

Simulationsbasiertes Lernen im Astrophysik-Tutorium am Beispiel Schwarzkörper und Sternspektren

Ronja Langendorf*, Stephanie Merker⁺, Frederic Hessman[°], Susanne Schneider*

*Didaktik der Physik, Georg-August-Universität Göttingen, ⁺Studienseminar Göttingen,
[°]Institut für Astrophysik, Georg-August-Universität Göttingen
rlangen@gwdg.de, Stephanie.merker@sts-goe-gym.de, hessman@astro.physik.uni-goettingen.de,
sschnei@gwdg.de

Kurzfassung

Die Auseinandersetzung mit fachspezifischen digitalen Medien und Werkzeugen ist ein zentraler Auftrag der universitären Lehrer:innenbildung. Im Fach Physik umfasst dies die Förderung von unterschiedlichen digitalen Basiskompetenzen wie z.B. *Simulation und Modellierung*. Wenn die Durchführung klassischer Experimente wie im Fall der Astrophysik kaum möglich ist, sind Simulationen eine wichtige Erkenntnismethode. Daher stellt dieser Beitrag eine erprobte Lerneinheit eines Astrophysik-Tutoriums für Lehramtsstudierende vor, die das Ziel der Förderung ebendieser digitalen Basiskompetenzen verfolgt. Im Zentrum der Lerneinheit steht eine Simulation, welche die physikalischen Zusammenhänge eines Schwarzkörperspektrums veranschaulicht, die Helligkeitsmessung von Sternen in unterschiedlichen Filtern aufgreift sowie das Importieren und die direkte Analyse der Daten von originalen Sternspektren ermöglicht. Der Beitrag schließt mit einer Diskussion über die mögliche Anpassung der simulationsbasierten Lerneinheit an den Physikunterricht.

1. Theoretische Rahmung

Für den lernförderlichen Einsatz von digitalen Medien im naturwissenschaftlichen Unterricht ist die Expertise einer Lehrkraft im Umgang mit und beim Einsatz von digitalen Medien zentral (Hillmayr et al., 2017). Jedoch gerade die Lehramtsstudierenden gelten unter der Generation von Digital Natives als wenig digitalaffin (Schmid et al., 2017). Insbesondere vor diesem Hintergrund erscheint es unumgänglich, die digitalen Kompetenzen von Lehramtsstudierenden gezielt zu fördern. In diesem Beitrag liegt der Fokus dabei auf dem simulationsbasierten Lernen.

1.1. Digitale Kompetenzen im Lehramt

Zur operationalisierten Beschreibung digitaler Kompetenzen von angehenden Lehrkräften können unterschiedliche Modelle herangezogen werden, von denen zwei im Folgenden vorgestellt werden.

1.1.1. TPACK-Modell

Auf internationaler Ebene wird das technologiebezogene Professionswissen von Lehrenden durch das TPACK-Modell dargestellt (Mishra & Koehler, 2006). Es stellt eine Erweiterung des von Shulman (1986) entwickelten PCK-Modells zum Lehrerprofessionswissen dar, welches das fachliche (CK) und das pädagogische Wissen (PK) als essenzielles Wissen (Knowledge) einer Lehrkraft zusammenfasst und die Schnittstelle dieser beiden als fachdidaktisches Wissen (PCK) definiert.

Im TPACK-Modell werden diese Fähigkeitsbereiche des Professionswissens durch das technologiebezogene Wissen (TK) als eine weitere Kompetenz von Lehrkräften ergänzt. Als zusätzliche Schnittstellen er-

geben sich daraus technologiebezogene Kompetenzen im pädagogischen (TPK), fachlichen (TCK) und fachdidaktischen (PCK) Wissensbereich.

Die Gesamtschnittstelle TPACK stellt die zentralen Fähigkeiten einer Lehrkraft für den Technikeinsatz in Lehr-Lern-Prozessen dar und geht auf das komplexe Zusammenspiel zwischen Lernenden, Lehrenden, Fachinhalt, Methode und Technik ein. Das Modell kann beispielsweise zur theoriebasierten Curriculumsentwicklung in der Lehrer:innenbildung herangezogen werden (Mishra & Koehler, 2006).

1.1.2. Orientierungsrahmen DiKoLAN

Der Orientierungsrahmen DiKoLAN bezieht sich bei der Operationalisierung von digitalen Basiskompetenzen im Lehramt, im Gegensatz zum TPACK-Modell, explizit auf den Bereich Naturwissenschaften und verfolgt damit das Ziel der Unterstützung einer dortigen curricularen Verankerung von Digitalisierung (Becker et al., 2020). Die digitalen Basiskompetenzen werden hier in vier allgemeinere und drei fachspezifischere Bereiche unterteilt (s. Tab1). Jeder dieser Bereiche unterteilt sich auf drei Kompetenzniveaus wiederum in die Schwerpunkte *Spezielle Technik; Fachwissenschaftlicher Kontext; Methodik & Digitalität* sowie *Unterricht*. Den Schwerpunkten werden zudem die vier technologiebezogenen Wissensbereiche des TPACK-Modells zugeordnet.

Dem Orientierungsrahmen können für alle sieben Bereiche ausformulierte Kompetenzen entnommen und einem Schwerpunkt sowie dem Niveau zugeordnet werden. Beispiel: Die Kompetenz „Führen mindestens eine Modellierung inklusive Simulation und Er-

gebnißsicherung durch.“ zählt zum Bereich *Simulation & Modellierung* mit dem Schwerpunkt *Spezielle Technik* (TK) und entspricht dem höchsten Niveau *Anwenden/Durchführen* (Becker et al., 2020, S.41).

Allgemeinere Kompetenzen	Fachspezifischere Kompetenzen
Dokumentation	Messwert- & Datenerfassung
Präsentation	Datenverarbeitung
Kommunikation & Kollaboration	Simulation & Modellierung
Recherche & Bewertung	

Tab. 1: Kompetenzbereiche des DiKoLAN (Becker et al., 2020).

1.2. Simulationsbasiertes Lernen

Simulationen basieren auf Modellen und bilden ausgewählte Aspekte der Wirklichkeit möglichst realitätsnah ab. Diese Reduktion kann komplexe Fachinhalte vereinfachen und so die kognitive Belastung für Lernende verringern (de Jong, 2010). Da Nutzer:innen die in der Simulation dargestellten Bedingungen gezielt manipulieren und dessen Auswirkungen direkt beobachten können, ist der damit verbundene Lernweg besonders interaktiv gestaltet (Girwidz, 2015). Das simulationsbasierte Lernen fördert Aspekte des entdeckenden Lernens, wie das Aufstellen sowie Überprüfen von Hypothesen, und gestaltet eine Lehr-Lern-Situation im besonderen Maße lernerzentriert (de Jong, 2010).

Vorteile beim Lernen sind darüber hinaus, dass Simulationen

- Unsichtbares sichtbar machen und Fehlkonzepte direkt aufgreifen können,
- multiple Repräsentationen nutzen und verknüpfen,
- auch außerhalb der Lehr-Lern-Situation eingesetzt werden können, um die Lernenden beim Wiederholen oder Vertiefen der Fachinhalte zu unterstützen,
- eingesetzt werden können, wenn klassische Experimente zu teuer, nicht erlaubt, nicht vorhanden oder unmöglich durchzuführen sind,
- eine einfache Manipulation vor allem von solchen Variablen ermöglichen, die in der Wirklichkeit nicht variiert werden können (Wieman et al., 2010).

Die letzten zwei Aspekte sind im Besonderen für die Astrophysik bedeutsam, da sich hier der typische Erkenntnisweg (Beobachtung, Hypothesenbildung, Simulation, Theorie) vom Ansatz der klassischen Physik (Beobachtung, Hypothesenbildung, Experiment, Theorie) unterscheidet (Percy, 2005; Stiller et al., 2020).

Das simulationsbasierte Lernen kann gerade bei schwachen Lernenden zu einer hohen intrinsischen kognitiven Belastung führen (Urhahne & Harms, 2006). Um diese Belastung und andere Schwierigkeiten zu minimieren sowie das Potenzial der Simulationen bestmöglich zu nutzen, ist eine Unterstützung der Lernenden durch Instruktionen notwendig (de Jong, 2010; Urhahne & Harms, 2006). Dabei ist im Spannungsfeld zwischen Komplexitätsreduktion und selbstständigem Lernen eine lernwirksame Form der instruktionalen Unterstützung zu wählen (Urhahne & Harms, 2006).

Grundsätzlich ist der Einsatz einer Simulation didaktisch zu begründen und sollte nicht zum bloßen Selbstzweck erfolgen (Girwidz, 2013).

2. Zielsetzung des Tutoriums

Das vorlesungsbegleitende Tutorium zur Vorlesung „Einführung in die Astrophysik“, an der Universität Göttingen, ein Pflichtmodul im Umfang von 8 Credits für den Master of Education, wurde im Wintersemester 2020/2021 erstmals mit einem neuen Konzept durchgeführt. Die Entwicklung des Lehrkonzepts geht mit der Zielsetzung einher, die digitalen Kompetenzen der Lehramtsstudierenden zu fördern und einen Beitrag zur Professionalisierung angehender Lehrkräfte zu leisten. Dabei liegt der Schwerpunkt passend zum astrophysikalischen Erkenntnisweg auf dem Umgang mit und dem Einsatz von Computersimulationen in Lehr-Lern-Situationen. Das neue Konzept sieht u.a. vor, dass die astrophysikalischen Inhalte mit der Aufgabe, digitale Werkzeuge zu erstellen oder zu nutzen, verbunden werden, um lernerzentrierte Arbeitsformen zu ermöglichen. Die zentralen Vorlesungsinhalte werden daher im Tutorium unter dem didaktisch begründeten Einsatz von Simulationen o. ä. aufgegriffen, um die Studierenden bei der Wiederholung und Vertiefung des Stoffs zu unterstützen. Wie das im Detail aussieht, wird in diesem Beitrag exemplarisch für die Tutoriums-Einheit zum Thema Schwarzkörper und Sternspektren dargestellt.

2.1. Inhaltsbezogene Kompetenzen

Aufbauend auf den Vorlesungsinhalten werden für diese Tutoriums-Einheit zum Thema Schwarzkörper und Sternspektren die folgenden inhaltsbezogenen Kompetenzziele formuliert:

Die Studierenden...

IK1 ...beschreiben den Zusammenhang der Peakwellenlänge λ_{max} eines Schwarzkörperspektrums mit dessen Temperatur T als $\lambda_{max} * T = \text{const.}$ (Wiensches Verschiebungsgesetz).

IK2 ...beschreiben den Zusammenhang des Gesamtstrahlungsstroms B eines Schwarzkörpers mit dessen Temperatur T als $B(T) \sim T^4$ (Boltzman-Gesetz).

IK3 ...vergleichen ein theoretisches Schwarzkörperspektrum mit einem beobachteten Sternspektrum.

IK4 ...erläutern, dass der Farbindex ($B-V$) und die visuell wahrgenommene Farbe als Indikatoren für die Temperatur eines Sterns interpretiert werden können.

IK5 ...ermitteln die durch Wega kalibrierten absoluten Magnituden M_V und M_B eines Sterns aufbauend auf scheinbaren Helligkeitsmessungen in den Filtern V und B .

Zu diesen Fachinhalten ist die Durchführung von Laborexperimenten zur Erkenntnisgewinnung seitens der Lernenden nicht möglich, was den Einsatz einer Simulation indiziert.

2.2. Digitale Kompetenzen

Aufbauend auf den inhaltsbezogenen Kompetenzziele werden die digitalen Kompetenzziele, die am Orientierungsrahmen DiKoLAN (Becker et al., 2020) ausgerichtet sind, ausformuliert und den technologiebezogenen Wissenskomponenten im TPACK-Modell (Mishra & Koehler, 2006) zugeordnet (s. Abb.1). Bei der Förderung von IK1 bis IK5 liegt der Fokus dem Lehrkonzept entsprechend auf dem Kompetenzbereich *Simulation & Modellierung*. Darüber hinaus liegt es in Bezug auf IK3 nahe, dass eine astrophysikspezifische Datenbank zur Recherche von originalen Sternspektren herangezogen wird (*Recherche & Bewertung*). Zusätzlich können beim Erwerb von IK4 und IK5 digitale Kompetenzen im Bereich *Datenverarbeitung* gefördert werden.

Simulation & Modellierung: Die Studierenden...

- setzen im eigenen Lernprozess eine fertige Simulation zur Erkenntnisgewinnung ein. *TK*
- unterscheiden zwischen Modellierung und Realität (Modellkompetenz). *TK*
- vergleichen und bewerten Simulationen für einen sachgerechten Einsatz in einer Lehr-Lern-Situation. *TPACK*

Recherche & Bewertung: Die Studierenden...

- nutzen eine astrophysikspezifische Datenbank als digitales Werkzeug, um Informationen zu beschaffen und zu strukturieren. *TCK*

Datenverarbeitung: Die Studierenden...

- nutzen digitale Werkzeuge (Simulation, Tabellenkalkulation) zur Weiterverarbeitung von Daten. *TK*

Abb.1: Darstellung der in der Tutoriums-Einheit adressierten digitalen Basiskompetenzen in Anlehnung an DiKoLAN (Becker et al., 2020).

2.3. Simulation

Aus den definierten inhaltsbezogenen und digitalen Kompetenzziele können grundlegende Anforderungen an die Funktionen einer für die Lerneinheit geeigneten Simulation abgeleitet werden:

- Veranschaulichung der physikalischen Zusammenhänge eines Schwarzkörperspektrums
- Aufgreifen der Helligkeitsmessung von Sternen mit unterschiedlichen Filtern

- Möglichkeit zum Importieren und direkten Analysieren der Daten von originalen Sternspektren (hohe Authentizität)

Darüber hinaus sollte die Simulation benutzerfreundlich sein und die genutzte Software kostenlos zur Verfügung stehen.

3. Material der Lerneinheit

Im Folgenden werden das eingesetzte Lernmaterial bestehend aus der Simulation *Blackbody Explorer* sowie den Instruktionen vorgestellt. Der *Blackbody Explorer* wird in zweifacher Ausführung, als Python- und als Snap!-basierte Simulation, eingesetzt. Um den Anforderungen (vgl. 2.3.) gerecht zu werden, wurden beide Versionen eigens entwickelt.

3.1. Python-basierte Simulation

Diese Python-basierte Version des *Blackbody Explorer* (s. Abb.2) steht für Windows und Linux zum Download zur Verfügung (Homepage der Didaktik der Physik - Uni Göttingen, 2021)

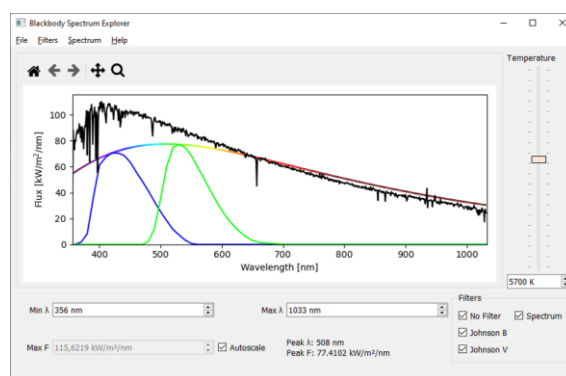


Abb.2: Screenshot der Python-basierten Simulation. Das importierte Sternspektrum stammt aus der SDSS-Datenbank und zeigt einen F-Stern (Ahumada et al., 2019). Bei der Entwicklung wurde auf eine übersichtliche und schlichte Benutzeroberfläche geachtet, deren Funktionen intuitiv ersichtlich sind. Die relevanten astrophysikalischen Größen eines Planck-Spektrums und deren Einheiten werden direkt auf der Hauptoberfläche dargestellt. Die Temperatur kann über einen Schieberegler, der die visuelle Farbe des Schwarzkörpers darstellt, sowie eine Direkteingabe variiert werden. In dieser Form ermöglicht die Simulation den Lernenden zunächst eine grundlegende Auseinandersetzung mit dem Schwarzkörperspektrum, bei der die Komplexität der Simulation dadurch reduziert wird, dass weiterführende Funktionen über die Menüleiste erst aktiv hinzugefügt werden müssen. Mit der Option *Filters* öffnet sich als eine solche Erweiterung eine separate Tabelle, in der die Magnituden und der Gesamtstrahlungsstrom in Abhängigkeit von Temperatur und Filter aufgelistet werden. Die Menüoption *Spectrum* ermöglicht das Importieren von Sternspektren als *.CSV*. Diese werden grafisch in die Simulation integriert und können durch das Planck-Spektrum zur Temperaturbestimmung angenähert werden. Mit unterschiedlichen Steuerelementen kann man den

grafisch dargestellten Bereich des Spektrums optimieren. Die Elemente *Spektrum*, *B-Filter* und *V-Filter* können in der Grafik ein- und ausgeblendet werden. Für Hintergrundinformationen und Hilfe ist der Menüpunkt *Help* vorgesehen.

3.2. Snap!-basierte Simulation

Die vorgestellte Python-basierte Version ermöglicht den Lernenden das *Nutzen* einer Simulation für den eigenen Lernprozess. Um ihnen aber auch den Zugang zum *Erstellen* einer Simulation zu bieten, wurde zudem eine Snap!-basierte Version des *Blackbody Explorer* entwickelt, die den Anforderungen (vgl. 2.3.) ebenfalls gerecht wird. Snap! ist eine grafische Programmiersprache, deren spielerische und intuitive Handhabung einen anfängerfreundlichen Einstieg in das Programmieren bietet. Die vollständige Browser-Anwendung (Homepage von Snap!) kann unabhängig vom Betriebssystem und ohne vorherige Installation einer Software genutzt werden. Skript und Oberfläche werden parallel angezeigt, so dass Änderungen im Skript direkt im Endprodukt nachvollzogen werden können.

Während der Entwicklungsaufwand bei der Python-basierten Simulation hoch wäre (gute Python-Kenntnisse erforderlich), erhalten die Lernenden mit der Snap!-basierten Simulation einen angemessenen Einblick in den Entwicklungsprozess der Simulation. Abhängig vom Vorwissen und den Lernzielen können Lernende hier die Variationsbreite von einer sehr einfachen Simulation (Erstellen und Plotten des Planck-Spektrums) (s. Abb.3) bis hin zu einer Simulation mit komplexeren Funktionen (Importieren von Spektren) nutzen, deren Skript nachvollziehen und bearbeiten oder sie selbst entwickeln. Eine komplexere Simulationsversion sowie eine Anleitung zur Erstellung einer einfachen Version stehen online zur Verfügung (Hessman & Modrow, 2020).

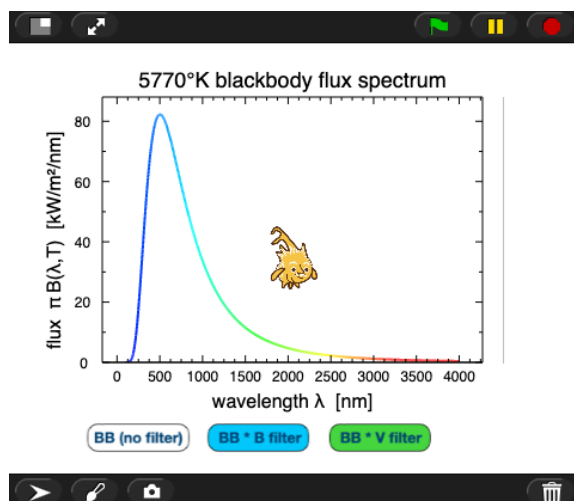


Abb.3: Screenshot der Snap!-basierten Simulation.

3.3. Instruktionen

Die Studierenden werden beim simulationsbasierten Lernen durch Instruktionen unterstützt und begleitet, damit die Komplexität reduziert und der Mehrwert des Simulationseinsatzes wirksam werden kann (vgl.

1.2.). Abbildung 4 zeigt die Einteilung der instruktionalen Unterstützung in vier Phasen und ordnet diesen die inhaltsbezogenen Kompetenzziele IK1-IK5 zu.

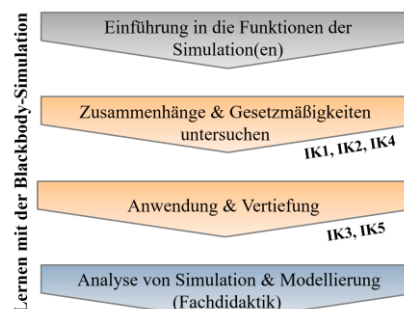


Abb.4: Aufbau des Instruktionsmaterials und Zuordnung der inhaltsbezogenen Kompetenzziele. Phasen der Interaktion mit einer Simulation sind orange eingefärbt.

Den Lernenden wird der Einstieg in die Interaktion mit der Simulation zunächst erleichtert, indem die Snap!- und die Python-basierte Anwendung und ihre Funktionen vorgestellt werden. Sie entscheiden sich anschließend individuell und selbstbestimmt für eine der beiden Versionen. Die Studierenden haben im Tutorium bereits zu anderen Themen mit Snap! gearbeitet und sind mit der Programmiersprache vertraut. Daher ermöglicht die Snap!-Simulation ein Differenzierungsangebot für leistungsstarke und am Programmieren interessierte Lernende (vgl. 3.2.). Während der Interaktion mit der Simulation werden zunächst die physikalischen Zusammenhänge zwischen der Temperatur und anderen Größen untersucht (IK1, IK2, IK4). Aufbauend auf Urhahne & Harms (2006), die lernförderliche Instruktionsmaßnahmen beim simulationsbasierten Lernen zusammenfassen, werden die Studierenden in dieser Instruktionsphase zu einer physikalischen Begründung bzw. Erklärung des beobachteten Simulationsergebnisses anhand von Vorwissen aus der Vorlesung aufgefordert. Für die Anwendungs- und Vertiefungsphase stehen den Lernenden als Unterstützung permanente Hintergrundinformationen zur Verfügung, die unabhängig von der Simulation sind (ebd.). Diese beziehen sich einerseits auf Sternspektren und deren Recherche über die Datenbank der SDSS (Homepage des SDSS DR16 Navigate Tool) (IK3) und andererseits auf die Definition von Magnituden und die Wega-Eichung (IK5). Eine abschließende Instruktion stellt den für die Lehramtsstudierenden relevanten Bezug zur Fachdidaktik und den Tätigkeiten einer Lehrkraft her. Aufbauend auf einer Reflexion des eigenen Lernprozesses, was nach der Interaktion mit einer Simulation das Lernen fördert (Urhahne & Harms, 2006), werden die Python- und die Snap!-basierte Simulation verglichen und deren sachgerechter Einsatz im Unterricht diskutiert.

Die Instruktionen sind insgesamt so formuliert, dass die digitalen Kompetenzziele adressiert werden (vgl. 2.2.). Methodisch profitieren die Studierenden im eher distanzierten online-Format vom simulationsbasierten Lernen in Kleingruppen, da so die Kommunikation besonders gefördert und eine Unterstützung

durch andere Lernende ermöglicht werden kann (Hillmayr et al., 2017).

3.4. Erfahrungen

Die Erprobung des Materials erfolgte im Rahmen der Pilotierung des Tutoriums im Wintersemester 2020/2021 als synchrone online-Veranstaltung (2 SWS) mit 20 Physik-Studierenden (M.Ed.) der Universität Göttingen. Erste Erfahrungen zeigen, dass die Simulationen benutzerfreundlich gestaltet sind und problemlos von den Studierenden bedient werden können. Zudem betrachteten die Lernenden den Einsatz der Simulationen als hilfreich für ihren Lernerfolg. Beide Simulationsversionen wurden zu gleichen Teilen von den Studierenden in ihrem Lernprozess eingesetzt.

An diese Lerneinheit schloss im Tutorium eine Einheit zu Spektraltypen an, bei der die Stärke der H α -Linie und die Temperatur untersucht wurden. Hierbei konnte der Python-basierte *Blackbody Explorer* erneut sinnvoll eingesetzt werden.

4. Ausblick: Potenzial für den Physikunterricht

Die Lerneinheit zum Thema Schwarzkörper und Sternspektren ist, wie die meisten astrophysikalischen Fachinhalte, für die gymnasiale Oberstufe in Niedersachsen zwar nicht curricular verankert, kann den Physikunterricht aber dennoch bereichern. Astrophysikalische Themen bieten häufig Anknüpfungspunkte an curriculare Inhalte aus der klassischen Physik (z.B. Optik, Mechanik). Auch diese Lerneinheit greift das Vorwissen der Schüler:innen aus dem Physikunterricht auf, genau gesagt aus dem Wahlmodul *Strahlungsphysik* (Einführungsphase) und dem Bereich *Atomhülle* (Qualifikationsphase). Die inhaltsbezogenen Kompetenzziele IK1-IK3 können mit der Blackbody-Simulation ohne spezifisches astrophysikalisches Vorwissen erreicht werden und zudem schließen IK1 und IK2 mit dem Wienschen Verschiebungsgesetz und dem Boltzman-Gesetz direkt an das Kerncurriculum an (Niedersächsisches Kultusministerium, 2017). Daher sind diese Kompetenzziele auch für einen schulischen Rahmen geeignet. Die Blackbody-Simulation bietet für die Oberstufe also die Möglichkeit, curriculare Inhalte im Kontext der Astrophysik anzuwenden und zu vertiefen. Gleichzeitig kann sie prozessbezogene Kompetenzen im Bereich *Erkenntnisgewinnung* fördern und trägt zur Auseinandersetzung der Schüler:innen mit modernen Medien bei (ebd.).

Die Snap!-Simulation ist Teil eines Projekts mit dem Ziel, den wissenschaftlichen Gebrauch der grafischen Programmiersprache im Schulkontext und in der Lehrerbildung zu fördern (Hessman & Modrow, 2020). Dies umfasst eine regelmäßig aktualisierte und erweiterte Sammlung von Simulationen zur Astrophysik, Biologie, Mathematik, Physik, Technik und Volkswirtschaft. Für den schulischen Einsatz hat die Snap!-basierte Blackbody-Simulation den Vorteil,

dass Lehrkräfte das Skript ohne fortgeschrittene Programmierkenntnisse (im Gegensatz dazu: Python) eigenständig und individuell auf die Lerngruppe und die Lernziele anpassen können. Zudem ist Snap! eine Software, die explizit für Anfänger im Programmieren gedacht und somit grundsätzlich für den Schuleinsatz gut geeignet ist. Für Snap! spricht auch, dass die Simulation hier mit deutlich weniger Programmieraufwand erstellt werden kann, als dies bei einer anderen schultypischen Software wie z.B. einem Tabellenkalkulationsprogramm der Fall ist.

5. Literatur

Becker, Sebastian; Bruckermann, Till; Finger, Alexander; Huwer, Johannes; Kremser, Erik; Meier, Monique; Thoms, Lars-Jochen; Thyssen, Christoph & von Kotzebue, Lena (2020): Orientierungsrahmen Digitale Kompetenzen für das Lehramt in den Naturwissenschaften – DiKoLAN. In: Becker, Sebastian; Meßinger-Koppelt, Jenny & Thyssen, Christoph (Hrsg.): *Digitale Basiskompetenzen – Orientierungshilfe und Praxisbeispiele für die universitäre Lehramtsausbildung in den Naturwissenschaften*, (S.14-43). Hamburg: Joachim Herz Stiftung.

de Jong, Ton (2010): Instruction Based on Computer Simulations. In: Mayer, Richard E. & Alexander, Patricia A. (Hrsg.): *Handbook of Research on Learning and Instruction*, (S.446-466). United Kingdom: Routledge.

Girwidz, Raimund (2015): Neue Medien und Multimedia. In: Kircher, Ernst; Girwidz, Raimund & Häußler, Peter (Hrsg.): *Physikdidaktik*. Springer-Lehrbuch.

Girwidz, Raimund (2013): Lernen mit bewegten Bildern. Animationen und dynamische Visualisierungen im Physikunterricht. *Unterricht Physik*, 137, 4-9.

Hessman, Frederic V. & Modrow, Eckart (2020): Scientific Snap!: <https://github.com/fhessman/scientific-snap> (Stand: 4/2021)

Hillmayr, Delia; Reinhold, Frank; Ziernwald, Lisa; Reiss, Kristina (2017): *Digitale Medien im mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht der Sekundarstufe. Einsatzmöglichkeiten, Umsetzung und Wirksamkeit*. Münster: Waxmann.

Homepage der Didaktik der Physik - Uni Göttingen (2021): <https://www.uni-goettingen.de/de/downloads/571879.html> (Stand: 4/2021)

Homepage von Snap!: <https://snap.berkeley.edu/> (Stand: 4/2021)

Homepage des SDSS DR16 Navigate Tool:

<http://sky-server.sdss.org/dr16/en/tools/chart/navi.aspx>

(Stand: 4/2021)

Mishra, Punya & Koehler, Matthew J. (2006): Technological Pedagogical Content Knowledge: A Framework for Teacher Knowledge. *Teachers College Record*, 108 (6), 1017-1054.

Niedersächsisches Kultusministerium (NKM) (2017): *Kerncurriculum für das Gymnasium – gymnasiale Oberstufe: Physik*.

Percy, John R. (2005): Why astronomy is useful and should be included in the school curriculum. In: Pasachoff, Jay M. & Percy, John R. (Hrsg.): *Teaching and Learning Astronomy. Effective Strategies for Educators Worldwide*, (S.10-13). Cambridge University Press

Schmid, Ulrich; Goertz, Lutz; Radomski, Sabine; Thom, Sabrina & Behrens, Julia (2017): *Monitor Digitale Bildung: Die Hochschulen im digitalen Zeitalter*. Gütersloh.

Shulman, Lee S. (1986): Those who understand: Knowledge growth in teaching. *Educational researcher*, 15(2), 4-14.

Stiller, Cornelia; Allmers, Tobias; Habigsberg, Annette; Stockey, Andreas & Wilde, Matthias (2020): Erkenntnisgewinnung in den Naturwissenschaften: Von der Hypothese zur Theorie. *PraxisForschungLehrer*innenBildung. Zeitschrift für Schul- und Professionsentwicklung.*, 2(2), 28-39.

Urhahne, Detlef & Harms, Ute (2006): Instruktionale Unterstützung beim Lernen mit Computersimulationen. *Unterrichtswissenschaft* 34 (4), 358-377.

Wieman, Carl E; Adams, Wendy K.; Loeblein, P. & Perkins, P. P. (2010): Teaching Physics Using PhET Simulations. *The Physics Teacher*, 48(4), 225-227.

Danksagung

Ein großer Dank gilt an dieser Stelle Florian Liebing für die Unterstützung im Tutorium und die Erstellung der Python-basierten Blackbody-Simulation.