

Komplexitätsgestaffelte Übungsaufgaben zur Unterstützung im ersten Semester Physik

David Woitkowski*

*Universität Paderborn, Didaktik der Physik, Warburger Straße 100, 33098 Paderborn
david.woitkowski@uni-paderborn.de

Kurzfassung

Eine von vielfältigen Herausforderungen der Studieneingangsphase ist der Umgang mit der häufig ungewohnt hohen Komplexität von Übungsaufgaben in den physikalischen Fachveranstaltungen. Aktuelle Studien zeigen einerseits, dass Lehrveranstaltungen dann wirksam sind, wenn die Komplexität der präsentierten Inhalte und Aufgabenstellungen im oberen von den Lernenden nutzbaren Komplexitätsbereich liegt. Andererseits ist nur eine Minderheit der Studienanfängerinnen und -anfänger zum Umgang mit den hohen Komplexitäten typischer Übungsaufgaben fähig. Im Ergebnis werden Aufgabenlösungen häufig abgeschrieben, nicht verstanden und somit nicht oder nur wenig lernwirksam.

Im Beitrag wird ein Konzept zur Komplexitätsreduktion und -staffelung von Übungsaufgaben am Beispiel in seinen Vor- und Nachteilen vorgestellt. Ziel ist dabei, das Niveau der Aufgaben an die tatsächlichen Fähigkeiten der Mehrheit der Studierenden anzupassen und so Misserfolge und Demotivation zu verhindern. Wichtig sind hier Aspekte der Staffelung über den Semesterverlauf und der Transparenz des angezielten Klausurniveaus. Konkrete Vorschläge anhand realer Übungsaufgaben werden diskutiert.

1. Ausgangslage und Ziel

Die Studieneingangsphase im Fach Physik ist von einer Reihe fachlicher Anforderungen gekennzeichnet, die neben den organisatorischen, sozialen und personalen Anforderungen (Bosse & Trautwein, 2014) eine erhebliche Herausforderung für Studienanfänger darstellen. Tatsächlich geben viele Studienabbrecher und -wechsler aber die fachliche Ebene als zentralen Auslöser für die Entscheidung an, nicht weiter Physik zu studieren (Albrecht, 2011; Heublein, Hutzsch, Schreiber, Sommer & Besuch, 2010). Im ersten Semester empfinden Studierende vor allem das fachliche Niveau von Übungsaufgaben als zu schwierig (Woitkowski & Reinhold, 2018), so dass sich gerade hier ein steuerndes Eingreifen als sinnvoll erweisen könnte.

Das im Folgenden vorgestellte Konzept verfolgt im Rahmen der Paderborner Studieneingangsphase Physik (PSΦ) das Ziel, die Schwierigkeit der wöchentlich zu bearbeitenden Übungsaufgaben gezielt zu variieren, um deren Effekt auf Studienabbruch und -unzufriedenheit zu mindern (Bauer, Lahme, Woitkowski, Vogelsang & Reinhold, 2019). Dazu wird ein Komplexitätsmodell (Bernholt, 2010) zur gezielten, theoriebasierten Steuerung der Aufgabenschwierigkeit eingesetzt. Weiter wird in diesem Beitrag diskutiert, wie eine sinnvolle Schwierigkeitsprogression im Semester aussehen kann, die sowohl Studierenden mit typischen Vorkenntnissen einen gelingenden Start ins Fachstudium ermöglicht, gleichzeitig aber auch sinnvoll auf das in der Physik übliche Klausurniveau vorbereitet.

2. Komplexität und Aufgabenschwierigkeit

Das Fach Physik gilt bereits in der Schule als „schwieriges Fach“ (Merzyn, 2010) – mit allen dazugehörigen Herausforderungen. Wenn die „Schwierigkeit“ auch in der universitären Ausbildung als zentrales Anliegen ausgemacht wird, so wäre es sinnvoll, dieses qualifizieren und in einem nächsten Schritt möglichst auch quantifizieren zu können. Zur Schwierigkeit in der Schule trägt dabei u. a. die Fachsprache, der hohe Mathematisierungsgrad, die Abstraktion und die Komplexität der betrachteten Phänomene und Fragestellungen eine Rolle. Die Komplexität hat hier den Vorteil, dass sie als „objektive Aufgabenmerkmal“ (vgl. Kauertz, 2008) gut handhabbar ist und andererseits tatsächlich einen erheblichen Anteil der Schwierigkeitsvarianz von Aufgabenstellungen aufklären kann (Bernholt, 2010; Kauertz, 2008; Woitkowski & Riese, 2017).

Die Komplexität einer Anforderung, einer Aufgabe, gibt das Maß und die Art und Weise an, in dem für die erfolgreiche Bearbeitung Wissenselemente miteinander verknüpft werden müssen (Commons, Trudeau, Stein, Richards & Krause, 1998). Dies beruht auf der Auffassung von Wissen als propositionalem Netzwerk (Schnotz, 1994), wobei ein höherer Verknüpfungsgrad eine flexiblere Einsetzbarkeit des Wissens bedeutet. Das Konzept der Komplexität wurde in der Vergangenheit vielfach als schwierigkeitszeugendes Aufgabenmerkmal in physikdidaktischen Kompetenz- und Leistungstests eingesetzt (Bernholt, 2010; Kauertz, 2008; Woitkowski & Riese, 2017). Es zeigt sich, dass eine höhere (hierarchische) Aufgabenkomplexität regelmäßig mit einer höheren Aufgabenschwierigkeit einhergeht.

2.1. Komplexitätsniveaus

Für das vorliegende Anliegen kann dieses Aufgabenmerkmal wie folgt genutzt werden. Einerseits ist es möglich, die Schwierigkeit der in der Lehre eingesetzten Übungsaufgaben gezielt zu variieren. Andererseits ist aus empirischen Erhebungen bekannt, wie viele Studierende Aufgaben welcher Komplexität erfolgreich bearbeiten können (Woitkowski & Riese, 2017; Woitkowski, 2017, 2019). Verknüpft werden diese beiden Zugänge über die (auch lernpsychologisch nicht überraschende) Einsicht, dass Aufgaben dann am ehesten lernwirksam werden, wenn ihre Komplexität am oberen Ende der von den Lernenden bewältigbaren Komplexitätsspannbreite liegt (Podschweit, Bernholt & Brückmann, 2016) – wenn Studierende durch die Aufgabenstellungen also weder über- noch unterfordert werden.

Für die vorliegende Studie erscheint das (auch auf universitärem Niveau erprobte) Komplexitätsmodell von Bernholt (2010) in der Umsetzung von Woitkowski (2017) nutzbar. Es beschreibt die Niveaus¹ *Fakten – Prozessbeschreibungen – Lineare Kausalität – Multivariate Interdependenz* (Abb. 1, links). Jedes Niveau erfordert es dabei, die Elemente des Niveaus darunter zusammenzuführen und zu transformieren, so dass damit Anforderungen bewältigt

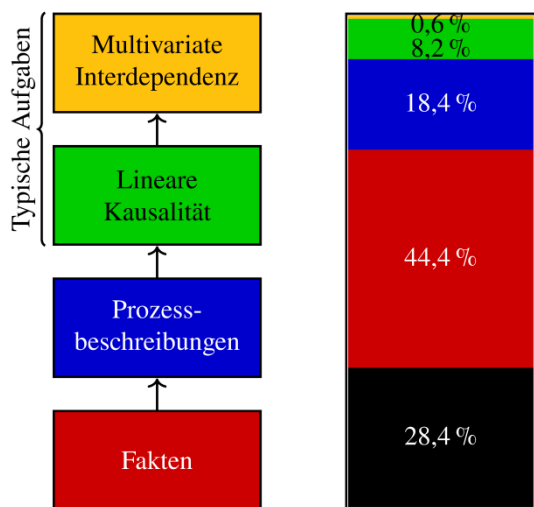


Abb.1: Links die Komplexitätsstufung im Modell von Bernholt (2010), typische Aufgaben im universitären Übungsbetrieb müssten den oberen beiden Komplexitäten zugeordnet werden. Rechts zum Vergleich die Niveauzuordnung von 626 Studierenden zu Beginn des ersten Semesters aus dem KEMΦ-Projekt (Woitkowski, 2018, 2020). Gelb eingefärbte Studierende sind in der Lage, Items des Niveaus Multivariate Interdependenz zu lösen, rot eingefärbte können Fakten-Items lösen, schwarz eingefärbte Studierende können selbst typische Fakten-Items nicht lösen.

¹ Bernholt beschreibt ein Niveau *Unreflektiertes Erfahrungswissen* unterhalb des *Fakten*-Niveaus, dieses zu erfassen erscheint im Kontext universitärer Ausbildung allerdings nicht angemessen.

werden können, die allein mit Elementen des darunterliegenden Niveaus nicht bewältigbar wären (Commons et al., 1998).

Typische Übungsaufgaben im Physikstudium erfordern nun in der Regel Begründungen und (häufig mathematische) Argumentationen und gehen nicht selten über das einfache Nutzen einer fertig vorliegenden Formel hinaus, sie sind somit in aller Regel den oberen beiden Niveaus dieses Modells zuzuordnen.

2.2. Fähigkeitsverteilung zu Studienbeginn

Im Rahmen des Projekts KEMΦ (Woitkowski, 2018) nehmen Studierende u. a. zu Beginn des ersten Semesters an einem Fachwissenstest teil. Dieser ist so konzipiert, dass sich Studierende Kompetenzniveaus zuordnen lassen. Diese Niveaus geben Aufschluss darüber, welches das höchste Komplexitätsniveau ist, dessen Aufgaben die Studierenden mit hinreichender Sicherheit erfolgreich lösen können (Zur Interpretation der Niveaus, vgl. Woitkowski & Riese, 2017).

Im gegenwärtig verfügbaren Datensatz liegen Fachwissensdaten von 626 Physik-Studierenden zu Beginn des 1. Semesters an 8 deutschen Universitäten vor (Woitkowski, 2020). Es zeigt sich, dass weniger als 10 % der Studierenden Aufgaben auf den oberen beiden Komplexitätsniveaus – also typische Übungsaufgaben – hinreichend sicher bearbeiten können. Der Großteil der Studierenden beherrscht höchstens den Umgang mit physikalischen Fakten und wird somit regelmäßig überfordert sein (Abb. 1, rechts).

Dieser Befund kann als höchst problematisch angesehen werden. Studierende, die von Beginn an mit vielen oder sogar den meisten an sie gestellten Aufgaben überfordert sind, werden aus diesen Aufgaben keinen Lernerfolg ziehen können. Während einige Studierende diese Lücke erfolgreich schließen können, gelingt das bei weitem nicht allen (Woitkowski, 2019, 2020). Neben den fachlichen sind außerdem negative Auswirkungen auf Motivation und Selbstkonzept zu erwarten, die bisher allerdings erst an sehr kleinen Stichproben untersucht wurden (Woitkowski & Breitkopf, 2019).

3. Zwei Vorschläge zur Komplexitätsprogression

Ein sinnvoller didaktischer Umgang mit dieser Disparität müsste im Anpassen der typischen Aufgabenstellungen an das tatsächliche Leistungsniveau der Lerngruppe liegen – eine Einsicht, die an Schulen bereits seit längerem angekommen ist (z. B. Wiesner, 1995). Dabei muss aber klar sein, dass die Fachkultur (und auch die auf das universitäre Physiklernen bezogenen Beliefs der Lehrenden) kein beliebiges Absenken des allgemeinen Leistungsniveaus zulässt – Ziel muss sein, dass das gegebene Klausurniveau zu Semesterende von *mehr* Studierenden erreicht werden kann, *ohne* es abzusenken.

Im Zuge des Projekts PSΦ (Paderborner Studiengangphase Physik; Bauer et al., 2019) wird versucht, dieses Ziel durch die gezielte Steuerung der Komplexität und damit der Schwierigkeit der eingesetzten Aufgaben zu erreichen. Dazu stehen im Prinzip zwei Vorgehensweisen zur Verfügung, die im Folgenden dargestellt und diskutiert werden.

3.1. Progression im Semester

Ausgehend vom oben dargestellten Befund erscheint eine Komplexitätsprogression der angebotenen Übungsaufgaben im Verlauf des Semesters als sinnvoller erster Ansatz (Abb. 2). Zu Semesterbeginn könnten vor allem Aufgaben auf den niedrigen Komplexitätsniveaus gestellt werden, so dass ein großer Anteil Studierender dieser erfolgreich bearbeiten kann. Im Zuge des Semesters würde sich die Aufgabenkomplexität dann schrittweise steigern, bis zum Semesterende das Klausurniveau erreicht wird. So werden Studierende langsam an das angezielte Niveau herangeführt, der durch Überforderung hervorgerufene Dropout im Semester wird verringert und durch Erfolgserlebnisse kann ein positiver Effekt auf das Selbstkonzept der Studierenden hervorgerufen werden.

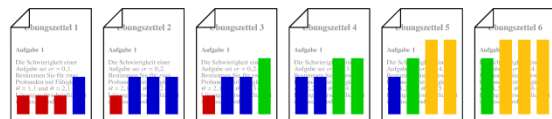


Abb.2: Schemadarstellung einer Komplexitätsprogression im Semester.

Praktisch weist dieses Konzept allerdings eine Reihe von Schwierigkeiten auf. Von geringerer Bedeutung ist wohl die anfängliche Unterforderung der wenigen sehr fähigen Studienanfänger. Bedeutsamer ist wohl, dass eine Steigerung der Fähigkeiten im Umgang mit komplexen Aufgabenstellungen nur sehr langsam verläuft. Typische Studierende zeigen hier Zuwächse von etwa einem Komplexitätsniveau pro Jahr (Dawson-Tunik, 2006; Woitkowski, 2020) – die bei diesem Konzept anvisierte Komplexitätsprogression steigt aber deutlich schneller an.

Dazu kommen Schwierigkeiten auf der Ebene der Akzeptanz durch Lehrende. Die ersten Übungszettel eines Semesters werden hier vielfach schlicht als zu leicht empfunden. Übungszettel zu Themen, die früh im Semester bearbeitet werden, können mangels Aufgaben auf Klausurniveau kaum zur Klausurvorbereitung genutzt werden. Studierende könnten einer „Verstehensillusion“ (Chi, Lewis, Reimann & Glaser, 1989; Kulgemeyer, 2018) erliegen und sich bei erfolgreicher Bearbeitung der (zu) leichten Aufgaben gut auf die Klausur vorbereitet fühlen ohne es jedoch zu sein.

3.2. Differenzierung je Aufgabenzettel

Als Alternative kann eine Differenzierung auf jedem einzelnen Aufgabenzettel vorgeschlagen werden (Abb. 3). Diese erscheint zunächst problematisch, da

auf den Zetteln zu Semesterbeginn scheinbar zu wenig angemessen leichte Aufgaben und auf den Zetteln am Semesterende zu wenige Aufgaben auf fortgeschrittenem Niveau auftauchen. Tatsächlich umgeht dieses Konzept aber viele der Probleme einer Komplexitätsprogression im Semesterverlauf.

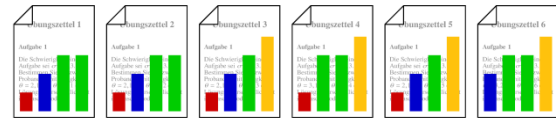


Abb.3: Schemadarstellung einer Komplexitätsdifferenzierung auf jedem Aufgabenzettel

Nach diesem Muster differenzierte Übungszettel enthalten zu jedem Zeitpunkt im Semester für jeden Leistungsstand passende Aufgaben. Auch Studierende, die langsamer vorankommen, als die oben vorgeschlagene Komplexitätsprogression über das Semester anvisiert, können die Aufgabenzettel weiterhin sinnvoll zum Lernen nutzen. Dazu kommt, dass auf jedem Übungszettel, also zu jedem abgedeckten Inhaltsbereich, Aufgaben auf Klausurniveau verfügbar sind. Die Übungszettel behalten somit also ihre Funktion bei der Klausurvorbereitung.

Um einer Verstehensillusion vorzubeugen, kann und sollte deutlich kommuniziert werden, welche Aufgabe auf dem Zettel jeweils auf Klausurniveau liegt. Es wäre sogar vorteilhaft, auf jedem Aufgabenzettel dieselbe Schwierigkeitsreihung zu nutzen (z. B. eine leichte, eine mittlere, eine Klausur- und eine sehr schwierige Aufgabe). Weiterhin kann für jede Aufgabe ein ungefährender Schwierigkeitsgrad angegeben werden (Konkret könnte z. B. die Angabe in der Form ●○○, ●●○, ●●● aus dem Lehrbuch von Tipler & Mosca, 2015, genutzt werden).

4. Stafflung anhand einer Beispielaufgabe

Die Möglichkeit, Komplexität und andere schwierigkeitserschöpfende Aufgabemerkmale gezielt zu variieren, soll nun anhand einer konkreten Beispielaufgabe vorgestellt werden. Ausgangspunkt bildet eine Aufgabe aus der *Experimentalphysik A* eines früheren Semesters an der Universität Paderborn (Abb. 4, Aufgabe 1). Diese Aufgabe enthält eine abstrakte Situationsbeschreibung ohne Elemente wie eine Skizze, die die Problemrepräsentation (also das Erstellen eines mentalen Modells der gefragten Situation; Savelsbergh, 1998) erleichtern würden. Die drei Teilaufgaben enthalten jeweils implizit mehrere Teilschritte, was eine hohe Komplexität (*Multivariate Interdependenz*) bedeutet. Dazu kommt, dass die Aufgabenstellung dem Leser keinen Hinweis auf die zur Lösung notwendige Mathematik (ein Arbeits-Integral) und Physik (z. B. Bestimmung der Zentralkraft, obwohl nach Arbeit/Energie gefragt ist) gibt. Im ersten Schritt kann die Aufgabe in ihrer Zugänglichkeit für die Lösenden verbessert werden (Abb. 4, Aufgabe 2). Dazu wurde zunächst eine Skizze mit allen relevanten

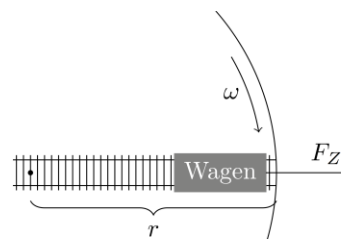
Aufgabe 1: Wagen auf der Scheibe

Man betrachte eine mit der Winkelgeschwindigkeit ω rotierende Scheibe mit dem Radius r . Längs des Durchmessers ist ein Gleis montiert, auf dem ein Wagen der Masse m reibungsfrei von außen bis in das Zentrum geschoben werden kann.

- a) Welche Arbeit muss dafür geleistet werden?
- b) Wie groß ist die Differenz der potentiellen Energie des Wagens zwischen dem Rand und dem Zentrum?
- c) Wie schnell würde dieser Wagen am Rand der Scheibe ankommen, wenn man ihn im Zentrum loslassen würde? Ist seine Bewegung gleichmäßig beschleunigt?

Aufgabe 2: Wagen auf der Scheibe

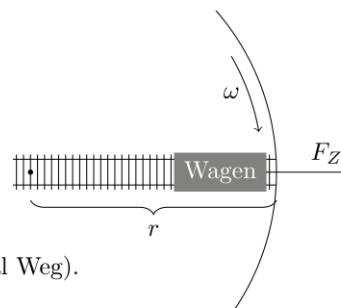
Man betrachte eine mit der Winkelgeschwindigkeit ω rotierende Scheibe mit dem Radius r . Längs des Durchmessers ist ein Gleis montiert, auf dem ein Wagen der Masse m reibungsfrei von außen bis in das Zentrum geschoben werden kann.



- a) Geben Sie an, welche Kraft F_Z (Zentrifugalkraft) dabei auf den Wagen wirkt.
- b) Berechnen Sie die beim Schieben zu leistende Arbeit.
- c) Wie groß ist die Differenz der potentiellen Energie des Wagens zwischen dem Rand und dem Zentrum?
- d) Wenn man den Wagen im Zentrum der Scheibe loslässt und er bis zum Rand fährt, wird diese potentielle Energie in kinetische Energie umgewandelt. Berechnen Sie die Geschwindigkeit des Wagens am Rand.
- e) Wird der Wagen bei dieser Bewegung nach außen gleichmäßig beschleunigt?

Aufgabe 3: Wagen auf der Scheibe

Man betrachte eine mit der Winkelgeschwindigkeit ω rotierende Scheibe mit dem Radius r . Längs des Durchmessers ist ein Gleis montiert, auf dem ein Wagen der Masse m reibungsfrei von außen bis in das Zentrum geschoben werden kann.



- a) Geben Sie an, welche Kraft F_Z (Zentrifugalkraft) dabei auf den Wagen wirkt. In welche Richtung wirkt diese?
- b) Die beim Schieben zu leistende Arbeit ist $W = \int_r^0 F_Z dr$ (Kraft mal Weg). Setzen Sie F_Z ein. Berechnen Sie das Integral.
- c) Wie groß ist die Differenz der potentiellen Energie E_{POT} des Wagens zwischen dem Rand und dem Zentrum?
- d) Wenn man den Wagen im Zentrum der Scheibe loslässt und er bis zum Rand fährt, wird diese potentielle Energie in kinetische Energie E_{KIN} umgewandelt. Nutzen Sie $E_{\text{KIN}} = \frac{1}{2}mv^2$, um die Geschwindigkeit v am Rand zu bestimmen.
- e) Wird der Wagen bei dieser Bewegung nach außen gleichmäßig beschleunigt? (Hinweis: Dies ist der Fall, wenn die Zentripetalbeschleunigung a_Z unabhängig von der Position r des Wagens auf dem Gleis ist.)

Abb.4: Beispielaufgabe in drei Varianten. Die ursprüngliche Aufgabe (1), eine Version mit verbesserter Zugänglichkeit (2) und mit deutlich reduzierter Komplexität (3).

Größen eingefügt. Anschließend wurden mehrere Teilaufgaben aufgespalten, um z. B. die Notwendigkeit der Berechnung der Zentralkraft sowie den Energieansatz explizit zu nennen. Die Aufgabe wirkt auf den Leser dadurch zwar möglicherweise insgesamt umfangreicher, erfordert aber immer noch

dieselben Rechen- und Argumentationsschritte wie die ursprüngliche Form der Aufgabe.

Die Komplexität der Aufgabe wurde hier noch nicht wesentlich reduziert, kann aber in einem weiteren Schritt deutlich herabgesetzt werden (Abb. 4, Aufgabe 3). Die Aufgabenteile sind nun so umgearbei-

tet, dass jede Teilaufgabe jeweils nur eine einschrittige Rechnung erfordert. Im oben dargestellten Komplexitätsmodell entspräche das einer Reduktion um ein Niveau, nämlich von *Multivariate Interdependenz* auf *Lineare Kausalität*. Die Aufgabe ist weiterhin in ihrer Schwierigkeit herabgesetzt, indem mehrere mathematische Ansätze, insbesondere das Arbeits-Integral, nun explizit genannt werden.

Diese Umarbeitung von Aufgaben ist insgesamt recht aufwändig (zumal sie für einen größeren Aufgabenbestand durchgeführt werden müsste), ermöglicht aber eine schrittweise und angepasste Reduktion der Aufgabenschwierigkeit auf das jeweils gewünschte Maß.

5. Diskussion und Ausblick

Während sich die Komplexität von Aufgaben theoriebasiert relativ leicht und zielgerichtet steuern lässt, ist dieses Vorgehen in der Praxis universitärer Lehre nicht ganz einfach umzusetzen. Unter Eindruck eines verbreiteten Zeitdrucks und der häufig nicht allzu hohen Wertschätzung gegenüber der Lehre im Vergleich zur Forschung (vgl. z. B. Wissenschaftsrat, 2017) werden nicht selten einfach Übungsaufgaben aus früheren Semestern übernommen, ohne sie wie vorgeschlagen zu bearbeiten. Eine praktikable Möglichkeit, kurzfristig bei vertretbarem Zeitaufwand zu passenden Aufgaben zu kommen, stellen Lehr- und Aufgabenbücher dar, die bereits nach Schwierigkeit (wenn auch nicht nach Komplexität im engeren Sinne) sortierte Aufgaben enthalten. Eine weitere Herausforderung des Übungsbetriebs ist, dass zur erfolgreichen Bearbeitung von Übungsaufgaben neben dem Fachwissen noch weitere (Problemlöse-)Fähigkeiten und Ressourcen nötig sind (z. B. Reinhold, Lind & Friege, 1999). Diese können im klassischen Übungsbetrieb nicht unbedingt effizient erworben werden, so dass in der Paderborner Studieneingangsphase Physik (PSΦ; Bauer et al., 2019) hier Präsenzübungen eingesetzt werden. In diesen können Lösungsansätze diskutiert, durchdacht und tiefergehend verstanden werden, als es beim isolierten Aufgabearbeiten möglich wäre (Wahle, 2017). Inwiefern sich diese Maßnahme insgesamt positiv auswirkt, ist Gegenstand laufender Evaluation.

Was aufgrund der bisherigen Erfahrungen aus der PSΦ in jedem Fall bereits problematisiert werden muss, ist die Tatsache, dass der tatsächliche Lehrbetrieb in den Fachveranstaltungen in aller Regel nicht von fachdidaktisch ausgebildeten Personen sondern eben von Fachphysikern durchgeführt wird. Diese verfügen häufig weder über den theoretischen Wissensbestand bezüglich des Lernens mit Aufgaben noch die analytischen oder praktisch-gestalterischen Fähigkeiten und didaktischen Erfahrungen, die zur Aufgabearbeitung und Komplexitätsreduktion nötig wäre. Die verbreitete Ansicht, fachliche Expertise (die die Lehrenden in aller Regel in großem Maße mitbringen) mache bereits einen fähigen Leh-

renden, muss empirisch leider zurückgewiesen werden (z. B. Kulgemeyer & Riese, 2018). Eine Möglichkeit die Situation hier zu verbessern, stellt die Implementation hochschulfachdidaktischer Schulungen für Lehrende dar, die (anders als die verbreitete fachübergreifend ausgerichtete Hochschuldidaktik) gezielt die Herausforderungen des Lernens im Fach in den Blick nimmt.

Schließlich sollten, neben der hier fokussierten Aufgabenkomplexität, auch andere Schwierigkeitsmerkmale der Physik als Fach (Merzyn, 2010) in den Blick genommen werden. Der Mathematisierungsgrad und die Verständlichkeit der Aufgabenstellung wurden oben bereits kurz angesprochen, aber auch das Erlernen der Fachsprache sollte Gegenstand weiterer Maßnahmen zur Verbesserung der universitären Ausbildung sein.

6. Literatur

- Albrecht, A. (2011). *Längsschnittstudie zur Identifikation von Risikofaktoren für einen erfolgreichen Studieneinstieg in das Fach Physik*. Dissertation. Freie Universität Berlin, Berlin.
- Bauer, A. B., Lahme, S., Woitkowski, D., Vogelsang, C. & Reinhold, P. (2019). PSΦ: Forschungsprogramm zur Studieneingangsphase im Physikstudium. *PhyDid B – Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung Aachen*, 53–60.
- Bernholt, S. (2010). *Kompetenzmodellierung in der Chemie – Theoretische und empirische Reflexion am Beispiel des Modells hierarchischer Komplexität* (Studien zum Physik- und Chemielernen, Bd. 98). Dissertation. Berlin: Logos.
- Bosse, E. & Trautwein, C. (2014). Individuelle und institutionelle Herausforderungen der Studieneingangsphase. *Zeitschrift für Hochschulentwicklung*, 9(5), 41–62.
- Chi, M. T. H., Lewis, M. W., Reimann, P. & Glaser, R. (1989). Self-Explanations: How Students Study and Use Examples in Learning to Solve Problems. *Cognitive Science*, 13, 145–182.
- Commons, M. L., Trudeau, E. J., Stein, S. A., Richards, F. A. & Krause, S. R. (1998). Hierarchical Complexity of Tasks Shows the Existence of Developmental Stages. *Developmental Review*, 18, 237–278.
- Dawson-Tunik, T. L. (2006). Stage-Like Patterns in the Development of Conceptions of Energy. In X. Liu & W. J. Boone (Hrsg.), *Applications of Rasch Measurement in Science Education* (S. 111–136). Maple Grove: JAM Press.
- Heublein, U., Hutzsch, C., Schreiber, J., Sommer, D. & Besuch, G. (2010). *Ursachen des Studienabbruchs in Bachelor- und in herkömmlichen Studiengängen. Ergebnisse einer bundesweiten Befragung von Exmatrikulierten des Studienjahres 2007/08*. Hannover: HIS.
- Kauertz, A. (2008). *Schwierigkeitserzeugende Merkmale physikalischer Leistungstestaufgaben*.

- (Studien zum Physik- und Chemielernen, Bd. 79). Dissertation. Berlin: Logos.
- Kulgemeyer, C. (2018). Wie gut erklären Erklärvidéos? Ein Bewertungs-Leitfaden. *Computer + Unterricht*, 109, 4–7.
- Kulgemeyer, C. & Riese, J. (2018). From professional knowledge to professional performance. The impact of CK and PCK on teaching quality in explaining situations. *Journal of Research in Science Teaching*, 55(10), 1393–1418.
- Merzyn, G. (2010). Physik – ein schwieriges Fach? *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule*, 59(5), 9–12.
- Podschuweit, S., Bernholt, S. & Brückmann, M. (2016). Classroom learning and achievement. How the complexity of classroom interaction impacts students' learning. *Research in Science & Technological Education*, 34(2), 142–163.
- Reinhold, P., Lind, G. & Friege, G. (1999). Wissenszentriertes Problemlösen in Physik. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 5(1), 41–62. Zugriff am 17.10.2013.
- Savelsbergh, E. (1998). *Improving Mental Representations in Physics Problem Solving*. Enschede: Twente University.
- Schnotz, W. (1994). *Aufbau von Wissensstrukturen. Untersuchungen zur Kohärenzbildung beim Wissenserwerb mit Texten*. Weinheim: Beltz.
- Tipler, P. A. & Mosca, G. (2015). *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure* (7. Aufl.). Berlin: Springer Spektrum.
- Wahle, M. (2017). Traditionelle Übungen vs. Gruppenübungen in naturwissenschaftlichen Fächern. *die Hochschullehre*, 3, 1–15.
- Wiesner, H. (1995). Physikunterricht - an Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten orientiert. *Unterrichtswissenschaft – Zeitschrift für Lernforschung*, 23(2), 127–145.
- Wissenschaftsrat. (2017). *Strategien für die Hochschullehre. Positionspapier*. Halle (Saale): Wissenschaftsrat.
- Woitkowski, D. (2017). Studieneingangsprofile in Fach- und Lehramts-Studiengängen Physik. Eine kontrastierende Analyse auf Basis eines Kompetenzstrukturmodells für Fach-Physiker. *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, 16(1), 43–56.
- Woitkowski, D. (2018). Fachwissen und Problemlösen im Physikstudium. Vorstellung des Forschungsprojektes KEMΦ. *PhyDid B – Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung Würzburg*, 125–131.
- Woitkowski, D. (2019). Erfolgreicher Wissenserwerb im ersten Semester Physik. Analyse mithilfe eines Niveaumodells. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 25(1), 97–114.
- Woitkowski, D. (2020). Tracing Physics Content Knowledge Gains Using Content Complexity Levels. *International Journal of Science Education*, 42.
- Woitkowski, D. & Breitkopf, S. (2019). Fähigkeits-selbstkonzept und Lernerfolg im ersten Fachsemester Physik. *die Hochschullehre*, 5, 855–876.
- Woitkowski, D. & Reinhold, P. (2018). Strategien und Probleme im Umgang mit Übungsaufgaben. Pilotergebnisse einer Interviewstudie im ersten Semester Physik. In C. Maurer (Hrsg.), *Qualitätsvoller Chemie- und Physikunterricht. Normative und empirische Dimensionen* (S. 726–729). Regensburg: Universität Regensburg.
- Woitkowski, D. & Riese, J. (2017). Kriterienorientierte Konstruktion eines Kompetenzniveaumodells im physikalischen Fachwissen. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 23(1), 39–52. <https://doi.org/10.1007/s40573-016-0054-z>.

Förderung

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – WO 2181/2-1.