), 15-21
- Wiesner, H. (1994). Zum Einführungsunterricht in die Mechanik: Statisch oder dynamisch? *Naturwissenschaften im Unterricht-Physik*, 22, 16-23.
- Wiesner, H.; Wilhelm, T.; Waltner, C; Tobias, V.; Rachel, A. & Hopf, M. (2016). Kraft und Geschwindigkeitsänderung. *Neuer fachdidaktischer Zugang zur Mechanik (Sek. 1)* Freising: Aulis.
- Wilhelm, T. & Heuer, D. (2002). Fehlvorstellungen in der Kinematik vermeiden - durch Beginn mit der zweidimensionalen Bewegung. *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule*, 51 (7), 29 – 34.
- Wilhelm, T. & Hopf, M. (2014). Design-Forschung. In: D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdi-daktischen Forschung*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 31-42.
- Wilhelm, T. (2018 a). Trägheit nur bei schnellen Bewegungen? In: T. Wilhelm (Hrsg), *Stolpersteine überwinden im Physikunterricht*. Seltze: Aulis 36-38.
- Wilhelm, T. (2018). *Stolpersteine überwinden im Physikunterricht*. Seltze: Aulis.

Danksagung

An dieser Stelle sei ein besonderer Dank an Raimund Girwidz für seine erste Entwicklung der Vorlesung zur Mechanik gerichtet.

Die Entwicklung und Evaluation der Lehr-Lernformen zur Unterstützung von kumulativem Lernen von physikalischen Grundkonzepten ist ein Teilprojekt des Verbundvorhabens Lehrerbildung PLUS der PSE Stuttgart-Ludwigsburg. Es wird im Rahmen der gemeinsamen „Qualitätsoffensive Lehrerbildung“ von Bund und Ländern aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert.