

---

# BASISKONZEPTE KONKRETISIEREN

---

Entwicklung und Evaluation einer Interventionsmaßnahme zur Förderung  
kumulativen Lernens durch den Einsatz von Basiskonzepten

Dissertation

Zur Erlangung des Doktorgrades

Der mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Vorgelegt von

Julian Alexander Fischer

Kiel, Juli 2022

Erstgutachter: Prof. Dr. Knut Neumann

Zweitgutachter: Prof. Dr. Ilka Parchmann

Tag der mündlichen Prüfung: 27.10.2022





---

## Zusammenfassung

Der naturwissenschaftliche Unterricht in den Schulen soll kumulatives Lernen fördern mit dem Ziel, Kompetenzen sukzessiv über mehrere Jahre zu entwickeln. Um kumulatives Lernen zu fördern, sollten Unterrichtsinhalte deshalb durch Basiskonzepte vernetzt werden. Findet dagegen keine Vernetzung von Inhalten im Unterricht statt, können Schülerinnen und Schüler überwiegend nur isoliertes Faktenwissen wiedergeben, das nicht allein zur Erklärung von Phänomenen und Lösung von Problemen ausreicht. Vergleiche nationaler Standards und Schulbücher zeigen jedoch, dass kein basiskonzeptorientierter Unterricht zur Vernetzung von Inhalten und damit zur Förderung kumulativen Lernens stattfindet und demnach eine Umsetzungslücke von der Forschung in die Praxis existiert.

Im Rahmen dieser Arbeit wird deshalb eine Interventionsmaßnahme in Form kurzer Unterrichtseinheiten zum Basiskonzept Energie zur Förderung kumulativen Lernens entwickelt. Ausgehend von den zentralen Anforderungen an einen Unterricht zur Förderung kumulativen Lernens werden Designprinzipien für die Interventionsmaßnahme hergeleitet und mittels der Designprinzipien ein basiskonzeptorientierter Unterricht theoretisch konzipiert. Im Anschluss wird die Interventionsmaßnahme durch die Entwicklung kurzer Unterrichtseinheiten konkretisiert. Einem Design-Based Research-Ansatz folgend werden die kurzen Unterrichtseinheiten durch mehrere Zyklen aus Entwicklung und Erprobung schrittweise optimiert und abschließend deren Wirksamkeit im Regelunterricht hinsichtlich des Zuwachses des Energiewissens und der Vernetzung des Wissens evaluiert.

Im Rahmen der Evaluation wurden die kurzen Unterrichtseinheiten mit 60 Schulklassen und N=1500 Schülerinnen und Schülern der Mittelstufe im Regelunterricht erprobt. Die Ergebnisse zeigen keine signifikante Zunahme des Energiewissens über den Verlauf einer Unterrichtseinheit, es ist jedoch eine Zunahme des Energiewissens entlang mehreren aufeinanderfolgenden Unterrichtseinheiten zu beobachten. Es ist zudem eine Zunahme des vernetzten Wissens von Schülerinnen und Schülern bereits im Verlauf einer kurzen Unterrichtseinheit zu sehen. Eine exemplarische qualitative Betrachtung des vernetzten Wissens einzelner Schülerinnen bzw. Schüler zeigt zudem eine sehr unterschiedliche Zunahme des vernetzten Wissens in Abhängigkeit vom Vorwissen der Schülerinnen und Schüler.

Die Ergebnisse zeigen damit die Notwendigkeit der regelmäßigen Vernetzung von Wissen im naturwissenschaftlichen Unterricht und wie eine solche Vernetzung mithilfe von Basiskonzepten konkret umgesetzt werden kann.

---

## Summary

Science education in schools should promote knowledge integration with the aim of developing competencies successively over several years. To enable knowledge integration, scientific ideas should be organized around core ideas to build an integrated knowledge base. Without an integrated knowledge base, students can mostly reproduce factual knowledge, which is not sufficient on its own to explain phenomena and solve problems. However, comparisons of national standards and textbooks indicate that most science teaching does not focus on the development of integrated learning by using core ideas and consequently neglecting knowledge integration. All in all, a gap between science education research and practice in school exists.

Therefore, in this dissertation, an intervention using short instructional units focusing on the core idea of energy is developed to promote knowledge integration. Based on requirements for science education to promote knowledge integration, design principles for an intervention are derived. That way, science education based on core ideas is theoretically designed. Subsequently, the intervention is finalized through the development of short instructional units. Following a design-based research approach, the instructional units are gradually optimized through several cycles of development and testing. Their effectiveness is evaluated in regular classes with respect to the development of energy knowledge and the integration of knowledge.

During the evaluation, the teaching units were tested with 60 school classes and N=1500 middle school students in regular classes. The results indicate no significant increase in energy knowledge over the course of one instructional unit, but an increase along several consecutive units can be observed. Furthermore, an increase in students' integrated knowledge can already be seen in the course of one instructional unit. A qualitative examination of the knowledge bases of individual students also shows a different increase in integrated knowledge depending on the prior knowledge of students.

All in all, the results underline the importance of regular integration of knowledge in science education and how such integration can be implemented by using core ideas.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung und Motivation</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Problemstellung und Methodisches Vorgehen</b> .....	<b>6</b>
2.1. <i>Anforderungen an kumulatives Lernen</i> .....	6
2.2. <i>Lernen (in den Naturwissenschaften)</i> .....	7
2.2.1. Konstruktivismus.....	7
2.2.2. Konstruktivistisch-kognitivistische Lernmodelle und vernetzendes Lernen.....	10
2.2.3. Leitideen und Learning Progressions.....	13
2.2.4. Situiertes Lernen.....	19
2.2.5. Zusammenfassung und Synthese des theoretischen Forschungsstands .....	22
2.3. <i>Problemstellung</i> .....	24
2.3.1. Design-Based Research.....	28
2.3.2. Fazit.....	33
<b>3. Entwicklung und Erprobung</b> .....	<b>35</b>
3.1. <i>Analyse und Exploration der Anforderungen an kumulatives Lernen</i> .....	37
3.1.1. Fachliche Klärung .....	37
3.1.2. Analyse von Präkonzepten .....	44
3.1.3. Lehrplananalyse.....	47
3.1.4. Strukturierungsmaßnahme.....	52
3.2. <i>Design und Entwicklung energiebasierter Unterrichtseinheiten</i> .....	63
3.2.1. Prototyp einer Interventionsmaßnahme .....	63
3.2.2. Identifikation geeigneter Kontexte.....	68
3.3. <i>Evaluation und Reflexion von Alltagskontexten</i> .....	69
3.3.1. Evaluation geeigneter Kontexte .....	69
3.4. <i>Design und Entwicklung der CRUs</i> .....	73
3.4.1. Konzeptionelle Entwicklung.....	73
3.4.2. Entwicklung von Unterrichtsmaterialien .....	77
3.5. <i>Evaluation und Reflexion des ersten Erprobungszyklus</i> .....	82
3.5.1. Märzerprobung .....	83
3.5.2. Junierprobung.....	91
3.6. <i>Design und Entwicklung zur Überarbeitung der Designlösung</i> .....	94
3.6.1. Exemplarische CRU „Warum wird ein Laptop manchmal heiß?“ .....	95
<b>4. Forschungsfragen und Feldtest</b> .....	<b>103</b>

---

4.1.	<i>Design</i> .....	104
4.1.1.	Stichprobe und Besonderheiten der Erprobung .....	105
4.1.2.	Untersuchungsinstrumente .....	109
4.1.3.	Datenerhebung und -struktur.....	114
4.2.	<i>Ergebnisse</i> .....	116
4.2.1.	Zum Aufbau eines Energiewissens.....	116
4.2.2.	Zum Zuwachs eines vernetzten Wissens .....	123
5.	<b>Zusammenfassung und Diskussion</b> .....	<b>134</b>
6.	<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>142</b>
7.	<b>Literatur</b> .....	<b>143</b>
8.	<b>Anhang</b> .....	<b>166</b>
8.1.	<i>Interviewleitfaden</i> .....	166
8.2.	<i>Anregungen im Interview</i> .....	169
8.3.	<i>Kodierleitfaden</i> .....	171
8.4.	<i>Exemplarisches Interview inklusive Kodierung</i> .....	178

## 1. Einleitung und Motivation

Die 1995 durchgeführte internationale Vergleichsstudie *Trends in International Mathematics and Science Study (TIMSS)* wirkte wie ein Schock für die mathematisch-naturwissenschaftlichen Fächer in Deutschland. In diesen Fächern lag die Testleistung von Schülerinnen und Schülern in Deutschland nur im unteren Bereich und selbst die besten Schülerinnen und Schüler konnten mit vergleichbar guten Schülerinnen und Schülern anderer Länder nicht mithalten (Baumert, Bos & Lehmann, 2000). Schülerinnen und Schüler in Deutschland konnten zwar vergleichsweise viel Faktenwissen und auswendig gelernte Formeln wiedergeben, jedoch hatten die Schülerinnen und Schüler insbesondere bei der flexiblen Anwendung von Wissen und bei der Übertragung des Wissens auf neue Kontexte zur Erklärung von Phänomenen und Lösung von Problemen große Schwierigkeiten. Die Schwierigkeiten bei der flexiblen Anwendung des Wissens von Schülerinnen und Schülern aus Deutschland zeigte sich auch in der internationalen Vergleichsstudie PISA (Baumert et al., 2001). Hier war die Gesamtleistung von Schülerinnen und Schülern in Deutschland in naturwissenschaftlichen Fächern deutlich unter dem Mittelwert vergleichbarer Länder. Zudem fiel der Anteil von Schülerinnen und Schülern aus Deutschland mit hohen naturwissenschaftlichen Kompetenzen im Vergleich zu anderen Ländern sehr gering aus (Baumert et al., 2001). Zwar konnten Schülerinnen und Schüler aus Deutschland in den folgenden Jahren im Mittel Verbesserungen erzielen und zeigten nun sogar teilweise eine überdurchschnittliche Leistung im Vergleich zu anderen Ländern, jedoch bereitete die flexible Anwendung von Wissen weiterhin Probleme (Reiss et al., 2016, 2019). Um die Probleme bei der flexiblen Anwendung von Wissen im Speziellen und im Allgemeinen die Leistung aller Schülerinnen und Schüler aus Deutschland zu verbessern, kam es als Reaktion auf PISA 2000 zu Beginn des Jahrtausends zu einer Neuausrichtung im Bildungssystem (Klieme et al., 2003). Das Bildungssystem sollte nicht länger durch starre Lehrpläne nur input-gesteuert, sondern zukünftig am Output orientiert sein. Eine zentrale Maßnahme zur Output-Orientierung war die Einführung von nationalen und für alle Schulen geltenden Bildungsstandards (z. B. KMK, 2005). In den Bildungsstandards werden nicht mehr länger wie in Lehrplänen die zu erlernenden Bildungsinhalte nach Jahrgangsstufen, sondern zu erreichende Kompetenzen abschlussbezogen und damit zielorientiert formuliert (Klieme et al., 2003).

### Kompetenzen

Die neue Beschreibung in Form abschlussbezogener Kompetenzen in den Bildungsstandards geht auf Klieme et al. (2003) zurück. Klieme et al. (2003) beziehen sich hier auf den Kompetenzbegriff nach Weinert (2001), wonach Kompetenzen „die bei Individuen verfügbaren oder durch sie erlernbaren kognitiven Fähigkeiten und Fertigkeiten [sind], um bestimmte Probleme zu lösen sowie die damit verbundenen motivationalen, volitionalen und sozialen Bereitschaften, damit die Problemlösungen in variablen Situationen erfolgreich und verantwortungsvoll genutzt werden können“ (S.27). An der Definition von Weinert (2001) ist zu erkennen, dass Kompetenz sich von reinem Wissen über Fachinhalte unterscheidet, indem Wissen und Können zusammengefasst wird (Lersch & Schreder, 2013). Kompetenzen sind somit funktional insofern, als dass der Kompetenzbegriff auch die Fertigkeiten umfasst, das Wissen zielgerichtet anzuwenden. Kompetenzen werden demnach nicht nach einigen wenigen Schulstunden, sondern vielmehr über mehrere Schuljahre entwickelt (Schecker & Parchmann, 2006). Klieme et al. (2003) ergänzen zudem, dass zwischen fachspezifischen und fachübergreifenden Kompetenzen unterschieden werden sollte. Zu den fachübergreifenden Kompetenzen zählen hier die Kompetenzen in der digitalen Bildung. Diese sind als Kompetenzrahmen bewusst überfachlich formuliert und für alle Unterrichtsfächer fachübergreifend als Vorgabe entwickelt (KMK, 2016). Zu den fachspezifischen Kompetenzen zählt dagegen bspw. das Fachwissen im Physikunterricht, das in Deutschland durch die vier Basiskonzepte Materie, Wechselwirkung, System und Energie strukturiert ist (KMK, 2005).

Auch in den anderen naturwissenschaftlichen Fächern wurden entsprechende fachspezifische Kompetenzen durch die KMK-Bildungsstandards abschlussbezogen formuliert (z.B. KMK, 2005, 2004a, 2004b). Es geht jedoch aus der abschlussbezogenen Formulierung der Kompetenzen für die naturwissenschaftlichen Fächer nicht hervor, wie Schülerinnen und Schüler letztlich die fachspezifischen Kompetenzen über die Jahre ihres Schulbesuchs entwickeln. Vielmehr wird die Entwicklung der fachspezifischen und zu erlernenden Kompetenzen an die Bundesländer und Schulen delegiert (Neumann et al., 2010). So entscheidet schließlich jedes Bundesland für einzelne Jahrgänge oder Doppeljahrgänge und Schulen für Schulhalbjahre, wann und zu welchen fachlichen Inhalten die Kompetenzen in welchem Umfang zu entwickeln sind.

Gerade für die über mehrere Jahre angelegte Entwicklung von Kompetenzen ist eine sinnvolle und fachspezifische Strukturierung von Inhalten jedoch wichtig (Neumann,

2020). In der fachdidaktischen Forschung werden solche Entwicklungen von Kompetenzen durch sogenannte Kompetenzmodelle beschrieben, die sich in Kompetenzstruktur- und Kompetenzentwicklungsmodelle unterscheiden lassen (Schecker & Parchmann, 2006). Anhand von Kompetenzstrukturmodellen sollen Ausprägungen in verschiedenen Kompetenzbereichen dargestellt werden. In Kompetenzentwicklungsmodellen wird dagegen beschrieben, wie sich die Kompetenzstrukturen z. B. als eine Folge von Lehr-Lernprozessen verändern (Neumann et al., 2007). Kompetenzentwicklungsmodelle bilden demnach eine wichtige Voraussetzung für die systematische Strukturierung von Lehr-Lernprozessen sowohl für einige wenige Unterrichtsstunden als auch über Schuljahre hinweg (Neumann & Nordine, 2021; Neumann, 2020). Eng verwandt sind Kompetenzentwicklungsmodelle zudem mit dem international etablierten Begriff der *Learning Progression* (Bernholt et al., 2018; Duncan & Hmelo-Silver, 2009). Learning Progressions sind theoretisch hergeleitete und empirisch validierte Modelle, die eine Kompetenzentwicklung anhand mehrerer Stufen über Jahre hinweg beschreiben (Bernholt et al., 2018; Lehrer & Schauble, 2015). Insbesondere in den Naturwissenschaften ist eine solche Beschreibung anhand mehrerer Stufen wichtig, um Schülerinnen und Schüler in dem sukzessiven und kohärenten Aufbau von Kompetenzen zu unterstützen, da in den naturwissenschaftlichen Fächern die fachlichen Inhalte kohärent und sukzessiv aufeinander aufbauen (Helmke, 2009).

### Kumulatives Lernen

Ein derartiges Lernen, bei dem Schülerinnen und Schüler sukzessiv Kompetenzen aufbauen, wird auch als kumulatives Lernen bezeichnet (Bruner, 1980; H. E. Fischer et al., 2007; Neumann et al., 2008). Hier wird das Vorwissen der Schülerinnen und Schülern beachtet und systematisch auf diesem aufgebaut, damit Schülerinnen und Schüler ein zunehmend komplexeres Verständnis fachspezifischer Kompetenzen entwickeln können (Neumann et al., 2008). Wird dagegen nicht an das Vorwissen bzw. an bereits bekannte Inhalte angebunden, behindert dies kumulatives Lernen und damit den Aufbau fachspezifischer Kompetenzen (Schmidt et al., 2005). Als eine Folge von fehlendem kumulativen Lernen erklären Baumert et al. (1997) auch die Ergebnisse der deutschen Schülerinnen und Schüler in TIMSS. Eine fehlender systematischer Aufbau der Inhalte bzw. eine fehlende Anbindung an Vorwissen in den naturwissenschaftlichen Fächern erschwere demnach kumulatives Lernen und damit den systematischen Kompetenzaufbau, was sich in den niedrigen Testergebnissen in TIMSS widerspiegelt

(Baumert et al., 1997b). Der Unterricht beginne inhaltlich ständig neu, indem neue Inhalte in den naturwissenschaftlichen Fächern ohne Anbindung an bereits bekannte Inhalte unterrichtet werden. Ein Beispiel hierfür ist das Unterrichten in getrennten Sachgebieten wie Mechanik und Elektrizitätslehre im Physikunterricht, das kumulative Lernen zur Entwicklung von Kompetenzen über mehrere Schuljahre hinweg erschweren kann (Baumert et al., 1997b; Schmidt et al., 2005).

Um kumulatives Lernen schließlich zu fördern, wurde der Kompetenzbereich Fachwissen in den KMK-Bildungsstandards für die naturwissenschaftlichen Fächer nach fachspezifischen Basiskonzepten strukturiert (KMK, 2005, 2004a, 2004b). Basiskonzepte sind übergeordnete Konzepte einer Domäne, die „Fachwissen strukturieren und den Schülerinnen und Schülern kumulatives Lernen erleichtern [sollen]“ (KMK, 2005, S. 7). Für das Fach Physik wurden Energie, Materie, Wechselwirkung und System als Basiskonzepte der Mittelstufe formuliert. Aus der o. g. Definition für die Basiskonzepte geht jedoch nicht hervor, wie einer an Basiskonzepten orientierter Unterricht in der Praxis gestaltet werden kann. Zur Gestaltung eines an Basiskonzepten orientierten Unterrichts wurde in der Folge sowohl in Forschung als auch in der Praxis diskutiert. Schecker & Wiesner (2007) argumentieren bspw. hierzu, dass eine Unterrichtsstrukturierung nach Basiskonzepten statt nach (klassischen) Sachgebieten zu vielen fachlichen Problemen bei der Zuordnung der Sachgebiete zu den einzelnen Basiskonzepten führe. Sie schlugen auch statt einer Strukturierung nach Basiskonzepten der Physik eher eine Strukturierung nach den Begriffen und Konzepten vor, die „Schülerinnen und Schülern bei der Entwicklung strukturierten Wissens im Lernprozess helfen“ (Schecker & Wiesner, 2007, S. 10). Die Begriffe und Konzepte seien gemäß den Autoren nicht zwingend die Basiskonzepte der Fachdomäne. In der Folge argumentierten sie, eine „top-down-Strategie – zuerst die Leitideen [die Basiskonzepte – Anm. d. Verf.] einführen und dann an Beispielen veranschaulichen – widerspräche den Erkenntnissen über den Verlauf von Lernprozessen. Schülerinnen und Schüler benötigen zunächst vielfältige Erfahrungen und Einsichten in den jeweiligen Sachgebieten. [...] Erst auf einer breiten Erfahrungsbasis lassen sich Vernetzungen mithilfe von Leitideen erreichen und stärken.“ (Schecker & Wiesner, 2007, S. 11). Es ist hier zu beachten, dass die Autoren nur eine von vielen Möglichkeiten zur Umsetzung eines basiskonzeptorientierten Unterrichts darstellen, die in der Folge jedoch weit verbreitet war und im Allgemeinen eher zur Ablehnung der Basiskonzepte in der Schulpraxis führte (Wodzinski, 2020; Hertel & Großmann, 2016). Andere Möglichkeiten zur Umsetzung der Basiskonzepte sind in den

unterschiedlichen Formulierungen der landesspezifischen Lehrpläne auf Grundlage der Bildungsstandards zu sehen (vgl. z. B. Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, 2008; Niedersächsisches Kultusministerium, 2015). Die Basiskonzepte werden hier zwar erwähnt, sie spielen faktisch jedoch keine praktische Rolle für die Strukturierung von Unterrichtsinhalten, was auch in den an die Lehrpläne angepassten Schulbüchern zu sehen ist (z. B. Appel, 2016; Westermann Schulbuchverlag, 2020). Es fehlen demnach Vorschläge, wie ein Unterricht über mehrere Schuljahre zur Unterstützung kumulativen Lernens anhand von Basiskonzepten grundlegend in Lehrplänen zu konzipieren ist und wie er unterrichtspraktisch auf Grundlage vorhandener Lehrpläne entwickelt werden kann. Ebendiese Lücke der unterrichtspraktischen Umsetzung wird auch regelmäßig im naturwissenschaftlichen Unterricht beobachtet (Bernholt et al., 2020). Damit verbunden sind auch fehlende Erkenntnisse darüber, welche Voraussetzungen notwendig sind, um Schülerinnen und Schülern das Erreichen weiterer Kompetenzstufen zu ermöglichen und in der Folge kumulatives Lernen zu ermöglichen (z. B. Neumann, 2013).

Sowohl den fehlenden Vorschlägen zur Umsetzung eines basiskonzeptorientierten Unterrichts als auch fehlenden Erkenntnissen über die Wirksamkeit eines solchen Unterrichts wird in der vorliegenden Arbeit nachgegangen. Hierfür werden zunächst Anforderungen an einen Unterricht zur Unterstützung kumulativen Lernens zum Aufbau fachlicher Kompetenzen in den Naturwissenschaften theoretisch erarbeitet und entsprechende Designprinzipien formuliert. Im Anschluss wird die o. g. Umsetzungslücke adressiert und am Beispiel des Basiskonzepts Energie die Entwicklung einer Instruktionsmaßnahme für den Physikunterricht der Sekundarstufe I vorgestellt, in der die Designprinzipien umgesetzt werden. Hier wird exemplarisch ein Teil der Instruktionsmaßnahme in Form einer konkreten Unterrichtseinheit vorgestellt. Die praktische Umsetzung der Designprinzipien soll hier nicht als verpflichtende Vorgabe zur Gestaltung zukünftigen Unterrichts gesehen werden. Vielmehr stellt es eine erste mögliche Umsetzung zur Unterstützung eines kumulativen Kompetenzaufbaus anhand von Basiskonzepten dar. Abschließend wird der Praxiseinsatz der Instruktionsmaßnahme mit Lehrkräften im Regelunterricht dargestellt und die Maßnahme und der Entwicklungsprozess hinsichtlich der Designprinzipien und der Wirksamkeit evaluiert. Abschließend werden mögliche Schlussfolgerungen aus der Entwicklung und Erprobung der Instruktionsmaßnahme diskutiert und Anforderungen für künftige Entwicklungs- und Forschungsprojekte (hinsichtlich der Förderung kumulativen Lernens) formuliert.

## 2. Problemstellung und Methodisches Vorgehen

### 2.1. Anforderungen an kumulatives Lernen

Die Unterteilung von fachspezifischen und fachübergreifenden Kompetenzen in Lehr-Lernprozessen des naturwissenschaftlichen Unterrichts ist auch in den zugrundeliegenden Lerntheorien zu sehen. Die Lerntheorien zur Entwicklung von Kompetenzen lassen sich demnach grob in „domänenübergreifende und gegenstandsspezifische Theorien“ (z.B. Schecker et al., 2018) unterteilen. Als domänenübergreifend werden hier insbesondere kognitionspsychologische und pädagogische Theorien verstanden, auf deren Basis allgemeine Aussagen über Lehr- und Lernprozesse formuliert werden (Jung, 1983). Dazu werden auch die eingangs dargestellte Theorie zum kumulativen Lernen ebenso wie der im Folgenden vorgestellte Konstruktivismus zugeordnet. Gegenstandsspezifische Theorien stellen dagegen zumeist eine Weiterentwicklung und Anpassung domänenübergreifender Theorien dar und werden in dieser Arbeit zur sprachlichen Abgrenzung auch als fachspezifische Modelle Lehren und Lernens bezeichnet (Schecker et al., 2018). Solche fachspezifischen Modelle Lehren und Lernens beschreiben eine Kompetenzentwicklung in Bezug auf einen fachspezifischen Gegenstand oder Inhalt. Die Modelle sind demnach auf eine bestimmte Domäne beschränkt und werden deshalb auch als „gegenstandsspezifische lokale Lehr-Lern-Theorien“ (Prediger & Link, 2012, S. 38) bezeichnet. Ein Beispiel solcher Modelle ist die Beschreibung der Entwicklung fachspezifischer Kompetenzen in sogenannten Learning Progressions (Bernholt et al., 2018).

Für die konkrete Gestaltung von Lehr-Lernprozessen bedarf es nach Schecker et al. (2018) sowohl domänenübergreifende Theorien als auch konkrete fachspezifische Modelle Lehren und Lernens zum einen in der Domäne und zum anderen zum domänenspezifischen Inhalt. Aus dem Grund werden im Folgenden zunächst die für kumulatives Lernen in den Naturwissenschaften notwendigen domänenübergreifenden Theorien dargestellt und für den naturwissenschaftlichen Unterricht konkretisiert. Im Anschluss wird die Notwendigkeit eines fachspezifischen Modells des Lehren und Lernens in Form einer Learning Progression theoretisch erarbeitet und mit den domänenübergreifenden Theorien verbunden. Insgesamt werden auf diese Weise fünf Anforderungen an einen Unterricht zur Förderung kumulativen Lernens theoretisch hergeleitet.

## 2.2. Lernen (in den Naturwissenschaften)

### 2.2.1. Konstruktivismus

Das Verständnis rund um Lehr-Lernprozesse spielt in allen pädagogischen Disziplinen eine wichtige Rolle und ist ebenfalls zentraler Forschungsgegenstand der pädagogischen Fachdisziplinen. Dieses Verständnis insbesondere von Schülerinnen und Schülern im Unterricht hat sich über die letzten Jahre häufig geändert. So dominierte Mitte des 20. Jahrhunderts noch eine Auffassung von Lehren und Lernen, nach der Unterricht zur Weitergabe und Vermittlung von Wissen dient. Die Schülerinnen und Schüler nehmen demnach eine passive Rolle im Lehr-Lernprozess ein; der Unterrichtsinhalt müsse nur so angepasst werden, dass er bestmöglich von den Schülerinnen und Schülern aufgenommen werden kann (Riemeier, 2007 bzw. Skinner & Correll, 1971). Das Ziel von Unterricht ist demnach die Weitergabe von Wissen, infolgedessen die Schülerinnen und Schüler über das gleiche Wissen wie die Lehrkraft verfügen sollen (Reinmann & Mandl, 2006).

Speziell in den naturwissenschaftlichen Fächern des Schulunterrichts setzte sich Ende des 20. Jahrhunderts vermehrt eine konstruktivistische Auffassung als alternative Auffassung von Lehren und Lernen durch und schrieb den Schülerinnen und Schülern in der Folge eine aktive Rolle im Lernprozess zu (Riemeier, 2007; Terhart, 2012). Die konstruktivistische Auffassung wurde zum einen von Grundüberlegungen zu Erkenntnisprozessen beeinflusst, nach denen eine objektive Realität und damit Wissens Elemente über die Realität angezweifelt werden (von Glasersfeld, 1997). In diesem „radikalen Konstruktivismus“ wird eine objektive Realität ausgeschlossen, wodurch in der Folge jegliche Erkenntnisse und das Wissen von Individuen subjektiv konstruiert werden (von Glasersfeld, 1997). Zum anderen setzte sich eine konstruktivistische Auffassung von Lehren und Lernen als Folge von Unterrichtsbeobachtungen und fachdidaktischen Analysen von Lernprozessen durch (z.B. Duit, 1995). In den Unterrichtsbeobachtungen hat sich u.a. gezeigt, dass Schülerinnen und Schüler nach Lehr-Lernprozessen im naturwissenschaftlichen Unterricht nicht das gleiche fachlich adäquate Wissen wie die Lehrkraft haben bzw. wie die Lehrkraft es weitergegeben hat. Das Wissen der Schülerinnen und Schüler ist hingegen dominiert von Präkonzepten und Alltagsvorstellungen zu naturwissenschaftlichen Konzepten. Die Präkonzepte von Schülerinnen und Schülern halten sich demnach hartnäckig und zeigen sich resistent

gegenüber der reinen Weitergabe naturwissenschaftlicher Konzepte durch die Lehrkraft (z.B. Schecker & Duit, 2018; Duit, 1986).

Hier ist zu betonen, dass beide vorgestellten Auffassungen von Lehren und Lernen der Schülerinnen und Schüler in den Naturwissenschaften sich nicht klar voneinander trennen lassen. Brooks und Brooks (1999) trennen zwar klar zwischen traditionellen und konstruktivistischen Lernumgebungen, wohingegen Siebert (2003) ein solch klare Unterscheidung ablehnt. Siebert (2003) bezeichnet den Konstruktivismus an sich als „keine eigene Wissenschaftsdisziplin, sondern [als] ein inter- und transdisziplinäres Paradigma“ (S. 11). Demnach legen verschiedene wissenschaftliche Disziplinen wie die Psychologie oder die Lehr-Lernforschung den Konstruktivismus unterschiedlich aus, so dass eine klare Definition erschwert wird.

Nach Riemeier (2007) ist der Ursprung der verschiedenen Auslegungen der bereits vorgestellte radikale Konstruktivismus nach von Glasersfeld (1997). Im radikalen Konstruktivismus wird keine rein objektive Realität abgelehnt, jedoch ist diese prinzipiell nicht von Individuen erfahrbar. Jede Wahrnehmung der objektiven Realität ist somit von Individuen abhängig und somit von Individuen unterschiedlich konstruiert (C. von Aufschnaiter, 1999; S. von Aufschnaiter et al., 1992). Aus dem radikalen Konstruktivismus nach von Glasersfeld (1997) entwickelte sich schließlich speziell für die Lehr-Lernforschung der moderate Konstruktivismus (Riemeier, 2007). Während der radikale Konstruktivismus allgemein die Erkenntnisprozesse von Individuen beschreibt, ist der moderate Konstruktivismus auf Lehr-Lernprozesse von Individuen zugeschnitten und damit auf die Frage, wie sich Wissen verändert (Riemeier, 2007). Im moderaten Konstruktivismus werden Lehr-Lernprozesse insbesondere in den Naturwissenschaften als ein individuelles, aber soziales Lernen beschrieben, bei dem Schülerinnen und Schüler selbstgesteuert und aktiv in der Interaktion mit anderen Schülerinnen und Schülern Wissen konstruieren. Unterstützt wird diese Auffassung von Lehr-Lernprozessen in den Naturwissenschaften durch Befunde der Neurobiologie, wonach auf ein Individuum einwirkende Reize nicht unverarbeitet aufgenommen, sondern vielmehr individuell unterschiedliche Erregungen im Gehirn auslösen und damit verschieden verarbeitet werden (Roth, 1997). Die Verarbeitung und die Konstruktion von Wissen ist demnach individuell höchst unterschiedlich und abhängig von inneren und äußeren Faktoren (Mandl, 2006). So ist die Konstruktion von Wissen zwar vom Individuum selbstgesteuert, unterliegt jedoch äußeren sozialen, kontextuellen und damit äußeren Einflüssen (Riemeier, 2007). In der Folge werden auch Lehr-Lernprozesse als sozial und situiert, d.h.

abhängig von einer den Kontext bildenden Lernumgebung, aufgefasst. Gleichzeitig werden Lehr-Lernprozesse, d.h. die Veränderung von Wissen, in Abhängigkeit vom Vorwissen eines Individuums betrachtet (Mandl, 2006; Brown et al., 1989).

Die Abhängigkeit vom Vorwissen bei der Konstruktion von Wissen in Lehr-Lernprozessen wurde bereits vor der Formulierung des radikalen bzw. moderaten Konstruktivismus insbesondere in der naturwissenschaftlichen Lehr-Lernforschung hinlänglich beobachtet (z.B. Duit, 1973, 1986). Da also Teile des moderaten Konstruktivismus<sup>1</sup> bereits in der naturwissenschaftlichen Lehr-Lernforschung entwickelt wurden, hat in der Folge der moderate Konstruktivismus auch eine besondere Bedeutung für den naturwissenschaftlichen Unterricht (Riemeier, 2007). Zwar ist der moderate Konstruktivismus nicht allein auf den naturwissenschaftlichen Unterricht beschränkt und hat auch für die allgemeine Lehr-Lernforschung weitreichende Konsequenzen (Terhart, 2012). Jedoch wurde vor allem in den naturwissenschaftlichen Fächern der moderate Konstruktivismus zur Beschreibung von Lehr-Lernprozessen übernommen (C. von Aufschnaiter, 1999; S. von Aufschnaiter et al., 1992) und auf Grundlage des moderaten Konstruktivismus<sup>1</sup> auch eigene Theorien und Modelle fachlichen Lehren und Lernens speziell für den naturwissenschaftlichen Unterricht entwickelt (z.B. Aufschnaiter & Welzel, 1997; Kattmann et al., 1997).

Als Theorie zur Beschreibung der Veränderung von Wissen auf Grundlage des Vorwissens von Individuen infolge von Lehr-Lernprozessen hat sich in den letzten Jahrzehnten die *Conceptual Change*<sup>1</sup>-Theorie durchgesetzt (Sikorski & Hammer, 2017; Duit et al., 2012; Bransford et al., 2000; Ausubel, 1974). Die Conceptual Change-Theorie kann hier als wichtige theoretische Grundlage für die Entwicklung vieler konstruktivistisch-kognitivistischer Modelle fachlichen Lehren und Lernens in den Naturwissenschaften betrachtet werden (u.a. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2018; DiSessa, 2013; Linn, 2006; Bransford et al., 2000; S. von Aufschnaiter & Welzel, 1997; Smith III et al., 1994). Dass Lernprozesse in den Naturwissenschaften mit einem konstruktivistischen Ansatz besser erklärt werden können, bestätigte sich in diesen Modellen (u.a. Aufschnaiter & Welzel, 1997). Auf Grundlage der Modelle wird genauer untersucht, wie Schülerinnen und Schüler in den

---

<sup>1</sup> Es lässt sich wie beim Konstruktivismus auch zur Conceptual Change-Theorie darüber streiten, ob hier eine domänenübergreifende oder domänenspezifische Theorie vorliegt. Riemeier (2007) und Terhart (2012) ordnen beide Theorien eher den domänenübergreifenden Theorien zu, räumen jedoch eine höhere Bedeutung für die Entwicklung von Lehr- und Lernprozessen in den Naturwissenschaften gegenüber anderen Fachdisziplinen ein.

Naturwissenschaften Informationen individuell verarbeiten und welche kognitiven Prozesse hier eine Rolle spielen.

Im Folgenden wird daher zum einen die Conceptual Change-Theorie vorgestellt und anschließend zwei weitere eng mit der Theorie verknüpfte fachspezifische Modelle Lehren und Lernens in ihrer Bedeutung für ein kumulatives Lernen vorgestellt.

### 2.2.2. Konstruktivistisch-kognitivistische Lernmodelle und vernetzendes Lernen

Die individuelle Verarbeitung und die Konstruktion von Wissen wird insbesondere durch die Präkonzepte von Schülerinnen und Schülern beeinflusst (Duit, 1986; Schecker & Duit, 2018). Unter Präkonzepten, auch als Vorwissen, Vorerfahrungen, Schüler-, Alltags- oder Fehlvorstellungen bekannt, werden solche Vorstellungen, Konzepte, Ideen und Wissens Elemente basierend auf dem Alltag von Schülerinnen und Schülern vor einem naturwissenschaftlichen Unterricht verstanden (Möller, 2007). Präkonzepte können demnach lernförderlich sein, wenn auf den Präkonzepten der Schülerinnen und Schüler im Lehr-Lernprozess kohärent aufgebaut wird (*engl. Conceptual Growth*). Die Präkonzepte können jedoch auch lernhinderlich sein und den Aufbau fachlich adäquater Konzepte verhindern oder blockieren (DiSessa, 2013; Möller, 2007). Entgegen dem irreführenden Begriff des Conceptual Change sollen jedoch fachlich adäquate Konzepte die Präkonzepte von Schülerinnen und Schüler in einem Lehr-Lernprozess nicht ersetzen (Duit & Treagust, 2003). Vielmehr geht es hier um die Schaffung von Lernangeboten im Lehr-Lernprozess, die den Aufbau fachlich adäquater Konzepte parallel zu den Präkonzepten von Schülerinnen und Schülern ermöglichen und damit das Wissen der Schülerinnen und Schüler neu strukturieren (Möller, 2007; Vosniadou, 2013). Für den Aufbau müssen sich die fachlich adäquaten Konzepte gegenüber den Präkonzepten durch eine hohe Erklärungsmächtigkeit auszeichnen und variabel in verschiedenen Problemlösekonstellationen einsetzbar sein (Bransford et al., 2000; DiSessa, 2013). Im naturwissenschaftlichen Unterricht sollen demnach solche Lernangebote geschaffen werden, die diesen Aufbau fachliche adäquater Konzepte unterstützen (Duit & Treagust, 2003; Möller, 2007).

Die Conceptual Change-Theorie beschreibt damit die Entwicklung von lernförderlichen und -hinderlichen Präkonzepten zu fachlich adäquaten Konzepten. Die Entwicklung erfolgt jedoch nicht innerhalb einiger weniger Schulstunden, sondern vielmehr über mehrere Schuljahre (Vosniadou, 2013). Auf diese Weise ist Conceptual Change eng mit der eingangs vorgestellten Theorie des kumulativen Lernens verbunden. Nach der

Theorie des kumulativen Lernens sollen ebenfalls Konzepte über mehrere Jahre sukzessiv und kohärent aufbauend auf den Präkonzepten von Schülerinnen und Schülern entwickelt werden (H. E. Fischer et al., 2007). Der sukzessive Aufbau von Konzepten ist wichtig, um zum einen die Erklärungsmächtigkeit der Konzepte in variablen Problemlösekonstellationen zu thematisieren und zum anderen anhand der Probleme ein im Allgemeinen zunehmend komplexeres Wissen zu entwickeln (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2018; DiSessa, 2013; Linn, 2006; Bransford et al., 2000; Smith III et al., 1994). Eine Synthese von Conceptual Change und kumulativem Lernen mit einem besonderen Fokus auf die Veränderung und Neustrukturierung des Wissens von Schülerinnen und Schülern infolge von Lehr-Lernprozessen bietet hier die Theorie der Wissensintegration (Linn, 2006).

In der Theorie der Wissensintegration wird vor allem der systematische Aufbau naturwissenschaftlicher Ideen und Konzepte und deren Verknüpfungen untereinander über einen langen Lehr-Lernprozess beachtet bzw. beschrieben. Sie basiert zum einen auf konstruktivistischen Überlegungen wie der Rolle von Präkonzepten für die Strukturierung von Lehr-Lernprozessen, aber auch auf kognitivistischen Überlegungen in Folge von Analysen komplexer Wissensstrukturen von Expertinnen und Experten im Vergleich zu Novizinnen und Novizen (Bransford et al., 2000; Chi et al., 1981). So unterscheiden sich Expertinnen und Experten in einem Fachgebiet nicht allein von Novizinnen und Novizen durch mehr Wissen bzw. durch ein Mehr an naturwissenschaftlichen Ideen im jeweiligen Fachgebiet (Chi et al., 1981). Vielmehr begründet sich der Unterschied in der Art, wie das Wissen organisiert und damit die naturwissenschaftlichen Ideen des Fachgebiets untereinander vernetzt sind (Bransford et al., 2000). So verfügen Expertinnen und Experten über eine komplexe Wissensstruktur, die sie variabel in gegebenen Problemlösekonstellationen einsetzen können. Insbesondere in den naturwissenschaftlichen Fächern erfordert die komplexe Sachstruktur der Fächer den Aufbau von ebenso komplexen und vernetzten Wissensstrukturen (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2018; Bransford et al., 2000; Chi et al., 1981).

Komplexe Wissensstrukturen werden in der Theorie der Wissensintegration daher als Netzwerke aufgefasst, die aus einer Ansammlung von Ideen und Verbindungen zwischen den Ideen bestehen (H. E. Fischer et al., 2007; Linn, 2006; Bransford et al., 2000; Anderson, 1983). Je mehr fachlich adäquate bzw. naturwissenschaftliche Ideen in der Wissensstruktur vorliegen und je mehr Verbindungen zwischen den Ideen existieren,

desto komplexer ist die Wissensstruktur und kann zur flexiblen Anwendung und zur Problemlösung genutzt werden (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2018; Bransford et al., 2000). Eine Veränderung der Wissensstruktur kann hier im Allgemeinen als Lernen aufgefasst werden (Linn, 2006). Entscheidend für das Lernen und den Aufbau zunehmend vernetzter und komplexer Wissensstrukturen ist das Vorwissen der Schülerinnen und Schüler und damit die Wissensstruktur, über die die Schülerinnen und Schüler vor dem Eintritt in den Lernprozess bereits verfügen (Bransford et al., 2000; Smith III et al., 1994; Ausubel; 1974). Das Vorwissen und damit die Wissensstruktur besteht zu Beginn des Unterrichts zumeist nur aus wenigen, miteinander unverbundenen und teils fachlich inkorrekten Ideen (DiSessa, 2013; Möller, 2007). Der Aufbau zunehmend komplexer Wissensstrukturen durch Lernen wird durch das Hinzufügen neuer Ideen, durch das Verändern und Verfeinern bestehender Ideen und durch das Herstellen, Verstärken und Verfeinern von Verbindungen zwischen den Ideen bewirkt (Linn, 2006). Insbesondere die Bedeutung des Herstellens, Verstärkens und Verfeinerns von Verbindungen zwischen den Ideen wird in der Theorie der Wissensintegration betont und unterscheidet sich in der Art von klassischen Annahmen, nach denen Lernen als ein Hinzufügen neuen Wissens angesehen werden kann (u.a. Bransford et al., 2000). So kann insbesondere die Verstärkung bzw. Verfeinerung von Verbindungen zwischen Ideen durch eine Variation von Kontexten und damit durch eine neue Anwendung eines Inhalts auf weitere Phänomene erreicht werden (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2018).

Die Theorie der Wissensintegration nach Linn (2006) ist eng mit dem Modell der vertikalen Vernetzung zum kumulativen Kompetenzaufbau verwandt (H. E. Fischer et al., 2007; Neumann et al., 2008). Nach Neumann et al. (2008) müssen nicht nur Lerngelegenheiten angeboten werden, die neue Ideen einer Wissensstruktur hinzufügen, sondern verstärkt Verbindungen zwischen dem Vorwissen und neuen Ideen ermöglichen.<sup>3</sup> In dem Zuge wird auch die Rolle der Lehrkraft hervorgehoben. Die Lehrkraft muss demnach aktiv die Schülerinnen und Schüler bei den Verknüpfungen

---

<sup>3</sup> Das Modell der vertikalen Vernetzung nach Neumann et al. (2008) wird von Bernholt et al. (2018) klar den fachspezifischen Modellen Lehren und Lernens zugeschrieben. Die nahezu analoge und im angloamerikanischen Raum entwickelte Theorie zur Wissensintegration erhebt dagegen den Anspruch, domänenübergreifend Lehren und Lernen in einem konstruktivistisch-kognitivistischen Ansatz zu beschreiben (Bransford et al., 2000) und kann damit auch allgemeinen lernpsychologischen Theorien zugeschrieben werden. Da diese Arbeit die Förderung kumulativen Lernens in den Naturwissenschaften fokussiert, wird hier auf eine strenge Abgrenzung zwischen domänenübergreifenden und gegenstandsspezifischen Theorien bzw. Modellen verzichtet, sondern vielmehr deren Bedeutung für die Entwicklung von Lehr- und Lernprozessen in den Naturwissenschaften betont.

zwischen Ideen bzw. bei der Informationsverarbeitung unterstützen. Aufbauend auf kognitiven Überlegungen zu Informationsverarbeitungsstrategien unterscheiden Neumann et al. (2008) zwischen den drei möglichen Aktivitäten „Erinnern“, „Strukturieren“ und „Explorieren“ im Unterricht zur Vernetzung von Inhalten und bezeichnen diese als „Vernetzungsaktivitäten“ (S. 144). Unter Erinnern wird hier insbesondere das Abrufen von Vorwissen bzw. der Präkonzepte von Schülerinnen und Schüler verstanden. Dies kann bspw. durch die Lehrkraft aktiv durch Nachfragen oder implizit durch die Anwendung des Vorwissens geschehen. Die Aktivität „Strukturieren“ bezieht sich dagegen vor allem auf das neu erlernte Wissen und bezeichnet die Einordnung von Inhalten in bestehende Wissensstrukturen durch Vergleichen, Umordnen und Hierarchisieren. Unter der Aktivität „Explorieren“ wird schließlich das Bewerten und Anwenden von Wissen zu geeigneten Beispielen bzw. Phänomenen auf Grundlage des Vorwissens verstanden. Diese drei Vernetzungsaktivitäten sollen so gemäß dem Modell der vertikalen Vernetzung Schülerinnen und Schüler unterstützen, integrierte Wissensstrukturen zu entwickeln (H. E. Fischer et al., 2007).

### 2.2.3. Leitideen und Learning Progressions

Sowohl im Modell der Wissensintegration nach Linn (2006) als auch im Modell der vertikalen Vernetzung nach H. E. Fischer et al. (2007) wurden bisher vor allem die Verbindungen zwischen den (naturwissenschaftlichen) Ideen in einem Wissensnetzwerk von Schülerinnen und Schülern betrachtet. Zugleich wurden Möglichkeiten zur Veränderung, Herstellung und Verstärkung von Verbindungen zwischen Ideen vorgestellt. Diese gelingen vor allem durch das Einbeziehen des Vorwissens der Schülerinnen und Schüler und durch die Betrachtung variabler Problemlösekonstellationen zur Verstärkung von Verbindungen zwischen Ideen (vgl. Abschnitt 2.2.1). Die Betrachtung variabler Problemlösekonstellationen zeigt zudem gemäß der Conceptual Change-Theorie die hohe Erklärungsmächtigkeit einzelner naturwissenschaftlicher Ideen und Konzepte. Somit wurde bereits eine Hierarchisierung zwischen naturwissenschaftlichen Ideen und Konzepten anhand des Kriteriums der Erklärungsmächtigkeit vollzogen. Auch in der Theorie der Wissensintegration nach Linn (2006) bzw. im Modell vertikaler Vernetzung von H. E. Fischer et al. (2007) wird eine solche Hierarchisierung von Ideen und Konzepten innerhalb einer Wissensstruktur vorgenommen. So wird bei H. E. Fischer et al. (2007) die Bedeutung von Leitideen der Wissensstruktur für Lehr-Lernprozesse betont und werden hier auch als „übergeordnete

Konzepte der Fachstruktur“ (S. 661) bezeichnet. Leitideen sind demnach zentrale bzw. übergeordnete Ideen und Konzepte eines Faches wie z. B. das Energiekonzept in der Physik. Sie zeichnen sich durch einen hohen Grad an Abstraktion und Generalisierung aus und sind in diesem Sinne stark dekontextualisiert (H. E. Fischer et al., 2007). Demnach ist eine Leitidee in einer Wissensstruktur weder eine einzelne Idee noch eine Verbindung zwischen Ideen. Eine Leitidee ist vielmehr ein Bereich in der Wissensstruktur, der aus einer Ansammlung von Ideen und Verbindungen untereinander besteht.

Ihre Bedeutung für die Organisation einer Wissensstruktur erhalten die Leitideen zum einen durch ihre hohe Erklärungsmächtigkeit gegenüber anderen Ideen und Bereichen der Wissensstruktur (Duit & Treagust, 2003; Bransford et al., 2000; Smith III et al., 1994). Die Leitideen eignen sich zur Erklärung vieler Phänomene und sind variabel in verschiedenen Problemlösekonstellationen anwendbar. Zum anderen zeichnen sich Leitideen durch ihre Zentralität in der Wissensstruktur auch durch viele Verbindungen zu weiteren Ideen der Wissensstruktur aus und eignen sich daher insbesondere zur Organisation der Wissensstruktur (DiSessa, 2018; Bransford et al., 2000). Durch die Verbindung zu weiteren Ideen bieten sich Leitideen auch als erster Zugang zu einer Problemlösung an und kann die Nutzung weiterer Ideen der Wissensstruktur zur Lösung des Problems unterstützen (Kubsch et al., 2019; J. R. Anderson & Schunn, 2000).

Die Funktion von Leitideen für die Organisation von Wissensstrukturen basiert u.a. auf dem Vergleich von Wissensstrukturen von Expertinnen und Experten gegenüber Novizinnen und Novizen (Chi et al., 1981). Demnach „wissen“ Expertinnen und Experten gegenüber Novizinnen und Novizen nicht nur mehr, sondern sind die jeweiligen Wissensstrukturen auch unterschiedlich organisiert (vgl. auch Abschnitt 2.2.2). Expertinnen und Experten organisieren ihre Wissensstruktur vielmehr um einige wenige Leitideen eines Faches (Bransford et al., 2000). Zudem nutzen Expertinnen und Experten gegenüber Novizinnen und Novizen übermäßig häufig die Leitideen und integrieren nach einer ersten Betrachtung eines Problems anhand der Leitideen auch weitere Ideen zur Lösung von Problemen (Kubsch et al., 2019; Anderson & Schunn, 2000). Die Wissensstruktur von Expertinnen und Experten ist somit erst durch die Leitideen wesentlich integrierter als die von Novizinnen und Novizen (vgl. hier Abschnitt 2.2.2). Damit einhergehend nutzen auch Expertinnen und Experten die Leitideen übermäßig häufig zur Lösung von Problemen (Bransford et al., 2000). Die Organisation rund um diese Bereiche in der Wissensstruktur unterscheidet sich grundsätzlich bei Expertinnen und

Experten von Novizinnen und Novizen und bestimmt damit die Herangehensweise an Aufgaben und komplexe Probleme (Chi et al., 1981).

Die vorteilhafte Organisation von Wissensstrukturen rund um Leitideen spielt für die Gestaltung von Lehr-Lernprozessen eine wichtige Rolle. So können Leitideen als Strukturierungshilfe im Sinne eines *Advanced Organizer* (Ausubel, 1974) dienen, auf die regelmäßig in Lehr-Lernprozessen eingegangen wird (Neumann et al., 2008). Zugleich dienen Leitideen in besonderem Maße zur Anknüpfung neuer Ideen an die bestehende Wissensstruktur und können auf diese Weise kumulatives Lernen unterstützen (z.B. Luiten et al., 1980). In diesem Sinne sind die Leitideen nicht nur weitere Inhalte in den Naturwissenschaften, die erlernt werden sollen, sondern dienen vielmehr als ein strukturierendes Element für das Erlernen naturwissenschaftlicher Inhalte (Demuth et al., 2005; Duschl et al., 2007).

Die Stärke von Leitideen einer Fachdomäne, d.h. ihre hohe Erklärungsmächtigkeit und ihre Organisation der Wissensstruktur durch einen hohen Abstraktionsgrad bei gleichzeitiger Strukturierung von Lehr-Lernprozessen, stellt gleichermaßen auch eine Herausforderung an das Erlernen dieser Leitideen dar. Solche um die Leitideen organisierte Wissensstrukturen lassen sich nicht innerhalb einiger weniger Unterrichtsstunden entwickeln (Bernholt et al., 2018; Bransford et al., 2000; Neumann et al., 2013). Die starke Dekontextualisierung und Abstraktion von Leitideen (H. E. Fischer et al., 2007) erschwert die Entwicklung von um Leitideen organisierte Wissensstrukturen. Um dem hohen Maß an Abstraktion von Leitideen zu begegnen, müssen Leitideen deshalb wiederkehrend in verschiedenen Problemlösekonstellationen und Kontexten angewendet werden (Bernholt et al., 2020; Linn, 2006; Neumann et al., 2008). Für den naturwissenschaftlichen Unterricht bedeutet das eine Strukturierung eines Lehrplans oder Unterrichtsgangs organisiert um die Leitideen der Fachdomäne, damit regelmäßig Verbindungen zwischen Ideen hergestellt, verstärkt und verfeinert werden können (Bransford et al., 2000; Linn, 2006). Erste Überlegungen zu einer solchen Strukturierung entwickelte bereits Bruner (1980) unter dem Begriff des Spiralcurriculums. In einem Spiralcurriculum beginnen Schülerinnen und Schüler bereits früh im Unterricht mit dem Erlernen grundlegender und komplexer Leitideen der Fachdomäne und greifen diese im Lauf weiterer Unterrichtsjahre auf höheren Komplexitätsstufen regelmäßig wieder auf (H. E. Fischer et al., 2007). Auch die Bedeutung des Spiralcurriculums ist hier nicht rein auf die naturwissenschaftliche Domäne beschränkt. So sind bspw. die inhaltsbezogenen mathematischen Kompetenzen in Deutschland durch Leitideen wie „Zahlen und

Operationen“ beschrieben, wodurch der Zahlbegriff über die verschiedenen Jahrgänge von den natürlichen und ganzen Zahlen bis hin zu rationalen und reellen Zahlen entwickelt und damit der Zahlbereich sukzessiv und fachlich kohärent gemäß eines Spiralcurriculums entwickelt wird (KMK, 2003; Vollrath & Weigand, 2009).

In den letzten Jahrzehnten wurden deshalb vermehrt Anstrengungen unternommen, naturwissenschaftliche Unterrichtsgänge und Lehrpläne rund um Leitideen der Fachdomäne zu organisieren (z.B. KMK, 2005; NGSS Lead States, 2013). Ein erster Schritt war die explizite Benennung von Leitideen eines Fachs zur Organisation des Fachinhalts, wie an den in den NGSS eingeführten *disciplinary core ideas* oder auch anhand der Basiskonzepte der naturwissenschaftlichen Fächer in Deutschland zu sehen ist (KMK, 2005, 2004b, 2004a). Bei der Einführung von Leitideen in einen naturwissenschaftlichen Lehrplan bzw. dessen Ausrichtung und Strukturierung nach Leitideen gibt es jedoch unterschiedliche Perspektiven zu beachten. So kann zum einen die Strukturierung eines Lehrplans nach einer Leitidee bzw. dessen spiralförmiger Entwicklung streng formal nach der fachlichen Domäne bzw. dem fachlichen Inhalt strukturiert werden. Ein Beispiel hierfür ist die o.g. Entwicklung des Zahlbegriffs im Mathematikunterricht. Hier können sowohl die ganzen Zahlen und darauffolgend die rationalen Zahlen durch eine Zahlbereichserweiterung mathematisch formal aus den natürlichen Zahlen entwickelt werden. Dementsprechend werden in der Schule zunächst die natürlichen vor den ganzen bzw. rationalen Zahlen erlernt. Zum anderen kann aber die Strukturierung eines Lehrplans nach einer Leitidee auch an der Entwicklung der Schülerinnen und Schüler orientiert werden und auf diese Weise die Erkenntnisse von Conceptual Change und der Bedeutung des Vorwissens von Schülerinnen und Schülern aufgreifen (Duit et al., 2012 bzw. vgl. Kapitel 2.2.2). Da ein Verständnis von Leitideen im Allgemeinen jedoch über mehrere Schuljahre entwickelt werden muss, ist es für die fachdidaktische Forschung und Unterrichtsentwicklung wichtig, diese Verständnisenwicklung einer Leitidee in Modellen zu beschreiben (Neumann, 2020; Schecker & Parchmann, 2006). Die Beschreibung findet unter dem international etablierten Begriff der *Learning Progression* statt (Bernholt et al., 2018; Lehrer & Schauble, 2015; Krajcik et al., 2012; Duncan & Hmelo-Silver, 2009).

### Learning Progressions

Learning Progressions sind nach Bernholt et al. (2018) fachspezifische Modelle Lehren und Lernens und in den Naturwissenschaften eng mit den in den Kapiteln 2.2.1 und 2.2.2

genannten Lerntheorien und Modellen verknüpft bzw. bauen auf diesen auf (Duncan & Gotwals, 2015). Im Allgemeinen wird in einer Learning Progression die Entwicklung einer domänenspezifischen Kompetenz beschrieben (Krajcik et al., 2012). Die Kompetenz hat hier jeweils eine hohe Bedeutung für die entsprechende Domäne und kann sowohl inhaltlich in Form fachlicher Leitideen als auch methodisch in Form zentraler naturwissenschaftlicher Fähigkeiten sein. Beispiele für Learning Progressions zu zentralen Fähigkeiten finden sich bei Schwarz et al. (2009) zum naturwissenschaftlichen Modellieren oder bei Berland & McNeill (2010) zum naturwissenschaftlichen Argumentieren. Als Beispiel einer Learning Progression zu einer Leitidee bietet sich vor allem die Entwicklung des Energieverständnisses im Physikunterricht bzw. allgemein im naturwissenschaftlichen Unterricht an (Herrmann-Abell & DeBoer, 2018; Lacy et al., 2014; Neumann et al., 2013; H. Lee & Liu, 2010; Liu & McKeough, 2005).

In beiden Fällen beschreibt eine Learning Progression ausgehend von typischen Präkonzepten der Schülerinnen und Schüler ausgehend von einer unteren Stufe (engl. lower anchor) die Kompetenzentwicklung entlang mehrerer Kompetenzstufen und endet mit einer höchsten Stufe (engl. upper anchor). Die Kompetenz wird dementsprechend durch die Beschreibung der höchsten Kompetenzstufe in der Learning Progression charakterisiert (Duncan & Hmelo-Silver, 2009). Die höchste Kompetenzstufe entspricht dabei zumeist die fachlich adäquate Leitidee bzw. deren Anwendung oder der vollständigen Fähigkeit aus fachlicher Perspektive (z.B. Duit, 2014), kann aber auch anhand politischer Zielvorgaben in Form von Standards festgelegt werden (vgl. z.B. KMK, 2005). Neben der zuvor genannten Fokussierung auf eine domänenspezifische Kompetenz zeichnet sich eine Learning Progression dadurch aus, dass Kompetenzen und deren Aufbau nicht nur auf Grundlage fachlicher Überlegungen entwickelt werden, sondern zunehmend auch lernpsychologische Theorien und empirische Erkenntnisse zum Lernen von Schülerinnen und Schülern in Bezug auf die Kompetenz einbezogen werden (Bernholt et al., 2018; Duschl et al., 2007). In Verbindung mit der Beschreibung von Kompetenzstufen bildet eine Learning Progression so eine Beschreibung kumulativen Lernens in Bezug auf die domänenspezifische Kompetenz (Neumann, 2020). Gleichzeitig bildet sie eine Grundlage zur vertikalen Vernetzung domänenspezifischer Inhalte (Bernholt et al., 2018; Neumann et al., 2008). Eine Learning Progression dient in dem Sinne nicht nur der Diagnostik, d.h. der Ermittlung von Kompetenzen einer Schülerin bzw. eines Schülers (Schecker & Parchmann, 2006), sondern unterstützt auch den domänenspezifischen Aufbau von Kompetenzen in Lehr-Lernprozessen (Bernholt et

al., 2018). Erkenntnisse über den domänenspezifischen Aufbau von Kompetenzen entlang einer Learning Progression sind somit die Voraussetzung für die Förderung kumulativen Lernens (Duncan & Hmelo-Silver, 2009).

Die Beschreibung der Entwicklung verschiedener Kompetenzen (u.a. zum Aufbau verschiedener Leitideen oder zentraler naturwissenschaftlicher Fähigkeiten) mittels einer Learning Progressions hat in den letzten zwei Jahrzehnten zugenommen (z.B. Morell et al., 2017; Neumann et al., 2013; Schwarz et al., 2009). Am Anfang der Entwicklung einer Learning Progression steht zumeist eine hypothetische Formulierung in Form der einzelnen Stufen der Learning Progression (Bernholt et al., 2018). Die Formulierung einer hypothetischen Learning Progression basiert sowohl auf allgemeinen Lerntheorien als auch auf fachspezifischen Aspekten (Duit et al., 2012; Duncan & Hmelo-Silver, 2009). So berücksichtigt bspw. eine Learning Progression für Materie idealerweise, dass aus fachinhaltlicher Perspektive Schülerinnen und Schüler Materie zunächst mithilfe von (unteilbaren) Teilchen beschreiben und erst dann zwischen den Arten der Teilchen (Atome, Moleküle, Ladungen) unterscheiden (vgl. Hadenfeldt et al., 2014). Zusätzlich sollten in die hypothetische Formulierung einer Learning Progression Präkonzepte von Schülerinnen und Schüler eingehen, da sie zusätzlich eine eigene vielleicht zunächst nicht fachlich adäquate (Zwischen-)stufe einer Learning Progression darstellen können (Fortus & Krajcik, 2012). Das Erreichen einer fachlich nicht adäquaten Stufe erscheint zunächst nicht als erstrebenswert, kann jedoch mit Blick auf die Perspektive der Schülerinnen und Schüler eine kohärente Weiterentwicklung einer Stufe bzw. Grundlage für das Erreichen einer weiteren Stufe darstellen und in diesem Sinne ein wichtiger Schritt der Kompetenzentwicklung sein (Hammer & Sikorski, 2015). Die Formulierung einer hypothetischen Learning Progression erfolgt jedoch normalerweise anhand fachspezifischer Aspekte (Bernholt et al., 2018). Die hypothetische Learning Progression umfasst in dem Zuge zumeist nur einen einzigen idealisierten Lernweg, der den Aufbau von Kompetenzen entlang der Stufen anhand fachlicher Überlegungen beschreibt (Duncan & Gotwals, 2015). Mit Blick auf die individuellen Lernvoraussetzungen und Präkonzepte von Schülerinnen und Schülern sollte eine Learning Progression deshalb auch möglichst mehrere Lernwege beschreiben (Bernholt et al., 2018; Duncan & Gotwals, 2015).

Im Anschluss an die Formulierung einer hypothetischen Learning Progression wird die Learning Progression mithilfe zwei verschiedener Zugänge empirisch geprüft. Beim ersten Zugang werden Querschnittsuntersuchungen zum Kompetenzstand der

Schülerinnen und Schüler in Form von Leistungstests durchgeführt und die Kompetenz hinsichtlich der Stufen in der hypothetischen Learning Progression verglichen (z.B. Neumann et al., 2013; Schwarz et al., 2009). Beim zweiten Zugang werden zur hypothetischen Learning Progression passende Instruktionsmaßnahmen entwickelt und diese Maßnahmen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit im Unterricht bzw. der Kompetenzentwicklung empirisch geprüft (Bernholt et al., 2018). Die Maßnahmen können sowohl neu entwickelte Lehrpläne als auch konkrete Unterrichtseinheiten in Form von Schulbüchern oder Unterrichtsmaterialien sein. Es zeigt sich jedoch in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung, dass zumeist der erste Ansatz zur empirischen Prüfung einer Learning Progression Anwendung findet (Bernholt et al., 2018; Hammer & Sikorski, 2015), obwohl in der entsprechenden Forschung ebenfalls betont wird, dass zu einer vollständigen Learning Progression auch die Entwicklung von Instruktionsmaßnahmen gehören (Duschl et al., 2007). In diesem Zusammenhang und als Reaktion auf fehlende Instruktionsmaßnahmen für die konkrete Gestaltung von Unterricht wird im Allgemein auch eine empirische Prüfung anhand beider Ansätze vorgeschlagen (Bernholt et al., 2018; Lehrer & Schauble, 2015). So können aufbauend auf einer empirischen Prüfung anhand von Querschnittsuntersuchungen im Anschluss Instruktionsmaßnahmen entwickelt und hinsichtlich ihrer Wirksamkeit evaluiert werden, die wiederum die hypothetische Learning Progression verfeinern und gleichzeitig die konkrete Gestaltung von Unterricht unterstützen (vgl. Bakker, 2018; Bernholt et al., 2018).

### 2.2.4. Situiertes Lernen

Die bisherige Betrachtung vom Lernen in den Naturwissenschaften beschränkte sich vor allem auf individuelle Faktoren aus einer konstruktivistisch-kognitivistischen Perspektive und findet sich als zusammenfassende Analyse insbesondere im Buch von Bransford et al. (2000) wieder. Erkenntnisse aus der neueren Lehr-Lernforschung ergänzen diese Betrachtung mittlerweile um den Einfluss von soziokulturellen Hintergründen und der Lernumgebung auf das Lernen von Schülerinnen und Schülern in den Naturwissenschaften (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2018). Demnach entwickeln Schülerinnen und Schüler ein unterschiedliches Wissen in Abhängigkeit von kulturellen, sozialen, kognitiven und biologischen Faktoren. Der Einfluss dieser Faktoren auf das Lernen in den Naturwissenschaften ist nicht neu (z.B. Greeno, 1998; Lave & Wenger, 1991; Brown et al., 1989), wurde jedoch durch neue

Analysen in den Kognitionswissenschaften wieder aufgegriffen, da unterschiedliche Gehirnaktivitäten und Wissensentwicklungen bei Individuen in Abhängigkeit von unterschiedlichen sozialen und kulturellen Einflüssen gemessen wurden (z.B. Immordino-Yang & K. W. Fischer, 2010; Hackman & Farah, 2009).

Der zusätzliche Einfluss unterschiedlicher Lernumgebungen auf das Lernen von Schülerinnen und Schülern wird von Sadler (2009) in zwei fiktiven Unterrichtsszenarien beschrieben:

Im ersten Szenario soll eine Schülerin oder ein Schüler mit wenig Erfahrung in Genetik oder Biotechnologie eine strukturierte Versuchsanleitung befolgen, um eine DNA-Probe mithilfe der Polymerase-Kettenreaktion (PCR) zu vervielfältigen. Die Schülerin oder der Schüler kann die Aufgabe in der Folge zwar mithilfe der strukturierten Versuchsanleitung und mit geeignetem gestelltem Material erfolgreich ausführen. Jedoch ist unklar, ob die Schülerin oder der Schüler auch etwas über Genetik gelernt oder vielmehr die korrekte Befolgung der Versuchsanleitung erlernt hat. Kontrastiert wird das erste durch ein zweites Szenario, in dem die Schülerin oder der Schüler an einem naturwissenschaftlichen Ferienprogramm teilnimmt und in einem Forschungslabor arbeitet. Hier macht die Schülerin oder der Schüler Bekanntschaft mit Forschenden und wird in ein größeres naturwissenschaftliches Forschungsprogramm eingeführt. Es werden ähnliche bis gleiche Arbeitsschritte zur Vervielfältigung einer DNA-Probe erlernt, um neue Kreuzungen zu entwickeln.

Sadler (2009) nutzt die beiden Szenarien, um die Bandbreite unterschiedlicher sozialer Umgebungen und Kontexte darzustellen, in denen Lernen stattfinden kann. Lernen ist demnach ständig situiert, wobei unterschiedliche soziale Umgebungen und Kontexte auch eine unterschiedliche Partizipation zulassen können (Mikelskis-Seifert & Duit, 2010; Barab & Plucker, 2002). Nach Sadler (2009) führt im ersten Szenario die künstliche Situation in einer wenig authentischen Lernumgebung zu einer Lücke zwischen dem Ziel, etwas über Genetik zu lernen und der eigentlichen Handlung, d.h. eine strukturierte Versuchsanleitung zu befolgen. Im zweiten Szenario findet dagegen Lernen in einer authentischen Lernumgebung statt; die Schülerin oder der Schüler ist in einer sozialen und inhaltlichen Gemeinschaft eingebunden (engl. Community of Practice; Sadler, 2009). Im zweiten Szenario beschäftigt sich die Schülerin oder der Schüler zudem mit einem naturwissenschaftlichen Phänomen bzw. Problem und nimmt an der Lösung des Problems teil. Die authentische Lernumgebung im zweiten Szenario unterstützt auf diese Weise die Anwendung und damit den Transfer von Wissen zur Lösung eines

naturwissenschaftlichen Problems (vgl. auch National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2018). Selbstverständlich kann Lernen nicht ständig wie im zweiten fiktiven Szenario ablaufen bzw. Lernumgebungen von der Schule in ein naturwissenschaftliches Forschungslabor verlegt werden, um authentisch zu sein. Sadler (2009) verdeutlicht jedoch anhand der beiden Szenarien die Wirkung sozialer Faktoren und Lernumgebungen auf das Lernen.

Die Beachtung des sozialen Kontexts für das Lernen von Schülerinnen und Schülern wird insbesondere unter der Theorie des situierten Lernens (*engl. Situated Learning*) zusammengefasst (u.a. Greeno & Engeström, 2014; Anderson et al., 1996; Lave & Wenger, 1991). Entsprechend der Theorie des situierten Lernens ist Lernen wie in konstruktivistischen Lernumgebungen nicht nur hoch individuell, sondern auch ständig situiert und damit in einen sozialen Kontext eingebunden (Greeno, 1998; Lave & Wenger, 1991). Der Kontext wird durch kulturelle, individuelle und weitere Faktoren gebildet und somit auch von einer Lerngruppe bzw. einer Lehrkraft aktiv mitgestaltet (Lave & Wenger, 1991).

Im Zusammenhang mit der Theorie des situierten Lernens nach Lave & Wenger (1991) ist zu betonen, dass der Kontextbegriff sich insbesondere auf die soziale Dimension von Lehren und Lernen und dessen Rolle für das individuelle Lernen bezieht. Im schulischen Umfeld wird bspw. die Rolle der sozialen Beziehungen zwischen Schülerinnen und Schülern bzw. deren soziale Umwelt in Lehr-Lernprozess betrachtet und im Allgemeinen die Situation, in der ein Lehr-Lernprozess stattfindet. In der Folge kann der Kontext als für den Lehr-Lernprozess passend oder unpassend gemessen an der Authentizität bewertet werden (Sadler, 2009). Zu unterscheiden ist der Kontextbegriff deswegen vom Kontextbegriff im naturwissenschaftsdidaktischen Sinne in Bezug auf einen naturwissenschaftlichen Inhalt, der in der Folge als inhaltlicher Kontext bezeichnet wird. In Bezug auf einen naturwissenschaftlichen Inhalt bildet der inhaltliche Kontext das Exemplarische, mit dem sich die Schülerinnen und Schüler beschäftigen sollen, um anhand des Exemplarischen Erkenntnisse zu abstrahieren bzw. zu konkretisieren und Analogien zu bilden (Duit & Mikelskis-Seifert, 2015; Muckenfuß, 1995; Wagenschein, 1991, 1976). Der inhaltliche Kontext dient gleichzeitig zur Motivation eines naturwissenschaftlichen Inhalts und kann sich in der Folge lernförderlich für eine aktive Wissenskonstruktion von Schülerinnen und Schülern auswirken (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2018).

Insgesamt ist somit sowohl der soziale als auch der inhaltliche Kontext für die Gestaltung von Lehr-Lernprozessen zu beachten. Die Theorie des situierten Lernens ergänzt dabei die konstruktivistische Auffassung von Lernen in den Naturwissenschaften, nach der Schülerinnen und Schüler individuell Wissen konstruieren, um eine soziale Dimension (vgl. auch Riemeier, 2007). Zur Förderung kumulativen Lernens sollte demnach die Situietheit von Lernen in die Planung von Lehr-Lernprozesse eingebunden werden.

### 2.2.5. Zusammenfassung und Synthese des theoretischen Forschungsstands

Kumulativ wird Lernen bezeichnet, wenn in einem Lehr-Lernprozess Kompetenzen sukzessiv über mehrere Jahre hinweg aufgebaut werden (Neumann et al., 2008). Die Theorie des kumulativen Lernens hat insbesondere für die Naturwissenschaften eine hohe Bedeutung. Durch die fachinterne Kohärenz der Naturwissenschaften ist vor allem bei der Entwicklung naturwissenschaftlicher Kompetenzen eine Gliederung in Teilkompetenzen nötig, die an der Fachdomäne orientiert ist (Helmke, 2009).

Die Analyse der einschlägigen Literatur zeigt hier, dass zur Förderung von Lernen im Allgemeinen und insbesondere zur Förderung kumulativen Lernens in den Naturwissenschaften gewisse Anforderungen erfüllt werden müssen. Zu den Anforderungen gehört erstens eine konstruktivistische Auffassung von Lehren und Lernen für die Gestaltung von Lehr-Lernprozessen. Für eine solche Gestaltung sollte beachtet werden, dass eine Kompetenzentwicklung nicht durch die reine Weitergabe von Wissen durch eine Lehrperson erfolgt, sondern vielmehr Lernangebote der Wissens- und Bedeutungskonstruktion dienen (C. von Aufschnaiter, 1999; S. von Aufschnaiter & Welzel, 1997). Zweitens reicht eine rein konstruktivistische Sichtweise auf Lehr-Lernprozesse nicht aus, um kumulatives Lernen zu fördern. Vielmehr müssen auch kognitivistische Theorien beachtet werden. Ein besonderes Augenmerk liegt hier auf der aktiven Vernetzung von Fachinhalten innerhalb einer naturwissenschaftlichen Domäne. Sowohl in der Theorie der Wissensintegration als auch im Modell vertikaler Vernetzung wird hierfür das Wissen von Individuen als Netzwerke aufgefasst (H. E. Fischer et al., 2007; Linn, 2006; Bransford et al., 2000). Für die Entwicklung eines integrierten Wissensnetzwerks reicht das einfache Hinzufügen weiterer Ideen zum Netzwerk nicht aus, so dass zusätzlich auch Lerngelegenheiten zur Vernetzung, Verstärkung und Verfeinerung von Verbindungen zwischen Ideen geschaffen werden müssen (Neumann et al., 2008; Linn, 2006).

In besonderem Maße eignen sich drittens zur Vernetzung von Ideen innerhalb eines Wissensnetzwerks die Leitideen einer Fachdomäne, die regelmäßig und über Jahre hinweg aufgegriffen werden müssen (H. E. Fischer et al., 2007; Bransford et al., 2000). Zur Vernetzung anhand der Leitideen einer Fachdomäne müssen viertens empirisch valide Learning Progressions zur Kompetenzentwicklung von Schülerinnen und Schülern vorliegen, um Lehr-Lernprozesse ausgerichtet am Kompetenzstand der Schülerinnen und Schüler zu entwickeln (Neumann, 2020; Bernholt et al., 2018). Die Nutzung empirisch valider Learning Progression für Lehr-Lernprozesse ist als Anforderung an kumulatives Lernen zentral und hebt sich von den anderen Anforderungen ab. So sind zwar die weiteren Anforderungen zur Beschreibung allgemeiner und naturwissenschaftlicher Lehr-Lernprozesse wichtig, jedoch ist eine Learning Progression auf den fachlichen Inhalt spezifiziert und ermöglicht erst durch die Spezifizierung eine konkrete Entwicklung fachlicher Lehr-Lernprozesse. Demnach ist ohne eine Learning Progression die Entwicklung eines naturwissenschaftlichen Unterrichts zur Förderung kumulativen Lernens nicht möglich (Neumann & Nordine, 2021; Bernholt et al., 2018).

Abschließend müssen neben diesen Theorien und Modellen zum individuellen Lernen in der Naturwissenschaften fünftens auch soziale und kulturelle Einflüsse auf den Lehr-Lernprozess beachtet werden (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2018). Hierzu gehört die Schaffung von Lernangeboten, die gemäß der Theorie des situierten Lernens einen sozialen Kontext für authentisches Lernen schafft und dies mit einem inhaltlichen Kontext verbindet. Der inhaltliche Kontext bildet demnach einen Rahmen für den Lehr-Lernprozess und kann durch eine Lehrkraft und eine entsprechend gestaltete Lernumgebung motivations- bzw. lernförderlich gestaltet werden (Greeno & Engeström, 2014; Lave & Wenger, 1991).

Insgesamt werden auf diese Weise fünf Anforderungen für die Gestaltung von Lehr-Lernprozessen zur Förderung kumulativen Lernens formuliert. Ähnliche Anforderungen an kumulatives Lernen wurden u.a. auch von John und Starauschek (2021) für die Gestaltung von Lehr-Lernprozessen im Lehramtsstudium Physik formuliert. Aus ebenfalls lernpsychologischen Ansätzen wie dem nach Gagné (1970) und Ausubel (1974) leiteten die Autoren Bedingungen für das kumulative Lehren und Lernen im naturwissenschaftlichen Lehramt an der Hochschule ab. Zu den Bedingungen zählt insbesondere das regelmäßige „Wiederaufgreifen von zentralen Konzepten bzw. Leitideen“ (John & Starauschek, 2021, S. 29) im Sinne eines Spiralcurriculums. Außerdem soll ebenfalls auf Vorwissen strukturierend aufgebaut und das Vorwissen mit neuen

Wissenselementen vernetzt werden. Als letzte wichtige Bedingung wird „das wiederholende Anwenden der Grundkonzepte in variablen Kontexten“ (John & Starauschek, 2021, S. 30) genannt.

Ein Vergleich zwischen der o.g. fünf Anforderungen und denen von John und Starauschek (2021) zeigt eine hohe inhaltliche Übereinstimmung der Anforderungen für kumulatives Lernen. Dementsprechend bilden die fünf Anforderungen auch eine solide theoretische Basis sowohl für die Gestaltung eines übergeordneten naturwissenschaftlichen Unterrichtsgangs über Schuljahre hinweg als auch für einzelne Lehr-Lernprozesse und Unterrichtsstunden. Die Anforderungen sind dabei jedoch keinesfalls als disjunkt anzusehen. Vielmehr stehen die fünf Anforderungen miteinander in Beziehung und bedingen sich teilweise gegenseitig. So ist bspw. ein regelmäßiges Aufgreifen von Leitideen im Unterricht nicht effektiv, wenn es nicht an der Kompetenzentwicklung der Schülerinnen und Schüler orientiert ist (Neumann, 2020). Gleichzeitig wird eine Vernetzung zwischen naturwissenschaftlichen Ideen erschwert, wenn die Schülerinnen und Schüler nicht aktiv durch eine Bedeutungskonstruktion diese Verbindung zwischen den Ideen herstellen (C. von Aufschnaiter, 1999). Im Folgenden sind daher die fünf Anforderungen an einen Unterricht zur Förderung kumulativen Lernens als verbunden anzusehen, so dass die Betrachtung einer spezifischen Anforderung nicht ohne die Beeinflussung weiterer Anforderungen geschieht.

### 2.3. Problemstellung

Im vorigen Abschnitt wurden die theoretischen Grundlagen für kumulatives Lernen dargestellt und Anforderungen an einen Unterricht zur Förderung kumulativen Lernens hergeleitet. In einem derartigen Unterricht müssen demnach Leitideen der Fachdomäne regelmäßig auf verschiedenen Konzeptualisierungsstufen und über Jahre hinweg aufgegriffen werden, um auf diese Weise verschiedene Ideen der Fachdomäne miteinander zu vernetzen. Der Unterricht zu den Leitideen sollte in einem motivationsfördernden und authentischen Kontext stattfinden und gleichzeitig am Kenntnisstand der Schülerinnen und Schüler orientiert sein, um aktive Bedeutungskonstruktionen zu ermöglichen.

Die theoretische Grundüberlegung, dass Schülerinnen und Schüler für den Kompetenzerwerb kumulativ lernen sollten, ist nicht neu und erste Überlegungen hierzu wurden bereits in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts angestellt (z.B. Ausubel, 1974; Gagné, 1970). Die eingangs genannten Befunde von Baumert et al. (1997) bzw. Schmidt et

al. (2005) zur mangelnden Kohärenz in den Lehrplänen des naturwissenschaftlichen Unterrichts befeuerten jedoch Anfang des 21. Jahrhunderts die Diskussion um kumulatives Lernen ( Wodzinski, 2020; H. E. Fischer et al., 2007; Lau, 2011; Schecker & Wiesner, 2007). Im Zuge der Einführung der Bildungsstandards für den Mittleren Schulabschluss in den naturwissenschaftlichen Fächern wurden in Deutschland schließlich das Ziel der Förderung kumulativen Lernens formuliert. Zur Förderung kumulativen Lernens im Physikunterricht heißt es hierzu in den Bildungsstandards für das Fach Physik (2005):

„Die in vier Kompetenzbereichen festgelegten Standards beschreiben die notwendige physikalische Grundbildung. Die im Kompetenzbereich Fachwissen vorgenommene vertikale Vernetzung durch die übergeordneten vier Basiskonzepte Materie, Wechselwirkung, System und Energie soll den Schülerinnen und Schülern kumulatives Lernen erleichtern. Zugleich wird auf Basis des Fachwissens der Kompetenzerwerb in den Bereichen Erkenntnisgewinnung, Kommunikation und Bewerten ermöglicht und das Fachwissen in gesellschaftlichen und alltagsrelevanten Kontexten angewandt.“

- (KMK, 2005, S. 7)

Die KMK-Bildungsstandards geben demnach vor, dass die Kompetenzen im Fach Physik anhand der vier Basiskonzepte entwickelt werden sollen, um kumulatives Lernen zu fördern. Die Basiskonzepte können hier ähnlich wie die core ideas in den amerikanischen NGSS (2013) als Leitideen einer naturwissenschaftlichen Domäne angesehen werden. Zudem soll eine vertikale Vernetzung durch den Einsatz der Leitideen erreicht und in der Folge kumulatives Lernen gefördert werden. Ebenso wird die Anwendung von Wissen in authentischen Kontexten als (politische) Forderung an den naturwissenschaftlichen Unterricht gefordert. Vergleicht man die fünf Anforderungen an kumulatives Lernen mit der Zielformulierung zum kumulativen Lernen in den Bildungsstandards, so lassen sich begrifflich zwar viele Übereinstimmungen finden. Die Bildungsstandards legen jedoch nicht fest, wie bspw. eine entsprechende Strukturierung des Fachwissens anhand der Basiskonzepte aussehen soll. Die Konkretisierung obliegt den jeweiligen Bundesländern in Form von Lehrplänen bzw. den Schulen in Form schulspezifischer Curricula. Dies führt in der Folge zu einer sehr unterschiedlichen Umsetzung der Bildungsstandards:

Im niedersächsischen Lehrplan für die Sekundarstufe I wird bspw. das Fachwissen (die inhaltsbezogene Kompetenz gemäß der Bildungsstandards) in die klassischen Themenbereiche Energie, Thermodynamik, Magnetismus und Elektrizität, Mechanik, Optik und Kernphysik unterteilt. Demnach findet eine klassische Einteilung statt, in der die Basiskonzepte zur Strukturierung des Fachwissens faktisch keine Rolle spielen (vgl. Niedersächsisches Kultusministerium, 2015). Im Kernlehrplan Nordrhein-Westfalen für das Fach Physik ist dagegen das Fachwissen in Kompetenzbereiche und Inhaltsfelder gegliedert (Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, 2019, 2008). Die Inhaltsfelder entsprechen dabei den klassischen Themenbereichen wie im Niedersächsischen Lehrplan, die Kompetenzbereiche beschreiben die prozess- und inhaltsbezogenen Kompetenzen der KMK-Bildungsstandards. Je Inhaltsfeld werden zudem die Beiträge zu den Basiskonzepten genannt. Im Inhaltsfeld „Licht“ mit den Schwerpunkten auf die Ausbreitung des Lichts und das Lichtstrahlenmodell soll bspw. der Beitrag zum Basiskonzept Energie sein, dass Lichtquellen Energiewandler sind und Licht Energie transportiert (Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, 2019, S. 29). Im Lehrplan Nordrhein-Westfalen werden somit die Basiskonzepte in die fachlichen Inhaltsfelder integriert. Es zeigt sich aber auch hier, dass das fachliche Inhaltsfeld die Struktur vorgibt und die Beiträge zu den Basiskonzepten vielmehr eine Empfehlung sind, aus welcher fachlichen Perspektive die Basiskonzepte im Inhaltsfeld thematisiert werden können.

Anhand der Beispiele ist zu sehen, dass die Basiskonzepte der Bildungsstandards je nach Bundesland sehr unterschiedlich umgesetzt werden. Gemeinsam zeigen die Beispiele jedoch auch, dass die Basiskonzepte nicht zur Strukturierung des Fachwissens oder zur Vernetzung von Inhaltsgebieten verwendet werden. Die Anforderungen an einen Unterricht zur Förderung kumulativen Lernens werden demnach nicht umgesetzt.

Eine klassische Einteilung nach Inhaltsgebieten statt einer Strukturierung nach Basiskonzepten ist auch in den Schulbüchern für den Physikunterricht zu sehen (z.B. Appel, 2016). Die Entwicklung der Schulbücher folgt hier den landesspezifischen Lehrplänen und setzen in dem Sinne nicht die Strukturierung eines Schulbuchs anhand von Basiskonzepten, sondern ebenfalls nur die politischen Vorgaben der Bildungsstandards um (z.B. Gleixner et al., 2020; Bader & Dorn, 2016).

Insgesamt ist somit eine Diskrepanz zwischen Forschung bzgl. eines Unterrichts zur Förderung kumulativen Lernens und der Schulpraxis zu erkennen (Braaten, 2019; Gräsel & Parchmann, 2004). Die formulierten Zielvorgaben durch die Bildungsstandards sind

letztendlich nicht ausreichend und werden in den landesspezifischen Lehrplänen und damit auch in der Praxis nicht zufriedenstellend umgesetzt (z.B. Bernholt et al., 2020). Hierzu gehört insbesondere die Strukturierung des Fachwissens anhand der Basiskonzepte zur Förderung kumulativen Lernens. Dies lässt sich auch darauf zurückführen, dass die Bildungsstandards und auch die landesspezifischen Lehrpläne nicht konkret genug in der Frage sind, wie Basiskonzepte im Unterricht zur Förderung kumulativen Lernens genutzt werden können. Es fehlen zudem unterrichtspraktische Beispiele, wie Schulen und Lehrkräfte kumulatives Lernen durch Basiskonzepte fördern können. Dies ist sicher auch auf fehlende Erkenntnisse zur Kompetenzentwicklung in Bezug auf die Basiskonzepte zurückzuführen. Fehlende Erkenntnisse zur Kompetenzentwicklung wurden schließlich erst in den letzten Jahren vor allem durch die Formulierung von Learning Progressions gewonnen (vgl. Bernholt et al., 2018; Lehrer & Schauble, 2015). Diese neuen Erkenntnisse gehen bisher nicht in die Formulierung politischer Vorgaben wie die Bildungsstandards und die landesspezifischen Lehrpläne ein. Gerade diese Erkenntnisse braucht es aber, um das Fachwissen anhand von Basiskonzepten orientiert an der Kompetenzentwicklung von Schülerinnen und Schülern zu strukturieren (Neumann, 2020; Schecker & Parchmann, 2006).

Die Umsetzung der Erkenntnisse zur Kompetenzentwicklung in der Praxis würde zudem wiederum der naturwissenschaftlichen Lehr-Lernforschung helfen. So fehlen insgesamt unterrichtspraktische Beispiele in Form von Instruktionsmaßnahmen, die die Kompetenzentwicklung von Schülerinnen und Schülern entlang der formulierten Kompetenzstufen einer Learning Progression fördern. Eine Entwicklung solcher Instruktionsmaßnahmen würde durch eine Erprobung deren Wirksamkeit validieren und die Learning Progression schließlich wiederum bestätigen (vgl. Bernholt et al., 2018; Krajcik et al., 2012).

In dieser Arbeit sollen daher die vorgestellte Diskrepanz zwischen Forschung und Praxis (Braaten, 2019; Gräsel & Parchmann, 2004) adressiert und eine entsprechende Instruktionsmaßnahme auf Grundlage der fünf Anforderungen an kumulatives Lernen entwickelt und evaluiert werden. Zur Lösung der Diskrepanz zwischen Forschung und Praxis wird zur Entwicklung und Evaluation der Instruktionsmaßnahme ein Design-Based Research-Ansatz gewählt (Bakker, 2018; McKenney & Reeves, 2012). Der Ansatz wird im Folgenden vorgestellt, von anderen ähnlichen Forschungsansätzen abgegrenzt und schließlich dargestellt, warum sich Design-Based Research als Forschungsansatz in besonderem Maße für diese Arbeit eignet.

### 2.3.1. Design-Based Research

Design-Based Research ist ein vergleichsweise neuer Forschungsansatz in den empirischen Bildungswissenschaften und wurde erst zu Beginn der 90er Jahre explizit verwendet (z.B. Brown, 1992). Seitdem wurde Design-Based Research unter vielen verschiedenen Termini wie bspw. Design Research (Bakker, 2018; McKenney & Reeves, 2018) oder auch Development Research (Van den Akker, 1999) verwendet. In der vorliegenden Arbeit wird der Terminus Design-Based Research verwendet, da sich dieser insbesondere in der deutschen Fachdidaktik durchgesetzt hat (Reinmann, 2005).

Während über den Begriff noch weiterhin diskutiert wird, herrscht überwiegend Einigkeit über die zentralen Eigenschaften von Design-Based Research als Forschungsansatz (Bakker, 2018; McKenney & Reeves, 2018; Plomp & Nieveen, 2013; The Design-Based Research Collective, 2003). Ein typisches Design-Based Research-Projekt startet demnach idealerweise mit einer Problemstellung (McKenney & Reeves, 2018). Im Kontext der Bildungswissenschaften betont Bakker (2018) die Notwendigkeit einer gewissen Praxisrelevanz der Problemstellung. In den Bildungswissenschaften sind dies insbesondere offene Fragen bzw. Problemstellungen rund um zukünftige Lehr-Lernprozesse bspw. durch den Einsatz neuer Technologien oder Unterrichtsmethoden. Zu der Problemstellung wird in einem Design-Based Research-Projekt schließlich eine Lösung entwickelt. Eine Lösung zu einer Problemstellung soll hier nicht nur eine aktuelle Forschungslücke füllen, sondern vielmehr aufzeigen, wie Lernen in der Zukunft gestaltet werden und damit die Lösung zur Problemstellung langfristig praxistauglich sein kann. Die Lösung kann dabei ganz unterschiedlich aussehen und reicht von der Entwicklung technischer Werkzeuge über Unterrichtsmaterialien bis hin zu neuen Lehr-Lernkonzepten (Reinmann, 2005). Bakker (2018) spricht in dem Zuge von einer Designlösung, da als Lösung zu einer Problemstellung jeweils ein Produkt als Ergebnis entwickelt wird.

Die Entwicklung der Designlösung erfolgt aufbauend auf aktueller Forschung der Domäne und auf Grundlage von Lerntheorien (The Design-Based Research Collective, 2003). Die theoriebasierte Entwicklung einer Designlösung und die damit verbundene Forschung findet zudem in mehreren aufeinander aufbauenden Zyklen statt, die typischerweise aus der Analyse der Problemstellung, der Entwicklung eines prototypischen Designs, der Erprobung, der Analyse und der Weiterentwicklung des Designs bestehen (Reinmann, 2005; The Design-Based Research Collective, 2003). Design-Based Research geht jedoch über die reine theoriebasierte Entwicklung und

Weiterentwicklung einer Designlösung für die Praxis hinaus und unterscheidet sich damit auch von ähnlichen Ansätzen (z.B. Research-Based Design, McKenney, 2014). Vielmehr werden durch die Entwicklung und Erprobung in der Praxis der Entwicklung zugrundeliegende Lerntheorien erprobt, kontextualisiert und weiterentwickelt bzw. auf diese Weise auch neue Lerntheorien entwickelt. Hierdurch werden schließlich forschungsrelevante Erkenntnisse aus einem Praxiseinsatz generiert und tragen damit wiederum zur Grundlagenforschung bei (Plomp & Nieveen, 2013). Es ist zu beachten, dass forschungsrelevante Erkenntnisse nicht losgelöst von der Entwicklung der Designlösung gewonnen werden, sondern Entwicklung und Erkenntnisgewinnung miteinander verflochten sind (The Design-Based Research Collective, 2003). In dem Sinne lässt sich Design-Based Research auch von klassischen Laborstudien abgrenzen, die unter kontrollierten Bedingungen Erkenntnisse über das Lernen von Schülerinnen und Schülern generieren wollen. In diesen Laborstudien werden bewusst mit der Strategie der Variablenkontrolle nur ein Einfluss auf Lehr-Lernprozesse verändert, um eine möglichst empirisch valide Aussage über den einzelnen Einfluss treffen zu können. Im Forschungsansatz Design-Based Research dagegen wird die Variablenkontrollstrategie für Interventionen bewusst missachtet (Reinmann, 2005). Aufgrund der Missachtung der Variablenkontrollstrategie wurde der Design-Based Research-Ansatz häufig als methodisch unsauber kritisiert (z.B. Anderson & Shattuck, 2012). Die Forschungsergebnisse seien so nicht empirisch valide und replizierbar. Dennoch plädieren viele Forscherinnen und Forscher für den Ansatz aufgrund der Entwicklung innovativer und praxisnaher Designlösungen. Demnach verbessern die Designlösungen direkt das Lernen von Schülerinnen und Schülern. Eine Missachtung der Praxis findet im Gegensatz zu klassischen Laborstudien nicht statt (Reinmann, 2005). Gleichzeitig wird betont, dass bei Design-Based Research gerade nicht einzelne Variablen in kontrollierten Lehr-Lernprozessen untersucht, sondern verstärkt Lehr-Lernprozesse beschrieben werden. In Design-Based Research-Projekten werden damit verstärkt Forschungsfragen zum Umgang von Lehrkräften bzw. Schülerinnen und Schülern mit einer Designlösung im Unterricht gestellt (Bakker, 2018). Auf diese Weise können Lerntheorien in der Praxis nicht nur erprobt, sondern durch unterschiedliche Praxisszenarien auch verfeinert werden (Plomp & Nieveen, 2013).<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> Als Beispiel dient hier die Entwicklung und Evaluation einer Learning Progression durch Entwicklung passender Instruktionsmaßnahmen aus Abschnitt 2.2.3.

Zur Einordnung von Design-Based Research in das Spektrum klassischer Forschungsansätze hilft das Pasteur'sche Quadrat nach Stokes (1997). Im Pasteur'schen Quadrat teilt Stokes (1997) typische Forschungsprojekte bzw. -ansätze nach dem Grad der Anwendung bzw. dem Nutzen (x-Achse) und dem Grad der fachlichen Erkenntnis bzw. dem theoretischen Beitrag (y-Achse) ein, sodass vier Quadranten entstehen. Forschungsansätze mit hoher fachlicher Erkenntnis aber wenig praktischer Anwendung, wie die Arbeiten von Niels Bohr zum Aufbau des Atoms und zur Quantenphysik, sind im linken oberen Quadranten eingeordnet. Forschungsansätze mit hoher praktischer Anwendung und geringer fachlicher Erkenntnis, wie Thomas Edisons Entwicklungen einer Glühlampe, sind dagegen im rechten unteren Quadranten eingeordnet. Design-Based Research wird typischerweise oben rechts im Bereich der „nutzenorientierten Grundlagenforschung“ eingeteilt (z.B. Laumann, 2017; Wilhelm et al., 2011). Demnach soll der Forschungssatz sowohl Lerntheorien (weiter-)entwickeln und damit zur Grundlagenforschung beitragen, als auch ein direkt nutzbares Produkt für die Praxis liefern (vgl. auch McKenney & Reeves, 2018; Ejersbo et al., 2008). Neben der Verletzung der Variablenkontrollstrategie wird in den Bildungswissenschaften häufig diese duale Zielsetzung kritisiert und als unsauber und wenig systematisch wahrgenommen (T. Anderson & Shattuck, 2012; The Design-Based Research Collective, 2003).

Zur Klarstellung der Vereinbarkeit dualer Zielsetzungen im Design-Based Research erschienen deshalb in den letzten Jahren viele Forschungsbeiträge und -bücher zur grundsätzlichen Konzeptualisierung und der methodischen Vorgehensweise für ein Design-Based Research-Projekt (u.a. Bakker, 2018; McKenney & Reeves, 2018; Sandoval, 2014; Plomp & Nieveen, 2013). Zum einen wird hier ein Fokus auf ein verändertes Forschungsvorgehen gelegt, indem bspw. anhand von Forschungsfragen verstärkt der Umgang von Individuen mit einer Designlösung untersucht wird (siehe oben). Zum anderen werden in den Forschungsbeiträgen und Büchern verstärkt Modelle vorgestellt, die die methodische Vorgehensweise beim Design-Based Research darstellen (z.B. McKenney & Reeves, 2018; Sandoval, 2014; Ejersbo et al., 2008). Die Modelle zur methodischen Vorgehensweise stellen so bspw. die Vereinbarkeit dualer Zielsetzungen durch Integration von Erkenntnisgewinnung und Entwicklung dar. Ein Beispiel hierfür ist das Osmotische Modell von Ejersbo et al. (2008).

Das Osmotische Modell von Ejersbo et al. (2008) besteht aus zwei Zyklen, ein linker für die Erkenntnisgewinnung und ein rechter für die Entwicklung der Designlösung (Abb. 1; Ejersbo et al., 2008, S. 150). Beide Zyklen starten mit der gleichen Problemstellung (vgl.

Bakker, 2018) und generieren sowohl theoretische Erkenntnisse als auch eine Designlösung in parallel ablaufenden Prozessen. Während der Prozess der Erkenntnisgewinnung aus Hypothesenbildung, Datengewinnung und Theoriebildung für die Forschung besteht, wird im Prozess der Entwicklung zunächst eine Lösung entwickelt, die anschließend erprobt und überarbeitet wird. Beide Prozesse können im Anschluss in einem iterativen Verfahren ausgehend von einer Problemstellung des vorigen Prozesses wiederholt werden.

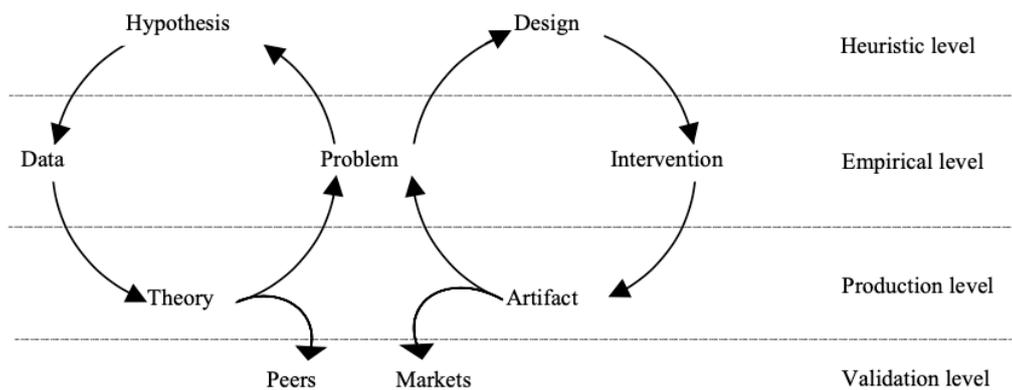


Abb. 1. Im Osmotischen Modell von Ejersbo et al. (2008) werden die Prozesse der gleichzeitigen Erkenntnisgewinnung und Entwicklung einer Designlösung eines Design-Based Research-Projekts parallel dargestellt. Ausgehend von einer Problemstellung werden sowohl Erkenntnisse für die Forschung in Form von Lerntheorien gewonnen als auch eine Designlösung für die Praxis entwickelt.

Während das Osmotische Modell von Ejersbo et al. (2008) eher die Gleichbedeutung von Entwicklungs- und Erkenntnisprozess betont, dient bspw. das Conjecture Mapping-Modell von Sandoval (2014) eher der Veranschaulichung des wissenschaftlichen Erkenntnisprozesses. Dem Modell zufolge wird zunächst eine mit der Problemstellung entwickelte übergeordnete Hypothese zur Unterstützung von Lernen in der Praxis entwickelt (*engl. High Level Conjecture*), die zunächst nicht unmittelbar evaluiert bzw. getestet werden kann. Die Hypothese wird schließlich in mehrere Teilbereiche der Praxis zerlegt und analysiert, wie die Hypothese als Designlösung in der Praxis umgesetzt werden kann. Zu den Teilbereichen gehören bspw. die Wahl von Unterrichtsmaterialien, -strukturen, -methoden, -medien oder von Sozialformen. Im Anschluss werden Vermutungen (*engl. Low Level Conjecture*) formuliert und skizziert, welche Ausgestaltungen der Teilbereiche sich wie im Unterricht auswirken können und damit die übergeordnete Hypothese überprüft. Auf diese Weise soll möglichst sichtbar

dargestellt werden, welche Designelemente des theoretischen Konstrukts wie umgesetzt wurden und welche Effekte zu erwarten bzw. zu untersuchen sind.

Eine Zusammenführung beider Modelle mit weiteren Design-Based Research Modellen bieten McKenney und Reeves (2018) mit dem Generischen Modell (vgl. Abb. 2). In dem Modell werden grundsätzlich folgende drei Phasen unterschieden:

- (1) Analyse und Exploration,
- (2) Design und Entwicklung
- (3) Evaluation und Reflexion

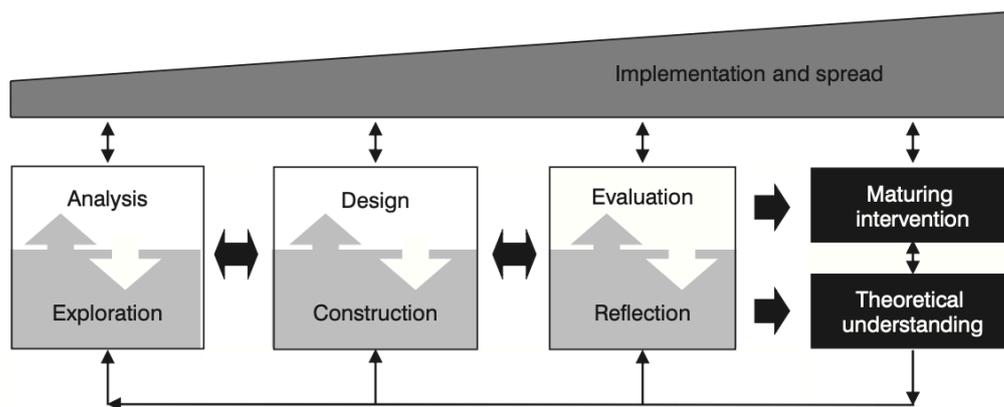


Abb. 2. Visualisierung des generischen Modells nach McKenney & Reeves (2012, S. 78). Im Gegensatz zum Osmotischen Modell wird Entwicklung und Erkenntnis nicht parallel, sondern miteinander verknüpft dargestellt. Unterteilt in die drei Phasen (1) Analyse und Exploration, (2) Design und Construction und (3) Evaluation und Reflection wird ein Prozess durchgeführt, der durch den wachsenden Austausch mit der Praxis („Implementation and spread“) gekennzeichnet ist.

Ein Design-Based Research-Projekt startet demnach mit der ersten Phase der Analyse und Exploration zu einer Problemstellung. In dieser Phase findet eine Literaturanalyse zur Problemstellung aus der Unterrichtspraxis statt und die Problemstellung wird mit bisherigen Forschungsprojekten zu ähnlichen Problemstellungen verglichen. Im Anschluss wird in der Phase des Designs und der Entwicklung ein theoretisches Konstrukt basierend auf der Literaturanalyse entworfen und eine Designlösung für die Unterrichtspraxis entwickelt. Die Designlösung wird schließlich in der Phase der Evaluation und Reflexion in der Praxis erprobt und sowohl die Designlösung als auch das theoretische Konstrukt evaluiert. Aus dieser Phase werden zugleich Erkenntnisse zur Theoriebildung gewonnen, die wiederum in darauffolgende Phasen einfließen. Während jede der drei Phasen kommt es zudem zu einem Austausch mit der Praxis, veranschaulicht am liegenden Trapez über den Phasen (Abb. 2). Von allen drei Phasen sollen sowohl Erkenntnisse in die Praxis transferiert als auch Einflüsse aus der Praxis beachtet werden.

Der Einfluss auf die Praxis nimmt im Verlauf eines Design-Based Research-Projekts ständig zu. McKenney & Reeves (2018) verdeutlichen in diesem Zusammenhang die Bedeutung des allgemeinen Austauschs des Projekts mit der Praxis, um ein möglichst unterrichtspraktisches Produkt zu entwickeln bzw. Lerntheorien auch praxisnah lokal zu evaluieren und zu entwickeln (vgl. Bakker, 2018).

Die Durchführung der drei Phasen fassen McKenney & Reeves (2018) insgesamt als einen Meso-Zyklus auf. Ein Meso-Zyklus besteht aus Phasen der Analysis und Exploration, Design und Konstruktion bzw. Evaluation und Reflexion, wobei nicht zwingend alle drei Phasen enthalten sein müssen. So kann bspw. bereits nach der Evaluation und Reflexion eine Überarbeitung der Designlösung in der Konstruktionsphase durchgeführt werden. Aufgrund der Unterscheidung in einzelne Phasen und Zusammenfassung von Phasen in Meso-Zyklen bei einer gleichzeitigen hohen Praxisrelevanz eignet sich das Generische Modell damit in besonderem Maße zur Strukturierung von Designprozessen.

### 2.3.2. Fazit

Im naturwissenschaftlichen Unterricht sollte möglichst kumulativ gelernt werden, damit Schülerinnen und Schüler ein vernetztes Wissen systematisch aufbauen, um Probleme zu lösen und Phänomene zu erklären. Gemäß den Bildungsstandards soll kumulatives Lernen durch Basiskonzepte gefördert werden, die den Bereich des Fachwissens strukturieren. Die Basiskonzepte entsprechen hier übergeordneten Konzepten der Fachdomäne, den Leitideen, die in besonderem Maße verschiedene Inhaltsbereiche der Fachdomäne miteinander vernetzen. Obwohl bereits zur Verständnisentwicklung der Leitideen von Schülerinnen und Schülern Erkenntnisse in Form von Learning Progressions vorliegen, fehlen unterrichtspraktische Beispiele zur Frage, wie ein Unterricht basierend auf diesen Modellen konkretisiert werden kann.

Das Fehlen unterrichtspraktischer Beispiele zur Erkenntnisgewinnung für die Forschung als auch für die Praxis stellt im Sinne eines Design-Based Research-Ansatzes eine Problemstellung dar. Dieser Forschungsansatz bietet sich zur Lösung der Problemstellung aus zwei Gründen an:

1. In Kapitel 2.2 wurde gezeigt, dass fünf Anforderungen an einen naturwissenschaftlichen Unterricht zur Förderung kumulativen Lernens gestellt werden. Die Anforderungen interagieren miteinander und können nicht isoliert betrachtet werden. In einem Design-Based Research-Ansatz kann die Interaktion der Anforderungen an kumulatives Lernen bewusst zugelassen und die Entwicklung

einer unterrichtspraktischen Instruktionsmaßnahme vor die Einhaltung einer Variablenkontrollstrategie gestellt werden.

2. Es liegt eine Problemstellung sowohl aus der Praxis als auch aus der Forschung vor. Die Weiterentwicklung von Modellen fachlichen Lehren und Lernens anhand geeigneter Instruktionsmaßnahmen kann deshalb mit der Entwicklung unterrichtspraktischer Beispiele zur gemeinsamen Erkenntnisgewinnung verknüpft werden. Ebendieses parallele Vorgehen aus Erkenntnisgewinnung und Entwicklung einer Designlösung kann am besten in einem Design-Based Research-Ansatz adressiert werden.

In der Wahl von Design-Based-Research als Forschungsansatz bietet sich zur Strukturierung des Prozesses das Generische Modell nach McKenney & Reeves (2018) in besonderem Maße an, da es verschiedene Aspekte ähnlicher Modelle vereinigt. Zudem laufen die Erkenntnisgewinnung und die Entwicklung einer Designlösung nicht parallel ab, sondern sind durch einen hohen Austausch mit der Praxis miteinander verzahnt. Gleichzeitig wird im Generischen Modell der Designprozess vorstrukturiert, lässt aber auch Möglichkeit zur Flexibilisierung der einzelnen Phasen zu.

### 3. Entwicklung und Erprobung

Im Sinne eines Design-Based Research-Ansatzes wird im Folgenden entlang von drei Mesozyklen eine Designlösung zu der herausgearbeiteten Problemstellung vorgestellt (vgl. Abb. 3). Hierzu wird auf Grundlage des generischen Modells von McKenney & Reeves (2018) in der ersten Phase (Analyse und Exploration) aufbauend auf den Anforderungen zur Förderung kumulativen Lernens erarbeitet, wie eine direkt unterrichtspraktische Designlösung in Form einer Instruktionsmaßnahme umgesetzt werden kann. Es erfolgt hier zunächst eine fachliche Klärung und die Analyse der Präkonzepte von Schülerinnen und Schülern in der jeweiligen Fachdomäne. In der Phase wird zudem eine Lehrplananalyse zur Strukturierung von Fachinhalten mittels einer qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring (2014) durchgeführt und eine didaktische Strukturierungsmaßnahme für die Entwicklung einer Interventionsmaßnahme beschrieben. In der zweiten Phase (Design und Entwicklung) wird ein Prototyp einer Interventionsmaßnahme theoretisch dargestellt und mögliche inhaltliche Kontexte für die Interventionsmaßnahme entwickelt. In der dritten Phase (Evaluation- und Reflexion) wird schließlich nach der Entwicklung der Kontexte die Evaluation der inhaltlichen Kontexte in einer Interessensstudie mit Schülerinnen und Schülern kurz vorgestellt. Diese drei Phasen bilden den ersten Mesozyklus.

In der ersten Phase des zweiten Mesozyklus' (Design und Entwicklung) wird für die Interventionsmaßnahme aufbauend auf dem Prototyp der ersten Entwicklungsphase und den evaluierten inhaltlichen Kontexten das Design eines Strukturierungsrahmens für die Interventionsmaßnahme vorgestellt. Darauffolgend wird die Entwicklung erster konkreter Unterrichtseinheiten ausgehend von dem Strukturierungsrahmen als Interventionsmaßnahme beschrieben und deren Erprobung in einer darauffolgenden Phase (Evaluation und Reflexion) in einem Lehr-Lernlabor mit Schülerinnen und Schülern vorgestellt. Diese zwei Phasen bilden den zweiten Mesozyklus.

Auf Grundlage der Evaluation und Reflexion wird schließlich in einer weiteren Phase (Design und Entwicklung) der Strukturierungsrahmen angepasst, die getesteten Unterrichtseinheiten überarbeitet und ausstehende Unterrichtseinheiten auf Grundlage des Strukturierungsrahmens entwickelt. Abschließend wird als Feldtest und damit als abschließende Phase (Evaluation und Reflexion) die Erprobung der gesamten Interventionsmaßnahme mit Schulklassen und Lehrkräften der Sekundarstufe I im Regelunterricht vorgestellt. Diese zwei Phasen bilden den abschließenden dritten Mesozyklus.

Jede der insgesamt sieben Phasen in den drei Mesozyklen hatte einen unterschiedlichen zeitlichen und inhaltlichen Umfang. Der Umfang jeder Phase ist durch die Größe des jeweiligen Zyklus einer Phase in Abb. 3 dargestellt und ist auch dem Umfang in den folgenden jeweiligen Kapiteln zu den sieben Phasen zu entnehmen.

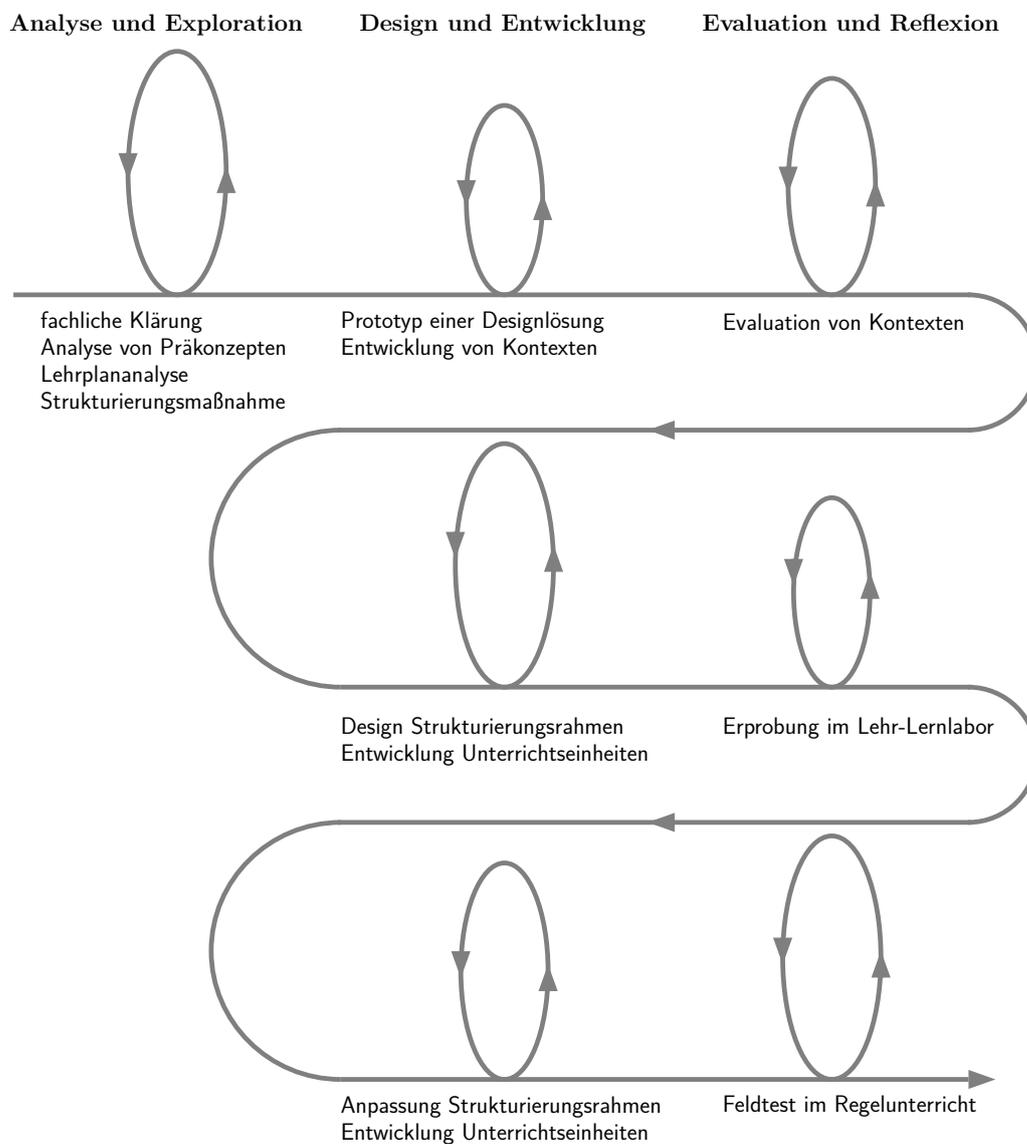


Abb. 3. Die Unterteilung des Designvorhabens in drei Mesozyklen mit insgesamt sieben Phasen aus wahlweise (1) Analyse und Exploration, (2) Design und Entwicklung und (3) Evaluation und Reflexion folgt dem Generischen Modell nach McKenney & Reeves (2018). Die entsprechenden Entwicklungsschritte jeder Phase sind jeweils aufgeführt. Die verschiedenen Größen der Zyklen entsprechen zudem dem zeitlichen bzw. auch dem inhaltlichen Umfang in der vorliegenden Arbeit.

### 3.1. Analyse und Exploration der Anforderungen an kumulatives Lernen

In der Analyse und Exploration wurde zunächst eine Literaturrecherche durchgeführt, die die Entwicklung einer Interventionsmaßnahme zur Förderung kumulativen Lernens verfolgt. Die Recherche umfasste auch die Analyse vergleichbarer Forschungsprojekte der naturwissenschaftlichen Lehr-Lernforschung. Da die politischen Vorgaben, d.h. die Förderung kumulativen Lernens durch den Einsatz von Basiskonzepten, nicht durch Standards, Lehrpläne und Schulbücher auf administrativer Ebene umgesetzt wurden (vgl. Abschnitt 2.3), wurde in dieser Arbeit keine Neustrukturierung der Lehrpläne oder vergleichbarer administrativer Umsetzungen verfolgt. Vielmehr sollte die Interventionsmaßnahme zur Problemstellung möglichst unterrichtspraktisch umgesetzt werden (vgl. auch Cobb et al., 2003; The Design-Based Research Collective, 2003). Für eine Interventionsmaßnahme wurde exemplarisch die Entwicklung von Unterrichtsmaterial für das Basiskonzept Energie gewählt. Im Folgenden wird zunächst die fachliche Klärung bzw. die Analyse von Präkonzepten zum Energiekonzept durchgeführt. Im Anschluss wird eine Lehrplananalyse zur Verortung des Basiskonzepts Energie im Physikunterricht vorgestellt und die Interventionsmaßnahme auf Grundlage der Lehrplananalyse konkretisiert. Zur Konkretisierung der Interventionsmaßnahme wird zudem eine Strukturierungsmaßnahme für einen Unterricht zur Förderung kumulativen Lernens abschließend vorgestellt.

#### 3.1.1. Fachliche Klärung

Das Energiekonzept ist sowohl für die Physik als auch für andere naturwissenschaftliche und technische Wissenschaftsdisziplinen von herausragender Bedeutung (Coopersmith, 2015). Es existieren jedoch sowohl in den anderen Wissenschaftsdisziplinen und aber auch in der Physik selbst unterschiedliche Zugänge zum Energiekonzept (Papadouris & Constantinou, 2016; Doménech et al., 2007; Kaper & Goedhart, 2002; Duit, 1987). Unabhängig vom Zugang kann Energie in der Physik zunächst als eine Bilanzierungsgröße eines abgeschlossenen Systems angesehen werden (vgl. Coelho, 2009). Sofern das System nicht mit einem anderen System wechselwirkt, bleibt die Gesamtenergie des Systems konstant. Diese sehr abstrakte Definition von Energie sagt jedoch zunächst nichts über Wirkprozesse innerhalb des Systems aus und wird daher in den jeweiligen physikalischen Sachgebieten wie Mechanik, Wärmelehre oder auch Astro- und Quantenphysik unterschiedlich spezifiziert. Bemerkenswert ist hierbei, dass sowohl

in der modernen Physik (u.a. Astrophysik, Plasmaphysik oder auch Festkörperphysik) als auch in den traditionellen Sachgebieten der Physik (u.a. Mechanik und Wärmelehre) das Energiekonzept jeweils eine wichtige, wenn nicht sogar die zentrale Rolle zur Erklärung physikalischer Prozesse spielt (z.B. Coopersmith, 2015, S. 1). Noch bemerkenswerter ist zudem, dass sich Inhalte aus verschiedenen physikalischen Sachgebieten mithilfe des Energiekonzepts verknüpfen lassen, wie im Folgenden aus einer historisch-fachlichen Perspektive gezeigt wird. Da die Problemstellung der Arbeit, d.h. die Förderung kumulativen Lernens durch Basiskonzepte, sich auf die politischen Vorgaben zur Sekundarstufe I beschränken, beschränkt sich die historische Darstellung und fachliche Klärung auf die klassischen Sachgebiete der Physik bzw. damit auch der Sekundarstufe I.

### Energie in der klassischen Mechanik

Viele klassischen Probleme der Physik und der Technik sind vor allem Probleme der Mechanik. So zeigt bspw. Coopersmith (2015) in einer Darstellung der Entwicklung des Energiekonzepts ausgehend von einfachen Fragen zu Hebelgesetzen in der Antike über zunehmend komplexere Fragen, wie die Existenz eines Perpetuum mobile im Mittelalter bis hin zu Fall- und Stoßprozessen in der Neuzeit, dass sich zunächst in der Physik überwiegend mit mechanischen Prozessen bzw. auch Maschinen beschäftigt wurde (siehe auch Viering, 2012, S. 37–40). Eine erste grundlegende Vorstellung der Energieerhaltung entwickelte insbesondere Leibniz mit der Unterscheidung einer „vis viva“ (lebendige Kraft<sup>5</sup>) bzw. „vis mortua“ (tote Kraft). Hier wurde sich insbesondere auf die heutige kinetische Energie (vis viva) und die Lageenergie (vis mortua) bezogen, deren Kombination und somit ihre Gesamtenergie bei Fall- bzw. Stoßprozessen nicht verloren geht. Mit der Postulierung der Newtonschen Axiome und der damit verbundenen zunehmenden Anwendung des Kraftbegriffs in der Mechanik wurde für mehrere Jahrzehnte das Energiekonzept in der Mechanik zunächst verdrängt (Tiemann, 2006). Erst Anfang des 19. Jahrhunderts griff insbesondere Julius Robert Mayer das Energiekonzept wieder auf und entwickelte ein allgemeineres und umfassenderes Verständnis von Energie inklusive eines Energieerhaltungsgedankens.

Heutzutage wird die Energie in der klassischen Mechanik vor allem über den Arbeitsbegriff  $W$  eingeführt (Fließbach, 2015; Feynman et al., 2007; Nolting, 1997).

---

<sup>5</sup> Insbesondere im Mittelalter und der Neuzeit wurden der Kraft- und der Energiebegriff zunächst synonym verwendet. Es lässt sich jedoch historisch an der genaueren Betrachtung des physikalischen Problems (z. B. dem freien Fall) erkennen, welches Konzept jeweils gemeint ist.

Werden nichtkonservative Kräfte wie Reibung ausgeschlossen, verrichtet ein konservatives Kraftfeld an einem bewegten Teilchen die Arbeit  $dW = \vec{F}(\vec{r}(t))d\vec{r}$ . Mithilfe des 2. Newtonschen Axioms  $F = m \cdot \frac{dv}{dt}$  gilt für die geleistete Arbeit im Kraftfeld entlang eines Weges von  $r_1$  zu  $r_2$ :

$$W = \frac{1}{2} m \vec{v}(t_2)^2 - \frac{1}{2} m \vec{v}(t_1)^2 = E_{kin,2} - E_{kin,1}$$

Die geleistete Arbeit des Kraftfelds am Teilchen entspricht somit der Differenz der kinetischen Energien des Teilchens zum Zeitpunkt  $t_2$  gegenüber  $t_1$ .

Aufbauend auf den Newtonschen Axiomen können außerdem Bewegungsvorgänge durch die Lagrange-Funktion  $L(q_i(t), \dot{q}_i(t), t)$  und generalisierte Koordinaten  $q_i$ , Geschwindigkeiten  $\dot{q}_i$  und der Zeit  $t$  in Abhängigkeit der Freiheitsgrade  $i \in \mathbb{N}$  verallgemeinert dargestellt werden. Mithilfe des d'Alembertschen Prinzips lässt sich darauf aufbauend die Euler-Lagrange-Gleichung ableiten:

$$\frac{d}{dt} \frac{\delta L}{\delta \dot{q}_i} - \frac{\delta L}{\delta q_i} = 0$$

und mithilfe der Newtonschen Gleichungen und dem Arbeitsbegriff die Energieerhaltung für die klassische Mechanik folgern (für eine genaue Darstellung siehe Viering, 2012, S. 40–43).

### Mechanik und Wärmelehre

Die phänomenologische Beobachtung, dass Wärme in Bewegung bzw. Bewegung in Wärme überführt werden kann, war bereits in der Antike bekannt. Seit Mitte des 17. Jahrhunderts wurden schließlich auch erste Maschinen zur mechanischen Bewegung basierend auf der Nutzung von Wärme theoretisch beschrieben und im Zuge der ersten Dampfmaschinen während der Industriellen Revolution Ende des 18. Jahrhunderts auch verbreitet genutzt (Coopersmith, 2015, S. 142–148). In den folgenden Jahrhunderten drehten sich viele Fragen rund um die technische Optimierung des Umwandlungsprozesses von Wärme in Bewegung. Dagegen war die Umwandlung von Bewegung in Wärme in Form von bspw. Reibung phänomenologisch zwar bekannt, konnte jedoch erst von James Prescott Joule Mitte des 19. Jahrhunderts quantitativ beschrieben und experimentell belegt werden. Er lieferte damit einen entscheidenden Beitrag zur Entwicklung des Energiekonzepts über die Mechanik hinaus (Coopersmith, 2015, S. 249–250).

Joule entwickelte u.a. ein Experiment zur Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents. Hierbei wird ein zylinderförmiges, isoliertes Gefäß mit Wasser gefüllt. Im Inneren des Gefäßes befinden sich mehrere Plättchenräder, die von außen drehbar waren. Ein fallendes Gewicht über eine Umlenkrolle bringt die Plättchenräder schließlich in eine Drehbewegung. Die bereitgestellte Lageenergie durch das fallende Gewicht kann über  $E_{Lage} = mgh$  berechnet werden, wobei  $m$  die Masse des Gewichts,  $g$  die Fallbeschleunigung und  $h$  die Fallstrecke ist. Schließlich wird die Temperaturveränderung  $\Delta T$  vor Beginn des Experiments und nach  $n \in \mathbb{N}$  Fallbewegungen des Gewichts gemessen (Giancoli et al., 2011, S. 653–654). Anhand des Experiments kann schließlich das mechanische Wärmeäquivalent, d. h. die Äquivalenz zwischen einer gewissen Menge mechanischer Arbeit (gemessen in Joule) und einer Menge an Wärme (in Kalorie), bestimmt werden:

$$4,186 J = 1 cal$$

Anhand dieses Beispielversuchs von Joule lässt sich nicht nur die Energieumwandlung von Lage- bzw. kinetischer- in thermische Energie demonstrieren. Es lässt sich auch quantitativ durch die Berechnung der Lage- und durch die Messung der thermischen Energie über  $\Delta T$  eine Form des Energieerhaltungssatzes formulieren. Heutzutage ist diese Relation im ersten Hauptsatz der Thermodynamik formuliert (Coopersmith, 2015, S. 282–283):

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W$$

$U$  entspricht hier der inneren Energie eines Systems,  $\Delta Q$  der zugeführten bzw. abgeführten Wärme des Systems von außen und  $\Delta W$  der am System verrichteten Arbeit. Die innere Energie eines Systems kann demnach entweder durch Zuführung bzw. Abführung von Wärme oder durch verrichtete Arbeit am System verändert werden. Der erste Hauptsatz der Thermodynamik formuliert damit die Energieerhaltung zwischen den Sachgebieten Mechanik und Wärmelehre.

### Mechanik, Wärmelehre und Elektrizitätslehre

Zu Beginn des 19. Jahrhunderts entdeckte insbesondere Oerstedt die Relation zwischen Magnetismus und Elektrizität, indem er eine Kompassnadel mithilfe eines stromdurchflossenen Leiters in Bewegung brachte (Coopersmith, 2015, S. 246). In der Folge wurden sowohl der Elektromotor als auch der Generator als elektromagnetische Maschinen theoretisch konzipiert und entwickelt. Wiederum war es hier Joule, dem eine quantitative Beschreibung von Elektrizität, Bewegung und der Wärmeentwicklung in

einem stromdurchflossenen Leiter gelang (Coopersmith, 2015, S. 246–250). Mithilfe eines Elektromotors konnte Joule experimentell zeigen, dass die mechanische Leistung  $P$  direkt proportional zur elektrischen Stromstärke  $I$  und zur elektrischen Spannung  $U$  ist. Hierzu gehörte auch der experimentelle Nachweis, dass in einem geschlossenen Stromkreis der Verlust an elektrischer Leistung in Form von Wärme proportional zu  $I^2R$  ist, wobei  $R$  dem Widerstand des Drahtes entspricht. Mithilfe des Ohmschen Gesetzes  $U = IR$  folgt damit die Proportionalität von mechanischer Arbeit zur Erwärmung des Drahtes in einem Stromkreis. Joule quantifizierte somit die Umwandlung jeweils von elektrischer- in kinetische- und Lageenergie bzw. in thermische Energie (Coopersmith, 2015).

Zur Umwandlung von kinetischer in elektrische Energie experimentierte anschließend vor allem Michael Faraday und formulierte schließlich Mitte des 19. Jahrhunderts aufbauend auf den Experimenten das Faradaysche Induktionsgesetz (Coopersmith, 2015, S. 259–261). Eines der berühmtesten Experimente Faradays beinhaltete lediglich eine Drahtschleife mit einem Spannungsmessgerät und einem Magneten. Wird der Magnet durch die Drahtschleife geführt, wird eine induzierte Spannung  $U$  in der Drahtschleife gemessen. Faradays überragende Leistung war hier in Verbindung mit weiteren Experimenten die Beobachtung, dass die induzierte Spannung  $U_{ind}$  nicht, wie zuvor vermutet, von der Änderung des Magnetfeldes  $\vec{B}$ , sondern proportional zur Änderung des magnetischen Flusses  $\Phi = \int \vec{B} d\vec{A}$  durch die Drahtschleife der Fläche  $\vec{A}$  abhängt (Giancoli et al., 2011, S. 984–986):

$$U_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

In Verbindung mit dem Faradayschen Induktionsgesetz, das die elektrische Wirkung auf die Drahtschleife beschreibt, ist zudem die Lenz'sche Regel für die Beschreibung elektromagnetischer Vorgänge von besonderer Bedeutung. Sie besagt, dass der durch die induzierte Spannung in der Drahtschleife fließende elektrische Strom ein Magnetfeld erzeugt, das der Änderung des magnetischen Flusses entgegengerichtet ist (Giancoli et al., 2011, S. 985). Die Lenz'sche Regel beschreibt somit u.a. auch die Wirkung auf einen Magneten bzw. die Bewegung eines Magneten und entspricht gemeinsam mit dem Faradayschen Induktionsgesetz dem Energieerhaltungssatz für elektrische und kinetische Energie. Würde dagegen das durch den elektrischen Strom erzeugte Magnetfeld in die Richtung der Änderung des magnetischen Flusses gerichtet sein, würde der induzierte Strom verstärkt werden und in der Folge auch das durch den Strom erzeugte Magnetfeld usw. Dies wäre ein Perpetuum mobile und würde dem Energieerhaltungssatz

widersprechen (Giancoli et al., 2011, S. 985). Die Beobachtung lässt sich heutzutage auch phänomenologisch an einem Kurbelgenerator beobachten. Wird ein Kurbelgenerator ohne elektrischen Verbraucher gedreht, benötigt die Drehung weniger mechanische Arbeit gegenüber der Drehung mit einem elektrischen Verbraucher. Erst mit einem elektrischen Verbraucher führt die induzierte Spannung zu einem Stromfluss, was ein Magnetfeld hervorruft, das entgegen der Drehung der Kurbel wirkt und die Drehung schließlich erschwert.

### ...und Optik

Bis ins 19. Jahrhundert hinein beschäftigten sich Naturwissenschaftlerinnen und Naturwissenschaftler in der Optik eher mit Beugungs- und Reflexionsphänomenen bzw. mit den Eigenschaften von Licht an sich (z.B. Coopersmith, 2015, S. 170). Zwar wurden bereits Effekte rund um die Entstehung von Licht bei Phänomenen in der Thermodynamik wie das Emittieren von Licht bei Wärme beobachtet (Coopersmith, 2015, S. 159), jedoch gelang erst Mitte des 19. Jahrhunderts Maxwell eine Formulierung elektromagnetischer Gleichungen, die Maxwellgleichungen. Die Maxwellgleichungen bildeten damit die erste grundlegende Theorie zu elektromagnetischen Feldern (Giancoli et al., 2011, S. 1062). Nach den Maxwellgleichungen ist Licht eine elektromagnetische Welle, die sich mit fester Ausbreitungsgeschwindigkeit im Vakuum ausbreitet. Heinrich Hertz bestätigte die Maxwell'sche Theorie, indem er Ladungen oszillieren, somit beschleunigen ließ und Welleneffekte wie Beugung und Reflexion für die Welle nachweisen konnte. Er konnte dabei jeweils die erzeugte elektromagnetische Welle mithilfe einer Drahtschleife messen (Giancoli et al., 2011, S. 1062–1069).

Licht ist somit aus historischer Sicht eng mit elektrischen bzw. elektromagnetischen Phänomenen verbunden und transportiert Energie, die gemessen werden kann. Aufgrund des Transports von Energie hat die Lichtwelle auch einen Impuls, der jedoch in Bezug auf makroskopische, mechanische Effekte zu gering ist, um beobachtet zu werden (Giancoli et al., 2011, S. 1071–1075). Ein Beispiel für die energetische Wirkung von Licht dagegen bzw. deren Umwandlung in elektrische Energie ist am photoelektrischen Effekt zu sehen. Nach der Theorie der Quantelung des Lichts wird Licht in einzelnen Quanten mit der Energie  $E = hf$  emittiert, wobei  $h$  das Plancksche Wirkungsquantum und  $f$  die Frequenz des Lichts ist. Trifft nun ein Lichtquant der Energie  $hf$  auf eine Metalloberfläche, können sich Elektronen aus der Metalloberfläche aufgrund der Aufnahme der Energie des Lichtquants lösen. Auf diese Weise kann ein elektrischer Strom fließen (für eine genauere

Beschreibung des Effekts und der historischen Bedeutung siehe Giancoli et al., 2011, S. 1268). Der photoelektrische Effekt wird technisch bspw. in einer Solarzelle genutzt, die die Strahlungsenergie des Lichts in elektrische Energie umwandeln kann und für weitere Energieumwandlungen nutzbar macht.

### Fazit

Anhand der Betrachtung der historischen Entwicklung des Energiekonzepts lassen sich in der Folge mehrere Schlussfolgerungen in Bezug auf die Förderung kumulativen Lernens anhand von Basiskonzepten ziehen. Zunächst muss festgehalten werden, dass Physikerinnen und Physiker über mehrere Jahrhunderte hinweg ein Verständnis von Energie entwickelten und ständig verfeinerten (Coopersmith, 2015). Ein ähnlich vollständiges Verständnis von Energie können demnach Schülerinnen und Schüler nicht innerhalb einiger weniger Unterrichtsstunden und -wochen erlangen. Zudem hat sich gezeigt, dass Energie kein eigenständiges physikalisches Sach- bzw. Forschungsgebiet vergleichbar mit der klassischen Mechanik bei Newton oder dem Elektromagnetismus von Faraday ist. Vielmehr manifestiert sich der Energiebegriff als Erscheinungsformen unterschiedlich in den klassischen Sach- und Forschungsgebieten der Physik (vgl. auch Duit, 2014). Aus dem Grund fanden auch die Weiterentwicklungen zum Energiekonzept von unterschiedlichen Naturwissenschaftlerinnen und Naturwissenschaftlern teilweise parallel und teilweise unabhängig voneinander statt. Energie ist somit ein sachgebietsübergreifendes Paradigma, was nicht innerhalb eines Sachgebiets entwickelt werden kann. Gleichzeitig genügt ein rein auf das Energiekonzept beschränkter Physikunterricht nicht aus. Vielmehr müssen auch weiterhin die klassischen Inhalte und Sachgebiete der Physik behandelt und parallel Querbezüge zwischen den klassischen Inhalten hergestellt werden (Neumann, 2017).

Die Querbezüge zwischen den klassischen Inhalten können wiederum aufgrund der unterschiedlichen Manifestationen und Erscheinungsformen (Energieformen) anhand des Energiekonzepts hergestellt werden. Erst mithilfe des Energiekonzepts lassen sich deshalb auch Verbindungen zwischen Inhalten verschiedener physikalischer Sachgebiete schlüssig und kohärent herstellen. Die Nutzung von Energie als Basiskonzept bietet sich in dem Sinne an, um aus fachlicher Sicht Verbindungen zwischen Inhalten verschiedener Sachgebiete im Unterricht zu ziehen und schließlich kumulatives Lernen zu fördern.

### 3.1.2. Analyse von Präkonzepten

In der Forschung besteht Konsens, dass Schülerinnen und Schüler am Ende der Sekundarstufe I ein Verständnis rund um die vier Aspekte von Energie (Formen und Quellen, Umwandlung und Übertragung, Entwertung, Erhaltung) entwickelt haben sollten (Duit, 2014; Neumann et al., 2013; NGSS Lead States, 2013; KMK, 2005; Kaper & Goedhart, 2002). Energie tritt demnach in verschiedenen (Erscheinungs-)Formen auf, wie z.B. Bewegungsenergie oder elektrische Energie, die Formen können ineinander umgewandelt oder von einem Ort zu einem anderen übertragen werden. Insgesamt aber bleibt die Menge der Energie innerhalb eines abgeschlossenen Systems bei einer abnehmenden Nutzbarkeit (Entwertung) der Gesamtenergie vollständig erhalten (z.B. Duit, 2014). Dieses Verständnis von Energie entwickeln Schülerinnen und Schüler jedoch nicht innerhalb einiger weniger Stunden, sondern über mehrere Schuljahre hinweg. Eine solche Verständniserwicklung von Energie wird in Learning Progressions beschrieben (Herrmann-Abell & DeBoer, 2018; Neumann et al., 2013; H. Lee & Liu, 2010; Liu & McKeough, 2005).

Gemäß der Learning Progressions sind den meisten Schülerinnen und Schülern die vier o.g. Aspekte von Energie zu Beginn des Physikunterrichts noch nicht bekannt, jedoch besitzen die meisten Schülerinnen und Schüler bereits Präkonzepte zum Energiebegriff (Driver & Warrington, 1985; Duit, 1986; Schecker & Duit, 2018). Zu typischen Präkonzepten gehört die Vorstellung von Energie als etwas Fließendes und in einem Körper Manifestes bzw. die Vorstellung, dass Energie als Treibstoff benötigt wird, um Dinge in Bewegung zu versetzen (Schecker & Duit, 2018). Einige Schülerinnen und Schüler schreiben auch Energie nur Lebewesen zu, was eine Zuschreibung von Energiemanifestationen zu nicht-lebenden Gegenständen erschwert. Aufgrund des bereits genutzten Energiebegriffs in der Alltagssprache wird dieser zudem häufig mit dem Kraftbegriff verwechselt (Duit, 1986).

Im Rahmen der Conceptual Change-Theorie wurde bereits früh in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung über den Umgang mit Präkonzepten von Schülerinnen und Schülern zum Energiebegriff diskutiert (z.B. Duit, 1987, 1986; Warren, 1982). So überlegte bereits Duit (1987), ob Energie zu Beginn des Physikunterrichts nicht als etwas Materielles aufgefasst werden sollte, um Schülerinnen und Schüler aufbauend auf der Treibstoff- und Flussvorstellung den Zugang zum Energiekonzept im Sinne eines Conceptual Growth-Ansatzes zu erleichtern. Die Diskussion um einen ersten Zugang zur Energie zu Beginn des Fachunterrichts hält an (z.B. Papadouris & Constantinou, 2016;

Millar, 2011; Swackhamer, 2005) und wurde auch durch die Entwicklung von Unterrichtsmaterialien konkretisiert bzw. erprobt (Fortus et al., 2019). Ein anderer Ansatz führt Energie dagegen direkt als eine Erhaltungsgröße im Sachgebiet Mechanik ein (M. Bader, 2001). Der dominierende Ansatz zur Energie ist jedoch der Formen-Ansatz, bei dem Schülerinnen und Schüler mit einzelnen wenigen Energieformen und -umwandlungen ineinander den Fachunterricht beginnen (z.B. Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, 2019). Dies zeigt sich auch in Untersuchungen zur Entwicklung des Energieverständnisses in Form einer Learning Progression.

Da ein Konsens über das Erlernen der vier Aspekte von Energie (Formen und Quellen, Umwandlung und Übertragung, Entwertung, Erhaltung) besteht, werden die Aspekte für die Beschreibung der Kompetenzstufen einer Learning Progression genutzt (Herrmann-Abell & DeBoer, 2018; Duit, 2014; Neumann et al., 2013; H. Lee & Liu, 2010; Liu & McKeough, 2005). Die höchste Kompetenzstufe entspricht dabei dem vollständigen Verständnis der vier Aspekte von Energie (z.B. Neumann et al., 2013). In Untersuchungen konnte schließlich mehrfach eine Verständniseentwicklung ausgehend von (1) Energieformen über (2) Umwandlung bzw. Übertragung, (3) Entwertung und schließlich (4) Erhaltung überwiegend gezeigt werden (z.B. Herrmann-Abell & DeBoer, 2018; Neumann et al., 2013; Liu & McKeough, 2005). So bestätigt sich bspw., dass der erklärungs mächtigste Aspekt von Energie, deren Erhaltung, für Schülerinnen und Schüler am schwersten zu erlernen ist (vgl. auch Lee & Liu, 2010; Driver & Warrington, 1985). Jedoch konnte diese hypothetische Formulierung entlang der Aspekte anhand der Stufen nicht vollständig bestätigt werden (z.B. Herrmann-Abell & DeBoer, 2018; Neumann et al., 2013). Schülerinnen und Schüler entwickeln zwar zunächst ein Verständnis von Formen, Umwandlung und Entwertung, jedoch sind Umwandlung und Entwertung nicht vollständig disjunkt zueinander anzusehen. Es zeigt sich vielmehr, dass Schülerinnen und Schüler durch die sukzessive Integration weiterer Energieformen und deren Umwandlungen ineinander gleichzeitig ein Verständnis von Umwandlung und Entwertung der Energie entwickeln (Herrmann-Abell & DeBoer, 2018; Neumann et al., 2013a; Neumann, 2017). Die meisten Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe I haben entsprechend dieses Energieverständnisses: sie kennen bereits einige Formen und Umwandlungen bzw. Entwertungen von Energie, haben aber noch kein umfassendes Verständnis zur Umwandlung und Entwertung entwickelt, um die Energieerhaltung zu verstehen. Gleichzeitig entwickeln die Schülerinnen und Schüler über die Zeit der

Sekundarstufe I ein umfassenderes Verständnis von Umwandlung und Entwertung (Neumann et al., 2013a).

Neben der Verständniseentwicklung von Energie beschrieben in Form einer Learning Progression, bestätigten die o.g. Arbeiten auch bereits bekannte Erkenntnisse der naturwissenschaftlichen Lehr-Lernforschung zum Energiekonzept. Hierzu gehört, dass nur die wenigsten Schülerinnen und Schülern ein vollständiges Verständnis der Energieerhaltung zum Ende der Sekundarstufe I entwickeln (z.B. Lee & Liu, 2010). Die meisten Schülerinnen und Schüler bleiben vielmehr am Ende des Fachunterrichts bei einem Umwandlungs- und teilweise Entwertungsverständnis stehen. Es hat sich auch gezeigt, dass Schülerinnen und Schüler das Energiekonzept nicht spontan zur Erklärung von Phänomenen oder Lösung physikalischer Probleme nutzen (Papadouris & Constantinou, 2016; Lacy et al., 2014; Driver & Warrington, 1985). Ein Problem für die Schülerinnen und Schüler stellt hier der scheinbar wahrgenommene Widerspruch zwischen der Entwertung und der Erhaltung der Energie dar (Duit, 2014). Energie wird demnach im Alltag der Schülerinnen und Schüler als etwas wahrgenommen, das verbraucht wird und somit nicht erhalten bleibt.

### Fazit

Das Ziel der Förderung kumulativen Lernens durch Basiskonzepte kann am Beispiel des Energiekonzepts nach der Analyse der Präkonzepte von Schülerinnen und Schüler realisiert werden. Schülerinnen und Schüler entwickeln demnach bereits früh in der Sekundarstufe I ein Verständnis einiger weniger Energieformen, die in verschiedenen Sachgebieten der Physik manifestiert sind. Das Verständnis vom Energiekonzept im Allgemeinen entwickelt sich durch die Integration weiterer Energieformen und -umwandlungen zwischen den Formen. In diesem Sinne kann Energie als Leitidee fungieren und im Sinne eines Basiskonzepts eine vertikale Vernetzung zwischen Inhalten bzw. Sachgebieten der Physik ermöglichen (vgl. die Definition eines physikalischen Basiskonzepts nach den KMK-Bildungsstandards (2005) in Kapitel 2.3). Auf diese Weise kann nach der Analyse der Präkonzepte und der Verständniseentwicklung von Schülerinnen und Schüler ein Spiralcurriculum über mehrere Schuljahre anhand des Basiskonzepts Energie als Interventionsmaßnahme entwickelt werden.

Der Formen-Ansatz zur Energie wird hier aufgrund der hohen Verbreitung im Physikunterricht und der damit verbundenen hohen Akzeptanz unter Lehrkräften gewählt. Er bietet sich zudem an, um Inhalte aus physikalischen Sachgebieten über

Energieformen und -umwandlungen miteinander zu vernetzen. So ist bspw. die kinetische Energie eine Energieform der Mechanik, wohingegen die elektrische Energie eine Energieform der Elektrizitätslehre ist und beide Energieformen über die Umwandlung ineinander verbunden sind.

Die Verbindung von Energieformen bzw. die sukzessive Vernetzung von Inhalten aus Sachgebieten über Energieformen im Sinne eines Spiralcurriculums setzt jedoch eine Verortung der Energieformen und Sachgebiete in Jahrgangsstufen der Sekundarstufe I voraus. Die Verortung erfolgt normalerweise anhand politischer Vorgaben in Lehrplänen für den Physikunterricht der Sekundarstufe I. Aus dem Grund wird im Folgenden eine Lehrplananalyse zur Verortung von Energieformen und Sachgebieten in Jahrgangsstufen vorgestellt.

### 3.1.3. Lehrplananalyse

Das Ziel der Lehrplananalyse ist die thematische und zeitliche Einordnung der Energieformen nach Jahrgängen und Sachgebieten der Sekundarstufe I des Physikunterrichts. Hier ist zu beachten, dass die deutschen KMK-Bildungsstandards (2005) nur Vorgaben für die landesspezifischen Lehrpläne, jedoch keine inhaltliche und zeitliche Vorgabe für Schulen machen. Zudem ist zu beachten, dass die landesspezifischen Lehrpläne sich untereinander substantiell unterscheiden (Euler, 2011). Das spezifischere Ziel der Lehrplananalyse ist vor dem Hintergrund die Erarbeitung eines gemeinsamen Lehrplans für die Energieformen nach Sachgebieten. Hier hat sich in einer ersten Sichtung der Lehrpläne gezeigt, dass aufgrund der substantiellen Unterscheidungen kein gemeinsamer Lehrplan für alle 16 Bundesländer entwickelt werden kann. Ein Problem stellte hier zum einen die unterschiedlich zeitlichen Umstellungen von G8 auf G9 in den Bundesländern. Zum anderen beginnt der Physikunterricht in unterschiedlichen Jahrgängen und behindert damit die Entwicklung eines gemeinsamen Lehrplans. Aus dem Grund wurde die Lehrplananalyse exemplarisch auf Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen und Schleswig-Holstein als Bundesländer zur Erprobung der Interventionsmaßnahme beschränkt.

#### Methodisches Vorgehen:

In den drei Bundesländern sind die Sachgebiete auf Doppeljahrgänge verteilt (bspw. Ministerium für Schule und Weiterbildung & des Landes Nordrhein-Westfalen, 2008) und verhindern damit eine Zuordnung von Energieformen zu einzelnen Jahrgängen. Zudem

sind in den Lehrplänen die Energieformen teilweise nicht explizit genannt und durch einen geringen Spezifizierungsgrad der zu unterrichtenden Inhalte schwierig identifizierbar. Deshalb wurden zusätzlich ausgewählte schulinterne Curricula (SIC) herangezogen. Diese konkretisieren die Lehrpläne der Länder, indem sie zum einen die Inhalte der Lehrpläne auf einzelne Jahrgänge verteilen und zum anderen inhaltlich spezifizieren. Als Quellengrundlage der Lehrplananalyse dienten daher zum einen die Lehrpläne der Bundesländer als verpflichtende Vorgaben für alle Schulen der Bundesländer und zum anderen exemplarisch ausgewählte SIC zur Spezifizierung der Inhalte der Lehrpläne und zur Einteilung der Energieformen auf einzelne Jahrgangsstufen. Obwohl grundsätzlich davon auszugehen ist, dass die SIC die Vorgaben der Lehrpläne erfüllen, soll durch die Berücksichtigung beider Elemente die Güte der Lehrplananalyse erhöht und hier Fehler ausgeschlossen werden.

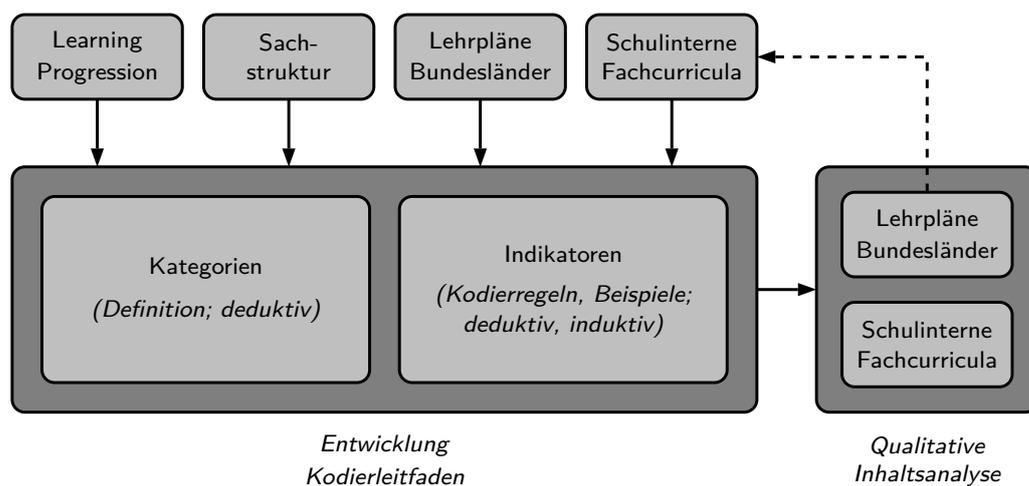


Abb. 4. Das methodische Vorgehen zur Einteilung von Energieformen auf Jahrgangsstufen in drei Bundesländern basiert auf der Methode der Qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring (2014). Die auf Grundlage einer Sachstruktur entwickelten Kategorien dienen der Identifizierung der Energieformen im Lehrplan. In einem deduktiv-induktiven Verfahren werden sowohl Energieformen im Lehrplan identifiziert als auch der Kodierleitfaden weiterentwickelt.

Das methodische Vorgehen der Lehrplananalyse ist in Abb. 4 dargestellt. In einem ersten Schritt wurde für die Entwicklung eines Kodierleitfadens Kategorien deduktiv aus der Learning Progression für das Energiekonzept (z. B. Neumann et al., 2013) und der zugrundeliegenden Sachstruktur der Physik entwickelt. Die Kategorien entsprechen den Energieformen der Sachgebiete der Physik. Ein Beispiel hierfür ist die elektrische Energie als Energieform der Elektrizitätslehre. In einem zweiten Schritt wurden Paraphrasen in den Lehrplänen und SIC identifiziert, die auf eine Behandlung einer Energieform in einem

Sachgebiet hindeuten. Dieser Schritt ist notwendig, da die Energieformen sowohl in den Lehrplänen der Bundesländer als auch in den SIC teilweise nicht explizit genannt werden. Eine exemplarische Auswahl von Paraphrasen zu Energieformen und deren Lehrplänen ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1. Auszug aus dem Kodierleitfaden zur Identifikation physikalischer Inhalte mit einem Energiebezug für eine Lehrplananalyse. Anhand exemplarischer Paraphrasen sollen Textstellen im Lehrplan bzw. schulinternen Curriculum markiert und der entsprechenden Kategorie zugeordnet werden.

Quelle	Paraphrase	Kategorie
NRW: SIC 1	„elektrischer Strom transportiert Energie“	Elektrische Energie (Energietransport)
Kernlehrplan Nordrhein-Westfalen	„Aufbau und Funktionsweise eines Kraftwerks“ (Sachgebiet: Elektrizität)	Elektrische Energie (Induktion)
SH: SIC 3	„Transport beim Umzug“ (Sachgebiet: Kraft und Energie)	Lageenergie

Es zeigte sich in der Analyse der Lehrpläne eine unterschiedliche inhaltliche Behandlung vieler Energieformen, so dass diese im Aufstellen der Kategorien aufgenommen wurde. So wird bspw. im Anfangsunterricht Physik zumeist die elektrische Energie in Form eines Energietransports in einfachen elektrischen Stromkreisen thematisiert. In den Jahrgängen 9/10 wird dagegen die elektrische Energie in Verbindung mit der elektromagnetischen Induktion fokussiert (vgl. hier auch Abschnitt 3.1.1). In der Folge wurde daher im Kodierleitfaden die Kategorie „Elektrische Energie“ in „Elektrische Energie (Energietransport)“, „Elektrische Energie (Leistung & Stromkreise)“ und „Elektrische Energie (Induktion)“ unterteilt. Sowohl die deduktiven (klassischen) als auch die induktiv erweiterten (adaptierten) Kategorien sind in Tabelle 2 dargestellt.

Im dritten Schritt wurde eine qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring (2014) durchgeführt. Dazu wurden die Energieformen des Kategoriensystems in den Lehrplänen identifiziert und anhand der Lehrpläne je Bundesland auf Doppeljahrgänge verteilt. Im Anschluss wurden die Energieformen anhand fünf ausgewählter SIC je Bundesland konkreten Jahrgängen zugeordnet. Das Kriterium für die Zuordnung einer Energieform in einen Jahrgang je Bundesland war die Thematisierung der Energieform in mindestens zwei SIC in einem Bundesland im jeweiligen Jahrgang. Durch dieses Kriterium wird sichergestellt, dass einzelne abweichende SIC im weiteren Vorgehen nicht berücksichtigt werden. Besteht eine Abweichung von SIC in mehr als einem Fall, werden diese zudem

durch das o.g. Kriterium berücksichtigt. Zum Abschluss wurden die Ergebnisse der einzelnen Bundesländer zusammengeführt. Eine absolute und übergreifende Einteilung der Energieformen in Jahrgänge war hier jedoch aufgrund der Unterschiede zwischen den Bundesländern nicht vollständig möglich. Zum einen variiert die Durchführung des Physikunterrichts in der 5. und 6. Jahrgangsstufe in Abhängigkeit vom Bundesland, zum anderen unterscheiden sich sowohl Schulen als auch Bundesländer in der Umsetzung von G8 bzw. G9.

Tabelle 2. Unterscheidung der Kategorienbildung in deduktive (klassische) und induktiv erweiterte Kategorien. Die deduktiven Kategorien ergeben sich aus der Learning Progression und der Sachstruktur, die induktive Erweiterung aus der Analyse der Lehrpläne und schulinternen Fachcurricula (vgl. Abb. 4).

<b>Kategorien (klassisch)</b>	<b>Kategorien (adaptiert)</b>
Kinetische Energie	Kinetische Energie
Elastische Energie	Elastische Energie
Lageenergie	Lageenergie
Thermische Energie	Thermische Energie (Energietransport)
	Thermische Energie (Temperatur)
Strahlungsenergie	Strahlungsenergie
Elektrische Energie	Elektrische Energie (Energietransport)
	Elektrische Energie (Leistung & Stromkreise)
	Elektrische Energie (Induktion)

Vor dem Hintergrund des Ziels der Vernetzung von Inhalten anhand von Basiskonzepten wurde deshalb eine Verteilung von Energieformen auf Jahrgänge verworfen. Stattdessen wurden mögliche Verbindungen zwischen Energieformen bundeslandübergreifend identifiziert. Eine Verbindung zwischen einer Energieform A zur Energieform B lässt sich schließlich nur herstellen, wenn Energieform B vor Energieform A im Unterricht thematisiert wurde. Energieform A wird in dem Zuge als Haupt- und Energieform B als Bezugsenergieform bezeichnet und für die Verbindung zwischen beiden Energieformen folgende Kriterien aufgestellt:

1. Die Bezugsenergieform wird in einem Jahrgang vor dem Jahrgang der Hauptenergieform behandelt.
2. Die Bezugsenergieform wird im gleichen Jahrgang wie die Hauptenergieform behandelt.

3. Die Bezugsenergieform wird sowohl im vorigen als auch im gleichen Jahrgang wie die Hauptenergieform behandelt.

Trifft eine der Kriterien nicht zu, kann keine Interventionsmaßnahme zu einer Haupt- mit Verbindung zu einer Bezugsenergieform entwickelt werden.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen:

In Abb. 5 sind die die möglichen Verbindungen zwischen den Energieformen als Haupt- bzw. Bezugsenergieformen dargestellt. Links sind die Energieformen als Haupt- und oben diese als Bezugsenergieformen zu lesen. Für die jeweiligen Verbindungen zwischen den Energieformen ist angegeben, in wie vielen Bundesländern eine Verbindung der beiden Energieformen möglich ist. Beispielsweise kann die Lageenergie als Haupt- mit der kinetischen Energie als Bezugsenergieform in 3/3 Bundesländern behandelt werden, da die Thematisierung der kinetischen Energie in den Bundesländern jeweils vor der Thematisierung der Lageenergie im Lehrplan stattfindet.

	Kinetische Energie	Elastische Energie	Lageenergie	Thermische Energie (Energietransport)	Thermische Energie (Temperatur)	Strahlungsenergie	Elektrische Energie (Energietransport)	Elektrische Energie (Leistung & Stromkreise)	Elektrische Energie (Induktion)
Kinetische Energie	-	2	2	2	2	2	2	2	0
Elastische Energie	1	-	0	1	1	1	1	0	0
Lageenergie	3	2	-	3	3	2	3	3	1
Thermische Energie (Energietransport)	1	1	1	-	-	1	1	1	1
Thermische Energie (Temperatur)	1	1	1	-	-	2	2	1	1
Strahlungsenergie	0	0	0	2	2	-	1	0	0
Elektrische Energie (Energietransport)	1	2	0	2	2	2	-	-	-
Elektrische Energie (Leistung & Stromkreise)	3	2	2	2	2	2	-	-	-
Elektrische Energie (Induktion)	3	2	3	3	3	2	-	-	-

Abb. 5. Die Zusammenführung der Bundesländer stellt die Anzahl der Bundesländer dar, in denen eine Verbindung zwischen einer Hauptenergieform (Zeilen) und einer jeweiligen Bezugsenergieform (Spalten) möglich ist.

Demnach ergeben sich insgesamt 10 Verbindungen von Energieformen, die in allen drei Bundesländern möglich sind. Diese Verknüpfungen thematisieren als Hauptenergieform jedoch fast ausschließlich die Lage- und die elektrische Energie (Induktion). Eine Interventionsmaßnahme zu ausschließlich diesen beiden Energieformen entspräche jedoch nicht dem regelmäßigen Aufgreifen des Energiekonzepts in der Sekundarstufe I,

da die Energieformen nur am Ende der Sekundarstufe I behandelt werden. Aus dem Grund wurde zusätzlich beschlossen, Verbindungen zwischen Energieformen zuzulassen, die nur in 2/3 Bundesländern möglich, aber speziell auch in den unteren Jahrgängen der Sekundarstufe I einsetzbar sind.

Insgesamt konnten auf diese Weise anhand der Lehrplananalyse mögliche Verbindungen zwischen Energieformen innerhalb eines Jahrgangs identifiziert werden. Die Lehrplananalyse schließt damit an die fachliche Klärung und die Klärung der Präkonzepte an, indem die fachlichen und fachdidaktischen Überlegungen unterrichtspraktisch konkretisiert werden. Die Orientierung an der Unterrichtspraxis wird im Folgenden durch eine Strukturierungsmaßnahme fortgesetzt.

### 3.1.4. Strukturierungsmaßnahme

Im Anschluss an die Lehrplananalyse muss vor der Entwicklung einer Interventionsmaßnahme geklärt werden, wie das Unterrichtsmaterial vor dem Hintergrund der Förderung kumulativen Lernens strukturiert wird.

Für die Strukturierung von Unterricht im Allgemeinen bedarf es nämlich einem Unterrichtskonzept bzw. -modell (z.B. Kattmann et al., 1997). Unterrichtskonzepte lassen sich grob in direkte Instruktion und forschend-entdeckenden Unterricht unterteilen (Cobern et al., 2010). Zendler (2018) bezeichnet in dem Zuge die direkte Instruktion als „eine lehrerzentrierte Unterrichtsmethode, in der die Lehrperson die zentrale Rolle in der Lenkung des Unterrichtsgeschehens übernimmt und diese bis zum Ende des Lernprozesses auch nicht wieder abgibt“ (S. 29). Direkte Instruktion ist dabei nicht mit Frontalunterricht zu verwechseln (z.B. Weinert, 1999). Zwar bestimmt die Lehrkraft den Unterrichtsinhalt, strukturiert den Unterricht anhand des Inhalts, es findet jedoch nicht ausschließlich ein Lehrkraftvortrag statt. Vielmehr führen Schülerinnen und Schüler Experimente durch, erarbeiten sich Inhalte und (naturwissenschaftliche) Modelle unter jeweiliger Anweisung der Lehrkraft.

Während direkte Instruktion ein eher lehrkraftzentriertes Unterrichtskonzept ist, ist ein forschend-entdeckender Unterricht eher lernendenzentriert (Riga et al., 2017). Forschend-entdeckender Unterricht soll damit Schülerinnen und Schüler stärker als in der direkten Instruktion motivieren, naturwissenschaftliche Fragen zu entwickeln, Hypothesen aufzustellen und Experimente zu eigenen Fragen durchzuführen. Damit soll ich Gegensatz zur direkten Instruktion nicht nur ein fachlicher Inhalt im Unterricht, sondern naturwissenschaftliche Arbeitsweisen auch zur eigenen Erarbeitung von Erkenntnissen

erlernt werden (Abrams et al., 2008). International besser bekannt ist forschend-entdeckendes Lernen unter dem Begriff des *inquiry-based learning*. Anhand des Begriffs „inquiry-based“ wird die Ausrichtung auf naturwissenschaftliche Arbeitsweisen bei gleichzeitiger Erarbeitung eines fachlichen Inhalts expliziert. Durch die Verzahnung von naturwissenschaftlichen Arbeitsweisen und fachlichen Inhalten sollen Schülerinnen und Schüler stärker an der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung teilhaben und den Unterricht authentischer und motivierender wahrnehmen (R. Bybee, 1997).

Forschend-entdeckender Unterricht wird zunehmend in Lehrplänen und nationalen Standards verfolgt (R. W. Bybee, 2014; KMK, 2005; NGSS Lead States, 2013). Dessen Effektivität gegenüber direkter Instruktion dagegen wird weiterhin kontrovers diskutiert. Zwar zeigen einige Arbeiten im Vergleich beider Unterrichtskonzepte einen Vorteil von forschend-entdeckendem Unterricht beim Erlernen zentraler naturwissenschaftlicher Konzepte und Arbeitsweisen (z.B. Harris et al., 2015), andere Forschungsarbeiten zeigen wiederum Vorteile von direkter Instruktion beim Erlernen fachlicher Inhalte (z.B. Oliver et al., 2021; Hattie, 2009). Es scheint demnach, dass für das reine Erarbeiten fachlicher Inhalte sich zwar direkte Instruktion anbietet, in einem forschend-entdeckenden Unterricht jedoch Schülerinnen und Schüler zusätzlich Kompetenzen zu naturwissenschaftlichen Arbeitsweisen entwickeln.

Vor dem Hintergrund des Ziels der Arbeit, der Förderung kumulativen Lernens durch Basiskonzepte, der Rolle von Konstruktivismus und situiertem Lernen für kumulatives Lernen wird als Unterrichtskonzept der forschend-entdeckende Unterricht gewählt. Schülerinnen und Schüler sollen für kumulatives Lernen in einer authentischen Lernumgebung situiert sein, um aktiv Wissen zu konstruieren. Da zudem die Erklärung von Phänomenen und Lösung von Problemen auch Kompetenzen zu naturwissenschaftlichen Arbeitsweisen benötigt (z.B. Berland & McNeill, 2010), bietet sich vor dem Hintergrund dieses Ziels ebenfalls ein forschend-entdeckender Unterricht an.

Project-Based Learning hat sich hier als eine Form eines forschend-entdeckenden Unterrichts bewährt (Miller & Krajcik, 2019; Banchi & Bell, 2008; Blumenfeld et al., 1991). Die aktuelle Forschung zeigt, dass Schülerinnen und Schüler auf dem Project-Based Learning-Ansatz basierenden Unterricht größere Lernzuwächse erzielen gegenüber traditionellen Unterrichtsansätzen (z.B. Geier et al., 2008; Rivet & Krajcik, 2004). Es zeigt sich zudem, dass ein Project-Based Learning-Ansatz eine Möglichkeit zum Abbau ungleicher Lernvoraussetzungen von Schülerinnen und Schülern ist. Insbesondere kann

Project-Based Learning Schülerinnen und Schüler unabhängig der Kultur oder auch des Geschlechts motivieren sich mit naturwissenschaftlichen Themen zu beschäftigen (O. Lee & Buxton, 2010; Moje et al., 2001) und wird daher im Folgenden vorgestellt.

### Project-Based Learning

Project-Based Learning ist ein Unterrichtsansatz, der auf einer konstruktivistischen-kognitivistischen Auffassung von Lehren und Lernen und der Theorie zum situierten Lernen beruht (Miller & Krajcik, 2019; Greeno & Engeström, 2014; Krajcik & Shin, 2014; Bransford et al., 2000; Lave & Wenger, 1991). Nach dieser Auffassung entwickeln Schülerinnen und Schüler ein tieferes Verständnis eines Unterrichtsinhalts, wenn sie Wissen durch naturwissenschaftliche Arbeitsweisen aktiv konstruieren und das konstruierte Wissen anschließend in Alltagskontexten anwenden (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2018; Greeno & Engeström, 2014; Lave & Wenger, 1991).

Der naturwissenschaftliche Inhalt wird damit beim Project-Based Learning nicht von der naturwissenschaftlichen Arbeitsweise getrennt. Vielmehr werden Inhalt und Arbeitsweise zur aktiven Wissenskonstruktion verknüpft (Krajcik & Shin, 2014). Die Wissenskonstruktion soll zudem in einer hoch kontextualisierten Lernumgebung stattfinden, die den Schülerinnen und Schüler die Anwendung des naturwissenschaftlichen Inhalts erleichtern soll (Krajcik & Shin, 2014).

Die beiden Prinzipien von Project-Based Learning, d.h. die Verknüpfung von Inhalt und Arbeitsweise und die aktive Auseinandersetzung mit Alltagskontexten bzw. -phänomenen zur Kompetenzentwicklung, stellen eine Reaktion auf eine langjährig beobachtete klassische Unterrichtspraxis dar, in der Lehrkräfte überwiegend Inhalte losgelöst von naturwissenschaftlichen Arbeitsweisen und von einem Alltagskontext unterrichten (z.B. Bransford et al., 2000; Brown et al., 1989). In der klassischen Unterrichtspraxis werden demnach bspw. Experimente von Schülerinnen und Schülern durchgeführt, diese jedoch nicht mit dem zugrundeliegenden naturwissenschaftlichen Inhalt verbunden. Die Unterrichtspraxis widerspricht damit der kognitivistisch-konstruktivistischen Auffassung vom Lernen in den Naturwissenschaften, da die aktive Wissensentwicklung von Schülerinnen und Schüler durch eine Trennung von Arbeitsweise und Inhalt erschwert wird (vgl. Kapitel 2.2 und Krajcik & Shin, 2014). Durch die Trennung von Arbeitsweise und Inhalt erkennen zudem Schülerinnen und Schüler nicht den Zweck, warum sie bestimmte Aufgaben wie das Experimentieren oder

Auswerten von Daten im Unterricht überhaupt durchführen (Schneider et al., 2020). Gerade diese Dekontextualisierung von naturwissenschaftlichem Inhalt und naturwissenschaftlicher Arbeitsweise kann den Transfer auf alltägliche Problemlöse- und Erklärungssituationen erschweren (Duit & Mikelskis-Seifert, 2015; H.-S. Lee & Butler, 2003; Bransford et al., 2000).

Basierend auf den Erkenntnissen zum Lernen in den Naturwissenschaften stellt Project-Based Learning einen Gegenentwurf zur klassischen Unterrichtspraxis dar. Project-Based Learning basiert dabei auf einer kognitivistisch-konstruktivistischen Auffassung vom Lernen in den Naturwissenschaften. Zu der Auffassung zählt, dass (1) Schülerinnen und Schüler aktiv Wissen konstruieren, (2) Lernen ständig situiert ist, (3) soziales Lernen und (4) kognitive Unterstützungen ein integriertes Lernen fördern (J. S. Krajcik & Shin, 2014). Aufbauend auf den vier Auffassungen zum Lernen in den Naturwissenschaften charakterisieren Krajcik & Shin (2014) Project-Based Learning anhand der folgenden sechs Prinzipien (vgl. auch Miller & Krajcik, 2019; Krajcik & Czerniak, 2014; Krajcik et al., 1998; Barron et al., 1998; Blumenfeld et al., 1991):

1. In jeder Unterrichtseinheit zu Project-Based Learning sollen sich die Schülerinnen und Schüler mit einer relevanten und interessanten Leitfrage beschäftigen. Die Leitfrage soll zu Beginn der Unterrichtseinheit entwickelt, aber nicht direkt von den Schülerinnen und Schülern beantwortet werden. Sie stellt in dem Sinne ein Problem dar, das es zu lösen gilt.
2. Zur Beantwortung der Leitfrage sollen die Schülerinnen und Schüler ein naturwissenschaftliches Konzept oder auch mehrere Konzepte entwickeln und vertiefen. Das naturwissenschaftliche Konzept soll hoch relevant für die jeweilige naturwissenschaftliche Fachdisziplin sein und über mehrere Schulstunden entwickelt werden. Die Relevanz des Konzepts sollte sich sowohl durch eine hohe Erklärungsmächtigkeit als auch durch möglichst viele Anknüpfungspunkte weiterer naturwissenschaftlicher Ideen darstellen.
3. Die Schülerinnen und Schüler erschließen sich durch naturwissenschaftliche Arbeitsweisen die Leitfrage: sie entwickeln Experimente zur Leitfrage, werten Daten aus und entwickeln naturwissenschaftliche Modelle (z.B. Schwarz et al., 2009). Zudem entwickeln Schülerinnen und Schüler Erklärungen zu Aspekten der Leitfrage, argumentieren für oder gegen Hypothesen und wenden auf diese Weise das naturwissenschaftliche Konzept zur Beantwortung der Leitfrage an. Die naturwissenschaftlichen Arbeitsweisen sollten sich an den entsprechenden

nationalen Standards und Lehrplänen orientieren (KMK, 2005; National Research Council (NRC), 2012).

4. Die Erschließung der Leitfrage findet zudem in ständigem Austausch mit Mitschülerinnen und -schülern bzw. der Lehrkraft statt. Naturwissenschaftliche Erklärungen und Argumente werden ausgetauscht, bewertet und gemeinsam weiterentwickelt. Durch den Austausch untereinander soll möglichst realistisch der naturwissenschaftliche Problemlöseprozess für die Schülerinnen und Schüler dargestellt werden.
5. Die Schülerinnen und Schüler werden beim Problemlöseprozess durch innovative Lehr- und Lerntechnologien unterstützt. Durch den Einsatz von Simulationen, Videos und naturwissenschaftlichen Modellen können sich Schülerinnen und Schüler naturwissenschaftliche Konzepte und Ideen erschließen, die ihnen z.B. aufgrund fehlender mathematischer Grundlagen (noch) nicht zugänglich sind.
6. Zur Unterrichts- und Ergebnissicherung fertigen die Schülerinnen und Schüler in den Unterrichtsstunden Artefakte an, die in Verbindung mit der Beantwortung der Leitfrage stehen. Die Artefakte dokumentieren den Lernfortschritt und die Entwicklung bzw. Vertiefung des naturwissenschaftlichen Konzepts.

Teils ähnliche Prinzipien finden sich auch bei anderen Unterrichtsansätzen, die situatives Lernen ermöglichen (z.B. Merritt et al., 2017; Halloun, 2004). Ein Alleinstellungsmerkmal für Project-Based Learning ist jedoch der Einsatz einer Leitfrage. Der Einsatz einer Leitfrage soll die Umsetzung der fünf weiteren Prinzipien unterstützen und wird im Folgenden vertieft vorgestellt.

### Umsetzung der Prinzipien durch eine Leitfrage

In einem Unterricht nach dem Ansatz des Project-Based Learning soll ein naturwissenschaftliches Konzept erarbeitet und vertieft werden. Da die Erarbeitung komplexer Konzepte nicht innerhalb weniger Schulstunden möglich ist, sondern vielmehr über viele Schulstunden und -wochen erfolgt, erfordert die Erarbeitung eine sinnvolle Strukturierung des Unterrichts (Lipowsky, 2015; Hattie, 2009; Helmke, 2009). Hierzu gehört insbesondere die Phasierung von Unterricht und die Zerlegung von Unterrichtseinheiten in mehrere aufeinander aufbauende Abschnitte (Lipowsky, 2015). Die Zerlegung in aufeinander aufbauende Abschnitte spielt insbesondere im naturwissenschaftlichen Unterricht eine wichtige Rolle, da diese Fächer bereits hierarchisch und aufeinander aufbauend gegliedert sind (Helmke, 2009). Diese

Gliederung sollte im naturwissenschaftlichen Unterricht fortgesetzt werden, indem Unterrichtseinheiten möglichst in sich geschlossen und kohärent gestaltet werden (Reiser et al., 2017; Fortus et al., 2015). Zur kohärenten Gestaltung einer Unterrichtseinheit bei Project-Based Learning dient die Leitfrage (Krajcik & Czerniak, 2014; Shwartz et al., 2008). Zu Beginn einer Unterrichtseinheit wird die Leitfrage anhand eines oder mehrerer Phänomene von den Schülerinnen und Schülern und in Zusammenarbeit mit der Lehrkraft entwickelt (vgl. im Folgenden auch J. A. Fischer et al., 2021). Ein Beispiel ist die Leitfrage der gleichnamigen Unterrichtseinheit „Warum stoppen manche Dinge, während sich andere Dinge weiterbewegen?“ und dient als Ausgangspunkt zur Erarbeitung des Energiekonzepts (Fortus et al., 2012). In der Unterrichtseinheit werden den Schülerinnen und Schülern in einer Einstiegsphase verschiedene Phänomene anhand von Gegenständen präsentiert, deren Bewegungen teilweise enden (z.B. ein Fadenpendel) bzw. auch teilweise aufrechterhalten werden (z.B. ein Forever-Spin<sup>6</sup> oder eine Lichtmühle<sup>7</sup>). Die Schülerinnen und Schüler entwickeln schließlich rund um die Phänomene Fragen, wie z.B.

- „Warum stoppt der ForeverSpin nicht wie ein gewöhnlicher Kreisel?“
- „Warum stoppt ein gewöhnlicher Kreisel?“
- „Wann dreht sich die Lichtmühle?“
- „Wie dunkel muss es sein, damit die Lichtmühle stoppt?“
- „Wann schwingt ein Pendel ewig weiter?“

Nachdem die Schülerinnen und Schüler die Fragen entwickelt haben, sammelt die Lehrkraft die Fragen und entwickelt aus diesen in einem Unterrichtsgespräch die übergeordnete Leitfrage. Die Beantwortung der übergeordneten Leitfrage bildet in dem Sinne das Ziel für die Schülerinnen und Schüler in der Unterrichtseinheit (Krajcik & Czerniak, 2014). Gleichzeitig ist das fachliche Lernziel der Unterrichtseinheit die Erarbeitung und Vertiefung eines naturwissenschaftlichen Konzepts, das durch

---

<sup>6</sup> Ein Forever-Spin ist ein klassischer Kreisel aus Metall, der händisch in eine Drehbewegung versetzt werden kann. Wird der Forever-Spin auf einem kleinen zylinderförmigen Podest gedreht, endet die Drehbewegung nicht. Eine Batterie inklusive Spule und Eisenkern erzeugt nach jeder Umdrehung des Kreisels für einen kurzen Moment ein Magnetfeld. Durch das Magnetfeld wird der Kreisel kurz abgestoßen und beschleunigt, so dass die Drehgeschwindigkeit des Kreisels nicht abnimmt (Schlichting & Ucke, 2014).

<sup>7</sup> Eine Lichtmühle besteht aus vier Flügeln, die auf einer Metallspitze so angeordnet sind, dass sie sich horizontal wie eine Mühle drehen lassen. Eine Seite jedes Flügels ist schwarz, eine Seite silbrig. Die Konstruktion ist in eine Glaskugel eingeschlossen. Fällt nun Licht auf die Lichtmühle, führen die Flügel aufgrund unterschiedlicher Erwärmungen der Flügel eine Drehbewegung aus (Dörfel & Müller, 2003).

übergeordnetes Standards bzw. Lehrpläne vorgegeben ist (Krajcik et al., 2008). Das Ziel für die Schülerinnen und Schüler und das fachliche Lernziel passen insofern zueinander, als dass die Schülerinnen und Schüler zur Erreichung des Ziels das naturwissenschaftliche Konzept erarbeiten bzw. vertiefen müssen (Schneider et al., 2020). Die Erarbeitung des naturwissenschaftlichen Konzepts wird schließlich durch die Beantwortung der Leitfrage von der Lehrkraft überprüft. Bei der Entwicklung einer Leitfrage zur Erarbeitung eines naturwissenschaftlichen Konzepts sollten insgesamt folgende Punkte beachtet werden (Penuel & Bell, 2016):

1. Die Leitfrage sollte möglichst bedeutsam entweder direkt für die Schülerinnen und Schüler oder für die Gesellschaft sein (Penuel & Bell, 2016). Durch eine hohe wahrgenommene Bedeutsamkeit der Leitfrage kann nicht nur die Motivation der Schülerinnen und Schüler erhöht, sondern auch Zielklarheit im Unterricht erzeugt werden.
2. Die Leitfrage sollte zudem ein hohes Maß an Kontextualisierung aufweisen, indem sie sich aus einem oder mehreren Phänomenen aus dem Alltag der Schülerinnen und Schüler ableiten lässt. Aus der Alltagswelt entstammende Phänomene können hier nicht nur das Interesse der Schülerinnen und Schüler, sondern insbesondere auch den Transfer naturwissenschaftlicher Ideen auf den Alltag erleichtern (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2018; Duit & Mikelskis-Seifert, 2015). Von dem Einsatz einer hoch kontextualisierten Leitfrage können hier vor allem lernschwächere Schülerinnen und Schüler profitieren.
3. Da die Schülerinnen und Schüler ein naturwissenschaftliches Konzept über mehrere Unterrichtsstunden bzw. über ein naturwissenschaftliches Sachgebiet erarbeiten, muss die Leitfrage über mehrere Schulwochen tragen (Krajcik & Czerniak, 2014). Für eine lange Tragfähigkeit sollte die Leitfrage nicht bereits nach einer Unterrichtsstunde beantwortbar sein. Gleichzeitig dürfen die Schülerinnen und Schüler nicht das Interesse an der Beantwortung der Leitfrage über den Zeitraum verlieren. Mithilfe der Leitfrage lässt sich ein Ziel für den Zeitraum formulieren, aber auch ständig durch Rückschlüsse auf die Beantwortung der Leitfrage und damit auf deren Phänomen zurückgreifen.
4. Um eine lange Tragfähigkeit zu gewährleisten, muss die Leitfrage entsprechend komplex sein. Insbesondere sollte die Leitfrage nicht innerhalb einer Unterrichtsstunde oder durch eine Internet- oder Buchrecherche direkt beantwortet werden können.

5. Damit die Leitfrage nach einer Unterrichtseinheit von den Schülerinnen und Schülern beantwortet werden kann, muss sie an den kognitiven Fähigkeiten und Fertigkeiten der Schülerinnen und Schüler orientiert sein. Insbesondere beim lernendenzentrierten Unterrichtsansatz des Project-Based Learning wird die Beantwortung der Leitfrage durch die Schülerinnen und Schüler selbst vorausgesetzt.

Da die Erarbeitung des Konzepts in mehreren Teilschritten und über mehrere Wochen durchgeführt wird, wird analog auch die Leitfrage in mehrere Teilschritte bzw. -fragen zerlegt (Nordine et al., 2019). Die Teilfragen strukturieren in der Folge die Unterrichtseinheit und ihre Beantwortungen tragen zur Beantwortung der Leitfrage bei (Krajcik & Czerniak, 2014). Um auch bei der Entwicklung von Teilfragen eine hohe Lernendenzentrierung zu erreichen, werden hierfür die zu den Eingangsphänomenen entwickelten Fragen der Schülerinnen und Schüler genutzt (Nordine & Torres, 2013). In der zuvor vorgestellten Unterrichtseinheit zur Leitfrage „Warum stoppen manche Dinge, während sich andere Dinge weiterbewegen?“ (Fortus et al., 2012) bieten sich hier bspw. die Nutzung folgender Teilfragen an:

- „Warum stoppt ein Kreisel?“
- „Warum stoppt der ForeverSpin nicht?“

Im Anschluss werden die Fragen von den Schülerinnen und Schülern und der Lehrkraft jeweils so geordnet, dass die Beantwortungen der Fragen sich gegenseitig begünstigen und zur Beantwortung der Leitfrage beitragen. Entsprechend sollte zunächst die Teilfrage beantwortet werden, warum ein gewöhnlicher Kreisel stoppt, um anschließend die Frage zu beantworten, warum ein Forever-Spin im Gegensatz zu einem gewöhnlichen Kreisel nicht stoppt. Durch die Strukturierung der Unterrichtseinheit sind auf diese Weise die Schülerinnen und Schüler an der Gestaltung des Unterrichts beteiligt, so dass das Autonomieempfinden der Schülerinnen und Schüler erhöht werden kann (Thuneberg et al., 2018). Die Strukturierung der Unterrichtseinheit anhand mehrerer Teilfragen erlaubt zudem die ständige Verortung einzelner Unterrichtsstunden in der gesamten Unterrichtseinheit (Nordine et al., 2019). In den einzelnen Unterrichtsstunden kann die Lehrkraft auf die Struktur zurückgreifen, indem bereits erarbeitete Erkenntnisse und Antworten auf Teilfragen mit kommenden Aktivitäten und Teilfragen verknüpft werden (J. A. Fischer et al., 2021). Durch die Beantwortung der Teilfragen und der damit schrittweisen Beantwortung der Leitfrage entwickeln die Schülerinnen und Schüler zudem ein Produkt, das den Lernfortschritt demonstriert.

Als Teil naturwissenschaftlicher Arbeitsweisen entwickeln die Schülerinnen und Schüler Fragen zu einem oder mehreren Phänomenen. Um die Fragen im Verlauf einer Unterrichtseinheit mithilfe eines naturwissenschaftlichen Konzepts zu beantworten, entwickeln die Schülerinnen und Schüler Modelle, führen Experimente durch und argumentieren für oder gegen Antworten zu Teilfragen. Auf diese Weise unterstützt der Einsatz einer Leitfrage die Verbindung zwischen naturwissenschaftlichem Inhalt und Arbeitsweise. Die Leitfragen bzw. Teilfragen schaffen eine Notwendigkeit für die Erarbeitung eines naturwissenschaftlichen Inhalts, dessen Erarbeitung wiederum mithilfe naturwissenschaftlicher Arbeitsweisen erfolgt.

Leitfragen können damit eine Unterrichtseinheit sinnvoll strukturieren, bei der Erarbeitung eines naturwissenschaftlichen Konzepts unterstützen, naturwissenschaftlichen Inhalt und Arbeitsweise miteinander verbinden und durch die Beantwortung der Teilfragen den Lernfortschritt demonstrieren. Die Prinzipien von Project-Based Learning und der Einsatz einer Leitfrage können zudem durch verschiedene Hilfsmittel umgesetzt werden.

### Hilfsmittel bei der Umsetzung von Project-Based Learning

Trotz der sehr positiven Befunde zu Unterricht basierend auf einem Project-Based Learning-Ansatz ist in den letzten Jahrzehnten zu beobachten, dass Project-Based Learning überwiegend zur Forschung und Entwicklung innovativer Unterrichtseinheiten von Forscherinnen und Forschern der Naturwissenschaftsdidaktik genutzt wird (Coburn, 2003; Condliffe, 2017; Halvorsen et al., 2012; Lam et al., 2010). Beispiele für innovative Unterrichtseinheiten aus der Forschung, die nach dem Konzept von Project-Based Learning entwickelt wurden, finden sich u.a. bei Krajcik et al. (2008) bzw. bei Reiser (2017). Krajcik et al. (2008) entwickelten u.a. eine Unterrichtseinheit zur Entwicklung des Energiekonzepts durch den systematischen Aufbau entlang von Energieformen und deren Verknüpfungen untereinander über die Energieumwandlung (Fortus, 2012). Die Unterrichtseinheit ist in zwölf Teile gegliedert, wobei eine Einheit entsprechend aus 3-5 Schulstunden besteht. Unterrichtseinheiten dieser Art sind in mehreren Entwicklungsschritten getestet, evaluiert, verfeinert und verbessert worden und umfassen sowohl aufwendig gestaltete Unterrichtsmaterialien für Schülerinnen und Schüler als auch detaillierte Instruktionshinweise für Lehrkräfte.

Die Entwicklung von Unterricht bzw. Unterrichtseinheiten von Lehrkräften selbst basierend auf Project-Based Learning findet hingegen weniger statt (Coburn, 2003).

Möglicherweise schreckt gerade viele Lehrkräfte die komplizierte Gestaltung eines aufeinander aufbauenden und lang geplanten Unterrichts ab (Condliffe, 2017). Zudem vermuten Blumenfeld et al. (1991), dass der hohe Grad an individualisiertem und lernendenzentriertem Lernen viele Lehrkräfte aufgrund eines möglicherweise einsetzenden Kontrollverlusts vor der Umsetzung von Project-Based Learning abschreckt. Lehrkräfte geben außerdem an, dass individualisiertes und von Schülerinnen und Schülern initiiertes Lernen schnell unproduktiv werden und vom Lernziel abweichen kann (Blumenfeld et al., 1991). Nach Lam et al. (2010) mangelt es außerdem Lehrkräften an strukturellen und motivationalen Unterstützungsmaßnahmen seitens der eigenen Schule zur Umsetzung und Implementierung eines Project-Based Learning-Ansatzes.

Um den verschiedenen Herausforderungen und Schwierigkeiten bei der Anwendung eines Project-Based Learning-Ansatzes zu begegnen, wurden verschiedene Hilfsmittel zur Umsetzung des Ansatzes rund um Project-Based Learning entwickelt.

Um einen Kontrollverlust beim Entwickeln von Fragen rund um Phänomene zu verhindern, entwickelten bspw. Reiser et al. (2017) die *Anchoring Phenomena Routine* für die Einleitung einer Unterrichtseinheit. Nach Reiser et al. (2017) sollen die Schülerinnen und Schüler nach der Entwicklung der Leitfrage bereits erste Antworten zur Leitfrage formulieren. Zum einen erhält so die Lehrkraft Informationen über den Kompetenzstand der Schülerinnen und Schüler und kann zum anderen anhand der Antworten explizieren, dass der Kompetenzstand der Schülerinnen und Schüler zur Beantwortung der Leitfrage noch nicht ausreicht und zunächst ein naturwissenschaftliches Konzept erarbeitet werden muss. Die Notwendigkeit zur Erarbeitung des naturwissenschaftlichen Konzepts kann auf diese Weise verstärkt werden und sich in der Folge positiv auf den Lernerfolg der Schülerinnen und Schüler auswirken (vgl. auch Schneider et al., 2020). Zusätzlich zu dem ersten Beantwortungsversuch der Leitfrage suchen die Schülerinnen und Schüler ähnliche Phänomene und Fragestellungen aus ihrem Alltag. Dieses Vorgehen soll für die Schülerinnen und Schüler sowohl die Bedeutsamkeit der Fragestellung erhöhen als auch den Transfer auf ähnliche Kontexte nach Abschluss der Unterrichtseinheit erleichtern (Reiser et al., 2017).

Um der zudem von Lehrkräften empfundenen komplizierten Gestaltung eines strukturierten und aufeinander aufbauenden Unterrichts über viele Schulwochen zu begegnen, entwickelten Krajcik et al. (2008) ein Verfahren für die Entwicklung solchen Unterrichts mit Anknüpfung an den Lehrplan. Die Entwicklung basiert dabei auf der

Beobachtung, dass die Komplexität einer alltagsnahen und hoch kontextualisierten Leitfrage nur schwer mit Lehrplänen zu verbinden sind. Hierdurch wird eine Integration solchen Unterrichts durch Lehrkräfte in den eigenen Unterricht zusätzlich erschwert (Kesidou & Roseman, 2002). In dem Verfahren nach Krajcik et al. (2008) werden deshalb ausgehend von den Lehrplänen zunächst für ein naturwissenschaftliches Sachgebiet und deren Inhalte einzelne Lernziele und mit einer naturwissenschaftlichen Arbeitsweise als eine *Learning Performance* verknüpfend formuliert. Es wird zudem je Learning Performance das nötige Vorwissen und mögliche Lernendenvorstellungen ergänzt. Im Anschluss werden die Learning Performances in einer kohärente Sequenzierung angeordnet, die eine aufeinander aufbauende Entwicklung von Kompetenzen ermöglichen (Krajcik et al., 2008). Zur Sequenzierung passender Kontexte und Phänomene werden Teilfragen rund um Phänomene und Kontexte entwickelt, diese mit einer übergeordneten Leitfrage verknüpft und mit ersten Unterrichtsinstruktionen verbunden. Nach einer abschließenden Feedbackrunde wird dieses Verfahren mehrfach wiederholt und die Sequenzierung überarbeitet. Insgesamt soll das Verfahren nach Krajcik et al. (2008) insbesondere Lehrkräften, aber auch Entwicklern bzw. Forschenden die Entwicklung einer Unterrichtseinheit nach dem Project-Based Learning-Ansatz basierend auf Lehrplänen durch eine festes und strukturiertes Verfahren vereinfachen. Ergänzt wird das Verfahren durch die Nutzung von *Storylines* (Nordine et al., 2019). Storylines sollen durch die Verbindung von Kontexten, Inhalten und Unterrichtsstunden verstärkt Kohärenz innerhalb einer Unterrichtseinheit schaffen. Mithilfe von Storylines werden die einzelnen Unterrichtsstunden entlang einer Kontextualisierung angelegt, so dass die Schülerinnen und Schüler regelmäßig erinnert werden, was ihnen bereits über die Kontextualisierung bekannt ist und was noch neu erlernt werden muss. Es wird zudem stärker in einer Storyline expliziert, wie die einzelnen Kontextbereiche miteinander zusammenhängen und warum naturwissenschaftliche Konzepte neu erarbeitet oder auch Modelle überarbeitet werden müssen (Schneider et al., 2020).

Die Hilfsmittel zielen insbesondere auf die Kohärenzbildung von Unterrichtseinheiten basierend auf einem Project-Based Learning-Ansatz ab bzw. auf Möglichkeiten, Lehrkräfte bei der Entwicklung kohärenter Unterrichtseinheiten zu unterstützen. Die Entwicklung kohärenter Unterrichtseinheiten basiert hier vor allem auf der Beobachtung, dass kohärenter Unterricht zumeist lernwirksamer und auch motivationsfördernder für Schülerinnen und Schüler ist (Schneider et al., 2020; Beier et al., 2019; Harris et al., 2015), jedoch überwiegend im naturwissenschaftlichen Unterricht unterrepräsentiert ist

(Banilower et al., 2018). Es ist hier jedoch zu beachten, dass die Unterrichtseinheiten nicht nur möglichst fachlich und kontextuell kohärent aufeinander aufgebaut sind, sondern diese Kohärenz auch von den Schülerinnen und Schülern als solche wahrgenommen wird (Sikorski & Hammer, 2017). Die Kohärenzwahrnehmung von Schülerinnen und Schülern ist in der Folge also sicherzustellen und ein wesentliches Qualitätsmerkmal, was bei der Entwicklung solcher Unterrichtseinheiten nach dem Project-Based Learning-Ansatz sicherzustellen ist.

### 3.2. Design und Entwicklung energiebasierter Unterrichtseinheiten

Im vorangegangenen Zyklus aus Analyse und Exploration wurde das Energiekonzept in der Physik aus fachlicher Perspektive vorgestellt und erarbeitet, wie Schülerinnen und Schüler ein Verständnis von Energie entwickeln. Demnach entwickeln Schülerinnen und Schüler durch die sukzessive Integration von Energieformen und deren Umwandlungen ineinander ein zunehmend elaborierteres Verständnis von Energie. Aufgrund der vielfältigen Manifestationen von Energie als Energieformen in verschiedenen Sachgebieten der Physik eignet sich zudem Energie in besonderem Maße zur vertikalen Vernetzung von Inhalten der Physik. Anhand einer Lehrplananalyse wurden zudem Möglichkeiten zur Vernetzung von Inhalten anhand möglicher Verbindungen zwischen Energieformen im Lehrplan identifiziert. Abschließend wurde Project-Based Learning als lernendenzentrierter Unterrichtsansatz vorgestellt, der in besonderem Maße kumulatives Lernen durch einen möglichst kohärenten und hoch kontextualisierten Unterricht fördern soll.

Im zweiten Zyklus zum Design und der Entwicklung wird aufbauend auf dem ersten Zyklus ein Prototyp einer Interventionsmaßnahme für den Unterricht zur Förderung kumulativen Lernens theoretisch konzipiert und eine erste Entwicklung vorgestellt. Dieser erste Entwicklungsschritt ist nicht Teil dieser Arbeit und wird daher im Folgenden nur grob umrissen.

#### 3.2.1. Prototyp einer Interventionsmaßnahme

Ein konkretes Unterrichtsmaterial als Prototyp einer Interventionsmaßnahme muss gemäß des vorigen Zyklus wiederkehrend und regelmäßig das Basiskonzept Energie bzw. spezifischer die Umwandlung von Energieformen aufgreifen, um die Verständnisentwicklung von Energie zu fördern. Gleichzeitig soll das Basiskonzept

Energie ebenfalls wiederkehrend genutzt werden, um physikalische Inhalte miteinander vertikal zu vernetzen und damit Schülerinnen und Schüler den Aufbau eines integrierten Wissens zu ermöglichen. Als Prototyp einer Interventionsmaßnahme wird deshalb ein Unterrichtsmaterial entwickelt, das beide Ziele, d.h. die Verständniserwicklung von Energie und den Aufbau vernetzten Wissens, verfolgt. Gleichzeitig ist zu beachten, dass Schülerinnen und Schüler zwischen der Verständniserwicklung von Energie und dem Aufbau vernetzten Wissens auch physikalische Inhalte und Ideen zunächst entwickeln müssen (z.B. Linn, 2006). Demnach muss eine Interventionsmaßnahme mehrere Bausteine konkreter und insbesondere in sich geschlossener Unterrichtseinheiten umfassen, die wiederkehrend die Verständniserwicklung von Energie und den Aufbau vernetzten Wissens ermöglichen. Als Bausteine bzw. Unterrichtseinheiten bieten sich hier vor allem *Curriculum Replacement Units* an (abk. CRUs; Bybee, 2014; Marion & Shepard, 2010).

Eine CRU ist eine kurze und in sich geschlossene kurze Unterrichtseinheit, die bestehenden Unterricht zu einem Thema ersetzen kann (Marion & Shepard, 2010). Eine CRU ist damit eng an einen Lehrplan angelegt bzw. greift Inhalte von Lehrplänen auf. Sie ersetzen einen bestehenden Unterricht, um ein tiefergehendes Verständnis im Hinblick auf grundlegende Konzepte der Naturwissenschaften zu ermöglichen (R. W. Bybee, 2014). Auf diese Weise soll verhindert werden, dass Lehrkräfte mit Inhalten außerhalb eines Lehrplans zusätzlich konfrontiert werden. Eine Überfüllung der Lehrpläne soll durch eine CRU verhindert werden (Marion & Shepard, 2010). CRUs sind damit flexibel von Lehrkräften in einen Unterrichtsgang implementierbar, indem zwar gleiche Inhalte unterrichtet werden, jedoch der Unterricht verschieden konzeptualisiert wird. In dem Zuge betont Bybee (2014) das Potential von CRUs für das Erlernen grundlegender und wiederkehrender naturwissenschaftlicher Konzepte bzw. Leitideen in einem Lehrplan. Demnach kann in einer CRU der gleiche Inhalt unterrichtet, jedoch die Inhalte an naturwissenschaftliche Leitideen angeknüpft werden. CRUs können zudem auch wiederkehrend naturwissenschaftliche Arbeitsweisen aufgreifen und so die Kompetenzentwicklung in Bezug auf die naturwissenschaftliche Arbeitsweise sukzessiv fördern (R. W. Bybee, 2014).

Unterrichtseinheiten in Form von CRUs ermöglichen demnach die Umsetzung der Anforderungen an kumulatives Lernen, indem wiederkehrend die Umwandlung von Energieformen in Form kurzer Unterrichtseinheiten aufgegriffen wird. Die Entwicklung solcher Unterrichtseinheiten in Form von CRUs ist möglich, da die Energieformen in

verschiedenen Sachgebieten der Physik (Mechanik, Elektrizitätslehre, Wärmelehre und Optik) und in verschiedenen Schuljahren erarbeitet und vertieft werden (vgl. Abschnitt 3.1.3). Eine CRU soll hier den Unterricht zur Vertiefung einer jeweiligen Energieform A in einem Sachgebiet ersetzen und die Verbindung der Energieform A zu einer bereits bekannten Energieform B anhand der Energieumwandlung thematisieren. Die Verbindung ist in Abb. 6 exemplarisch für zwei mögliche CRUs dargestellt. Die CRU Y wird in der Jahrgangsstufe 9/10 im Sachgebiet Elektrizitätslehre eingesetzt und vertieft die elektrische Energie  $E_{el}$  mit einer Verbindung zur kinetischen Energie  $E_{kin}$  über die Energieumwandlung. Die kinetische Energie wurde zuvor in der Jahrgangsstufe 7/8 im Sachgebiet Mechanik behandelt.

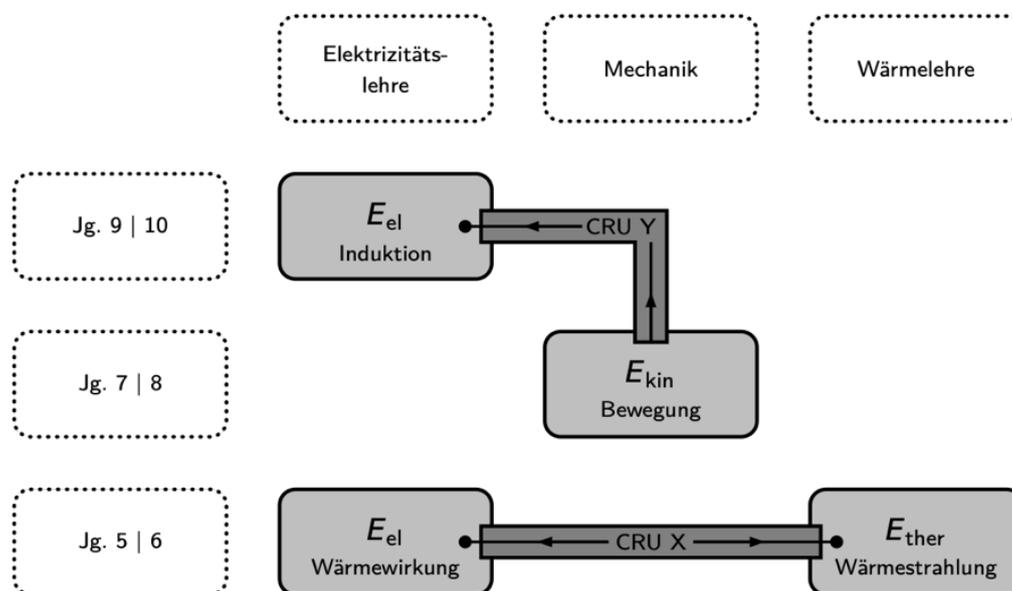


Abb. 6. Exemplarische Darstellung der vertikalen Vernetzung von Inhalten zweier Sachgebiete der Physik durch den Einsatz einer CRU über die Energieumwandlung. Eine CRU wird jeweils im später unterrichteten Sachgebiet eingesetzt, um Inhalte verschiedener Sachgebiete über das Konzept der Energieumwandlung mit einer zuvor behandelten Energieform eines anderen Sachgebiets zu vernetzen. Die CRU kann sowohl innerhalb von Jahrgängen (z.B. Jg. 5/6) oder auch über Jahrgänge hinweg (Jg. 9/10) eingesetzt werden.

Auf diese Weise wird das erste Ziel, die sukzessive Entwicklung eines Energieverständnisses von Schülerinnen und Schülern, durch den Einsatz von CRUs erfüllt. Um das zweite Ziel, den Aufbau vernetzten Wissens, umzusetzen, müssen in einer CRU zudem physikalische Inhalte bzw. Ideen zweier Sachgebiete aufgegriffen werden. Die naturwissenschaftlichen Ideen zur CRU Y aus Abb. 6 sind hier exemplarisch die elektrische Spannung  $U$  und die Stromstärke  $I$  im Sachgebiet Elektrizitätslehre, die der Mechanik sind die Geschwindigkeit  $v$  und die Masse  $m$ . Beide physikalischen Ideen sind Indikatoren der elektrischen bzw. kinetischen Energie und bestimmen deren Größe über

$E_{el} = U \cdot I \cdot t$  bzw.  $E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ , wobei  $t$  die Zeit ist. In der CRU Y soll schließlich in einer Erarbeitungsphase (1) die kinetische Energie mit der elektrischen Energie vernetzt und (2) die Masse bzw. die Geschwindigkeit aus dem Sachgebiet Mechanik über die kinetische Energie mit der elektrischen Energie und damit der elektrischen Spannung und Stromstärke aus der Elektrizitätslehre ebenfalls vernetzt werden. Durch diese spezifische Konzeption einer CRU ist die Möglichkeit zur Vernetzung von Inhalten verschiedener Sachgebiete über das Basiskonzept Energie gegeben und fördert damit den Aufbau vernetzten Wissens.

Gemäß den Anforderungen an kumulatives Lernen muss eine vertikale Vernetzung physikalischer Inhalte durch Basiskonzepte regelmäßig und wiederkehrend erfolgen. Die o.g. Konzeption einer CRU erfüllt diese Bedingung nur für zwei Energieformen bzw. zwei Sachgebiete und findet in einem Schuljahr der Sekundarstufe I statt. Um eine regelmäßige vertikale Vernetzung zu ermöglichen, müssen deshalb mehrere CRUs der gleichen Konzeption entwickelt werden. Hier wird sich auf die Entwicklung von insgesamt zwölf CRUs festgelegt, die möglichst gleichmäßig auf die Doppeljahrgänge 5/6, 7/8 und 9/10 der Sekundarstufe I verteilt werden. Im Zuge der gleichmäßigen Verteilung wird zudem sichergestellt, dass die CRUs auch je Doppeljahrgang in verschiedenen Sachgebieten implementiert werden können. Die Verteilung von vier CRUs je Doppeljahrgang und die Verteilung auf verschiedene Sachgebiete ist durch die Lehrplananalyse abgesichert (vgl. Abschnitt 3.1.3.) und ermöglicht damit die wiederkehrende Vernetzung von Inhalten über Schuljahre hinweg.

Insgesamt wurde auf diese Weise ein Prototyp einer Interventionsmaßnahme entwickelt, der die fünf Anforderungen an kumulatives Lernen anhand von fünf Designprinzipien umsetzt. Die Umsetzung ist in Abb. 7 dargestellt. Die Anforderungen aus Kapitel 2.2 sind Elemente, die gemeinsam kumulatives Lernen fördern. Um erstens eine aktive Wissenskonstruktion zu ermöglichen, wird Project-Based Learning als Unterrichtsansatz gewählt. Durch Project-Based Learning werden durch die gleichzeitige Entwicklung naturwissenschaftlicher Inhalte und Arbeitsweisen in besonderem Maße eine aktive Wissenskonstruktion zugelassen. Eine aktive Wissenskonstruktion wird durch situiertes Lernen in einer authentischen und damit hoch kontextualisierten Lernumgebung unterstützt. Hierfür bietet sich insbesondere die Nutzung von Leitfragen an. Leitfragen motivieren die Auseinandersetzung mit physikalischen Inhalten, strukturieren aber

gleichzeitig auch einen naturwissenschaftlichen Unterricht und unterstützen damit die aktive Wissenskonstruktion.

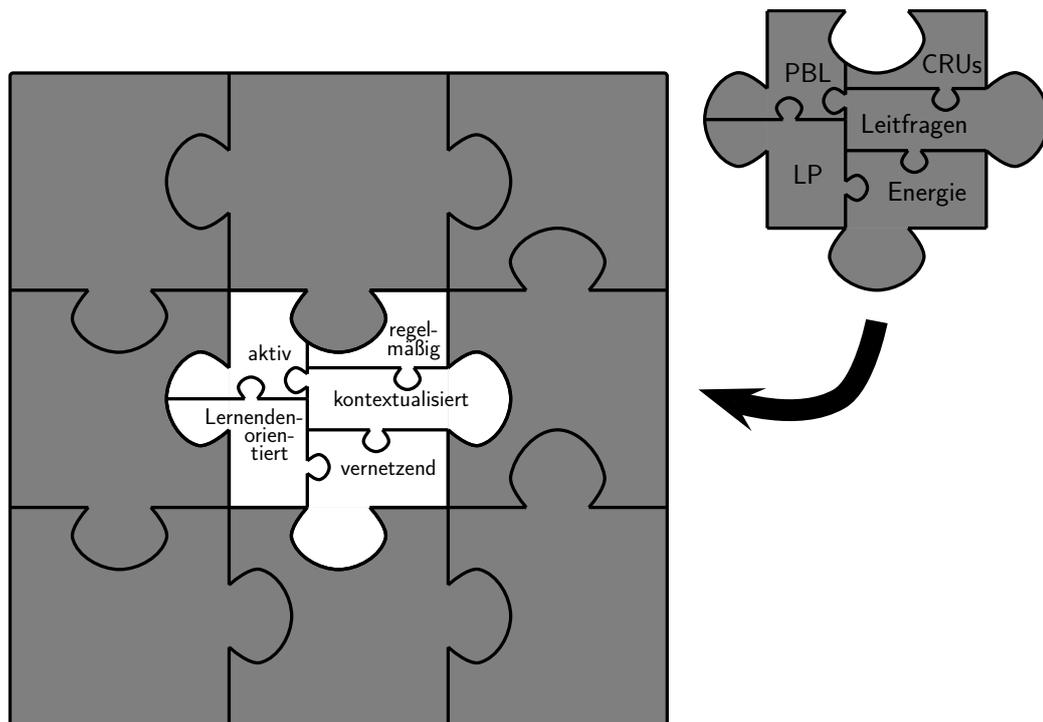


Abb. 7. Veranschaulichung der vollständigen Interventionsmaßnahme in Form eines Puzzlestücks inklusive einer Unterteilung in fünf Designprinzipien, die den Anforderungen an einen Unterricht zur Förderung kumulativen Lernens entsprechen.

Diese beiden Designprinzipien (Project-Based Learning und Leitfragen) zeigen zunächst, wie ein konkreter naturwissenschaftlicher Unterricht zur Förderung kumulativen Lernens gestaltet werden sollte. Der Aufbau naturwissenschaftlicher Kompetenzen in Form eines vernetzten Wissens erfolgt jedoch über mehrere Schuljahre, so dass neben der Gestaltung von Unterricht auch eine sinnvolle Strukturierung naturwissenschaftlicher Inhalte erfolgen muss. Der Aufbau vernetzten Wissen soll hier insbesondere durch die Vernetzung anhand von Leitideen der Fachdomäne erfolgen. Diese dritte Anforderung an kumulatives Lernen wird durch die Nutzung von Basiskonzepten, hier exemplarisch anhand des Energiekonzepts, umgesetzt. Die Basiskonzepte sollen viertens regelmäßig im Unterricht aufgegriffen werden, um wiederkehrend eine vertikale Vernetzung zu ermöglichen. Um diese vierte Anforderung an kumulatives Lernen umzusetzen, werden CRUs als kurze Unterrichtseinheiten entwickelt. CRUs sind flexibel in einen bestehenden Unterricht implementierbar. In einer CRU kann schließlich die vertikale Vernetzung physikalischer Inhalte fokussiert und gleichzeitig das Basiskonzept Energie weiterentwickelt werden. Die Weiterentwicklung des Basiskonzepts und den Aufbau

vernetzten Wissens anhand des Basiskonzepts setzt jedoch Erkenntnisse über die Verständnisenwicklung von Schülerinnen und Schülern in Bezug auf das jeweilige Basiskonzept voraus. Hierfür wird als fünftes Designprinzip eine Learning Progression zum Energiekonzept genutzt, die die Verständnisenwicklung von Schülerinnen und Schüler entlang mehrerer Schuljahre beschreibt. In einer CRU wird auf diese Weise die Umwandlung zweier Energieformen vertieft und gleichzeitig eine vertikale Vernetzung physikalischer Inhalte durch die Energieumwandlung ermöglicht. Der Einsatz mehrerer CRUs ermöglicht schließlich eine wiederkehrende vertikale Vernetzung anhand des Energiekonzepts und unterstützt so den Aufbau eines vernetzten Wissens von Schülerinnen und Schülern.

### 3.2.2. Identifikation geeigneter Kontexte

Nachdem der Prototyp einer Interventionsmaßnahme konzipiert und sich auf die Entwicklung von insgesamt zwölf CRUs festgelegt wurde, mussten für die einzelnen CRUs die jeweiligen fachlichen Inhalte und Kontexte gewählt werden. Aufgrund der Entscheidung für den Project-Based Learning-Ansatz und damit der Nutzung von Leitfragen im Unterricht zur aktiven Wissenskonstruktion und hohen Kontextualisierung mussten Leitfragen zum fachlichen Inhalt passend entwickelt werden. Da die CRUs aufgrund der Anforderungen an kumulatives Lernen flexibel im Unterricht integrierbar sein sollen und damit keine chronologische Abfolge der CRUs vorgegeben ist, ist die Nutzung einer übergeordneten Leitfrage für alle CRUs nicht möglich. Aus dem Grund wurde sich auf die Entwicklung von zwölf Leitfragen für die jeweiligen zwölf CRUs festgelegt.

Die Kriterien für eine Leitfrage aus Abschnitt 3.1.4 wurden hier für die Entwicklung von Leitfragen genutzt. Aufbauend auf physikalischen Lehrbüchern und weiterer einschlägiger Literatur (u.a. Penuel & Bell, 2016; Krajcik & Shin, 2014; Schwartz et al., 2008) wurden insgesamt 120 Leitfragen zu Kontexten aus den Bereichen (1) Menschen und Gesundheit, (2) Spaß und Spiele, (3) Technologie, (4) Gesellschaft und (5) Sport entwickelt. Jede der Leitfragen kann dabei mithilfe der Umwandlung zweier Energieformen beantwortet werden.

Die Entwicklung der Leitfragen ist nicht Teil dieser Arbeit und wird deshalb hier nur zur vollständigen Darstellung des Entwicklungsprozesses verkürzt dargestellt. Für eine ausführliche Beschreibung der Entwicklung der Leitfragen siehe Laumann et al. (2018).

### 3.3. Evaluation und Reflexion von Alltagskontexten

Im Anschluss an eine ausführliche Analyse zur Umsetzung der Anforderungen an kumulatives Lernen und der darauffolgenden Entwicklung einer prototypischen Interventionsmaßnahme in Form von zwölf CRUs wurde eine erste Evaluation durchgeführt. In dieser ersten Evaluation wurden ausschließlich die Leitfragen für die zwölf CRUs aufbauend auf den Kriterien für eine Leitfrage aus Abschnitt 3.1.4 empirisch evaluiert. Die Evaluation ist wie die Entwicklung der Leitfragen aus Abschnitt 3.2.2 nicht Teil dieser Arbeit und wird nur zur Vollständigkeit kurz dargestellt. Eine ausführliche Beschreibung zur Evaluation der Leitfragen findet sich bei Laumann et al. (2018).

#### 3.3.1. Evaluation geeigneter Kontexte

Die Evaluation der Leitfragen gliedert sich in zwei empirische Schritte. Im ersten Schritt wurden die 120 Leitfragen aus Abschnitt 3.2.2 von zwei Lehrkräften und Expertinnen bzw. Experten der Physikdidaktik nach den vier Kriterien zur Tragfähigkeit, Komplexität, Durchführbarkeit und Passung der Leitfragen zur Fokussierung auf die Energieumwandlung bewertet (siehe auch J. A. Fischer et al., 2021). Auf Grundlage der Bewertung wurden schließlich 30 Leitfragen ausgewählt. Im zweiten Schritt wurden anschließend die 30 Leitfragen von  $N = 285$  Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe I nach den zwei Kriterien Relevanz und Interesse bewertet (Laumann et al., 2018).

Auf Grundlage der Bewertungen wurden die 30 Leitfragen anhand der Relevanz und des Interesses von Schülerinnen und Schülern hierarchisiert und auf Grundlage der Lehrplananalyse aus Abschnitt 3.1.3 auf Jahrgänge bzw. Sachgebiete verteilt. Anhand der Lehrplananalyse konnten die möglichen Verbindungen zwischen Energieformen in den jeweiligen Jahrgängen und Sachgebieten dargestellt werden. Beginnend nun mit der am höchsten bewerteten Leitfrage zum Kontext „Smartphone“ wurde diese Leitfrage den passenden Verbindungen der zwei Energieformen in einem Jahrgang und Sachgebiet verortet. Eine weitere hoch bewertete Leitfrage zum Kontext „Laptop“ wurde entsprechend den Verbindungen zweier Energieformen in ein weiteres Sachgebiet bzw. Jahrgang eingeordnet usw.

Um eine Gleichverteilung von Leitfragen auf Sachgebiete zu ermöglichen, wurden nicht nur die zwölf am besten bewerteten Leitfragen ausgewählt. Hier wurde bspw. eine Leitfrage zum Kontext „Sprungkraft eines Flohs“ zur Umwandlung von Spann- in

Lageenergie gut bewertet, bereits zwei noch besser bewertete Leitfragen zur Umwandlung der gleichen Energieformen ausgewählt. Die damit dritte Leitfrage zur gleichen Umwandlung zweier Energieformen wurde für eine mögliche Gleichverteilung der Leitfragen auf Sachgebiete aus dem Grund nicht ausgewählt.

Tabelle 3. Die ausgewählten Leitfragen inklusive der jeweiligen Kontexte, die auf Grundlage der Lehrplananalyse bzw. der Bewertung durch Schülerinnen und Schüler ausgewählt wurden.

<b>Kontext</b>	<b>Leitfrage</b>
Jahreszeiten	Warum gibt es auf der Erde Jahreszeiten?
Kleidung	Welche Farbe sollte man im Sommer für seine Kleidung wählen, um wenig zu schwitzen?
Stick Bomb	Wie viel Energie steckt in einer „Stick Bomb“?
Laptop	Warum wird ein Laptop manchmal heiß?
Solarzellen	Wie sollten Solarzellen an einem Haus angebracht werden, um möglichst viel Energie umwandeln zu können?
Fahrrad	Wie lang müsste man Rad fahren, um ein Smartphone zu laden?
Achterbahn	Warum fährt eine Achterbahn auch ohne eigenen Antrieb rasend schnell?
Skateboard	Wie erreicht ein Skateboard in einer Halfpipe ständig die gleiche Höhe?
Smartphone	Wie kann man ein Smartphone auch ohne Steckdose oder Powerbank laden?
Mikrofon	Wie funktioniert ein Mikrofon?
Trampolin	Wie hoch kann man auf einem Trampolin springen?
Hautverbrennung	Warum verbrennt man sich die Haut, wenn man über den Boden der Turnhalle rutscht?

Um eine Gleichverteilung von Leitfragen auf Jahrgänge zu garantieren, wurde eine ähnliches Verfahren für die Auswahl der Leitfragen getroffen. Beispielsweise wurden Leitfragen zum Kontext „Windrad“, „Fahrraddynamo“ und „Mikrofon“ jeweils zur Umwandlung von kinetischer in elektrische Energie und eine Leitfrage zum Kontext „Solarzellen“ zur Umwandlung von Strahlungs- in elektrische Energie entwickelt. Die drei Leitfragen zur Umwandlung von kinetischer in elektrische Energie wurden zwar besser bewertet, sind jedoch gemäß der Lehrplananalyse ausschließlich in den Jahrgängen 9/10 möglich. Die Leitfrage zum Kontext „Solarzellen“ ist jedoch gemäß der Lehrplananalyse auch in den Jahrgängen 7/8 der Sekundarstufe I möglich. Schließlich wurden nur zwei Leitfragen zur Umwandlung von kinetischer in elektrische Energie und

statt der Leitfrage zum Kontext „Windrad“ auch die Leitfrage zum Kontext „Solarzellen“ ausgewählt.

Insgesamt wurden auf diese Weise die folgenden zwölf Leitfragen für die Entwicklung von zwölf CRUs ausgewählt. Eine Übersicht der zwölf CRUs mit ihren Kontexten und Leitfragen findet sich in Tabelle 3.

Eine Übersicht über die Verteilung der Leitfragen bzw. ihrer Kontexte auf Jahrgänge und Sachgebiete befindet sich in Abb. 8. Die Energieformen und ihre -umwandlung ineinander, die in einer CRU thematisiert werden, sind den vier physikalischen Sachgebieten zugeordnet. Eine CRU als vernetzende Unterrichtseinheit der beiden Energieformen und ihrer Sachgebiete ist durch einen Pfeil dargestellt. Bspw. verbindet die CRU zum Kontext „Laptop“ die Elektrizitäts- und die Wärmelehre bzw. verbindet die elektrische- mit der thermischen Energie. Solche CRUs, die in beiden Sachgebieten durchgeführt werden können, sind durch einen doppelseitigen Pfeil dargestellt. Solche CRUs, die nur in einem Sachgebiet unterrichtet werden können und damit die Reihenfolge der Energieformen (Haupt- und Bezugsenergieform, vgl. Abschnitt 3.1.3) relevant ist, sind als einseitiger Pfeil dargestellt.

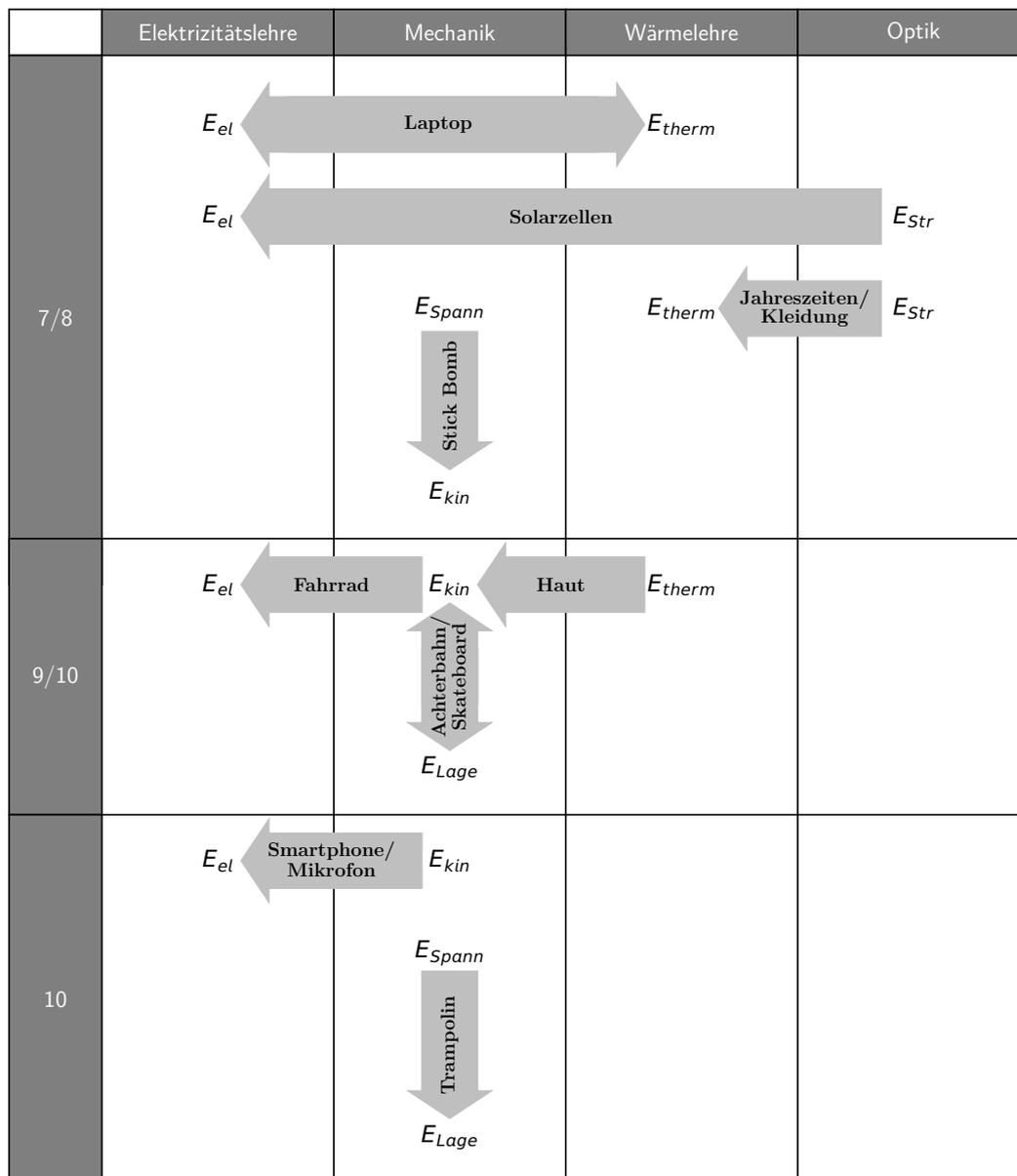


Abb. 8. Ergebnis des Evaluations- und Reflexions- bzw. des Design- und Entwicklungszyklus'. Auf die vier klassischen Sachgebiete des Physikunterrichts der Sekundarstufe I wurden zwölf CRUs nach den entsprechenden Kontexten und Verknüpfungen zu entsprechenden Sachgebieten verteilt. Die Richtung der Pfeile gibt jeweils die Haupt- bzw. Bezugsenergieform an. Ausgehend von der Bezugsenergieform wird demnach die Hauptenergieform im jeweiligen Sachgebiet vertieft. Ein Doppelpfeil gibt zudem an, dass beide Energieformen als Haupt- bzw. Bezugsenergieformen genutzt werden können und damit die entsprechende CRU in beiden Sachgebieten durchgeführt werden kann.

### 3.4. Design und Entwicklung der CRUs

Die vorangegangenen drei Phasen aus (1) Analyse und Exploration, (2) Design und Entwicklung und (3) Evaluation und Reflexion bildeten insgesamt einen ersten vollständigen Mesozyklus. Das Ergebnis des ersten Mesozyklus` ist die Umsetzung bzw. Konkretisierung der Anforderungen an kumulatives Lernen durch Designprinzipien und der Entwicklung einer prototypischen Interventionsmaßnahme. Die Interventionsmaßnahme umfasst insgesamt zwölf CRUs, die jeweils die Umwandlung von zwei Energieformen thematisieren. Jede der zwölf CRUs ist zudem mit einer übergeordneten Leitfrage verknüpft, die kriterienbasiert evaluiert wurden.

Im Anschluss wurde ein zweiter Mesozyklus durchgeführt, der im Gegensatz zum ersten Mesozyklus auf die erneute Phase der Analyse und Exploration verzichtet. Stattdessen wird das Design und die Entwicklung der konkreten CRUs vorgestellt.

#### 3.4.1. Konzeptionelle Entwicklung

Die Erkenntnisse zum allgemeinen Lehren und Lernen von Schülerinnen und Schülern in den Naturwissenschaften sind in Form der Designprinzipien in die vorige Design- und Entwicklungsphase eingegangen. Das Ergebnis dieser Phase ist eine prototypische Interventionsmaßnahme in Form von zwölf CRUs, die auf verschiedene physikalische Sachgebiete und Jahrgänge der Sekundarstufe I verteilt sind. In der vorigen Analyse- und Explorationsphase wurde zudem die Entwicklung eines Energieverständnisses von Schülerinnen und Schülern und Project-Based Learning als Unterrichtsansatz vorgestellt. Die Erkenntnisse dieser Phase werden nun für die konzeptionelle Entwicklung der CRUs genutzt. Hierfür wurde zunächst eine fiktive Unterrichtseinheit als Vorlage für die zwölf CRUs konzipiert. Die fiktive Unterrichtseinheit dient der Strukturierung der CRUs auf einer inhaltlichen und kontextuellen Ebene.

Auf kontextueller Ebene ergibt sich als Anforderung an eine CRU basierend auf Project-Based Learning zunächst, dass die Schülerinnen und Schüler die Leitfrage über die Dauer einer CRU und somit innerhalb von 4-6 Schulstunden selbstständig beantworten müssen (vgl. Marion & Shepard, 2010). Auf inhaltlicher Ebene ergibt sich die Anforderung, dass jede CRU die aktive Vernetzung physikalischer Inhalte über zwei Energieformen und deren Umwandlung ineinander ermöglichen muss.

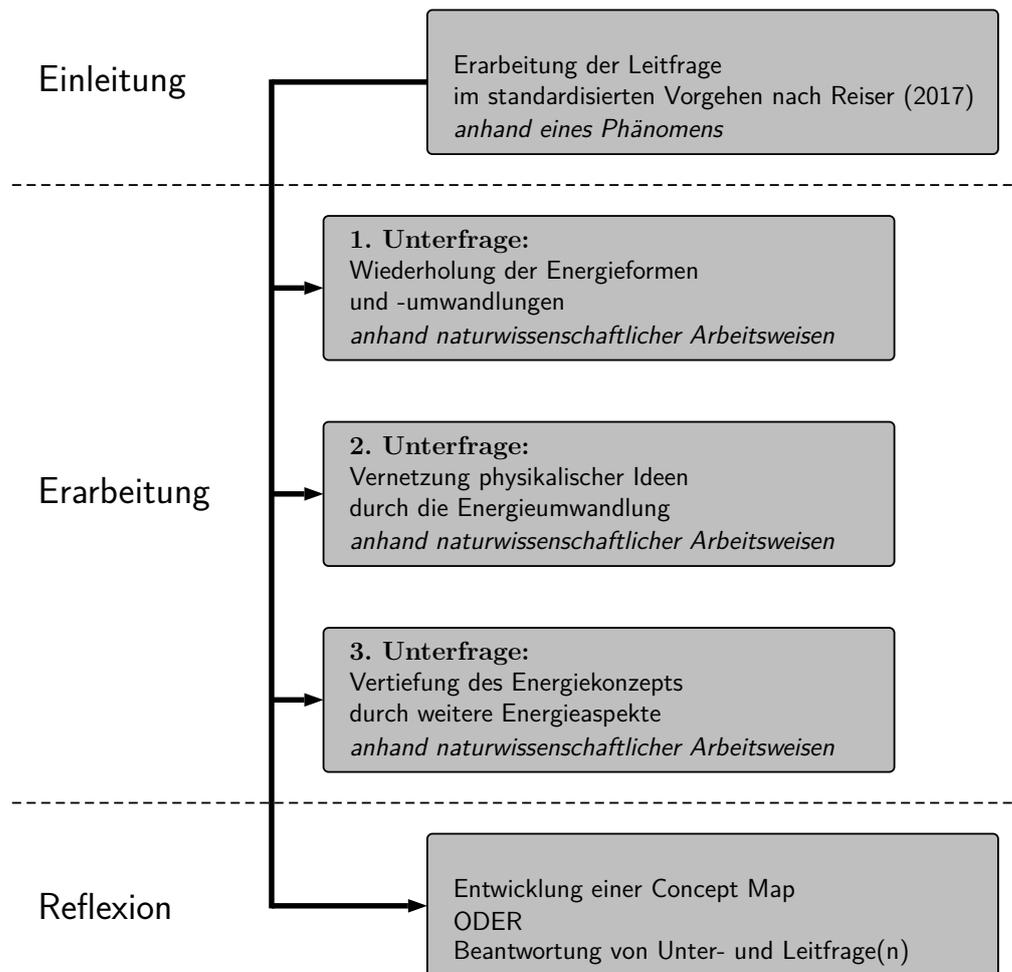


Abb. 9. Theoretisch entwickelte fiktive Unterrichtseinheit zur Entwicklung einer CRU zur Energieumwandlung zweier Formen anhand einer Leitfrage. Nach der Entwicklung der Leitfrage werden in der Erarbeitung drei Unterfragen zu verschiedenen Energievertiefungen mit variablen Aktivitäten behandelt. Den Abschluss bildet eine Reflexionsphase mit variablen Aktivitäten.

Die Struktur der fiktiven Unterrichtseinheit zur Entwicklung der CRUs ist in Abb. 9 dargestellt. Zur Umsetzung der Anforderungen wurde zunächst die fiktive Unterrichtseinheit in die drei Unterrichtsphasen Einleitung, Erarbeitung und Reflexion zerlegt und orientiert sich damit an vergleichbaren, auf dem Ansatz von Project-Based Learning basierenden Unterrichtseinheiten (Krajcik & Czerniak, 2014; Shwartz et al., 2008).

In der Einleitungsphase sollen sich die Schülerinnen und Schüler zunächst noch keine neuen Inhalte erarbeiten, sondern sich insbesondere mit einem Phänomen und einer damit verbundenen Leitfrage beschäftigen (Blumenfeld et al., 1991). Gleichzeitig dient die Einleitungsphase zur Strukturierung der fiktiven Unterrichtseinheit entlang der Beantwortung der Leitfrage durch die Entwicklung und Strukturierung von Unterfragen.

Hierfür wird zunächst ein Phänomen in Form eines Experiments, eines Videos oder ähnlichen Darstellungsformen in Verbindung mit einer Aufgabe präsentiert. Die Schülerinnen und Schüler entwickeln im Anschluss Fragen rund um das Phänomen und gemeinsam mit der Lehrkraft wird im Plenum die Leitfrage entwickelt. Nach der Entwicklung der Leitfrage versuchen die Schülerinnen und Schüler, die Leitfrage zu beantworten. Die Antworten der Schülerinnen und Schüler können nun entweder zurückgestellt und im weiteren Verlauf der Einheit aufgegriffen werden oder werden besprochen, um anhand der bisherigen noch lückenhaften Antworten eine tiefergehende Bearbeitung der Leitfrage zu begründen (vgl. Anchoring Phenomena Routine nach Reiser et al. (2017) aus Abschnitt 3.1.4). Im Anschluss sammeln die Schülerinnen und Schüler ähnliche Phänomene oder Fragestellungen aus ihrem Alltag, die zunächst nicht thematisiert und zurückgestellt werden. Abschließend nutzt die Lehrkraft die entwickelten Fragen der Schülerinnen und Schüler zur Strukturierung der Erarbeitungsphase (vgl. auch J. A. Fischer et al., 2021).

Jede Erarbeitungsphase der fiktiven Unterrichtseinheit beginnt im ersten Schritt mit der Wiederholung der für das Phänomen bzw. die Leitfrage wichtigen Energieformen. Da die fiktive Unterrichtseinheit zur Vertiefung der Umwandlung zweier Energieformen und zur Vernetzung von Inhalten verschiedener physikalischer Sachgebiete entwickelt wird, wird aus dem Grund durch die Wiederholung der Energieformen und deren Umwandlung das Vorwissen aktiviert und an dies angeknüpft (Bransford et al., 2000). Durch die Aktivierung von und die Anknüpfung an Vorwissen werden so auch die Anforderungen an kumulatives Lernen erfüllt. Wurden schließlich die nötigen Energieformen und deren Umwandlung ineinander wiederholt, findet im zweiten Schritt auf inhaltlicher Ebene die Vernetzung von Inhalten verschiedener physikalischer Sachgebiete über das Prinzip der Umwandlung zweier Energieformen statt (vgl. hier die Beispielvernetzung aus Abschnitt 3.2.1). Nach der Vernetzung von Inhalten wird im dritten Schritt schließlich die Vernetzung durch das Aufgreifen weiterer Energieaspekte (Transfer, Entwertung und Erhaltung) vertieft und verstärkt (Linn, 2006). Das Aufgreifen weiterer Energieaspekte orientiert sich dabei an der Kompetenzentwicklung zum Energiekonzept (Herrmann-Abell & DeBoer, 2018; Liu & McKeough, 2005; Neumann et al., 2013a), d.h. die Energieaspekte auf den unteren und für die Schülerinnen und Schüler leichteren Konzeptualisierungsstufen werden verstärkt in den Anfangsjahrgängen in Abstimmung mit dem Kontext aufgegriffen. Beispielsweise wird der Energietransfer als eine untere Konzeptualisierungsstufe zur Leitfrage „Warum gibt es auf der Erde Jahreszeiten?“ für

die Jahrgangsstufen 6/7 und passend zu den Energieformen Strahlungs- und thermische Energie vertieft. Dagegen wird die Energieerhaltung als obere Konzeptualisierungsstufe bspw. zur Leitfrage „Wie hoch kann man auf einem Trampolin springen?“ für die Jahrgangsstufen 9/10 und passend zu den Energieformen elastische- und Lageenergie vertieft.

Zum Abschluss der fiktiven Unterrichtseinheit wurden für die Reflexionsphase zunächst zwei mögliche Methoden vorgeschlagen. Gemäß der ersten Methode werden in einer Reflexionsphase die Leitfrage und die Unterfragen selbstständig durch die Schülerinnen und Schüler beantwortet. Das Verfahren zur Beantwortung der Leitfragen und Unterfragen orientiert sich am Vorgehen in IQWST, wo ebenfalls abschließend Leitfragen und Unterfragen beantwortet werden. Die Schülerinnen und Schüler sollen so die Fragen nacheinander und auf diese Weise kumulativ die Leitfrage beantworten (Shwartz et al., 2008). Gemäß der zweiten Methode wird dagegen eine Concept Map von den Schülerinnen und Schülern entwickelt, in der die Inhalte der Einheit grafisch von den Schülerinnen und Schülern geordnet und miteinander verbunden werden sollen (Willerman & Mac Harg, 1991; Won et al., 2017). Auf diese Weise sollen die Wissensnetzwerke der Schülerinnen und Schüler expliziert und so noch nicht vorhandene Verbindungen zwischen physikalischen Ideen identifiziert werden (vgl. z.B. H. E. Fischer et al., 2007).

Passend zu den drei Schritten in der Erarbeitungsphase bestehend aus der Wiederholung, Vernetzung und Vertiefung der Umwandlung zweier Energieformen werden jeweils drei Unterfragen zur Leitfrage je CRU entwickelt und untersucht. Die Unterfragen müssen zum einen aus dem Einstiegsphänomen der Einleitung von den Schülerinnen und Schülern entwickelt werden können, jedoch auch zur inhaltlichen Strukturierung der Erarbeitungsphase passen (vgl. Shwartz et al., 2008). Bspw. werden in der CRU zur Leitfrage „Warum verbrennt man sich die Haut, wenn man über den Boden der Turnhalle rutscht?“ die Schülerinnen und Schüler in der Einleitung mit einem Video konfrontiert, in dem ein Sportler beim Handball mehrmals über den Rücken und mehrmals über die Knie auf einem Turnhallenboden rutscht. Hier wird erwartet, dass die Schülerinnen und Schüler die Frage stellen, warum beim Rutschen über den Knien der Sportler schnell abstoppt und es schmerzt, wohingegen beim Rutschen über den Rücken der Sportler länger rutscht und keinen Schmerz spürt. Dazu passend lässt sich die Unterfrage „Warum verbrennen andere Dinge nicht, wenn sie über einen Turnhallenboden rutschen?“ zur

inhaltlichen Vertiefung der Energieentwertung und des Gleitreibungskoeffizienten untersuchen.

Während die Einleitung der fiktiven Unterrichtseinheit entsprechend vorstrukturiert ist und die Reflexion jeweils die Beantwortung der Leitfrage bzw. der Unterfragen oder das Erstellen einer Concept Map umfasst, sind die Lernaktivitäten in der Erarbeitung bewusst variabel gehalten. Die Wahl der Lernaktivität unterscheidet sich je nach Inhalt, Klassenstufe bzw. der curricularen Vorgabe und der Unterfragen und kann aus dem Grund in der fiktiven Unterrichtseinheit nicht allgemein festgelegt werden. Die Lernaktivitäten sind jedoch so zu gestalten, dass Schülerinnen und Schüler aktiv Wissen durch bspw. die Entwicklung und Durchführung von Experimenten oder auch durch naturwissenschaftliches Modellieren, Erklären und Argumentieren konstruieren müssen und orientiert sich damit an Anforderungen für die Entwicklung eines Unterrichts zur Förderung kumulativen Lernens (vgl. Kap. 2.2).

#### 3.4.2. Entwicklung von Unterrichtsmaterialien

Aufbauend auf der fiktiven Unterrichtseinheit wurden im Anschluss erste CRUs entwickelt. Die Entwicklung einer CRU umfasst die Wahl eines Phänomens zur Herleitung der Leitfrage, die Strukturierung einer CRU entlang von Teilfragen und die Entwicklung konkreter Unterrichtsmaterialien und -instruktionen für Aktivitäten der Schülerinnen und Schüler. Zur Erläuterung der Struktur und des Unterrichtsmaterials einer CRU wird außerdem ein Lehrkraftmanual benötigt (Fortus, 2012; Roblin et al., 2018). Roblin et al. (2018) betonen hier zudem die Notwendigkeit von Hintergrundinformationen für Lehrkräfte für den Lernerfolg von Schülerinnen und Schüler. Hier sollten insbesondere Informationen zum benötigten Vorwissen, möglichen relevanten Präkonzepten von Schülerinnen und Schülern, einem fachlichen Hintergrund und der thematischen Einordnung im Lehrplan für die Lehrkraft vorliegen. Durch geeignete Hintergrundinformationen kann eine CRU zwar inhaltlich passend im Unterricht implementiert werden, jedoch können die Methoden, die Unterrichtsstrukturen und die Sprache der Lehrkraft erheblich von einer CRU abweichen (z.B. Chai et al., 2013). Damit wird der Einsatz einer CRU nach dem Unterrichtskonzept des Project-Based Learning maßgeblich von der Lehrkraft und ihrer Einstellung zur CRU beeinflusst (Breuer et al., 2018; Chai et al., 2013). In der Folge sollten daher die CRUs für Lehrkräfte an den eigenen Unterricht der Lehrkraft adaptierbar bzw. individualisierbar sein (Roblin et al., 2018; Kirk & MacDonald, 2001).

Zur Umsetzung dieser Anforderungen an die CRUs wird sich deswegen für eine digitale Administrierung der CRUs entschieden. Eine digitale Administrierung ermöglicht die Bereitstellung von Unterrichtsmaterialien mit dazu passend verlinkten Instruktionshinweisen für die Lehrkraft. Zugleich muss die digitale Administrierung eine Anpassung und damit Bearbeitung der Unterrichtsmaterialien zulassen. Hierfür wird im Folgenden ein digitaler *Curriculum Administration and Customization Service* (abk. CACS) verwendet (Leary et al., 2016). Ein CACS ist eine digitale Lehr-Lerntechnologie, in der Unterrichtsmaterialien bereitgestellt werden können. Die Unterrichtsmaterialien sind entsprechend von Lehrkräften adaptierbar aber auch gleichzeitig für Schülerinnen und Schüler individualisierbar. Konkretisiert wird die Umsetzung des CACS durch die Nutzung des digitalen Lernmanagement-Systems Moodle (Schulmeister, 2017; Petko, 2010; Bauer, 2007).

Moodle ist ein browserbasiertes Lernmanagement-System und damit unabhängig von digitalen Endgeräten der Schulen, der Lehrkräfte und der Schülerinnen und Schüler. Es ist zudem eine frei verfügbare Software und kann auf eigenen Servern installiert und bereitgestellt werden. So haben u.a. Schulen auf schulinternen Servern die Möglichkeit, ein eigenes Moodle für Lehrkräfte und Schülerinnen und Schüler der Schule bereitzustellen. Die Lehrkräfte haben in Kursen bspw. die Möglichkeit, Unterrichtsmaterialien für Schulklassen bereitzustellen, Aktivitäten wie Tests, Foren oder H5P-Elemente zu erstellen oder Videos, Simulationen und Bilder hochzuladen. Die Schulklassen können das Material bearbeiten und die Lehrkraft die Bearbeitungen einsehen und individuelles Feedback vergeben (Höbarth, 2013; Hoeksema & Kuhn, 2011). Bestehende Elemente und Aktivitäten eines Kurses können von Lehrkräften vereinfacht über einen Editor angepasst, verändert oder auch gelöscht werden, so dass die Adaptierbarkeit aber auch Individualisierbarkeit von Aufgaben für einzelne Schülerinnen und Schüler möglich ist (Bauer, 2007). Zudem können die Kurse in Moodle vollständig heruntergeladen und in ein anderes bspw. schulinternes Moodle hochgeladen werden. Eine direkte Implementation von fertig ausgearbeiteten Moodle-Kursen in den eigenen Unterricht ist auf diese Weise mit einem bestehenden schulinternen Moodle direkt umsetzbar (Hoeksema & Kuhn, 2011).

Im Folgenden wird daher je CRU ein Moodle-Kurs verwendet, so dass insgesamt als Unterrichtseinheiten zwölf Moodle-Kurse vorliegen. Die Moodle-Kurse können zur Nutzung von Lehrkräften im Unterricht dupliziert und im Anschluss adaptiert bzw. individualisiert werden (IMS LTI® 1.3 and LTI Advantage, 2022). In einem Moodle-Kurs

stehen die Aktivitäten für Schülerinnen und Schüler und die Instruktionshinweise bzw. Hintergrundinformationen für Lehrkräfte parallel zur Verfügung, wobei ausschließlich die Lehrkraft auf Letzteres zugreifen kann. Die Hintergrundinformationen liegen jeweils als Textseite inklusive von Anleitungsvideos und -bildern für die Lehrkräfte vor. Als Aktivitäten für Schülerinnen und Schüler wurde sich nur auf solche Aktivitäten beschränkt, die in der Standardversion von Moodle zur Verfügung stehen. Die Beschränkung garantiert das fehlerfreie Herunterladen eines Moodle-Kurses und das anschließende Einbinden in schulinterne Moodle (Foster, 2022; Hoeksema & Kuhn, 2011). Nach einer eingehenden Prüfung der Funktionalitäten aller Grundaktivitäten von Moodle wurden beschlossen, ausschließlich die Aktivitäten „Test“ und „Forum“ für Schülerinnen und Schüler zu nutzen. Die weiteren Grundaktivitäten in Moodle organisieren dagegen vor allem das Lernen und ermöglichen nicht das direkte Bereitstellen klassischer Unterrichtsmaterialien und Aufgabenformate. Klassische Aufgabenformate wie die Anleitung für die Durchführung eines Experiments wurden daraufhin wie folgt umgesetzt (vgl. einen Screenshot aus Abb. 10):

1. Zu Beginn wird als Information in der Testumgebung eine kurze Versuchsbeschreibung inklusive eines Bezugs zur Fragestellung gegeben.
2. In einer folgenden Aufgabe wird der Experimentieraufbau und die -durchführung inklusive eines Fotos des Experiments oder einer Schaltskizze beschrieben und eine Tabelle zum Aufnehmen von Messdaten vorgegeben.
3. In einem Freitextfeld notieren sich die Schülerinnen und Schüler im Anschluss ihre Beobachtungen und deuten das Experiment.
4. Ergänzende Aufgaben können in einem Multiple-Choice- oder Freitextformat bereitgestellt werden. Zudem können Fotos des Experiments von den Schülerinnen und Schülern hochgeladen und Rechenaufgaben in einem Rechenaufgabenformat eingetragen werden.

Zusätzlich zur Umsetzung klassischer Aufgaben ermöglichen die genutzten Aktivitäten in Moodle noch interaktive Drag-and-Drop- bzw. verschiedene Multiple-Choice-Aufgaben inklusive eines adaptiven Feedbacks. Zur Fragestellung rund um den Kontext Fahrrad (vgl. Kapitel 3.3) erhalten bspw. die Schülerinnen und ein Schüler ein Fahrrad-Bild, in das die beim Radfahren relevanten Energieformen in die passenden Lücken per Drag-and-Drop eingefügt werden sollen. Nach Abschluss der Aufgabe erhalten die Schülerinnen und Schüler daraufhin ein Feedback zur Korrektheit der Antworten inklusive eines Hinweises zu falsch eingefügten Energieformen. Die Antworten der

Schülerinnen und Schüler werden in Moodle gespeichert und können zur späteren Einsicht sowohl von den Schülerinnen und Schülern als auch zur Kontrolle des Arbeitsstands von der Lehrkraft eingesehen werden.

Hannes Grobe [CC-BY 3.0]

In dem Prozessor eines Laptops laufen viele Stromkabel und somit viele Stromkreise zusammen. Die Stromkreise steuern dabei verschiedene Dinge im Laptop. Ist ein Stromkreis geschlossen, wird elektrische Energie transportiert. Ist der Stromkreis für den Bildschirm geschlossen, kann zum Beispiel elektrische Energie in Lichtenergie des Bildschirms umgewandelt werden.

In einem Experiment untersuchst du nun, ob sich Stromkabel in einem Stromkreis erwärmen und somit eine mögliche Wärmequelle sind.

Hypothese:  
"In einem Stromkreis erwärmen sich die Stromkabel, wenn ein elektrischer Strom fließt."

Stimmst du der Hypothese zu?

Wähle eine Antwort:

Stimme zu.

Stimme nicht zu.

Prüfen

**Experimentiermaterialien:**

- Spannungsquelle 12V
- 3 Kabel
- eine Glühlampe mit Fassung
- 2 Stativblöcke mit 2 Stativstangen
- einen Konstantandrahrt (leitet elektrischen Strom)
- ein Thermometer

Überlege dir zunächst, welche Materialien aus dem folgenden Experiment für welche Bauteile im Laptop stehen können.

eine Glühlampe mit Fassung

einen Konstantandrahrt

Spannungsquelle 12V

Prüfen

**Aufbau:**  
Bau nun einen Stromkreis nach der unten stehenden Schaltskizze bzw. der Anleitung auf:

1. Schließt zunächst die Lampe mithilfe von zwei Kabeln an die Spannungsquelle an.
2. Unterbricht den Stromkreis.
3. Bringt in den Stromkreis den aufgedrehten Draht mit den zwei Stativen ein.

**Durchführung:**

1. Miss die Temperatur im Draht über die Dauer von 1min. Schieb dafür das Thermometer in den aufgedrehten Draht und miss die Temperatur alle 10s für (1) einen geschlossenen und (2) einen nicht geschlossenen Stromkreis. Notiere dir die Werte in der unten stehenden Tabelle (Tipp: Starte beide Messungen mit der gleichen Starttemperatur).

**Hinweis:**  
Wenn du dir beim Aufbau unsicher bist, findest du hier das Bild des aufzubauenden Stromkreises.

1 A B I

offener Stromkreis

Zeit t in s	Temperatur T in °C

Was beobachtest du, wenn der Leiter stromdurchflossen ist?

1 A B I

Abb. 10. Exemplarische Experimentieranleitung in Moodle mithilfe der Test-Aktivität. Ausgehend von einer Kurzbeschreibung des Experiments, einer Hypothesenbildung und einer Materialliste wird der Aufbau des Experiments mithilfe einer Schaltskizze vorgegeben. Die Schülerinnen und Schüler notieren sich in einem Editor als Freitextfeld ihre Messdaten und ihre Beobachtungen.

Zudem können mithilfe der Aufgabenformate in Moodle interaktive Simulationen sinnvoll und kohärent eingebunden werden. Zum Kontext Achterbahn (vgl. Kapitel 3.3) wurde bspw. die Simulation einer Achterbahn genutzt, in der die Schülerinnen und

Schüler die Starthöhe und -geschwindigkeit, das Gewicht eines Achterbahnwagens und auch die Erdbeschleunigung für eine Achterbahn mit Looping systematisch variieren können. In der Simulation sollen die Schülerinnen und Schüler die Geschwindigkeit des Achterbahnwagens maximieren und vertiefen so die Umwandlung von Lage- in kinetische Energie am Kontext der Achterbahn.

Während die Aufgaben für die Schülerinnen und Schüler entweder klassisch oder interaktiv sind, sind die Instruktionshinweise für die Lehrkräfte als Textseiten in Moodle vorhanden und um Zusatzmaterialien ergänzt. Zu den Zusatzmaterialien gehören bspw. auch Videos von Experimenten, die im Unterricht durchgeführt werden können. Zum Kontext Skateboard (vgl. Kapitel 3.3) findet bspw. ein Experiment zum Rutschen und Rollen von Bleiklötzen an einer schiefen Ebene statt, in dem das Rutschen und Rollen der Bleiklotze mit einer Wärmebildkamera beobachtet wird. Das Video der Wärmebildkamera steht als Zusatzmaterial als Anleitung zur Verfügung, kann aber auch im Regelunterricht genutzt werden, falls die Schule nicht über das entsprechende Material verfügt.

Die Entwicklung der CRUs und damit die digitale Implementation der Unterrichtsmaterialien in das digitale Lern-Managementsystem Moodle lässt sich in das SAMR-Modell für technologische Innovationen einordnen. Um zwischen verschiedenen technologischen Integrationen digitaler Umsetzungen unterscheiden zu können, entwickelte Ruben Puentedura hierzu das SAMR-Modell (Romrell et al., 2014). Das Modell unterteilt die Integration digitaler Umsetzungen in die vier Stufen (1) Ersetzung, (2) Erweiterung, (3) Änderung und (4) Transformation. Die Digitalisierung klassischer Arbeitsblätter im Physikunterricht würde hier der Ersetzung (klassischen) Unterrichts entsprechen. Erhalten die Schülerinnen und Schüler dagegen ein automatisches Feedback zum Bearbeiten von Aufgaben des Arbeitsblatts, entspricht dieser Schritt nach dem SAMR-Modell einer Erweiterung, da ein klassisch ersetztes Unterrichtsmaterial um ein digitales Tool erweitert wird. Eine Änderung im Modell entspricht dagegen einer Neugestaltung von Aufgabenformaten. Hierzu gehören bspw. die Nutzungen von Tabellenkalkulationsprogrammen und grafischen Darstellungen, die einer grundlegenden Veränderung klassischer Aufgaben entspricht. Zur letzten Stufe der Transformation gehören dagegen die Konstruktion von Aufgaben, die ohne eine digitale Umsetzung nicht möglich wären. Hierzu zählt bspw. die Nutzung innovativer und insbesondere interaktiver Simulationen im naturwissenschaftlichen Unterricht (z.B. Moore et al., 2014).

Insgesamt kann die digitale Umsetzung der CRUs als Moodle-Kurse nicht einer disjunkten Stufe im SAMR-Modell zugeordnet werden. Eine CRU als Moodle-Kurs beinhaltet zum einen überwiegend klassische Aufgabenformate und Instruktionen, wie das Experimentieren und Modellieren, in denen naturwissenschaftliche Arbeitsweisen und Inhalte sinnvoll miteinander verbunden werden. Diese Aufgabenformate entsprechen der ersten Stufe der Ersetzung im SAMR-Modell. Zum anderen sind auch erweiterte Aufgabenformate wie Aufgaben inklusive eines adaptiven Feedbacks oder auch innovative Tools wie Simulationen in einem Moodle-Kurs vorhanden. Diese Aufgabenformate lassen sich eher den Stufe 2-4 im SAMR-Modell zuordnen (für eine ausführliche Beschreibung der innovativen Tools einer CRU siehe Weßnigk et al., 2020). Vor dem Hintergrund des Ziels der Arbeit, der Förderung kumulativen Lernens mithilfe von Basiskonzepten, ist jedoch zu betonen, dass die digitale Umsetzung in Form von Moodle-Kursen nur die Unterrichtsmaterialien umfasst. Vielmehr bilden die Unterrichtsmaterialien einen Baustein eines Unterrichts zur Förderung kumulativen Lernens, der von der Lehrkraft gesteuert wird. In dem Zuge ist auch zu beachten, dass die Moodle-Kurse nicht als digitale Selbstlernlektionen für Schülerinnen und Schüler entwickelt wurden. Die Schülerinnen und Schüler benötigen vielmehr für die aktive Wissenskonstruktion bzw. für den Aufbau vernetzten Wissens einen ständigen Austausch mit der Lehrkraft in Form von Reflexionsphasen und Vernetzungsangeboten (vgl. Neumann et al., 2008; H. E. Fischer et al., 2007). Mithilfe der Moodle-Kurse wird dagegen lediglich das Unterrichtsmaterial zur Verfügung gestellt, auf deren Grundlage die Lehrkraft Vernetzungsangebote bereitstellen kann.

### 3.5. Evaluation und Reflexion des ersten Erprobungszyklus

Im Anschluss an die Erstellung der fiktiven Unterrichtseinheit wurden sechs konkrete CRUs zu sechs Leitfragen entwickelt und in einem Evaluations- und Reflexionszyklus erprobt. In diesem Zyklus wurde das Ziel verfolgt, die CRUs in der Praxis mit Schulklassen zu testen und aufbauend auf einer Reflexion der Erprobung zum einen die spezifischen CRUs und zum anderen die fiktive Unterrichtseinheit weiterzuentwickeln. In dem Sinne verfolgte der erste Erprobungszyklus nicht das Ziel, generische Erkenntnisse über das Lehren und Lernen, sondern vielmehr Erkenntnisse zur Verbesserung der Designlösung zu generieren (vgl. McKenney & Reeves, 2018; Ejersbo et al., 2008).

Der erste Erprobungszyklus wurde in zwei Schritten im Frühjahr bzw. Sommer 2019 durchgeführt und nach den Erprobungsmonaten benannt:

1. Märzerprobung,
2. Junierprobung.

### 3.5.1. Märzerprobung

In der Märzerprobung wurden im Energielabor der Kieler Forschungswerkstatt mit zwei Schulklassen an zwei Vormittagen jeweils eine CRU getestet. Im Energielabor besuchen Schulklassen üblicherweise die Kieler Forschungswerkstatt für einen Vormittag und führen gemeinsam mit der Laborleitung ein Programm im Umfang von 3-5 Stunden durch. Als Programm wurde hier jeweils eine spezifische CRU mit den Schulklassen gewählt. Der Tabelle 4 sind jeweils die Leitfragen bzw. die zugehörigen Klassen und Anzahl der Schülerinnen und Schüler (abk. SuS) zu entnehmen. Da im ersten Erprobungszyklus die Interventionsmaßnahme verbessert werden sollte, wurden vor allem qualitative Daten wie Feldnotizen, Artefakte der Schülerinnen und Schüler genutzt (Bakker, 2018). Die beiden getesteten CRUs wurden vom Autor dieser Arbeit durchgeführt und von Mitarbeitenden des Projekts energie.TRANSFER beobachtet.

Tabelle 4. Im ersten Schritt der Erprobung in der Kieler Forschungswerkstatt wurden zwei CRUs zu verschiedenen Kontexten und in verschiedenen Jahrgängen erprobt.

Kontext	Fragestellung	Jahrgang	SuS
Fahrrad	Wie lang müsste man Rad fahren, um ein Smartphone zu laden?	10	16
Laptop	Warum wird ein Laptop manchmal heiß?	8	19

### Ergebnisse

Im Folgenden werden ausschließlich die Ergebnisse berichtet, die für die Überarbeitung der fiktiven Unterrichtseinheit bedeutsam und dementsprechend aus der Testung spezifischer CRUs generalisierbar sind. Hier ist zu beachten, dass nicht alle Elemente der fiktiven Unterrichtseinheit in ihrer Wirkung auf die Entwicklung eines Energie- und vernetzten Wissens evaluiert werden können (vgl. Abschnitt 2.3.1). In der Folge fokussiert sich die Darstellung der Beobachtung auf die folgenden drei zentralen Elemente der fiktiven Unterrichtseinheiten:

1. Motivierender Einstieg und lernendenzentrierte Strukturierung anhand eines Phänomens und passender Unterfragen durch die Anchoring Phenomena Routine,
2. Durchführung von Experimenten in Verbindung zum Kontext der CRU,
3. Beantwortung der Leitfrage und der Unterfragen unter Berücksichtigung der jeweiligen Energieumwandlungen.

In beiden CRUs wurden bzgl. des ersten Designprinzips mit der Präsentation eines Phänomens begonnen. Zum Kontext „Laptop“ beobachteten die Schülerinnen und Schüler einen abstürzenden Laptop und befühlten ihn auch in der Folge. Im Anschluss sollten die Schülerinnen und Schüler ähnliche bekannte Situationen nennen, in denen elektrische Geräte heiß wurden und erste Ideen entwickeln, warum ein Laptop heiß wird. In dieser Phase sollten die Schülerinnen und Schüler auch bereits den heißen Laptop mit einer Wärmebildkamera beobachten, zeigten sich jedoch gemäß den Beobachtungen in den Feldnotizen stärker interessiert an der Wärmebildkamera als am heißen Laptop. Im Anschluss sollten sich die Schülerinnen und Schüler erste Überlegungen zum heißen Laptop notieren. Hier notierte sich eine Schülerin bzw. ein Schüler, „der Laptop wird warm wegen der Energie“ und zeigte damit erste Ansätze eines Energieverständnisses zur Beantwortung der Leitfrage. Eine andere Schülerin bzw. anderer Schüler notierte dagegen, „vielleicht ist es ein Virus“ und vermutete demnach eher eine softwarebedingte Erwärmung des Laptops.

Zum Kontext „Fahrrad“ sahen die Schülerinnen und Schüler ein Video einer Schwedin, die mit ihrem Fahrrad um die Welt fuhr und ihre Eindrücke schilderte. Als Aktivität rund um das Video sollten die Schülerinnen und Schüler sich Möglichkeiten zur Ladung eines Smartphones zur Navigation während der Weltreise überlegen. Die Schülerinnen und Schüler hatten jedoch bei der Entwicklung erste Ideen zur Frage, wie lang man Rad fahren müsste, um ein Smartphone zu laden, zunehmend Schwierigkeiten. So notierte eine Schülerin bzw. ein Schüler, man brauche wie bei einer gewöhnlichen Ladung des Smartphones „ca. 2 Stunden“, während auch „40-50 Stunden“ von einer Schülerin bzw. einem Schüler notiert wurden. Nur wenige Schülerinnen und Schüler stellten hier insgesamt weiterführende Überlegungen an. Hierzu notierten sich Schülerinnen und Schüler bspw. „Gleichbleibende Geschwindigkeit 2-4h“ oder „mit Pausen: 14 Stunden, ohne Pausen: 12 Stunden“. Diese Schülerinnen und Schüler unterschieden damit bereits zwischen verschiedenen Szenarien des Fahrradfahrens und zeigten damit erste Überlegungen auch hinsichtlich eines Energieverständnisses, indem die Geschwindigkeit als abhängige Variable beachtet wurde.

Bzgl. des zweiten und dritten Elements waren abhängig von der CRU unterschiedliche Resultate zu beobachten. In der Folge werden die Resultate deshalb getrennt nach den Kontexten dargestellt:

Zum Kontext „Laptop“ sollten die Schülerinnen und Schüler in Kleingruppen Experimente zur Erhitzung in Stromkreisen durchführen. Hier war nach einem Informationstext zur Verbindung des Experiments zum Kontext Laptop eine Experimentieranleitung vorgegeben (Abb. 11), die die Schülerinnen und Schüler in Kleingruppen auch überwiegend befolgten. Die Experimente wurden entsprechend sauber durchgeführt und Messwerte gesammelt. Die folgenden Beobachtungen waren ebenfalls korrekt notiert. So schrieb bspw. eine Schülerin bzw. ein Schüler: „Die Temperatur steigt und ist höher als wenn der Stromkreis offen ist.“ Am Ende der CRU sollten schließlich die Schülerinnen und Schüler die Unterfragen beantworten und Belege für ihre Antwort nennen. Hier zeigte sich jedoch hinsichtlich des zweiten Elements, dass die Verbindungen zwischen Experimenten, dem Konzept der Energieumwandlung und dem Kontext des heißen Laptops nicht hergestellt werden konnten. So antwortete eine Schülerin bzw. ein Schüler „am Prozessor“ auf die Frage, wo ein Laptop heiß wird, und gab als Beleg „kenn ich aus dem Alltag“ an. Hier ist demnach keine Verbindung zwischen dem Kontext, den Experimenten und dem Konzept der Energieumwandlung zu sehen. Eine andere Schülerin bzw. anderer Schüler nannte dagegen als Beleg „am Anfang von den Versuchen“ für die gleiche Antwort auf die Frage und konnte immerhin einen Bezug zwischen dem Kontext und den Experimenten, jedoch nicht zum Konzept der Energieumwandlung herstellen.

Wo wird ein Laptop heiß?

Code: \_\_\_\_\_

**Einleitung:**

In dem Prozessor eines Laptops laufen viele Stromkabel und somit viele Stromkreise zusammen. Die Stromkreise steuern dabei verschiedene Dinge im Laptop. Beispielsweise steuert ein Stromkreis, ob der Bildschirm an oder aus ist. Dies kannst du dir wie einen Stromkreis vorstellen, bei dem ein Schalter entweder geschlossen (Stromkreis oben) oder geöffnet ist (Stromkreis unten). Ist ein Schalter im Stromkreis geschlossen, kann ein Strom fließen. Auf diese Weise wird elektrische Energie transportiert.

Mithilfe von elektrischer Energie können sehr viele verschiedene Dinge aus deinem Alltag betrieben werden, da elektrische Energie sich leicht transportiert und in andere Energieformen umgewandelt werden kann.

Wir wollen nun herausfinden, was in einem Stromkreis (auch in einem Laptop) mit der elektrischen Energie passiert.

Dafür bildet Gruppen mit jeweils 5-6 Schülerinnen und Schülern.

**Versuchsmaterialien:**

4,5V Blockbatterie, einen aufgedrehten Draht, eine Glühlampe mit Fassung, ein Thermometer, 2 Stativblöcke mit Stativstangen, 3 Kabel, 2 Krokodilklemmen

**Versuchsaufbau:**

Baut einen Stromkreis nach der rechtsstehenden Schaltskizze auf.  
Dafür macht ihr folgendes:

1. Schließt zunächst die Lampe mit einem Kabel und einer Krokodilklemme an die Batterie an.
2. Verbindet ein weiteres Kabel der Lampe mit einem Stativblock.
3. Spannt zwischen die beiden Stativblöcke den aufgedrehten Draht ein.
4. Schiebt ein Thermometer in den aufgedrehten Draht.
5. Schließt den Stromkreis zwischen Batterie und dem zweiten Stativblock erst, wenn eine Lehrerin oder ein Lehrer den Stromkreis kontrolliert hat.

**Versuchsdurchführung:**

1. Messt zunächst die Temperatur über die Zeit von 1min alle 10s für den offenen Stromkreis. Tragt eure Ergebnisse in die Tabelle links unter „Versuchsergebnisse“ ein. Zur Zeitmessung dürft ihr ein Smartphone benutzen.
2. Schließt den Stromkreis und messt erneut die Temperatur über die Zeit von 1min alle 10s. Tragt eure Ergebnisse in die Tabelle rechts unter „Versuchsergebnisse“ ein.

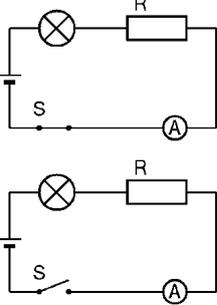
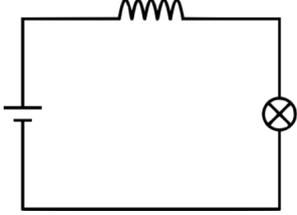




Abb. 11. Arbeitsblatt zur Durchführung der CRU „Laptop“ im Energielabor der Kieler Forschungswerkstatt. Die Schülerinnen und Schüler erhielten anstatt der digitalen Instruktionen in Moodle aus technischen Gründen ein Arbeitsblatt in klassischer Form. Weitere digitale Elemente wie Videos, Simulationen etc. wurden entsprechend adaptiert.

Zum Kontext „Fahrrad“ sollte zur zweiten Unterfrage „Wieviel Energie pro Zeit kann man beim Fahrradfahren generieren?“ ebenfalls ein Experiment durchgeführt werden. In dem Experiment sollte die elektrische Stromstärke in einem Stromkreis mit Widerstand in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit eines Fahrrads mithilfe eines Dynamos und eines Tachometers von den Schülerinnen und Schülern gemessen werden. Im Anschluss sollten die elektrische Spannung mithilfe des Ohmschen Gesetzes, die elektrische Leistung und die elektrische Energie für eine Betriebsdauer von acht Stunden berechnet werden. Das

Experiment konnte erst unter Hilfestellung der Laborleitung durchgeführt werden. Bei den anschließenden Berechnungen zeigte sich zudem, dass die Schülerinnen und Schüler nicht über das nötige Vorwissen verfügten, um die Rechnungen korrekt durchzuführen. Insgesamt wurde nur eine Rechnung vollständig durchgeführt, die jedoch keine physikalischen Einheiten beinhaltet. Aufgrund der fehlenden Einheiten war in der Folge selbst diese Rechenaufgabe für weitere Aktivitäten nicht nutzbar (siehe Abb. 12). Von vielen Schülerinnen und Schülern wurden keine oder unvollständige und/oder falsche Rechnungen durchgeführt. So ist bspw. in Abb. 13 in der Rechnung einer Schülerin bzw. eines Schülers zu sehen, dass bei einer gemessenen Stromstärke  $I = 80,4 \text{ mA}$  die Werte ohne Umrechnung der physikalischen Einheiten übernommen wurden. Zudem wurde auch für die berechnete Spannung  $U$  die Einheit für die Stromstärke Ampere [A] verwendet und damit eine falsche Einheit genutzt.

**Aufgabe 4**

Berechnet die Spannung, indem ihr die Formel  $U = R \cdot I$ , benutzt:  $U = 98,5 \cdot 0,086 = 8,496$

Berechnet damit die elektrische Leistung  $P = 8,496 \cdot 0,086 = 0,73$

Wir nehmen an, dass Fredrika ca. 8 Stunden am Tag Fahrrad fährt mit einer Geschwindigkeit von 20km/h.

Berechne die elektrische Energie, die Fredrika so generieren kann:  $E = 28.800 \cdot 0,73 = 21024$

Abb. 12. Rechenaufgaben inklusive einer exemplarischen und mathematisch korrekten Rechnung durch eine Schülerin bzw. eines Schülers. Hier erfolgte die Rechnung jedoch ohne die Nutzung physikalischer Einheiten, so dass insbesondere die letzte Rechenaufgabe mit dem Ergebnis einer Zeitdauer schwierig in Bezug auf die passende Unterfrage zu interpretieren ist.

**Aufgabe 4**

Berechnet die Spannung, indem ihr die Formel  $U = R \cdot I$ , benutzt:  $U = 98,6 \cdot 80,4 = 79 \text{ A}$

Berechnet damit die elektrische Leistung  $P = 7,9 \cdot 0,68 = 0,632$

Wir nehmen an, dass Fredrika ca. 8 Stunden am Tag Fahrrad fährt mit einer Geschwindigkeit von 20km/h.

Berechne die elektrische Energie, die Fredrika so generieren kann:  $E = \underline{\hspace{2cm}}$

Abb. 13. Rechenaufgabe inklusive falscher und fehlender Rechnungen einer Schülerin oder eines Schülers. Bereits zur ersten Aufgabe wurde eine falsche Einheit (mA statt A) genutzt. Die letzte Rechenaufgabe fehlt zudem vollständig.

Zum Abschluss der CRU sollten die Schülerinnen und Schüler schließlich die physikalischen Begriffe der CRU in einer Concept Map zusammenführen. Hier zeigte sich, dass den meisten Schülerinnen und Schülern einige Energieformen bekannt, jedoch für die CRU notwendige Begriffe wie Stromstärke, Spannung und Leistung auch nach der CRU nicht bekannt waren (siehe das Beispiel einer Person in Abb. 14). In einem Fall wurden die notwendigen Begriffe immerhin genannt, jedoch nicht inhaltlich mit Energiebegriffen verbunden (siehe Abb. 15). Zudem zeigte sich hier, dass die Schülerin bzw. der Schüler zwar viele physikalische- und auch Kontextbegriffe der CRU nennen, diese jedoch nicht im Sinne eines Begriffsnetzwerks anordnen konnte.

### Aufgabe 1:

Entwirf eine Concept Map mit den physikalischen Begriffen, die wir heute behandelt haben.

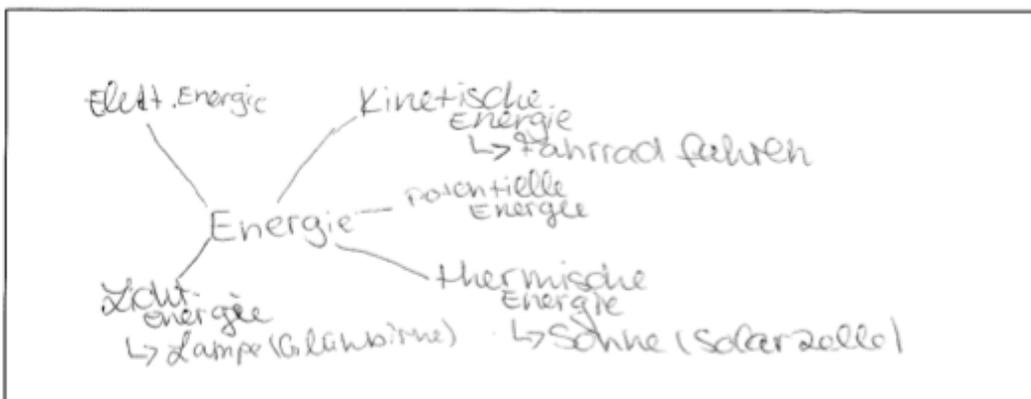


Abb. 14. Concept Map einer Schülerin oder eines Schülers. Trotz Auseinandersetzung mit Energiebegriffen und weiteren physikalischen Ideen wie Stromstärke, Leistung und Spannung wurden diese Ideen nicht von der Person in der Concept Map aufgeführt.

**Aufgabe 1:**

Entwurf eine Concept Map mit den physikalischen Begriffen, die wir heute behandelt haben.

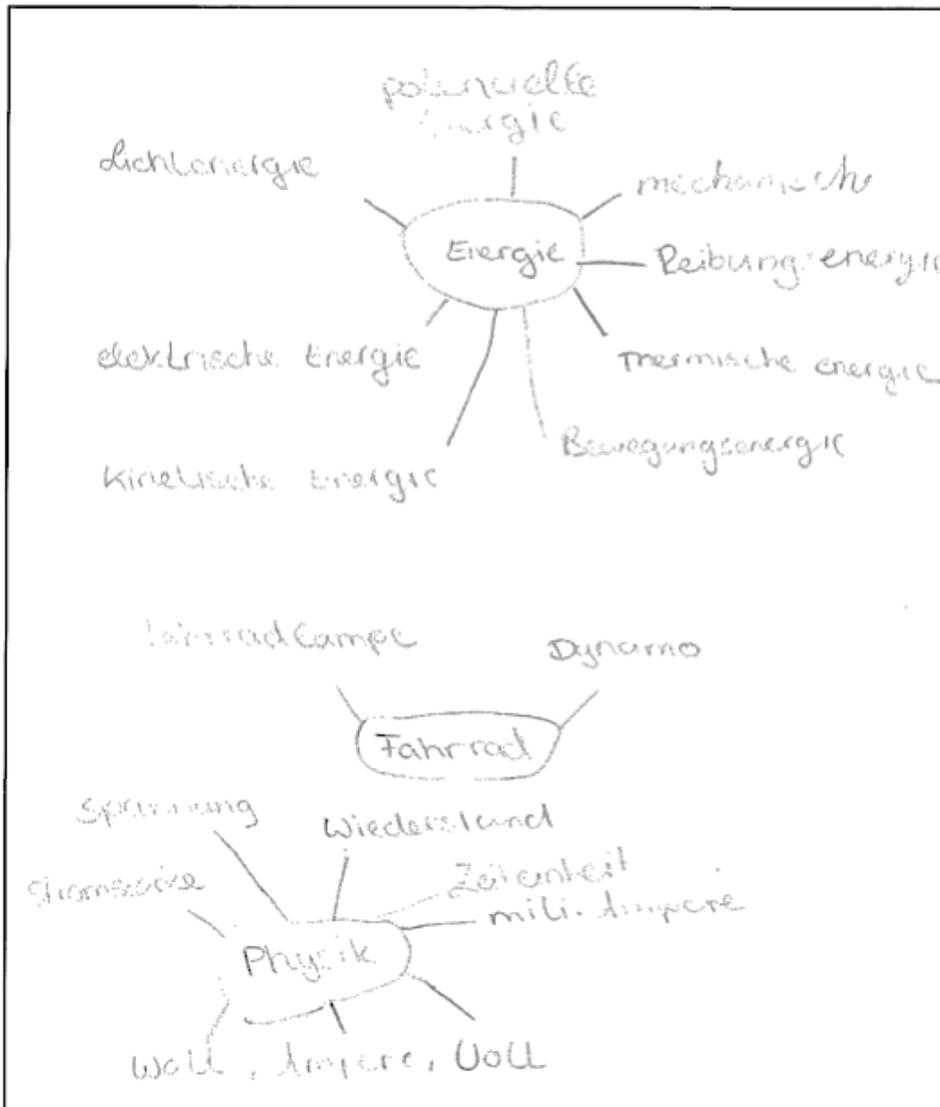


Abb. 15. Concept Map einer Schülerin oder eines Schülers. Die Schülerin bzw. der Schüler verfügt zwar über ein reichhaltiges Begriffsnetzwerk inklusive der physikalischen Ideen der CRU, verbindet diese nicht im Sinne einer Concept Map. Vielmehr wird zwischen den Energie-, den physikalischen- und den Kontextbegriffen getrennt.

### Zusammenfassung und Fazit:

Aus der Märzerprobung haben sich drei wesentliche Erkenntnisse in Bezug auf die fiktive Unterrichtseinheit, deren Elemente und damit der Überarbeitung fiktiven Unterrichtseinheit ergeben.

Erstens hat sich gezeigt, dass sich die Anchoring Phenomena Routine nach Reiser et al. (2017) nicht für die Erarbeitung jeder Leitfrage eignet. Insbesondere zu quantitativen Fragestellungen („Wie lang müsste man Rad fahren, um ein Smartphone zu laden?“) können Schülerinnen und Schüler keine theoriebasierten Antworten liefern. Gleichzeitig

erhält die Lehrkraft auf diese Weise keine Informationen über das Vorwissen der Schülerinnen und Schüler. Aufgrund weiterer quantitativ gestellter Leitfragen in der Designlösung („Wie hoch kann man auf einem Trampolin springen?“, „Wie viel Energie steckt in einer Stick Bomb?“) wurde in der fiktiven Unterrichtseinheit vermerkt, dass die Anchoring Phenomena Routine nach Reiser et al. (2017) bis auf die Erarbeitung der Unterfragen und Leitfragen jeweils individuell an die spezifische CRU angepasst wird. Auch wird den Lehrkräften die Aufgabe zur Sammlung ähnlicher Phänomene aus dem Alltag als optional gekennzeichnet, da diese Aktivität erst dann kohärent in einer CRU eingebaut werden kann, wenn die Phänomene im Verlauf der Einheit von der Lehrkraft thematisiert werden.

Zweitens geht aus den Beobachtungen hervor, dass die Schülerinnen und Schüler große Schwierigkeiten beim Transfer des erworbenen physikalischen Inhalts auf den Kontext bzw. die Leitfrage haben. Zur stärkeren Vernetzung von Kontext und Inhalt wurde aus dem Grund in der fiktiven Unterrichtseinheit die Beantwortung der Unterfragen zum Abschluss des jeweiligen Abschnitts der Erarbeitungsphase verschoben. Zusätzlich wurde in das Lehrkraftmanual der Hinweis je Aufgabe aufgenommen, wie der physikalische Inhalt zur Beantwortung der Unterfragen bzw. zur Leitfrage beiträgt. Gleichzeitig sollen die Lehrkräfte möglichst häufig die Verknüpfung zwischen Inhalt und Kontext explizieren, um zum einen Verbindungen zwischen physikalischen Ideen zu stärken (vgl. Neumann et al., 2008; Linn, 2006) und zum anderen den Transfer auf Kontexte zu unterstützen (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2018). Aus dem Grund wurde die Beantwortung der Unterfragen im Allgemeinen überarbeitet. Da die Unterfragen bewusst als Fragen aus dem Alltag der Schülerinnen und Schüler und nicht als naturwissenschaftliche Fragen formuliert sind bzw. Schülerinnen und Schüler dementsprechend ohne Rückbezug auf physikalische Ideen die Fragen beantwortet haben, wurde die Beantwortung der Unterfragen nach Absprache mit Lehrkräften in Zukunft mit einem Erläuterungsoperator formuliert, wie das folgende Beispiel zeigt:

„Wann wird ein Laptop heiß?“ → „Erläutere, wann ein Laptop heiß wird.“

Durch die Neugestaltung und -strukturierung der Unterfragen bzw. der Erarbeitungsphase bei gleichzeitiger regelmäßiger Explizierung der Lehrkraft (Neumann et al., 2008) sollen die Schülerinnen und Schüler stärker in die Entwicklung einer kohärenten aber auch anwendbaren Wissensbasis unterstützt werden.

Drittens wurde die Reflexionsphase aufgrund des Wegfalls der Beantwortung der Unterfragen bzw. der Schwierigkeiten beim Entwerfen einer Concept Map verändert. In der Reflexion wird nun ausschließlich die Leitfrage von den Schülerinnen und Schülern beantwortet und die CRU mündlich im Plenum besprochen. In der mündlichen Zusammenfassung können hier wahlweise auch die ähnlichen Phänomene der Einleitung von der Lehrkraft aufgegriffen und hinsichtlich der Energieumwandlung im Unterrichtsgespräch thematisiert werden.<sup>8</sup>

### 3.5.2. Junierprobung

In der Junierprobung wurden im Energielabor der Kieler Forschungswerkstatt drei CRUs mit fünf Schulklassen erprobt. Der Tabelle 5 sind jeweils die Leitfragen bzw. die zugehörigen Klassen und Anzahl der Schülerinnen und Schüler (SuS) zu entnehmen.

Tabelle 5. Im zweiten Schritt der ersten Erprobung wurde mit fünf Schulklassen in der Kieler Forschungswerkstatt drei verschiedene CRUs erprobt.

Kontext	Fragestellung	Jahrgang	SuS
Trampolin	Wie hoch kann man auf einem Trampolin springen?	9	20
		8	24
Solarzellen	Wie sollten Solarzellen an einem Haus angebracht werden, um möglichst viel Energie umwandeln zu können?	7	23
		7	26
Laptop	Warum wird ein Laptop manchmal heiß?	6	27

Die CRUs zu den Kontexten „Trampolin“ und „Solarzellen“ wurden im Rahmen von Qualifikationsarbeiten durch zwei Studierende mithilfe der überarbeiteten fiktiven Unterrichtseinheit angefertigt. Die Erprobung im Energielabor wurde entsprechend von diesen beiden Studierenden durchgeführt. Die Beobachtungen und einheitenspezifischen

<sup>8</sup> Zu den drei Beobachtungen ergänzend zeigte sich zudem, dass das Vorwissen der Schülerinnen und Schüler einen zentralen Einfluss auf die Bearbeitung der Aufgaben zum Erwerb eines physikalischen Inhalts hat. Diese Erkenntnis beeinflusst nicht die fiktive Unterrichtseinheit zur Entwicklung der CRUs. Jedoch wurde innerhalb des Forschungsprojekts für die digitale Umsetzung übernommen, dass das benötigte Vorwissen einer CRU für Lehrkräfte zu Beginn genannt und je Aufgabe in einem Manual für Lehrkräfte expliziert wird.

Überarbeiten sind in den jeweiligen Qualifikationsarbeiten festgehalten (Baumgarten, 2019; Meyerholz, 2019). Die folgende Ausführung fokussiert daher ausschließlich die Unterrichtseinheit zum Kontext „Laptop“, deren Testung vom Autor der Arbeit durchgeführt wurde. Zu dieser Testung liegen in Bezug auf die Beantwortung der Unterfragen und der Leitfrage keine Artefakte der Schülerinnen und Schüler vor, da die Beantwortungen mündlich im Plenum durchgeführt wurden. Vor und nach der Testung wurden zur Erprobung von Testinstrumenten für einen später in dieser Arbeit durchgeführten Feldtest u.a. Interviews zur Erklärung von Phänomenen mit Schülerinnen und Schülern durchgeführt. Die qualitative Analyse der Interviews dient hier ebenfalls als Datengrundlage.

### Ergebnisse

Die Unterrichtseinheit wurde entsprechend den Überarbeitungen aus der Märzerprobung durchgeführt. Da die Lehrkräfte möglichst häufig die Verknüpfung zwischen Inhalt und Kontext in der Unterrichtseinheit explizieren sollen, ging die Lehrkraft während der Experimentierphase mit einem offenen Laptop zu jeder Gruppe. Mithilfe des Laptops sollten die Schülerinnen und Schüler eine Analogie zwischen dem Experiment und dem Laptop herstellen, indem Bauteile direkt miteinander verglichen werden. Zudem konnte so der Wärmetransport in einem Laptop händisch verfolgt und mit dem Experiment verglichen werden. Gemäß der Feldnotizen gelang es den Schülerinnen und Schülern im Anschluss im Plenum, die physikalischen Inhalte aus den Aufgaben auf den Kontext bzw. zur Beantwortung der Unterfragen zu übertragen.

In den Interviews zur Erklärung von Phänomenen wurde den Schülerinnen und Schülern zudem vor und nach der Testung u.a. ein Video eines Toasters im Betrieb gezeigt, deren Vorgänge erklärt werden sollten (für eine ausführliche Beschreibung der Interviews siehe Abschnitt 4.1.2). Vor der Testung nutzte hier nur eine von drei Schülerinnen bzw. Schülern Energiebegriffe zur Erklärung der Phänomene:

„Es ist halt ein Toaster und bei einem Toaster wird halt Energie, also Elektroenergie, in Wärmeenergie und die erhitzt das Brot halt und äh ja...“

- Schüler/in 1

Auch die anderen beiden Schülerinnen bzw. Schüler nutzten zwar den elektrischen Strom als Begründung für eine Erhitzung des Toasters, jedoch nutzten sie keine Energiebegriffe:

„Also da fließt sozusagen Strom oder so durch diese Stäbe und das erhitzt das ähnlich wie einer Glühlampe, dadurch dass da ja Strom durchfließt, dass sich das dann erhitzt, bloß dass das halt heißer wird als bei einer Glühlampe.“

- Schüler/in 2

Nach der Unterrichtseinheit wurden dagegen von allen drei Schülerinnen bzw. Schülern Energiebegriffe zur Erklärung der Vorgänge in einem Toaster genutzt:

„Weil ähm elektrische Energie aus der Steckdose in den Toaster gelangt und ähm sich da in diesen Metalldrähten in Lichtenergie und Wärmeenergie umwandelt und so erhitzt es dann, wenn da ein Toast drin ist, das Toast.“

- Schüler/in 2

Interessanterweise ließ sich bei Schüler/in 1 auch die Nutzung weiterer Aspekte des Energiekonzepts wie das der Energieentwertung und das des -transfers zusätzlich zur Energieumwandlung beobachten:

„Also da wurde erst Elektroenergie umgewandelt in thermische Energie und die wurde am Ende glaub ich auch entwertet und dann ging das halt weg, also freigelassen, also ist irgendwie weggegangen.“ (Nachfrage der Testleitung: „Ähm also was meinst du mit „weggegangen“ oder wohin ist sie gegangen?“) „Entweder in die Luft oder wieder in elektrische Energie? Das weiß ich nicht.“

- Schüler/in 1

### Zusammenfassung und Fazit

Gemäß den Ergebnissen der Junierprobung führten die Überarbeitungen der fiktiven Unterrichtseinheit zu einer verbesserten Durchführung der CRU. Dies wurde insbesondere in den durchgeführten Interviews beobachtet. Die Schülerinnen und Schüler erfüllten so das Ziel, das erworbene Wissen über die Energieumwandlung von elektrischer in thermische Energie auch zur Erklärung von Phänomenen anwenden und damit Wissen transferieren zu können. Das regelmäßige Explizieren von Verknüpfungen zwischen physikalischen Ideen bzw. Aufgaben und Kontexten durch die Lehrkraft, hier durch die Analogiebildung zwischen Laptop und Experiment, erwies sich als wichtige Maßnahme und sollte bei zukünftigen Erprobungen der Unterrichtseinheit beachtet werden.

Da zur Kontrolle des Lernziels Lehrkräfte jedoch im Regelunterricht nicht mit allen Schülerinnen und Schülern Interviews durchführen können, wurde in einer

abschließenden Design- und Entwicklungsphase die fiktive Unterrichtseinheit erneut überarbeitet.

### 3.6. Design und Entwicklung zur Überarbeitung der Designlösung

Die in einer abschließenden Design- und Entwicklungsphase überarbeitete und finalisierte fiktive Unterrichtseinheit ist in Abb. 16 dargestellt. In der Einleitung wird hier nun anhand eines Phänomens in einer Problematisierung die Leitfrage weiterhin hergeleitet und Unterfragen zur Strukturierung der Erarbeitung genutzt. Wahlweise können hier auch Aufgaben zu ähnlichen Phänomenen bzw. zur Beantwortung der Leitfrage implementiert werden. In der Erarbeitung werden schließlich drei Unterfragen bearbeitet und nacheinander relevante Energieformen und deren -umwandlungen wiederholt, diese mit physikalischen Inhalten vernetzt und schließlich vertieft. Am Ende jede der drei Phasen wird die Unterfrage beantwortet und um eine Erläuterung unter Rückgriff auf Aufgaben aus der Erarbeitung ergänzt. Die Aufgaben sind jeweils variabel und werden passend zu diesen Vorgaben bzw. der Leitfrage konstruiert. In der Reflexionsphase sollen die Schülerinnen und Schüler nun neben der Beantwortung der Leitfrage zwei kurze Transferaufgaben zum jeweiligen physikalischen Inhalt einer CRU bearbeiten. Während die eine Aufgabe die Energieumwandlung zu einem ähnlichen Kontext der jeweiligen CRU thematisiert, vertieft die andere Aufgabe die entsprechende Energiekonzeptualisierung (Transfer, Entwertung, Erhaltung) der dritten Unterfrage. Anhand der Transferaufgaben kann die Lehrkraft das Energiekonzept abschließend aufgreifen und das fachliche Lernziel geprüft werden.

Das Ergebnis des ersten Erprobungszyklus' im Energielabor in Bezug auf die Designlösung war zum einen die Weiterentwicklung der fiktiven Unterrichtseinheit. Diese wurde gemäß dem vorigen Kapitel überarbeitet. Zum anderen wurden bestehende CRUs an die überarbeitete fiktive Unterrichtseinheit angepasst bzw. auch die spezifisch erprobten CRUs individuell weiterentwickelt. Exemplarisch wird daher im Folgenden die CRU zum Kontext Laptop zur Leitfrage „Warum wird ein Laptop manchmal heiß?“ vorgestellt.

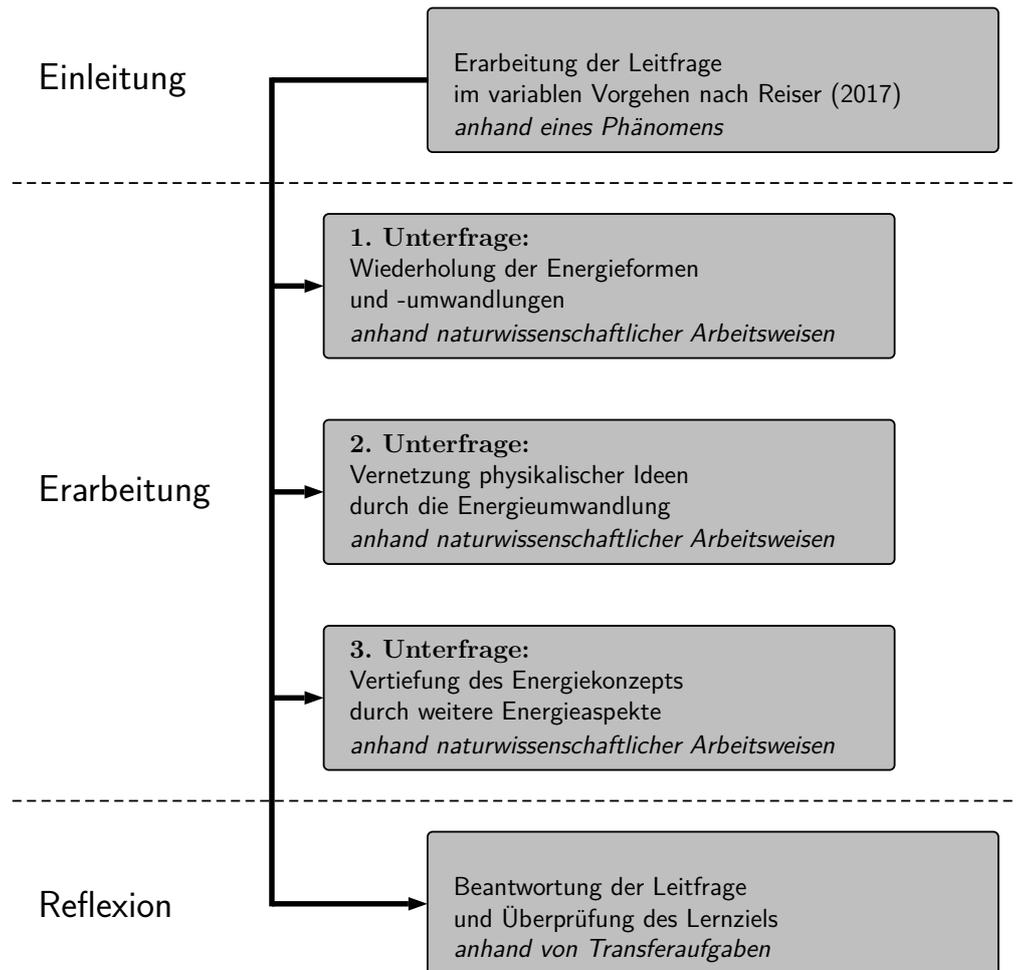


Abb. 16. Überarbeitete Fassung der fiktiven Unterrichtseinheit zur Entwicklung einer CRU zur Energieumwandlung zweier Formen anhand einer Leitfrage. Insbesondere wurde hier zum einen die Kohärenz der CRU durch die direkte Beantwortung der Unterfragen erhöht und damit auch die Reflexionsphase durch Transferaufgaben überarbeitet.

### 3.6.1. Exemplarische CRU „Warum wird ein Laptop manchmal heiß?“

In der CRU „Warum wird ein Laptop manchmal heiß?“ wird anhand des Kontexts eines Laptops die Umwandlung von elektrischer in thermische Energie behandelt und ist für eine 6./7. Schulklasse entwickelt. Da gemäß Abschnitt 3.4.2 die CRU Möglichkeiten beinhaltet, bei denen die Lehrkräfte zwischen Aktivitäten wählen können, werden hier nicht alle möglichen Lernwege vorgestellt, sondern vielmehr der Lernweg aufgezeigt, der den Lehrkräften empfohlen wurde.

### Einleitung

In der Einleitung der CRU wird den Schülerinnen und Schülern ein Laptop präsentiert, auf dem mehrere leistungsintensive Programme laufen. Die Schülerinnen und Schülern beobachten den Laptop und erfahren die hohe Temperatur an der Oberseite des Laptops. Im Anschluss werden die Beobachtungen der Schülerinnen und Schüler gesammelt und Fragen rund um den heißen Laptop entwickelt. In einer Plenumsphase wird aus den Fragen der Schülerinnen und Schüler die übergeordnete Leitfrage „Warum wird ein Laptop manchmal heiß?“ entwickelt. Im Anschluss stellen die Schülerinnen und Schüler erste Überlegungen zur Beantwortung der Leitfrage an. Mögliche erste Überlegungen zur Leitfrage sind im unteren Teil des Tafelbilds von Abb. 17 zu sehen und als kurze Vermutungen durch die Lehrkraft notiert. Die Vermutungen geben der Lehrkraft eine Übersicht über das Vorwissen der Schülerinnen und Schüler. Hier werden bspw. erste Vermutungen wie „Licht des Displays benötigt Energie → Wärme wird produziert“ formuliert. Der Energiebegriff wird demnach hier alltagssprachlich aber korrekt verwendet. Jedoch zeigen sich auch Lücken beim Energieverständnis („Batterie wird heiß → Laptop braucht mehr Energie als Batterie liefern kann“), die die Lehrkraft im Verlauf der CRU adressieren kann. Die im Anschluss gesammelten Phänomene wie bspw. ein Wasserkocher, eine Mikrowelle, ein Herd, eine Playstation oder eine Glühbirne werden von der Lehrkraft zunächst nicht thematisiert, können aber zur Generalisierung bzw. zum Transfer des Energiekonzepts auf andere Kontexte während der Unterrichtseinheit genutzt werden.

Zum Abschluss der Einleitung greift die Lehrkraft die formulierten Fragen der Schülerinnen und Schüler erneut auf und nutzt diese als Unterfragen der Leitfrage zur Strukturierung der Erarbeitungsphase. Die Erarbeitungsphase ist über mehrere Unterrichtsstunden und entlang von drei Unterfragen angelegt. Zunächst wird hier die Frage „Wo wird ein Laptop heiß?“ bzw. anschließend „Wann wird ein Laptop heiß?“ thematisiert, um abschließend die Frage „Wie lässt sich die Erhitzung eines Laptops verhindern?“ zu beantworten.

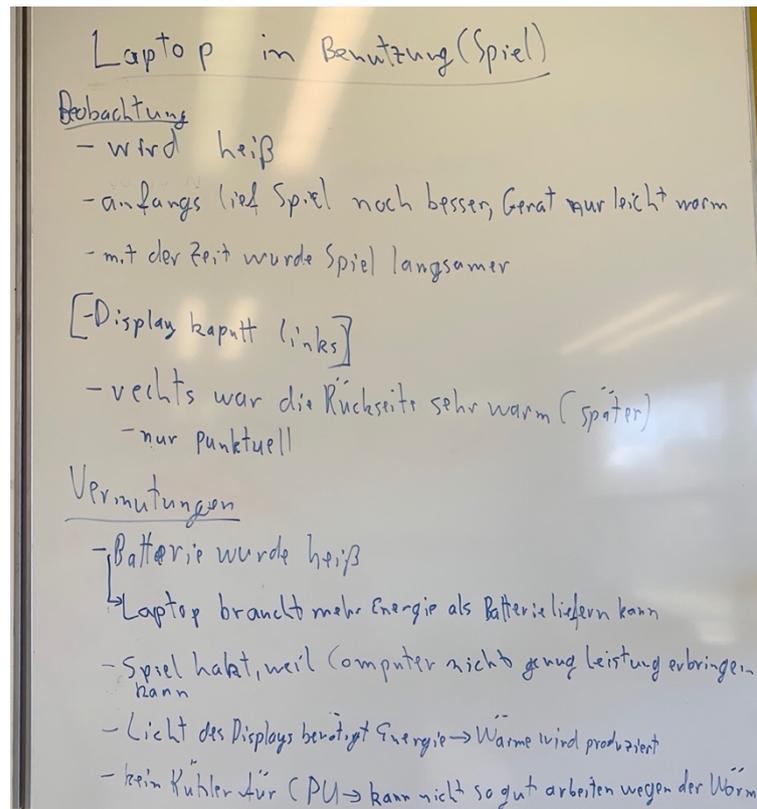


Abb. 17. Das Tafelbild der Einleitungsphase zur Erprobung der CRU "Warum wird ein Laptop manchmal heiß?" mit einer 9. Klasse einer Gemeinschaftsschule.

### 1. Unterfrage: „Wo wird ein Laptop heiß?“

Zur ersten Unterfrage „Wo wird ein Laptop heiß?“ vergleichen die Schülerinnen und Schüler zunächst Bilder eines Laptops, der einmal ein- und einmal ausgeschaltet ist. Die Bilder sind mit einer Wärmebildkamera aufgenommen und offenbaren eine punktuelle Erwärmung im Zentrum des Laptops (vgl. Abb. 18). Im Bereich des Prozessors eines Laptops findet demnach die größte punktuelle Erwärmung statt. In der Folge befassen sich die Schülerinnen und Schüler mit dem Aufbau eines Prozessors. Dazu schauen die Schülerinnen und Schüler u.a. ein Video an, in dem Aufbau und einzelnen Bestandteile des Prozessors mithilfe eines Rastertunnelmikroskops sichtbar gemacht werden. Ein wichtiger Bestandteil des Prozessors sind viele miteinander verbundene Kabel und damit elektrische Stromkreise.

Die Erkenntnis, dass ein Prozessor im Wesentlichen aus vielen elektrischen Stromkreisen besteht, dient der Motivation und Vorbereitung eines anschließenden Versuchs zur Wärmeentwicklung in elektrischen Stromkreisen. Die Schülerinnen und Schüler führen den Versuch unter Anleitung durch, indem in einem offenen bzw. geschlossenen Stromkreis mit einer Glühlampe als Verbraucher über eine Minute jeweils die

Temperatur in einem stromdurchflossenen Draht gemessen wird. Im Anschluss sollen die Schülerinnen und Schüler die elektrische bzw. thermische Energie im Experiment zuordnen und unter Berücksichtigung der Energieumwandlung eine Deutung des Experiments vornehmen. Hier ist zu beachten, dass den meisten Schülerinnen und Schülern der Effekt bereits bekannt ist und sie entsprechende Vermutungen bereits vor dem Experiment formulieren. Die Vermutungen der Schülerinnen und Schüler beziehen sich jedoch auf absolute Zustände, d.h. ein Laptop bzw. ein Stromkreis ist entweder warm oder kalt. Anhand des Experiments kann die Lehrkraft unter Einbezug des Energiekonzepts jedoch explizieren, dass in einem eingeschalteten Laptop bzw. in einem stromdurchflossenen Leiter immer ein Temperaturanstieg zu beobachten ist und diese Erwärmung mit der Umwandlung von elektrischer in thermische Energie in jedem elektrischen Bauteil verknüpfen. Zudem wird im Experiment zwischen verschiedenen Zeitpunkten der Erwärmung unterschieden. Der Vermutung der Schülerinnen und Schüler, d.h. die disjunkte Unterscheidung in warme und kalte Zustände eines Stromkreises bzw. eines Laptops, wird dementsprechend begegnet.

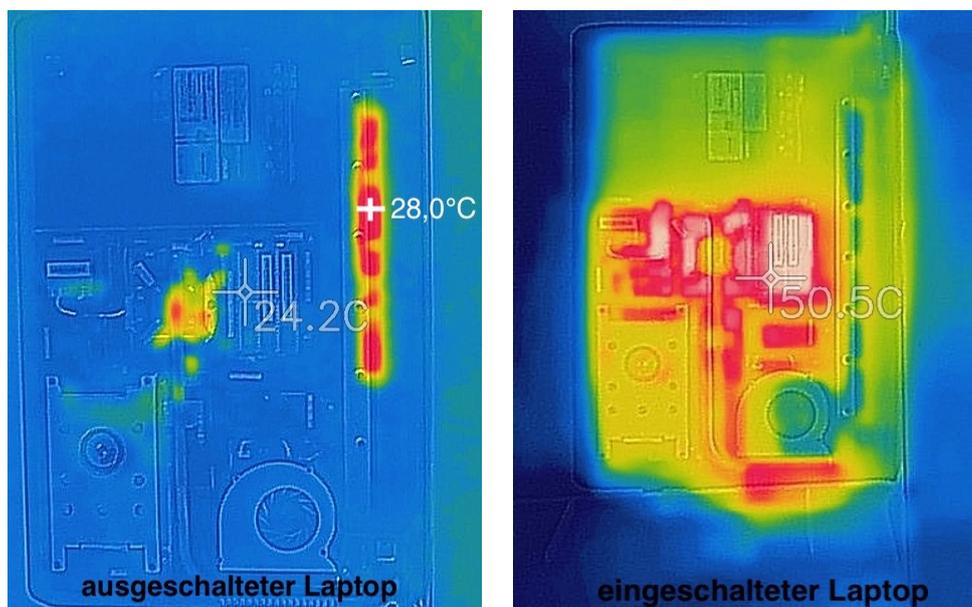


Abb. 18. Ein Laptop wird im ausgeschalteten bzw. eingeschalteten Zustand mit einer Wärmebildkamera fotografiert. Im rechten Bild ist insbesondere die punktuelle Erwärmung im Zentrum des Laptops zu erkennen.

Die erste Erarbeitungsphase schließt mit einer Bearbeitung der 1. Unterfrage ab, in deren Rahmen die Schülerinnen und Schüler nicht nur die 1. Unterfrage beantworten, sondern deren Beantwortung auch unter Berücksichtigung physikalischer Ideen und Konzepte begründen. Das heißt es reicht hier nicht aus, zu benennen, wo sich der Laptop erwärmt.

Vielmehr wird erwartet, dass die Schülerinnen und Schüler den Grund der Erwärmung bspw. unter Berücksichtigung der Energieumwandlung ausformulieren.

## 2. Unterfrage: „Wann wird ein Laptop heiß?“

Gemäß der fiktiven Unterrichtseinheit nach Abschnitt 3.4.1 werden zur zweiten Unterfrage Lernaktivitäten zur Vernetzung von physikalischen Inhalten angeboten. In dieser CRU sollen demnach explizit physikalische Ideen aus dem Bereich der Wärmelehre mit solchen Ideen aus der Elektrizitätslehre vernetzt werden. Die Vernetzung findet dabei über die Umwandlung der elektrischen in die thermische Energie statt.

Zu Beginn der CRU sammeln hierfür die Schülerinnen und Schüler zunächst Situationen aus ihrem Alltag, in denen ein Laptop besonders heiß wurde. Anhand der Situationen (bspw. Bildbearbeitungen, Filme streamen oder Computerspiele spielen) kann die Lehrkraft explizieren, dass in diesen Situationen der Laptop mehr elektrische Energie benötigt, da mehrere gleichzeitige Prozesse im Laptop ablaufen und motiviert ein weiteres Experiment. In dem Experiment wird nun erneut der Temperaturverlauf im Draht wie im ersten Experiment gemessen, jedoch werden zwei Glühlampen im Stromkreis als Verbraucher verwendet. Die Temperatur mit zwei Glühlampen nimmt im Verlauf wesentlich stärker zu als die Temperatur im Stromkreis mit einer Glühlampe aus dem ersten Experiment. Im Stromkreis liegt aufgrund der zwei Verbraucher eine höhere Stromstärke vor als im Stromkreis mit einem Verbraucher.

Die Lehrkraft hat hier die Möglichkeit, die elektrische Stromstärke aus der Elektrizitätslehre explizit mit der Temperatur aus der Wärmelehre über die Energieumwandlung miteinander zu vernetzen. Sollte die Lehrkraft die elektrische Stromstärke noch nicht explizit in der Elektrizitätslehre eingeführt haben, können insbesondere „Je-desto-Sätze“ zur Vernetzung genutzt werden: „Je mehr elektrische Energie die Verbraucher benötigen, desto höher ist die umgewandelte thermische Energie und damit auch die Temperatur im Draht.“

Je nach Vorwissen der Schülerinnen und Schüler ist so eine Vernetzung physikalischer Ideen möglich. Abschließend sollen die Schülerinnen und Schüler die Erkenntnis aus dem Experiment erneut nutzen, die Unterfrage zu beantworten.

## 3. Unterfrage: „Wie lässt sich die Erwärmung eines Laptops verhindern?“

Die dritte Unterfrage der CRU soll abschließend eine bestimmte Energiekonzeptualisierung (Transfer, Entwertung, Erhaltung) vertiefen. Da diese CRU

zum Kontext Laptop für den Anfangsunterrichts Physik eingeteilt ist (vgl. Abb. 8), wird der Energietransfer als eine untere Stufe in der Learning Progression zum Energiekonzepts vertieft (vgl. Neumann et al., 2013). Zudem bietet sich der Energietransfer einer Energieform in besonderem Maße an, da die umgewandelte thermische Energie im Prozessor des Laptops nicht genutzt und demnach abtransportiert werden muss. Ebendiese Gefahr der Überhitzung bei der Umwandlung in thermische Energie am Laptop wird in der dritten Unterfrage thematisiert.

Hierfür wird das vorige Experiment mit zwei Glühlampen im Stromkreis erneut durchgeführt, jedoch um ein Wärmerohr am Konstantendraht ergänzt (siehe Bild links unten in Abb. 19). Ein Wärmerohr (*engl. heatpipe*) ist in vielen Laptops verbaut und dient dem Wärmetransport vom Prozessor bzw. dem Zentrum des Laptops zu einem Lüfter, der warme Luft abtransportiert. Im Experiment wird dieser Aufbau aus Prozessor und Wärmerohr nachgestellt. Hierfür wird das Wärmerohr am Konstantendraht im Stromkreis einseitig befestigt, während das andere Ende des Wärmerohrs frei in der Luft ist. Die Schülerinnen und Schüler messen nun erneut den Temperaturverlauf im geschlossenen Stromkreis. Im Experiment mit dem Wärmerohr wird eine deutlich geringere Temperatur über die Zeit im Vergleich mit dem Experiment aus Unterfrage 2 gemessen (vgl. hier auch alle exemplarischen Messwerte in Tabelle 6).

Tabelle 6. Temperaturverlauf der vier Experimente aus der Erarbeitungsphase der CRU. Es wurde die Temperatur exemplarisch über die Zeit von 70s im Intervall von 10s am Konstantendraht gemessen. Zur Vergleichbarkeit der Messreihen wurde jeweils dieselbe Starttemperatur gewählt. Die aufgetragenen Messreihen entsprechen jeweils der Reihenfolge der Experimente aus Abb. 19.

ZEIT T IN S	TEMPERATUR T IN °C			
	offener Stromkreis	Geschlossener Stromkreis		
		Eine Glühlampe	Zwei Glühlampen	Mit Wärmerohr
0	25,9	25,9	25,9	25,9
10	25,9	26,4	27,1	26,5
20	25,9	27,1	28,5	27,3
30	25,9	27,8	29,9	27,8
40	25,9	28,4	30,9	28,3
50	25,9	29,0	31,7	28,7
60	25,9	29,4	32,3	29,0
70	25,9	29,8	32,9	29,1

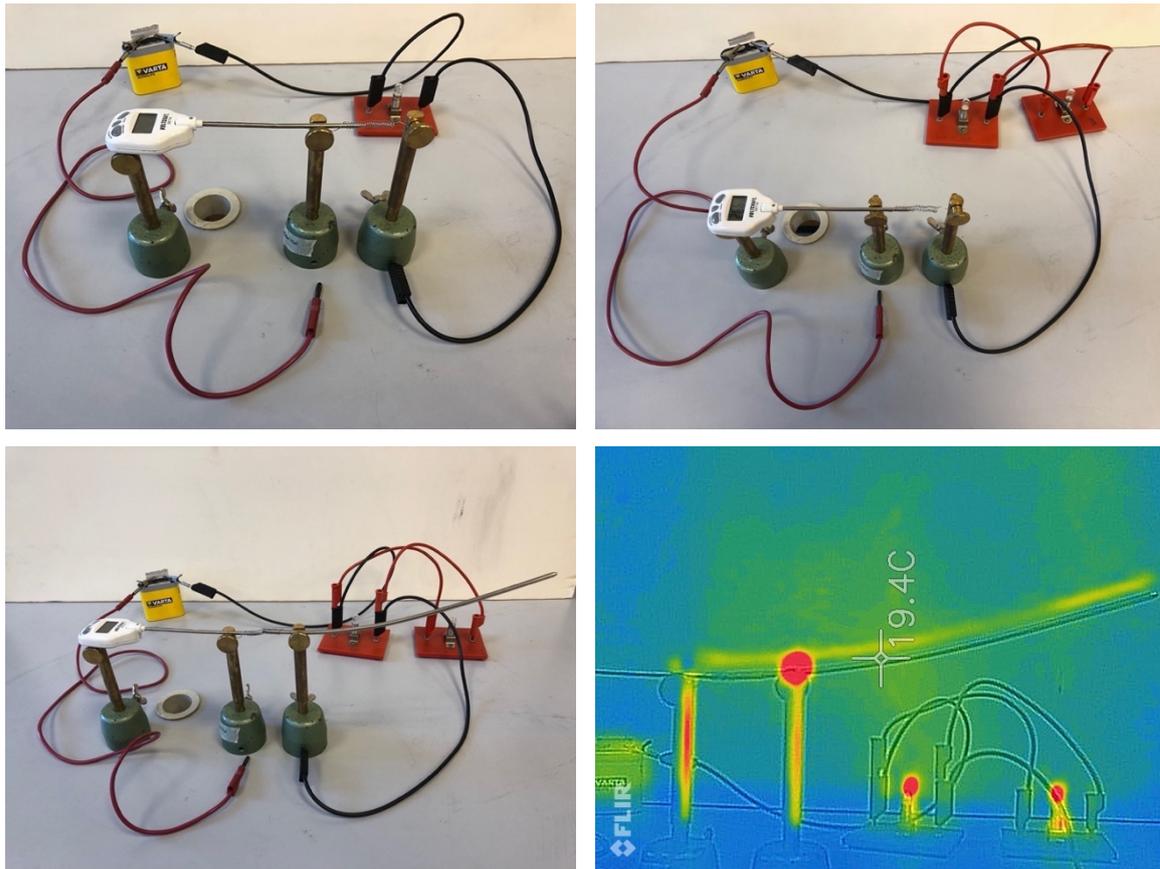


Abb. 19. Das Experiment eines Stromkreises mit Batterie, Lampe, einem Konstantendraht und einem Thermometer mit Fühler im Draht wird viermal durchgeführt. In allen Fällen wird die Temperaturentwicklung über die Zeit in regelmäßigen Abständen von den Schülerinnen und Schülern gemessen. Die erste Messung der Temperaturentwicklung wird (1) für einen offenen und (2) für einen geschlossenen Stromkreis mit einer Glühlampe durchgeführt (links oben). Im Anschluss wird das Experiment mit zwei Glühlampen wiederholt und die Temperatur erneut über die Zeit gemessen (rechts oben). Die Temperaturentwicklung wird abschließend mit einem Wärmerohr am Konstantendraht gemessen (links unten). Der Transport der thermischen Energie durch das Wärmerohr kann zudem mithilfe einer Wärmebildkamera visualisiert werden (rechts unten).

Das Wärmerohr sorgt demnach für eine Kühlung des Drahtes, indem die aus der elektrischen Energie umgewandelte thermische Energie vom Draht über das Wärmerohr abtransportiert wird. Ergänzende Messungen, wie bspw. die Aufnahme des Experiments mithilfe einer Wärmebildkamera (siehe Abb. 19 rechts unten), können hier zudem diese Deutung durch die Schülerinnen und Schüler unterstützen. Im Anschluss an die das Experiment füllen die Schülerinnen und Schüler einen Lückentext aus, der die historisch-technische Entwicklung von Wärmerohren ausgehend vom Prinzip der Wärmeleitung bis zum Prinzip der Konvektion und der Relation zum Energiekonzept thematisiert. Anhand des Lückentexts und des Experiments kann die Lehrkraft hier abschließend auf den Energietransfer (hier: thermische Energie) eingehen und damit die Energiekonzeptualisierung vertiefen. Die Lehrkraft sollte hier in Verbindung zum Laptop

erneut betonen, dass die umgewandelte thermische Energie nicht genutzt werden kann und wegen der Gefahr einer Überhitzung des Laptops abtransportiert werden muss.

Abschließend sollen die Schülerinnen und Schüler den Energietransfer bzw. den Transport thermischer Energie zur Beantwortung der Unterfrage nutzen. Bzgl. der Unterfrage, wie sich die Erwärmung eines Laptops verhindern lässt, ist zu betonen, dass die Erwärmung sich generell nicht verhindern lässt. Vielmehr werden geeignete technische Möglichkeit, wie der Transport der thermischen Energie, genutzt, um eine Überhitzung infolge der Erwärmung zu verhindern.

### Reflexion

In der abschließenden Reflexion beantworten die Schülerinnen und Schüler schließlich die Leitfrage „Warum wird ein Laptop manchmal heiß?“ im Plenum. Die in der Einleitung genannten Phänomene bzw. ähnliche Kontexte der Schülerinnen und Schüler werden hier im Anschluss aufgegriffen und dienen als Grundlage zur fachlichen Reflexion bzw. zum Transfer der Energieumwandlung von elektrischer in thermische Energie. Bspw. kann anhand des Vergleichs eines Wasserkochers mit dem Laptop thematisiert werden, dass beim Wasserkocher die Umwandlung von elektrischer in thermische Energie erwünscht ist, um Wasser zu erwärmen, jedoch beim Laptop zu technischen Problemen führen kann und in der Folge die Erwärmung verhindert werden muss.

Zur Kontrolle des Lernziels sollen gemäß der überarbeiteten fiktiven Unterrichtseinheit aus Abschnitt 3.6 Aufgaben zur Energieumwandlung in ähnlichen Kontexten bearbeitet werden. Als ähnlicher Kontext wird hier die Erwärmung eines Smartphones gewählt. Die Schülerinnen und Schüler bearbeiten eine Aufgabe zur Erwärmung des Smartphones und sollen zur Lösung der Aufgabe die Umwandlung von elektrischer in thermische Energie nutzen. Anhand der Aufgabe kann die Lehrkraft neben der Kontrolle des Lernziels die Energieumwandlung generalisieren und damit die CRU abschließen.

#### 4. Forschungsfragen und Feldtest

Im Anschluss an die Überarbeitungen der fiktiven Unterrichtseinheit wurden die verbleibenden CRUs entwickelt und in der Folge der zweite Meso-Zyklus abgeschlossen. Die zwölf entwickelten CRUs wurden im Anschluss im Regelunterricht erprobt. Während im zweiten Meso-Zyklus die Erkenntnisse rein auf die Interventionsmaßnahme beschränkt waren und die Interventionsmaßnahme in der Folge verbessert wurde, sollen in dem Feldtest generische Erkenntnisse über das Lehren und Lernen von Schülerinnen und Schülern gewonnen werden (vgl. Abschnitt 2.3.1). Mit der Entwicklung der CRUs und damit der Entwicklung einer Interventionsmaßnahme zur Förderung kumulativen Lernens wurde das Entwicklungsziel dieser Arbeit abgeschlossen.

Die Entwicklung der CRUs erfolgte auf Basis eines fachspezifischen Modells Lehren und Lernens, das wiederum auf einer allgemeinen Lerntheorie beruht. Nach der Lerntheorie müssen Schülerinnen und Schüler zur Lösung von Problemen bzw. Erklärung von Phänomenen nicht nur über entsprechende Wissens Elemente verfügen, sondern diese Wissens Elemente auch kohärent in einer Wissensbasis vernetzen. Die Vernetzung der entsprechenden Wissens Elemente kann durch zentrale Konzepte der jeweiligen Fachdomäne unterstützt und damit organisiert werden (vgl. Abschnitt 2.2.3). Die CRUs wurden in der Folge so entwickelt, dass Schülerinnen und Schüler fachliche Ideen bzw. Wissens Elemente rund um ein zentrales Konzept anhand von Alltagsphänomenen vernetzen.

Gleichzeitig sollen die CRUs die Schülerinnen und Schüler unterstützen, das fachliche Wissen zum zentralen Konzept, dem Energiekonzept, zu vertiefen. Zur Vertiefung des Energiekonzepts wurde wiederum das fachspezifische Modell Lehren und Lernens in Form einer Learning Progression über Energie genutzt. Mithilfe der Learning Progression wurde die CRUs so entwickelt, dass ein Zuwachs des Energiewissens orientiert an der Verständnisentwicklung von Schülerinnen und Schüler möglich ist. Die Learning Progression hierzu wurde mehrfach in Kompetenztests mit Schülerinnen und Schüler im Querschnitt für verschiedene Jahrgänge in Schulen erprobt (vgl. Herrmann-Abell & DeBoer, 2018; Neumann et al., 2013; Liu & McKeough, 2005). Hinsichtlich der Entwicklung des Energiewissens liegen jedoch keine Erkenntnisse in Verbindung mit hierzu entwickelten Instruktionsmaßnahmen vor (vgl. Abschnitt 2.2.3). Aus dem Grund wurden zur Learning Progression passende Instruktionsmaßnahmen in dieser Arbeit entwickelt. Die Wirksamkeit der Instruktionsmaßnahmen soll hier im Folgenden zur

Evaluation der Learning Progression untersucht werden, indem das Energiewissen der Schülerinnen und Schüler im Verlauf der Instruktionsmaßnahmen gemessen wird.

Zentrales Ziel dieser Arbeit war also die Förderung kumulativen Lernens durch eine inhaltliche Vernetzung mittels des Basiskonzepts Energie. Zur inhaltlichen Vernetzung mittels des Basiskonzepts Energie wurden eine entsprechende Instruktionsmaßnahme entwickelt. Mit Blick auf das Ziel dieser Arbeit ergibt sich als Forschungsgegenstand die Untersuchung der Entwicklung des vernetzten Wissens und des Energiewissens durch die Instruktionsmaßnahme. Gemäß der Intention der Instruktionsmaßnahme werden Unterrichtseinheiten zur inhaltlichen Vernetzung naturwissenschaftlicher Ideen von Lehrkräften im Unterricht passend zum Vorwissen der Schülerinnen und Schüler eingesetzt. Idealerweise sind damit den Schülerinnen und Schüler bereits vor dem Beginn einer Unterrichtseinheit die relevanten Wissens Elemente aus dem Physikunterricht bekannt, sie sind jedoch noch unverbunden. Unverbundene Wissens Elemente reichen jedoch nicht zur Lösung von Problemen und Erklärung von Phänomenen aus. So reicht bspw. das Wissen rund um die Umwandlung von elektrischer in thermische Energie nicht aus, um die Frage „Warum wird ein Laptop manchmal heiß?“ vollständig zu beantworten (vgl. die CRU zum Kontext „Laptop“ aus Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Die Verbindung der Wissens Elemente soll im Zuge einer CRU durch die inhaltliche Verbindung zum zentralen Konzept anhand eines Kontexts erfolgen. In der Folge soll untersucht werden, ob die Wissens Elemente von Schülerinnen und Schüler nach dem Einsatz einer CRU entsprechend vernetzter sind. Damit wird für den Feldtest die folgende Forschungsfrage formuliert:

Inwieweit fördern Unterrichtseinheiten zur Vernetzung von Inhalten verschiedener Sachgebiete mittels des Energiekonzepts den Aufbau eines Energiewissens und den Aufbau eines vernetzten Wissens?

### 4.1. Design

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurde die Durchführung eines Feldtests im Regelunterricht gewählt. Entgegen einer klassischen Laborstudie unter kontrollierten Bedingungen, bietet ein Feldtest die Möglichkeit, eine Interventionsmaßnahme unter Realbedingungen zu erproben. Der Einfluss verschiedener Faktoren unter Realbedingungen schränkt mitunter zwar die Aussagekraft von Forschungsergebnissen

ein, ermöglicht aber, der Komplexität der Intervention gerecht zu werden (vgl. Bakker, 2018). Aufgrund der Zulassung der Komplexität sind zudem Feldtests ein üblicher Ansatz zur Durchführung von Erprobungen in Design-Based Research-Projekten (z.B. McKenney & Reeves, 2018).

Im Rahmen des Feldtests soll schließlich die Wirksamkeit der CRUs und damit die Forschungsfrage adressiert werden. Hierfür wurden die CRUs mit Lehrkräften und Schulklassen der Sekundarstufe I im Regelunterricht erprobt. Das Design der Erprobung wird im Folgenden vorgestellt.

#### 4.1.1. Stichprobe und Besonderheiten der Erprobung

Zur Untersuchung der Wirksamkeit der CRUs im Regelunterricht wurden die zwölf CRUs durch 40 Lehrkräfte in 60 Schulklassen der Jahrgänge 7-11 mit N=1500 Schülerinnen und Schülern erprobt. Die Erprobung fand überwiegend im 7. in 25 Erprobungen mit 662 Schülerinnen und Schülern und im 9. Jahrgang in 23 Erprobungen mit 535 Schülerinnen und Schülern statt (vgl. Tabelle 7).

Tabelle 7. Verteilung der 60 Erprobungen durch 40 Lehrkräfte auf die Jahrgänge 7-11 mit insgesamt N=1500 Schülerinnen und Schülern.

<b>Jahrgang</b>	7	8	9	10	11
<b>Anzahl Erprobungen</b>	25	6	23	5	1
<b>Anzahl Personen</b>	662	164	535	128	11

Die Erprobung wurde vom Januar 2020 bis zum Juli 2021 in den Bundesländern Schleswig-Holstein (10), Niedersachsen (49) und Hamburg (1) durchgeführt. Eine zeitliche Verteilung der Erprobungen auf den Erprobungszeitraum ist in Abb. 20 dargestellt. Wie sich der Abbildung entnehmen lässt, konnte über den Erprobungszeitraum keine zeitliche Gleichverteilung der Unterrichtseinheiten erzielt werden. Im Erprobungszeitraum von Januar 2020 bis Juni 2021 fanden zudem aufgrund der COVID-19-Pandemie große Teile der schulischen Aktivitäten im Fern- statt im Präsenzunterricht statt. Durch den Wechsel in den Fernunterricht mussten sich nicht nur in Deutschland sondern in vielen Teilen der Welt sowohl Lehrkräfte als auch Schülerinnen und Schüler mit neuen Herausforderungen wie Lern-Managementsystemen und Videokonferenztools beschäftigen (Dibner et al., 2020; Hamilton et al., 2020). Aufgrund der neuen Herausforderungen musste Fernunterricht

überwiegend im Zuge der Digitalisierung von Unterricht neu entwickelt und Unterricht im Allgemeinen neu gedacht werden (Miller et al., 2021). Da die in dieser Arbeit entwickelten CRUs bereits in digitaler Form vorlagen und in das Lern-Managementssystem Moodle implementiert waren (vgl. Abschnitt 3.4.2), eigneten sich die CRUs in besonderem Maße auch zur Durchführung im Fernunterricht. In dem Zuge wurden vor den ersten Schließungen der Schulen im März 2020 aufgrund der COVID-19-Pandemie nur wenige CRUs (Januar: 2, Februar: 1) erprobt. Im weiteren Verlauf des Erprobungszeitraums ergaben sich drei größere Erprobungsabschnitte im Frühjahr 2020, im Winter 2021 und im Sommer 2021. Während im Winter 2021 von den insgesamt 13 Erprobungen aufgrund der Schließungen der Schulen alle Erprobungen im Fernunterricht stattfanden, wurden im Sommer 2021 alle Erprobungen im Regelunterricht durchgeführt. Im Frühjahr 2020 wurden aufgrund nicht einheitlicher Regeln an den Schulen sowohl Unterrichtseinheiten im Regel- als auch im Fernunterricht erprobt.



Abb. 20. Erprobungszeitraum der CRUs vom Januar 2020 bis zum Juli 2021. Auffällig ist hier die Zunahme der Anzahl von Erprobungen im Mai 2020 bzw. im Januar 2021 während der Zeit einer 1. bzw. 2. Schließung der Schulen aufgrund der Corona-Pandemie.

In Folge der wechselnden Durchführung von Fern- und Präsenzunterricht in den Schulen im Erprobungszeitraum wurden insgesamt 28 Erprobungen im Präsenz- bzw. 27 Erprobungen im Fernunterricht und fünf Erprobungen im Wechselunterricht durchgeführt. Aufgrund der neuen Herausforderungen im Fernunterricht bzw. aufgrund staatlicher und schulischer Vorgaben mussten insgesamt 8 Erprobungen mit insgesamt N=163 Schülerinnen und Schülern vorzeitig abgebrochen werden. Zudem mussten

teilweise zusätzlich in Bezug auf die Forschungsfragen erhobene Längsschnittdaten von Schulklassen im Anschluss an die Erprobung aus der Analyse entfernt werden, da technische Probleme eine saubere Durchführung der Tests bzw. Interviews unter gleichen Bedingungen nicht ermöglichten. Die entsprechende Anzahl der genutzten Daten von Schülerinnen und Schülern ist entsprechend vermerkt.

Aufgrund der Wahlfreiheit der Lehrkräfte in Bezug auf den Kontext der CRU in den Erprobungen konnte keine Gleichverteilung der zwölf Kontexte bzw. CRUs erzielt werden. Vielmehr gab es drei CRUs mit dem Kontext Trampolin (10 Erprobungen), Stick Bomb (10) und Solarzelle (9), auf die fast die Hälfte der Gesamterprobungen entfielen. Zu weiteren fünf CRUs fanden vier bis sieben Erprobungen bzw. zu drei CRUs nur 1-2 Erprobungen statt. Die CRU zum Kontext Kleidung wurde von Lehrkräften nicht gewählt und somit nicht erprobt (vgl. Abb. 21).

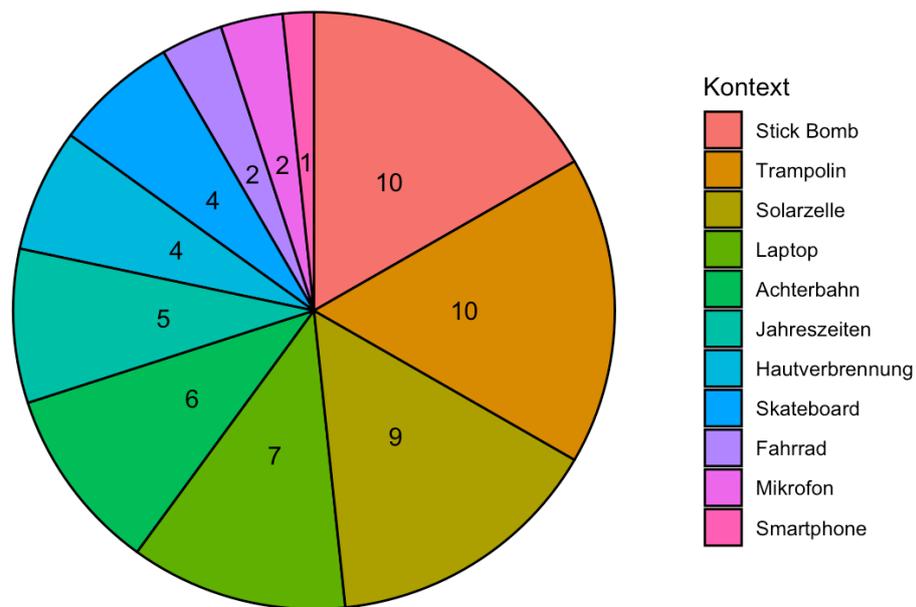


Abb. 21. Verteilung der 60 Erprobungen auf die jeweiligen Kontexte der zwölf CRUs. Die Zahl je Kreisabschnitt ist die Anzahl an Erprobungen je Kontext. Die Fragestellungen zu den jeweiligen Kontexten sind in Abschnitt 3.3 zu finden.

### Lehrkräftefortbildung

Vor Beginn der Erprobungen von CRUs im Regelunterricht nahmen die Lehrkräfte an einer Fortbildung teil, die aus vier Einzelmodulen bestand. Die Fortbildungen wurden als digitale Webinare durchgeführt. Im ersten Modul wurden die Lehrkräfte zunächst technisch in der Anwendung von Moodle fortgebildet. Teil der Fortbildung war hier die

Administrierung und Adaption von Aufgaben in Moodle, sowie die Einsicht von Lösungen zu Aufgaben. Das Modul war in der technischen Anwendung auf die Umsetzung der CRUs zugeschnitten, so dass die Lehrkräfte nicht allgemein in Moodle fortgebildet wurden. Aus dem Grund war die Teilnahme am Modul für die Lehrkräfte freiwillig. Solche Lehrkräfte, die bereits Moodle nutzen, mussten nicht am Modul teilnehmen.

Im zweiten Modul beschäftigten sich die Lehrkräfte mit der Konzeption der CRUs in Bezug auf phänomenorientiertes Lernen und Project-Based Learning. Hierfür wählten die Lehrkräfte zu Beginn der Fortbildung eine CRU aus und sollten in Kleingruppen die Struktur der CRU erarbeiten. In einer Plenumsphase wurden schließlich die CRUs von den Lehrkräften verglichen und Gemeinsamkeiten der CRUs expliziert. Durch einen Vortrag zu Project-Based Learning und der Umsetzung von Project-Based Learning in den CRUs wurde anschließend das Modul abgeschlossen.

Im dritten Modul der Fortbildung beschäftigten sich die Lehrkräfte schließlich mit dem theoretischen Hintergrund eines basiskonzeptorientierten Unterrichts und dessen Umsetzung in Form der CRUs. In einem Vortrag wurde hierzu ausgehend von den Basiskonzepten die Idee des kumulativen Lernens und der vertikalen Vernetzung im naturwissenschaftlichen Unterricht vorgestellt. Am Beispiel des Energiekonzepts und unter Berücksichtigung der Learning Progression wurde im Anschluss die Umsetzung eines basiskonzeptorientierten Unterrichts durch die CRUs entwickelt. Der Vortrag wurde durch mehrere Kleingruppenphasen ergänzt, in denen die Lehrkräfte sich zum kumulativen Lernen, zu den Basiskonzepten und zur Umsetzung im Lehrplan austauschen konnten.

Unmittelbar vor dem Einsatz einer CRU im Regelunterricht wurde abschließend in einem vierten Modul ein individuelles Coaching durchgeführt, in dem die technische Umsetzung besprochen und die jeweilige Lehrkraft in der Adaption der CRU unterstützt wurde.

Die vollständige theoretische Entwicklung der Fortbildung und deren Umsetzung basierend auf den Erkenntnissen des zweiten Erprobungszyklus‘ findet sich bei Stürmer-Steinmann (in Vorbereitung) und wurde ebenfalls empirisch begleitet. Nach Abschluss des individuellen Coachings wurde die entsprechende CRU von der Lehrkraft schließlich im Regelunterricht erprobt.

#### 4.1.2. Untersuchungsinstrumente

Zur Adressierung der Forschungsfragen sind zwei Untersuchungsinstrumente nötig, die zum einen das Energiewissen und zum anderen das vernetzte Wissen von Schülerinnen und Schülern messen. Hierfür werden zwei etablierte Untersuchungsinstrumente in Form des Energiekompetenztests nach Viering (2012) und leitfadengestützter Interviews nach Kubsch et al. (2019) verwendet.

##### Erfassung des Energiewissens

Zur Erfassung des naturwissenschaftlichen Energiewissens im Fach Physik wurde der von Viering (2012) entwickelte Energiekompetenztest (EKT) genutzt. Mithilfe des EKTs wurde auch die im Abschnitt 3.1.2 vorgestellte und der Entwicklung der CRUs zugrundeliegende Learning Progression entwickelt und validiert. Der EKT besteht aus insgesamt 90 Multiple-Choice-Items zum Energiekonzept. Die Items bestehen jeweils aus einer Kurzbeschreibung und einem Bild zu einem Alltagskontext, einer je nach Klassenstufe angepassten Hilfestellung, einer Frage zum Kontext und vier Antwortmöglichkeiten, von denen eine Antwort korrekt ist (siehe Beispiel in Abb. 22).

Jeweils 10 Items sind in einem von neun Testblöcken zusammengefasst. Zwei Testblöcke zusammen bilden wiederum eines von neun Testheften, so dass jedes Testheft aus 20 Items besteht. Die Testhefte sind entsprechend ihrer Schwierigkeit für die unterschiedlichen Jahrgänge der Mittelstufe angepasst (Weßnigk et al., 2017). Wird der EKT zur Messung des Energiewissens von Schülerinnen und Schülern eingesetzt, erhalten die Schülerinnen und Schüler demnach entweder einen Testblock mit 10 Items oder ein Testheft mit 20 Items. Die Items sind auf Grundlage voriger Untersuchungen raschskaliert und haben somit eine unterschiedliche, vom jeweiligen Item abhängige Itemschwierigkeit (Neumann et al., 2013; Viering, 2012). Anhand der Bearbeitungen eines Testblocks bzw. -hefts lassen sich so auf Grundlage der Itemschwierigkeiten die Personenfähigkeiten als Maß für das Energiewissen einzelner Schülerinnen und Schüler ermitteln (Neumann, 2014; Warm, 1989). Die Zuweisung der Personenfähigkeiten ermöglicht so eine vom Testheft unabhängige Messung des Energiewissens der Schülerinnen und Schüler. Auf diese Weise ist ein Vergleich unter Schülerinnen und Schülern bei unterschiedlichen Testheftzuweisungen zu den jeweiligen Schülerinnen und Schülern möglich (Neumann, 2014). Gleichzeitig ermöglicht das Verfahren auch den Vergleich einer Schülerin bzw. eines Schülers bei mehrfacher Durchführung des EKTs zu verschiedenen Testheften. Der EKT eignet sich aus dem Grund in besonderem Maße für

die Durchführung von Längsschnittstudien und damit Pre-Post-Vergleichen (Weßnigk et al., 2017).



Dabei wird Energie umgewandelt. Je höher der Stein gehoben wird, desto mehr Lageenergie kann man dem Stein zuschreiben. Je größer seine Fallgeschwindigkeit ist, desto größer ist seine Bewegungsenergie.

Wie würdest du das Fallen des Steins aus energetischer Sicht beschreiben?

- Vor dem Fallenlassen besitzt der Stein keine Energie. Erst wenn er losgelassen wird und nach unten fällt, hat er Bewegungsenergie.
- Vor dem Fallenlassen besitzt der Stein Bewegungsenergie. Wenn er losgelassen wird und nach unten fällt, wird seine Bewegungsenergie in Geschwindigkeit umgewandelt.
- Vor dem Fallenlassen besitzt der Stein Lageenergie. Wenn er losgelassen wird und nach unten fällt, wird seine Lageenergie in Bewegungsenergie umgewandelt.
- Vor dem Fallenlassen besitzt der Stein Bewegungsenergie. Wenn er losgelassen wird und nach unten fällt, wird seine Bewegungsenergie in Lageenergie umgewandelt.

Abb. 22. Beispielitem aus dem Energiekompetenztest (EKT) von Viering (2012). Jedes Item beinhaltet eine Kurzbeschreibung und ein Bild eines Alltagskontexts inklusive einer jahrgangsbabhängigen gestuften Hilfe. Im Anschluss wird eine Frage formuliert, zu der es vier Antwortmöglichkeiten gibt, von denen jeweils eine Antwort korrekt ist.

Aufgrund der hohen Anzahl an verschiedenen Testheften und der Zuweisung zu Personenfähigkeiten als Maß für das Energiewissen wird in dieser Arbeit ein Design gewählt, in dem Schülerinnen und Schüler vor und nach einer CRU unterschiedliche Testblöcke bzw. -hefte bearbeiten und auf diese Weise kein Item mehrfach beantworten (Abb. 23). Auf diese Weise kann die Entwicklung des Energiewissens von Schülerinnen und Schülern längsschnittlich betrachtet werden und Re-Test-Effekte bearbeiteter Items werden ausgeschlossen (Döring & Bortz, 2016, S. 210).

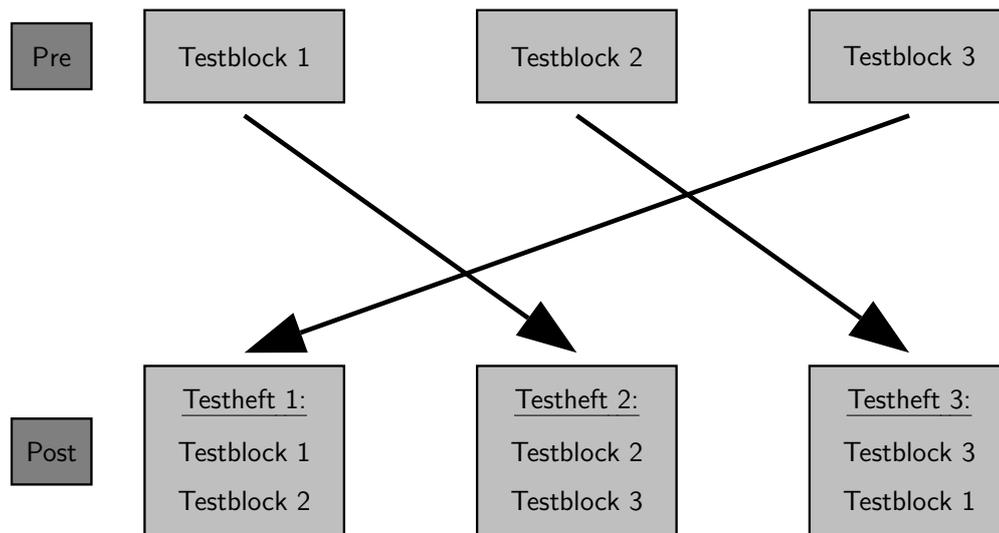


Abb. 23. Einsatz der Testhefte des Energiekompetenztests zur längsschnittlichen Untersuchung des Energiewissens von Schülerinnen und Schülern vor und nach dem Einsatz einer CRU. Durch das gekreuzte Testdesign wird sichergestellt, dass die Schülerinnen und Schüler Items des Energiekompetenztests nicht mehrfach bearbeiten.

#### Erfassung des vernetzten Wissens

Zur Erfassung des vernetzten Wissens wurden leitfadengestützte Interviews mit einzelnen Schülerinnen und Schülern je CRU durchgeführt (Kubsch et al., 2019). Während der Interviews sollen die Schülerinnen und Schüler fünf überwiegend aus dem Alltag stammende Phänomene erklären, die den Schülerinnen und Schülern als kurze Videos im Umfang von 10-20 Sekunden präsentiert werden. Nach dem Abschluss eines Videos wird den Schülerinnen und Schülern jeweils die Frage gestellt, wie sie das Phänomen naturwissenschaftlich erklären würden. Im Anschluss an die Erklärung kann die Interviewleitung auf die Erklärung der Schülerinnen und Schüler in Form von Rückfragen eingehen. Hier ist zu beachten, dass keine fachlichen Hinweise oder Stichwörter hinsichtlich einer fachlichen Idee gegeben werden, um möglichst sauber zu untersuchen, welche fachlichen Ideen die Schülerinnen und Schüler ohne Einfluss einer Lehrkraft nutzen (Kubsch et al., 2019; Nordine et al., 2011).

In der Auswahl der fünf Phänomene wurden zwei von Kubsch et al. (2019) übernommen (ein fallender Basketball bzw. ein oszillierender Wagen an Federn). Kubsch et al. (2019) entwickelten die leitfadengestützten Interviews und damit die Auswahl der Phänomene in den Videos im Rahmen einer Unterrichtseinheit zum Energiekonzept, die überwiegend auf das Erlernen des Energiekonzepts in Verbindung mit (mechanischen) Bewegungen und Fernwirkungen fokussierte (Nordine et al., 2018). Um auch Phänomene außerhalb

von mechanischen Bewegungen und Fernwirkungen durch Schülerinnen und Schüler erklären zu lassen, wurden drei der fünf Phänomene in enger Abstimmung mit der Methode der leitfadengestützten Interviews nach Kubsch et al. (2019) neu entwickelt (ein eingeschalteter Toaster, ein Laser entzündet ein Papier und ein Fahrraddynamo mit einer Lampe).<sup>9</sup>

Im Anschluss an die Interviews werden die Interviews mit den Schülerinnen und Schülern transkribiert und die genutzten fachlichen Ideen der Schülerinnen und Schüler kodiert. Die Kodierung erfolgte anhand des adaptierten Kodierleitfadens nach Kubsch et al. (2019) in der Software MAXQDA (Version 18.2.3) mithilfe der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring (2014). Hier ist zu beachten, dass die Schülerinnen und Schüler die fachlichen Ideen nicht explizit nennen müssen, sondern diese auch fachlich korrekt umschreiben bzw. nutzen können. Die korrekte Umschreibung ist im adaptierten Kodierleitfaden aufgenommen. Ein Ausschnitt des Kodierleitfadens inklusive eines exemplarisch transkribierten und kodierten Interviews mit einer Schülerin bzw. einem Schüler ist im Anhang zu finden.

Im Anschluss an die Kodierung werden schließlich solche Ideen, die zur Erklärung eines Phänomens einer Schülerin bzw. eines Schülers genutzt werden, als vernetzt angesehen (Koponen & Huttunen, 2013). Werden diese Ideen im Anschluss gemeinsam für die Erklärung eines weiteren Phänomens durch die gleiche Schülerin bzw. den gleichen Schüler genutzt, wird die Verbindung zwischen diesen Ideen als stärker angenommen (Kubsch et al., 2019, S. 5–6). Auf diese Weise wird die Konstruktion eines Netzwerks bestehend aus den naturwissenschaftlichen Ideen der Schülerin bzw. des Schülers inklusive der Stärke der Vernetzung zwischen diesen Ideen ermöglicht. Je Netzwerk einer Person lässt sich schließlich die Dichte  $C(x)$  je Idee  $x$  im Netzwerk quantifizieren, indem das Inverse der Summe aus den Abständen der einzelnen Ideen  $y$  zur Idee  $x$  berechnet wird (Freeman, 1978):

$$C(x) = \frac{1}{\sum_y d(x, y)}$$

Im Anschluss wird die gesamte Netzwerkdicke  $D$  als der Durchschnitt der einzelnen Dichten  $C(x)$  über die Anzahl aller Ideen  $n_x$  bestimmt und dient so als Maß für die

---

<sup>9</sup> Die in Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** beschriebene CRU zum Kontext Laptop mit der Fragestellung „Warum wird ein Laptop heiß?“ thematisiert die Umwandlung von elektrischer in thermische Energie. Um die Möglichkeit der Entwicklung eines vernetzteren Wissens auch hier sicherzustellen, wurde beispielsweise das Phänomen zum eingeschalteten Toaster neu entwickelt.

Vernetzung eines Netzwerks je Schülerin bzw. je Schüler (Koponen & Huttunen, 2013; Kubsch et al., 2019):

$$D = \frac{\sum_x C(x)}{n_x}$$

Auf diese Weise erhalten wir ein Maß für die Vernetzung eines Wissensnetzwerks je Schülerin bzw. Schüler in Form der Netzwerkdichte. Ergänzend zur Bestimmung der Netzwerkdichte von Schülerinnen und Schülern ist die Erstellung von Wissensnetzwerken jeweils einzelner Schülerinnen und Schüler mittels des R-Pakets `igraph` (Csardi & Nepusz, 2006) bzw. `tnet` (Opsahl, 2009) möglich (R Development Core Team, 2013).

Die Methode zur Messung des vernetzten Wissens von Schülerinnen und Schülern eignet sich insgesamt in besonderem Maße gegenüber weiteren klassischen Tests, die in Abschnitt 2.2.2 beschrieben werden. So werden hier die als korrekt bewerteten naturwissenschaftlichen Ideen nicht wie bei Lee & Liu (2010) vorgegeben, sondern mithilfe der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring (2014) kodiert. Wie bereits im Kapitel 2.3 dargestellt und im Abschnitt 3.1.3 empirisch abgesichert wurde, unterscheiden sich die Curricula in Deutschland bzw. auch an den deutschen Schulen und damit die Reihenfolge der physikalischen Inhalte erheblich. Das Messinstrument beachtet diesen Unterschied zwischen den Schulen, indem Schülerinnen und Schüler ein ähnlich vernetztes Wissen trotz unterschiedlicher physikalischer Ideen demonstrieren können. Zur Erfassung der Entwicklung eines vernetzten Wissens von Schülerinnen und Schülern durch den Einsatz einer Unterrichtseinheit wurden im Feldtest für die leitfadengestützten Interviews ebenfalls ein Pre-Post-Design mit jeweils den gleichen Schülerinnen und Schülern vor und nach einer CRU gewählt (Döring & Bortz, 2016).

#### Erfassung weiterer Einflussvariablen

Als Kontrollvariablen für das Energiewissen und das vernetzte Wissen wurden zum einen auf administrativer Ebene die jeweiligen Lehrkräfte, die Erprobungen geordnet in Schulklassen und die von einer Lehrkraft gewählte CRU sowie der Unterrichtsmodus (Fern- bzw. Präsenzunterricht) erfasst. Zum anderen wurde auf individueller Ebene der Schülerinnen und Schüler das situative Interesse der Schülerinnen und Schüler mehrfach im Verlauf einer CRU erfasst. Das situative Interesse wurden jeweils durch fünf Items auf einer fünf-stufigen Likert-Skala nach etablierten Instrumenten gemessen (Pekrun et al., 2017; Gaspard et al., 2015).

Ergänzend zum situativen Interesse wurde zudem auf individueller Ebene das Bearbeitungsverhalten der Schülerinnen und Schüler erfasst. Zur Erfassung des Bearbeitungsverhaltens wurden jeweils die Artefakte bzw. die Antworten der Schülerinnen und Schüler in der digitalen Lernumgebung genutzt. Jede Antwort jeder Schülerin bzw. jedes Schülers zu einer Aufgabe einer CRU wurde entsprechend des Grades der Aufgabebearbeitung auf einer drei-stufigen Skala gemäß Tabelle 8 kodiert.

Tabelle 8. Auszug des Kodierleitfadens für das Bearbeitungsverhalten der Schülerinnen und Schüler. Jede Antwort der Schülerinnen und Schüler zu einer Aufgabe in einer CRU wurde gemäß des Kodierleitfadens auf der drei-stufigen Skala kodiert.

<b>Skala</b>	<b>Kriterium</b>
0	Aufgabe nicht aufgerufen
0,5	Aufgabe aufgerufen und nicht bearbeitet
1	Aufgabe bearbeitet

Im Anschluss an die Kodierung jeder Antwort der Schülerinnen und Schüler wurde das Bearbeitungsverhalten als Mittelwert der kodierten Aufgaben operationalisiert. Auf diese Weise erhalten alle Schülerinnen und Schüler ein individuelles Bearbeitungsverhalten für die jeweilige Erprobung einer CRU.

### 4.1.3. Datenerhebung und -struktur

Im Feldtest wurden vor und nach der Erprobung einer CRU im Regelunterricht jeweils der Energiekompetenztest und mit einzelnen Schülerinnen und Schülern auch leitfadengestützte Interviews durchgeführt. Da die Lehrkräfte in ihrer Wahl der CRU frei waren, konnten Lehrkräfte mehrere CRUs sowohl in verschiedenen Schulklassen als auch in derselben Schulklasse durchführen. Wurden CRUs in derselben Schulklasse durchgeführt, so wurden die EKTs bzw. leitfadengestützten Interviews zum Zeitpunkt Post der CRU 1 als Untersuchungsinstrumente zum Zeitpunkt Pre der CRU 2 eingesetzt, um Mehrfachtestungen zum gleichen Zeitpunkt zu verhindern (vgl. Abb. 24 bzw. Döring & Bortz, 2016, S. 209). Die Untersuchungsinstrumente zum Zeitpunkt Post nach der CRU 2 wurden anschließend wie gewohnt eingesetzt.

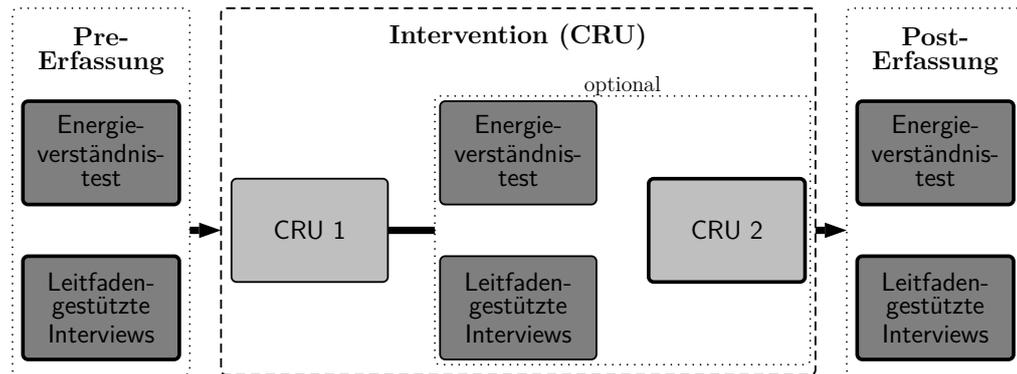


Abb. 24. Ablauf der Datenerhebung rund um den Einsatz einer CRU im Regelunterricht. Jeweils vor und nach einer CRU bearbeiten die Schülerinnen und Schüler den Energiekompetenztest bzw. werden einzelne Interviews durchgeführt. Wird im Anschluss an eine CRU eine weitere CRU in der Schulklasse erprobt (optionaler Kasten), dient die Post-Erfassung nach der CRU 1 als While-Erfassung zwischen den beiden CRUs.

Zum Energiekompetenztest zum Zeitpunkt Pre liegen  $N_{pre} = 1159$  bzw. zum Zeitpunkt Post insgesamt  $N_{post} = 869$  nutzbare Daten von Schülerinnen und Schülern vor. Aufgrund der Abnahme der Gesamteilnehmenden vom Pre- zum Posttest bei einer gleichzeitig hohen Gesamtstichprobe (vgl. Abschnitt 4.1.1) wurden in der Analyse nur solche Schülerinnen und Schüler beachtet, die sowohl den Pre- als auch den Posttest paarweise vollständig bearbeitet haben ( $N = 800$ ).

Mit  $N_{pre} = 63$  Schülerinnen und Schülern wurden zudem vor einer CRU leitfadengestützte Interviews durchgeführt und nach einer CRU mit  $N_{post} = 32$  Schülerinnen und Schülern. Es liegen demnach insgesamt für die Analyse  $N = 32$  vollständige Interviewsätze mit Schülerinnen und Schülern vor. Die große Anzahl fehlender Interviews zum Postzeitpunkt lässt sich auf abgebrochene Testungen bzw. Durchführungen im Fernunterricht zurückführen, bei denen Schülerinnen und Schüler nach dem Abschluss einer CRU für ein Interview nicht mehr zur Verfügung standen und auch nicht kontaktierbar waren (vgl. Abschnitt 4.1.1).

## 4.2. Ergebnisse

Es werden zunächst die Ergebnisse zum Aufbau des Energiewissens und im Anschluss die Ergebnisse zum Aufbau des vernetzten Wissens präsentiert.

### 4.2.1. Zum Aufbau eines Energiewissens

Zur Beantwortung des ersten Teils der Forschungsfrage, d.h. inwiefern die CRUs den Aufbau eines Energiewissens fördern, wurde ein gepaarter t-test des Energiewissens von Schülerinnen und Schüler anhand des Energiekompetenztests zwischen den Zeitpunkten Pre und Post gerechnet. Insgesamt konnte kein signifikanter Unterschied ( $t(799) = 1.83, p = .07$ ) zwischen dem Pre- ( $M = 0.69, SD = 1.16$ ) und dem Posttest ( $M = 0.77, SD = 1.25$ ) gefunden werden (vgl. Abb. 25). Ein globaler Zuwachs des Energiewissens von Schülerinnen und Schülern infolge einer CRU ist demnach nicht zu erkennen.

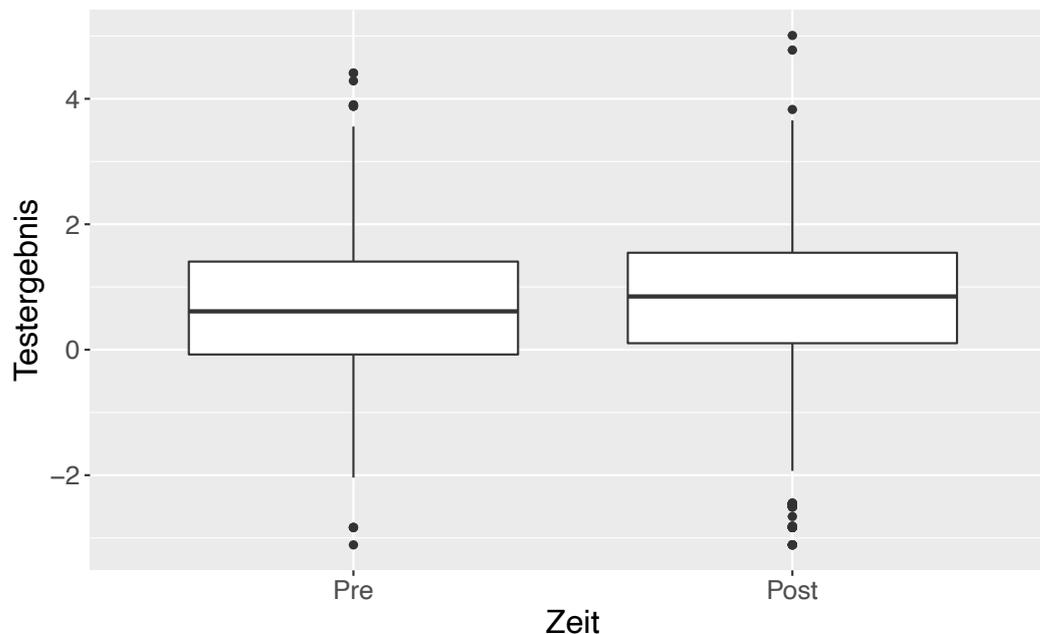


Abb. 25. Vergleich des Energiewissens operationalisiert über die Testergebnisse im Energiekompetenztest vor und nach dem Einsatz einer CRU im Regelunterricht. Ein gepaarter t-test ( $t(799) = 1.83, p = .07, N = 800$ ) ergab keine signifikante Zu- oder Abnahme des Energiewissens von Schülerinnen und Schülern.

Die Vermutung, ein Zuwachs des Energiewissens von Schülerinnen und Schüler ist global über alle CRUs zu sehen, basiert auf der theoriebasierten Entwicklung der CRUs (vgl. Kapitel 3.2). Jede der zwölf CRUs folgt dabei derselben Strukturierung mit der Umwandlung zweier Energieformen ineinander, der phänomenbasierten Entwicklung einer Leitfrage und der Bearbeitung entlang von drei Unterfragen dargestellt als fiktive Unterrichtseinheit. Jedoch thematisieren die CRUs untereinander verschiedene

Energieformen, Inhalte, Kontexte, Leitfragen und Instruktionen. Aus dem Grund der Variabilität der CRUs werden deshalb im Folgenden die Zuwächse des Energiewissens von Schülerinnen und Schülern in Abhängigkeit der einzelnen CRUs betrachtet.

Tabelle 9. Lineare Regressionen zwischen dem Zuwachs des Energiewissens und weiterer Faktoren (Klasse, Lehrkraft, Unterrichtsmodus und CRU).

Model	p	R <sup>2</sup>	Korrigiertes R <sup>2</sup>
Zuwachs Energiewissen ~ CRU	.006	0.033	0.019
Zuwachs Energiewissen ~ Lehrkraft	.016	0.051	0.022
Zuwachs Energiewissen ~ Klasse	.08	0.069	0.017
Zuwachs Energiewissen ~ Unterrichtsmodus	.03	0.009	0.006

Hierfür wird der Zuwachs des Energiewissens als Differenz aus dem Post- zum Pretest operationalisiert. Eine im Anschluss gerechnete lineare Regression mit der CRU als Dummy-Variable zeigt einen signifikanten Effekt der CRU ( $F(11, 789) = 2.418, p = 0.006$  und vgl. Tabelle 9). Die Wahl der CRU hat jedoch nur eine geringe Varianzaufklärung (ca. 2%). Die Zuwächse des Energiewissens aufgeteilt auf die elf erprobten CRUs sind hier für drei CRUs (Haut, Achterbahn, Stick Bomb) signifikant (Abb. 26). Betrachtet man die entsprechend thematisierten Energieformen der drei CRUs (Haut: kinetische- und thermische Energie, Achterbahn: kinetische- und Lageenergie, Stick Bomb: kinetische- und Spannenergie), so ist nur bedingt eine Systematik zu erkennen. So wird bspw. auch in den CRUs zum Skateboard (kinetische- und Lageenergie) und zum Trampolin (Lage- und Spannenergie) ein ähnlicher Fokus auf mechanische Energieformen gelegt. Zu diesen zwei CRUs zeigen Schülerinnen und Schüler jedoch keinen signifikanten Zuwachs des Energiewissens. Auffällig ist dagegen, dass von den vier CRUs mit dem geringsten Zuwachs des Energiewissens drei CRUs jeweils keine mechanischen Energieformen thematisieren (Jahreszeiten: thermische- und Lichtenergie, Laptop: thermische- und elektrische Energie, Solarzellen: elektrische- und Lichtenergie).

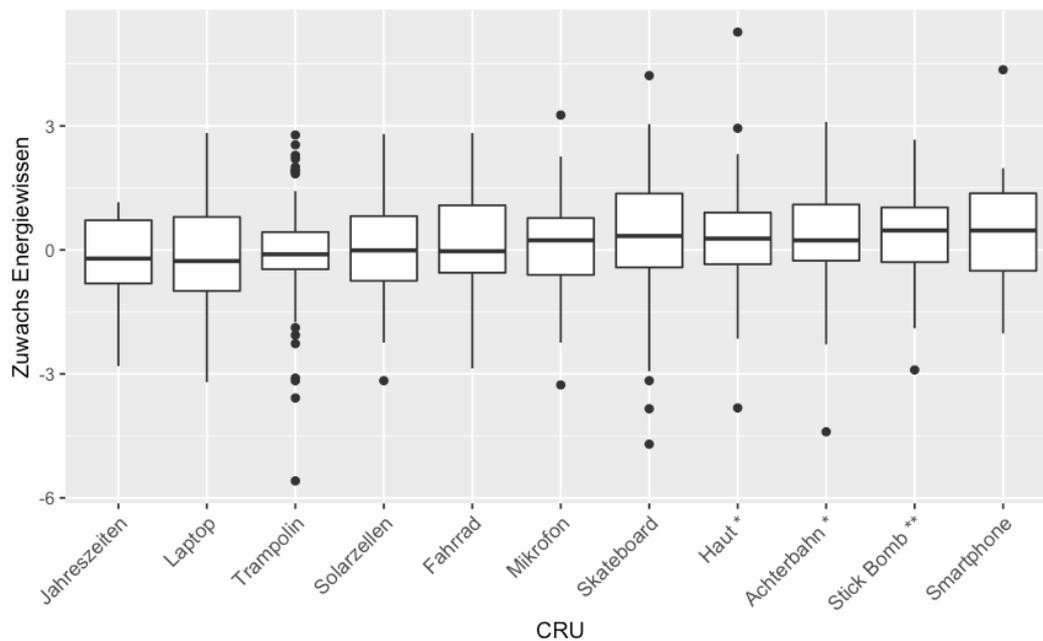


Abb. 26. Zu sehen ist der Zuwachs des Energiewissens in Abhängigkeit von der jeweiligen CRU. Die Benennung folgt dem jeweiligen Kontext der CRU, die zugehörigen Fragestellungen sind Abschnitt 3.3.1 zu entnehmen. Solche CRUs, zu denen Schülerinnen und Schüler eine signifikante Änderung des Energiewissens zeigen, sind gemäß der Signifikanz der CRU gekennzeichnet (\*\* $p < 0.01$ ; \* $p < 0.05$ ).

Die Analyse der einzelnen CRUs zeigte insgesamt, dass durchaus in einzelnen CRUs ein Lernzuwachs stattfindet, jedoch lassen sich die Unterschiede in den Lernzuwächsen nicht allein durch die CRU aufklären. Da nicht nur allein das Unterrichtsmaterial für einen Lernzuwachs von Schülerinnen und Schülern verantwortlich ist, sondern insbesondere auch die Instruktion durch die Lehrkraft und deren Interaktion mit der jeweiligen Schulklasse bedeutend für Lernprozesse sind, werden im Folgenden die Rolle der Lehrkraft bzw. der Schulklasse näher betrachtet.

Aufgrund des Designs des Feldtests wurde der Unterricht insgesamt in 60 Erprobungen bzw. in 60 Schulklassen von unterschiedlichen Lehrkräften durchgeführt. Lehrkräfte hatten die Möglichkeit, zwischen den zwölf CRUs frei zu wählen. Zur Analyse der Lehrkraft und der Schulklasse wurde erneut der Zuwachs des Energiewissens als Differenz aus dem Post- zum Pretest operationalisiert und im Anschluss lineare Regressionsmodelle für die zwei genannten unabhängigen Variablen Dummy-kodiert gerechnet.

Insgesamt lässt sich anhand der Ergebnisse kein signifikanter Einfluss der jeweiligen erprobten Klasse erkennen ( $F(42, 758) = 1.338, p = 0.08$ ). Demnach ist die Klassenebene bzw. die Art und Weise, wie die jeweilige Erprobung in der Schulklasse durchgeführt wurde, nicht entscheidend für den Zuwachs des Energiewissens. Vielmehr ist ein Einfluss

der Lehrkraft auf den Zuwachs des Energiewissens zu erkennen ( $F(24, 776) = 1.735, p = 0.016$ ), jedoch mit einer nur geringen Varianzaufklärung von ca. 2%. Zudem ergab die Regression, dass bei nur drei von 24 Lehrkräften die Schülerinnen und Schüler eine signifikante Änderung des Energiewissens aufweisen. Hier haben zum einen Schülerinnen und Schüler bei zwei Lehrkräften einen signifikanten Zuwachs des Energiewissens ( $p < 0.037$  bzw.  $p < 0.047$ ) und zum anderen aber auch Schülerinnen und Schüler bei einer Lehrkraft eine signifikante Abnahme des Energiewissens ( $p < 0.018$ ). Insgesamt zeigt sich, dass die Rolle der Lehrkraft ähnlich wie die erprobte Klasse auf den Zuwachs des Energiewissens nur einen geringen Einfluss hat.

Die Überlegungen zum Einfluss der jeweiligen CRU, der Lehrkraft und der Schulklasse auf den Zuwachs des Energiewissens basieren auf empirischen Erkenntnissen zum Einfluss dieser Variablen. Die Einflüsse dieser Variablen sind über mehrere Jahrzehnte beobachtet worden und beeinflussen je nach Unterrichtsmaterial, kulturellen Hintergründen oder fachlichen und fachdidaktischen Kompetenzen den Lehr-Lernprozess und damit das Lernen von Schülerinnen und Schülern (Hattie, 2009). In diesem Feldtest wurde jedoch nicht nur ein Unterricht mit verschiedenen Inhalten, Lehrkräften und Klassen durchgeführt, sondern in Form eines Fernunterrichts auch ein veränderter Unterrichtsmodus gegenüber klassischem Präsenzunterricht aufgrund politischer Vorgaben gewählt (vgl. Abschnitt 4.1.1). Aufgrund der veränderten Lehr-Lernprozesse durch einen Fernunterricht wird deshalb der Unterrichtsmodus (Fern- und Präsenzunterricht) ebenfalls als unabhängige Variable betrachtet. Hier zeigt sich ein signifikanter Einfluss des Unterrichtsmodus' für den Zuwachs des Energiewissens der Schülerinnen und Schüler ( $F(2, 798) = 3.528, p = .03$ ). Interessanterweise haben demnach die Schülerinnen und Schüler im Fernunterricht einen höheren Zuwachs des Energiewissens ( $N = 467, M = 0.15, SD = 1.15$ ) als die Schülerinnen und Schüler im Präsenzunterricht ( $N = 330, M = -0.02, SD = 1.35$ ). Eine Vermutung, der Effekt ließe sich darauf zurückführen, dass im Fernunterricht überwiegend lernstarke Schülerinnen und Schüler der Klassen überhaupt nur am Unterricht teilgenommen haben (bspw. Dibner et al., 2020; Ringeltaube-Stadler, 2020), lässt sich bei genauerer Betrachtung bspw. des Energievorwissens widerlegen. So ergab ein t-test keinen Unterschied ( $t(727) = 1.11, p = .27$ ) zwischen dem Energievorwissen der Schülerinnen und Schüler im Fernunterricht ( $M = 0.65, SD = 1.18$ ) und dem Energievorwissen der Schülerinnen und Schüler im Präsenzunterricht ( $M = 0.75, SD = 1.13$ ).

Insgesamt zeigt sich trotz der signifikanten Einflüsse von der Lehrkraft, dem Unterrichtsmodus und der CRU, dass alle drei Variablen nur eine geringe Varianzaufklärung aufweisen (vgl. Tabelle 9). Aufgrund der Datenstruktur müsste hier zur Analyse der Variablen eigentlich ein hierarchisches Modell gerechnet werden (z.B. Mehrebenenanalyse; Döring & Bortz, 2016, S. 695). Die Hierarchie ergibt sich aus der Einteilung von Schülerinnen und Schülern in Schulklassen, zu Lehrkräften und zu entsprechenden CRUs. In der Datenstruktur korrelieren auch die Variablen entsprechend hierarchisch miteinander, da bspw. eine Klasse eine eindeutige Zuordnung zu einer Lehrkraft hat und eine Lehrkraft mehrere Klassen haben kann. Eine vollständige Hierarchisierung wird hier jedoch erschwert, da bspw. zwar Lehrkräfte mit mehreren Klassen vorliegen, jedoch mit zwei Ausnahmen keine Lehrkraft mehrere verschiedene CRUs gewählt hat. Dementsprechend liegt nahezu eine 1-zu-1-Zuordnung zwischen Lehrkräften, Klassen und CRUs vor, was eine Varianzaufklärung auf den verschiedenen Ebenen in einer Mehrebenenanalyse bzw. der entsprechenden Variablen nicht möglich macht.<sup>10</sup>

Insgesamt zeigt sich jedoch auch ohne ein hierarchisches Modell der geringe Einfluss von Variablen auf institutioneller Ebene (Lehrkraft, Klasse, CRU und Unterrichtsmodus). Aus den unterschiedlichen Durchführungen von CRUs durch Lehrkräfte und in verschiedenen Unterrichtsmodi lässt sich jedoch vermuten, dass Schülerinnen und Schüler je nach Durchführung einer CRU sich auch unterschiedlich im Lehr-Lernprozess verhalten. Im Folgenden wird daher die individuelle Ebene der Schülerinnen und Schüler untersucht. Auf individueller Ebene wird hier zum einen das mittlere situative Interesse der Schülerinnen und Schüler im Verlauf einer CRU und zum anderen das Bearbeitungsverhalten der Schülerinnen und Schüler für den Zuwachs des Energiewissens betrachtet. Eine multiple lineare Regression mit dem Bearbeitungsverhalten und dem mittleren situativen Interesse als unabhängige Variable und dem Zuwachs des Energiewissens als abhängige Variable ergab einen signifikanten Einfluss des Bearbeitungsverhaltens ( $\beta^2 = 1.04$ ;  $p < 0.001$ ), jedoch keinen Einfluss des

---

<sup>10</sup> Eine Mehrebenenanalyse wurden hier explorativ durchgeführt. In einem ersten Schritt wurde ein Nullmodell gerechnet, das nur die randomisierten Effekte von Lehrkräften aufgeteilt auf die 60 Schulklassen bzw. 60 Erprobungen betrachtet. Hier bestätigten sich die jeweiligen korrigierten Korrelationswerte  $R^2$  der einzelnen Regressionen aus Tabelle 9. In einem zweiten Schritt wurde das Nullmodell um den festen Effekt einer CRU, d.h. der Wahl der jeweiligen Unterrichtseinheit, erweitert. Die Erweiterung des Nullmodells verbesserte jedoch nicht die Aussagekraft des Modells und verhinderte weitere Interpretationen hinsichtlich der Interaktionen von Klasse, Lehrkraft und CRU.

mittleren situativen Interesses ( $\beta^2 = -0.09$ ;  $p < 0.175$ ) bei insgesamt geringer Varianzaufklärung ( $F(727,2) = 11.51$ ;  $p < 0.001$ , korrigiertes  $R^2 = 0.028$ ).

Tabelle 10. Zu sehen ist die Anzahl an Schülerinnen und Schülern für vier verschiedene Gruppen des Bearbeitungsverhaltens. So haben bspw. 39 Schülerinnen und Schüler ein Bearbeitungsverhalten zwischen 0 und 0.25. Zur Operationalisierung des Bearbeitungsverhaltens siehe auch Abschnitt 4.1.2.

<b>Bearbeitungsverhalten</b>	<b>0 ≤ ... ≤ 0.25</b>	<b>0.25 &lt; ... ≤ 0.5</b>	<b>0.5 &lt; ... ≤ 0.75</b>	<b>0.75 &lt; ... ≤ 1</b>
<b>Schülerinnen und Schüler</b>	39	59	252	450

Betrachtet man hier das Bearbeitungsverhalten der Schülerinnen und Schüler, so zeigt sich, dass nur ungefähr die Hälfte der Schülerinnen und Schüler die Aufgaben einer CRU zu mehr als 75% bearbeitet haben (vgl. Tabelle 10). Von den 800 untersuchten Schülerinnen und Schülern haben zudem 98 Schülerinnen und Schüler weniger als die Hälfte der Aufgaben einer CRU bearbeitet. Betrachtet man hier ausschließlich die 450 Schülerinnen und Schüler, die mehr als 75% der Aufgaben einer CRU bearbeitet haben, zeigt sich für diese Gruppe ein signifikanter Zuwachs des Energiewissens ( $t(449) = 4.034$ ,  $p < .001$ ) vom Pre- ( $M = 0.73$ ,  $SD = 1.2$ ) zum Postzeitpunkt ( $M = 0.97$ ,  $SD = 1.28$ ) mit einem geringen Effekt (Cohens  $d = 0.19$ ).

Trotz der geringen Effektstärke in dieser Gruppe von Schülerinnen und Schüler zeigt sich, dass Schülerinnen und Schüler durchaus einen Zuwachs ihres Energiewissens durch eine CRU haben können, sofern sie jeweils die Aufgaben der CRU bearbeiten. Diese Aussage erscheint zunächst trivial. Es ist jedoch zu bedenken, dass aufgrund der Corona-Pandemie (vgl. Abschnitt 4.1.1) viele Erprobungen mit Schulen nicht in einem gewöhnlichen Unterrichtsmodus durchgeführt werden konnten. Dies zeigt sich zum einen auf institutioneller Ebene anhand der großen Reduzierung der Gesamtstichprobe aufgrund fehlerhaft durchgeführter Energiekompetenztests. Zum anderen ist auf individueller Ebene eine geringe tatsächliche Bearbeitung der Aufgaben einer CRU zu beobachten. Demnach sollten beim Einsatz einer CRU im Unterricht die Lehrkraft vermehrt auf das tatsächliche Bearbeitungsverhalten von Schülerinnen und Schüler achten und damit verbunden die Bearbeitung von Aufgaben sicherstellen.

Zusätzlich zu den Erkenntnissen über den Aufbau eines Energiewissens durch den Einsatz einer einzelnen CRU konnten bereits Erkenntnisse des Aufbaus eines Energiewissens über den Verlauf mehrerer folgender CRUs gewonnen werden. In zwei Fällen haben Lehrkräfte mit jeweils derselben Klasse zwei CRUs unmittelbar nacheinander durchgeführt, so dass insgesamt vollständige Längsschnittdaten von  $N = 26$  SuS über den Verlauf von zwei CRUs vorliegen. Die Erhebung des Energiewissens anhand des Energiekompetenztests erfolgte in diesen Fällen wie in Abb. 24 dargestellt, indem der Posttest nach der ersten CRU als While-Erhebung genutzt wurde.

Eine hierzu durchgeführte Mehrebenenanalyse mit dem Testzeitpunkt als fixierten Effekt zeigt einen signifikanten Effekt ab dem Zeitpunkt der dritten Testung nach zwei durchgeführten CRUs (vgl. Tabelle 11). Es zeigte sich demnach anbahnend, dass durchaus bei einigen Schülerinnen und Schülern der Aufbau eines Energiewissens entlang mehrerer CRUs zu beobachten ist. Aufgrund des geringen Datensatzes sind die Ergebnisse jedoch als entsprechend explorativ zu sehen. Diesen Ergebnissen zum Einfluss mehrerer CRUs sollten deshalb in Zukunft entsprechende Analysen der CRUs mit mehr Schülerinnen und Schülern folgen.

Tabelle 11. Mehrebenenanalyse mit dem Energiewissen als abhängige Variable und dem Testzeitpunkt modelliert als fester Effekt. Es ist demnach eine signifikante Zunahme des Energiewissens von Schülerinnen und Schülern nach zwei erprobten CRUs zu beobachten.

Feste Effekte	Energiewissen			
	$\beta$	$SE$	$t$	$p$
Intercept (Pre)	0.112	0.265	0.424	0.673
Post 1	0.312	0.295	1.06	0.294
Post 2	0.674	0.295	2.288	0.026

Die Messung des Energiewissens erfolgte quantitativ und lässt Schlüsse auf den globalen Lernzuwachs von Schülerinnen und Schülern durch eine CRU mit einem Fokus auf der Energieumwandlung zu. Jedoch lässt sich anhand dessen nicht beschreiben, wie Schülerinnen und Schüler tatsächlich im Verlauf einer CRU lernen. Um dieser Frage nachzugehen, wird im Folgenden der Aufbau des vernetzten Wissens von Schülerinnen und Schülern durch den Einsatz leitfadengestützter Interviews analysiert und damit die quantitativen Ergebnisse um qualitative Analysen ergänzt.

#### 4.2.2. Zum Zuwachs eines vernetzten Wissens

Anhand der leitfadengestützten Interviews, in denen Schülerinnen und Schüler Phänomene erklären, wird das vernetzte Wissen von Schülerinnen und Schülern gemessen. Anhand der Erklärungen der Phänomene und der hierzu genutzten physikalischen Ideen wird schließlich die Netzwerkdicke als Maß für das vernetzte Wissen berechnet. Je mehr physikalische Ideen die Schülerin bzw. der Schüler zur Erklärung von Phänomenen nutzt und je häufiger gleiche physikalische Ideen über Phänomene hinweg genutzt werden, desto größer ist die Netzwerkdicke.

Die Ergebnisse für die Netzwerkdichten als Maß für das vernetzte Wissen von Schülerinnen und Schülern zum jeweiligen Pre- bzw. Postzeitpunkt sind in Abb. 27 dargestellt. Mittels eines gepaarten t-tests konnte ein signifikanter Unterschied ( $t(31) = 4.8636, p < .001$ ) zwischen dem Pre- ( $M = 0.27, SD = 0.12$ ) und dem Posttest ( $M = 0.36, SD = 0.11$ ) mit einem mittleren Effekt (Cohens  $d = 0.75$ ) gefunden werden. Demnach zeigt sich, dass Schülerinnen und Schüler im Mittel durch eine CRU ein zunehmend vernetzteres Wissen entwickeln.

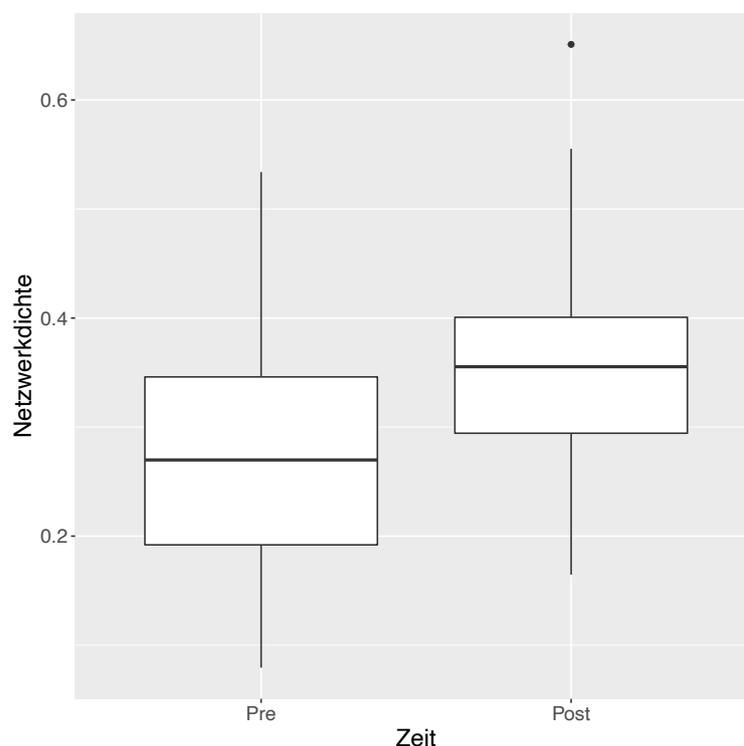


Abb. 27. Vergleich des vernetzten Wissens operationalisiert über die Netzwerkdicke vor und nach dem Einsatz einer CRU. Ein gepaarter t-test ( $t(31) = 4.8636, p < .001$ ) zeigt einen signifikanten Unterschied zwischen der Pre- ( $M = 0.27, SD = 0.12$ ) und der Posterhebung ( $M = 0.36, SD = 0.11$ ).

Um die Größe der Zunahme des vernetzten Wissens und damit die Wissensnetzwerke der Schülerinnen und Schülern inhaltlich besser zu verstehen, werden im Folgenden vier Schülerinnen und Schüler bzw. deren Wissensnetzwerke exemplarisch genauer betrachtet. Zum einen wird das Wissensnetzwerk von zwei Schülerinnen und Schülern betrachtet, deren vernetztes Wissen annähernd dem mittleren vernetzten Wissen aller interviewten Schülerinnen und Schülern zum Pre- bzw. Postzeitpunkt und damit auch dem mittleren Zuwachs des vernetzten Wissens entsprechen. Zum anderen werden die Wissensnetzwerke der zwei Schülerinnen und Schüler betrachtet, deren Zunahmen an vernetztem Wissen minimal bzw. maximal sind (vgl. Tabelle 12).

Tabelle 12. Mittleres vernetztes Wissen aller Schülerinnen und Schüler in der Pre- und Postherhebung inklusive zwei prototypischer Schülerinnen oder Schüler dargestellt als Person 1 und 2 und zwei Personen mit minimalem (Person 3) bzw. maximalem (Person 4) Zuwachs des vernetzten Wissens.

	Jahrgang	Kontext der CRU	Vernetztes Wissen		
			Pre	Post	Zuwachs
<b>Mittelwert</b>	-	-	0.27	0.36	0.09
<b>Person 1</b>	9	Achterbahn	0.267	0.356	0.089
<b>Person 2</b>	9	Laptop	0.23	0.324	0.094
<b>Person 3</b>	9	Solarzelle	0.46	0.336	-0.124
<b>Person 4</b>	9	Laptop	0.079	0.347	0.268

Für die vier exemplarischen Schülerinnen und Schüler wurden schließlich deren Wissensnetzwerke mithilfe des R-Pakets *igraph* (Csardi & Nepusz, 2006) grafisch dargestellt. Die Darstellung eines Wissensnetzwerks umfasst jeweils die genutzten fachlichen Ideen der Schülerinnen und Schüler und die Verbindungen zwischen den Ideen. Die Ideen sind jeweils mit den Fachbegriffen der Ideen benannt. Die Anzahl der Nutzung von Ideen ist durch die Größe eines orangefarbenen Kreises dargestellt. Je größer der orangefarbene Kreis ist, desto häufiger wurde die jeweilige Idee über Phänomene hinweg zur Erklärung genutzt. Solche Ideen, die gemeinsam zur Erklärung von Phänomenen genutzt wurden, sind durch eine Verbindungslinie zwischen zwei Ideen

dargestellt. Je dicker die Verbindungslinie ist, desto häufiger wurden zwei Ideen gemeinsam zur Erklärung von Phänomenen genutzt.

Je Person ergeben sich insgesamt vier Netzwerke: In den jeweils oberen Darstellungen sind in den Wissensnetzwerken die verwendeten Energieformen zunächst unter der übergeordneten Idee „Formen“ zusammengefasst. Um im Anschluss besser zu verstehen, welche Energieformen von Schülerinnen und Schüler zur Erklärung von Phänomenen genutzt werden, wird in den unteren Darstellungen ein Wissensnetzwerk jeweils ausschließlich zu den verwendeten Energieformen betrachtet und zur besseren Unterscheidung als Energiewissensnetzwerke bezeichnet. Beide Darstellungen sind sowohl für den Pre- als auch für den Postzeitpunkt dargestellt.

### Person 1

Die Wissensnetzwerke (oben) und die Energiewissensnetzwerke (unten) von Person 1 zum Pre- bzw. Postzeitpunkt sind in Abb. 28 (unten) dargestellt. Es zeigt sich, dass das Wissensnetzwerk von Person 1 zum Präzeitpunkt aus mehreren unverbundenen Ansammlungen von Ideen bestehen (oben links). Demnach wurden die Ideen „Licht“ und „Wärme“ gemeinsam nur für die Erklärung eines Phänomens genutzt. Dies gilt ebenso für die Ideen „Teilchen“, „Temperatur“ und „Elektrizität“. In der dritten Ansammlung sind zwar viele Ideen vorhanden, jedoch ist nur die Verbindungslinie zwischen „Geschwindigkeit“ und „Umwandlung“ dicker, d. h. somit wurden nur die beiden Ideen mehrfach gemeinsam zur Erklärung von Phänomenen genutzt. Dagegen besteht das Wissensnetzwerk zum Postzeitpunkt nur aus einer Ansammlung von Ideen (oben rechts). Es zeigt sich auch insgesamt eine Abnahme der insgesamt zur Erklärung der Phänomene genutzten Ideen. Gleichzeitig nimmt die Anzahl dickerer Verbindungslinien bspw. zwischen „Umwandlung“ und „Formen“ bzw. zwischen „Umwandlung“ und „Reibung“ zu. Die Person 1 nutzt demnach zum Postzeitpunkt vermehrt die gleichen Ideen zur Erklärung verschiedener Phänomene.

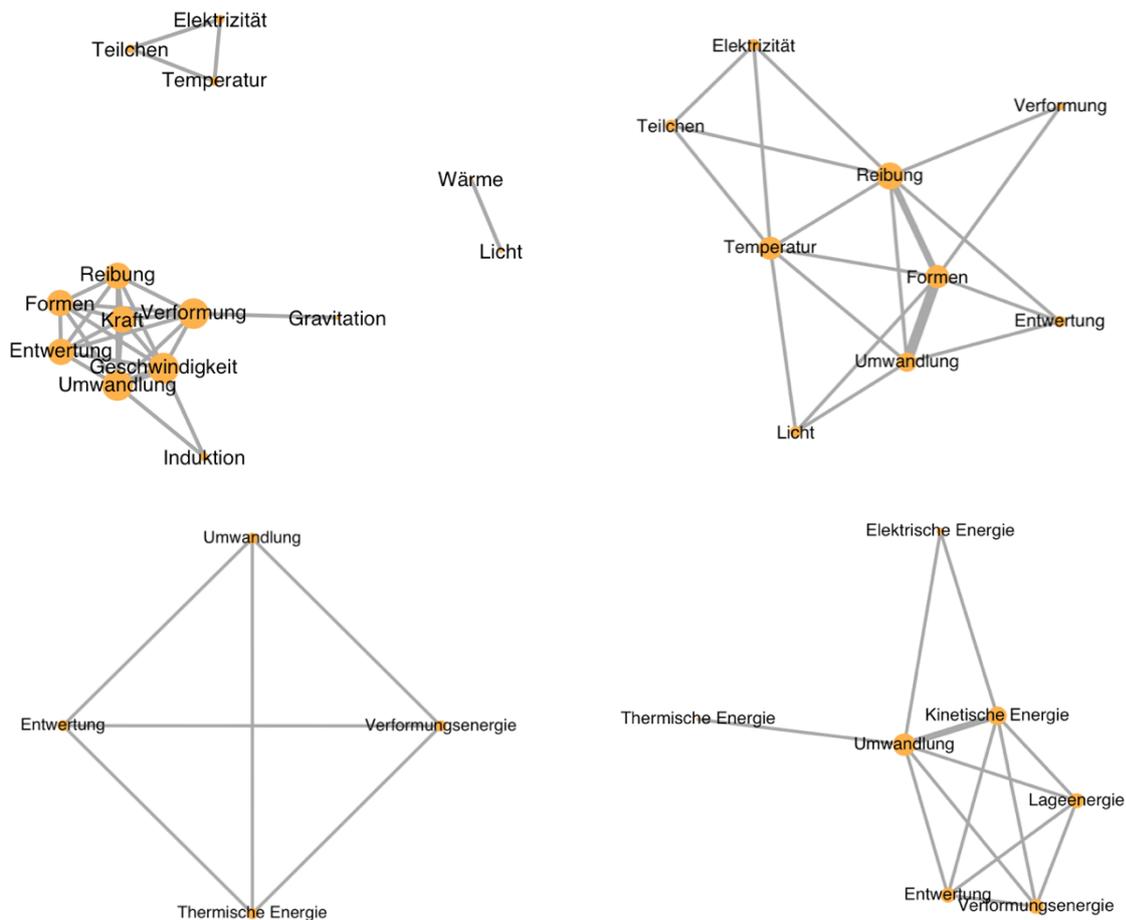


Abb. 28. Dargestellt sind die Wissensnetzwerke der Person 1 vor (links oben) und nach einer CRU (rechts oben). Zudem sind die Energiewissensnetzwerke vor (links unten) und nach einer CRU (rechts unten) dargestellt. Die unteren beiden Energiewissensnetzwerke beinhalten ausschließlich Energieideen inklusive einer Unterscheidung in verschiedene Energieformen.

In den Wissensnetzwerken (oben) ist anzumerken, dass zunächst keine Unterscheidung zwischen den verschiedenen Energieformen als naturwissenschaftliche Ideen vorgenommen wurde, sondern diese unter der Idee „Formen“ zusammengefasst wurden. Betrachtet man dagegen ausschließlich das Energiewissensnetzwerk (unten) für die verschiedenen Energiekonzeptualisierungen (Formen, Transfer, Umwandlung, Entwertung, Erhaltung) und differenziert zwischen den Energieformen, zeigt sich ein wesentlich komplexeres Wissensnetzwerk vom Pre- (links) zum Postzeitpunkt (rechts). Zum Prezeitpunkt benutzt Person 1 nur wenige Energieideen, die zudem keine dicken Verbindungslinien aufweisen, d.h. die wenigen Energieideen werden nur für die Erklärung einzelner Phänomene genutzt. Zudem werden mit „Thermische Energie“ bzw. „Verformungsenergie“ nur zwei verschiedene Energieformen genutzt. Zum Postzeitpunkt dagegen nutzt Person 1 nicht nur insgesamt mehr Energieideen, sondern diese werden

auch über Phänomene hinweg verwendet wie an der Verbindung zwischen „Umwandlung“ und „Kinetische Energie“ zu sehen ist. Person 1 verwendet nun auch zusätzlich zu den zum Prezeitpunkt verwendeten Energieformen „Verformungsenergie“ und „Thermische Energie“ auch „Lageenergie“, „Kinetische Energie“ und „elektrische Energie“ zur Erklärung von Phänomenen. Betrachtet man den Kontext der Unterrichtseinheit zu Person 1 (Tabelle 12: „Achterbahn“) zeigt sich, dass Person 1 insbesondere die thematisierten Energieformen der CRU verwendet. Interessanterweise nutzt Person 1 nun zusätzlich auch „elektrische Energie“ als Energieform zur Erklärung von Phänomenen.

Insgesamt ist bei Person 1 exemplarisch zu sehen, dass sich durch den Einsatz einer CRU das Wissensnetzwerk verändert und zwar so, dass das vernetzte Wissen zunimmt. Während zum Prezeitpunkt einzelne Ideen isoliert verwendet werden, werden zum Postzeitpunkt zunehmend Energieideen genutzt. Person 1 zeigt auf diese Weise nicht nur einen Wissenszuwachs durch Verwendung weiterer Ideen, sondern vielmehr auch die Verwendung ähnlicher (Energie-)Ideen über die Erklärung von Phänomenen hinweg.

### Person 2

Die Wissensnetzwerke und Energiewissensnetzwerke von Person 2 zum Pre- bzw. Postzeitpunkt sind in Abb. 29 dargestellt. Das Wissensnetzwerk von Person 2 besteht zum Prezeitpunkt (oben links) insgesamt aus weniger Ideen gegenüber dem Wissensnetzwerk zum gleichen Zeitpunkt von Person 1 (vgl. Abb. 28). Person 2 nutzt demnach nur fünf verschiedene Ideen zur Erklärung von Phänomenen. Hier ist allerdings erneut anzumerken, dass die Idee „Formen“ die verschiedenen Energieformen des Energiekonzepts zusammenfasst. Zudem sind bereits zwischen den einzelnen Ideen im Wissensnetzwerk bei Person 2 dickere Verbindungslinien zu sehen. Die Verbindung zwischen „Umwandlung“ und „Formen“ hat sogar die maximale Dicke, d.h. Person 2 nutzt zur Erklärung jedes der fünf Phänomene gemeinsam die beiden Ideen „Umwandlung“ und „Formen“. Zudem nutzt Person 2 auch die Idee „Entwertung“ bereits zur Erklärung von zwei Phänomenen in Verbindung mit „Formen“ bzw. „Umwandlung“. Insgesamt zeigt sich also, dass Person 2 bereits vor der Unterrichtseinheit überwiegend Energieideen, jedoch im Unterschied zu Person 1 insgesamt weniger verschiedene Ideen zur Erklärung von Phänomenen nutzt.

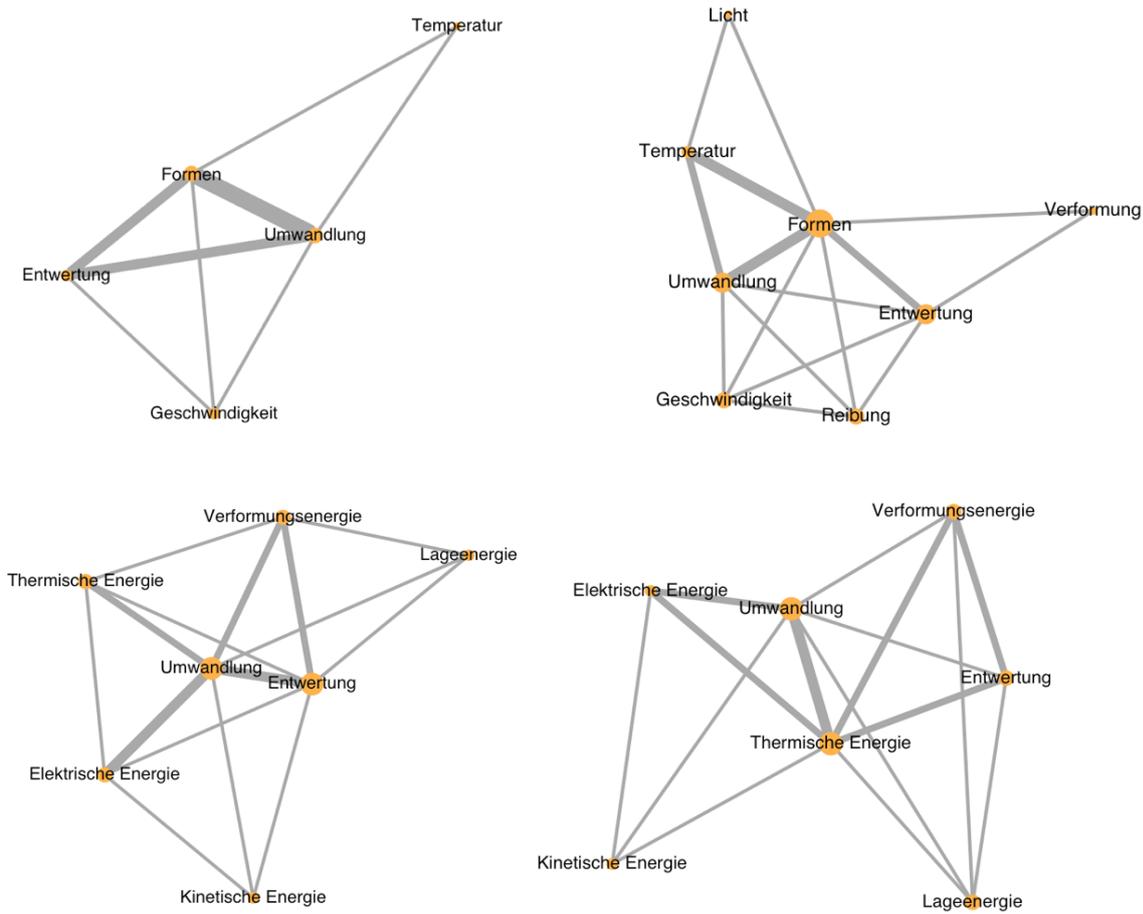


Abb. 29. Dargestellt sind die Wissensnetzwerke (oben) und Energiewissensnetzwerke (unten) der Person 2 vor (links) und nach einer CRU (rechts).

Nach der CRU nutzt dagegen Person 2 insgesamt mehr unterschiedliche Ideen wie zusätzlich „Licht“, „Reibung“ und „Verformung“ zur Erklärung von Phänomenen (oben rechts). Diese Ideen werden nicht isoliert verwendet, sondern in Verbindung mit bereits bestehenden Ideen verwendet. Im Zentrum des Wissensnetzwerks stehen erneut die beiden Ideen „Formen“ und „Umwandlung“ bzw. mit einer etwas geringeren Verbindung auch „Entwertung“. Zudem ist zu sehen, dass die Verbindung zwischen „Formen“ und „Temperatur“ dicker geworden ist, d. h. die beiden Ideen werden vermehrt gemeinsam zur Erklärung von Phänomenen genutzt. Insgesamt zeigt sich somit, dass die bereits vorhandenen starken Verbindungen zwischen den Energieideen von Person 2 sich nicht verändern, aber Person 2 auch zusätzlich weitere Ideen nutzt. Betrachtet man zudem erneut den Kontext der CRU von Person 2 (Laptop), so lässt sich vermuten, dass die zusätzliche Nutzung der Ideen „Licht“ und „Reibung“ bzw. die vermehrte Nutzung von „Temperatur“ auf den Kontext der CRU zurückzuführen ist. Dagegen kann die Nutzung der Ideen „Verformung“ nicht mit dem Kontext der CRU in Verbindung gebracht werden.

Werden nun zusätzlich die Wissensnetzwerke von Person 2 ausschließlich in Bezug auf das Energiekonzept dargestellt (unten, Abb. 29), bestätigt sich die bisherige Analyse der Wissensnetzwerke von Person 2. Bereits vor der CRU nutzt Person 2 viele unterschiedliche Energieformen zur Erklärung von Phänomenen (links) und verbindet diese mit der Energieumwandlung bzw. -entwertung. Nach der CRU verwendet Person 2 genau die gleichen Energieideen (rechts). Zwar zeigt sich eine vermehrte gemeinsame Nutzung der thermischen Energie als Energieform in Verbindung mit anderen Energieformen bzw. der Energieentwertung, was sich jedoch auch auf den Kontext der CRU und die thematisierten Energieformen zurückzuführen lässt. Insgesamt ist somit nur eine minimale Veränderung des Energiewissensnetzwerks von Person 2 durch den Einsatz einer CRU zu beobachten.

### Person 3

Person 3 zeigt von allen untersuchten Schülerinnen und Schülern den minimalen Zuwachs des vernetzten Wissens. Die (Energie-)Wissensnetzwerke von Person 3 zum Pre- bzw. Postzeitpunkt sind jeweils in Abb. 30 dargestellt. Das Wissensnetzwerk von Person 3 beinhaltet zum Pre- und Postzeitpunkt bereits viele naturwissenschaftliche Ideen, jedoch sind zum Prezeitpunkt insgesamt mehr Ideen (10) gegenüber der Anzahl der Ideen (8) im Netzwerk zum Postzeitpunkt zu sehen. Zudem ist zu beobachten, dass Person 3 bereits vor der CRU viele Energieideen („Umwandlung“, „Formen“, „Transfer“) nutzt und diese Ideen zusammen über Phänomene hinweg zur Erklärung von Phänomenen anwendet. Zum Postzeitpunkt dagegen nutzt die Person 3 die gleichen Energieideen wie zum Prezeitpunkt, jedoch sind diese geringfügig schwächer miteinander verbunden (vgl. jeweils die Verbindungslinien zwischen „Formen“ und „Transfer“ zum Pre- und Postzeitpunkt). Neben den schwächeren Verbindungen zwischen den Energieideen sind auch schwächere Verbindungen zu anderen Ideen zum Postzeitpunkt zu sehen (vgl. die Verbindungslinien zwischen „Reibung“, „Kraft“ und „Verformung“). Interessanterweise fallen vom Pre- und Postzeitpunkt genau die Ideen „Licht“ und „Elektrizität“ weg, obwohl gerade diese naturwissenschaftlichen Ideen in der entsprechenden CRU (Kontext: „Solarzelle“, vgl. Tabelle 12 bzw. Kapitel 3.3) thematisiert werden. Beide Ideen wurden von Person 3 sogar mehrfach zur Erklärung von Phänomenen im Interview genutzt, was anhand der Verbindungen zwischen „Licht“ bzw. „Elektrizität“ und „Umwandlungen“ und „Formen“ zu sehen ist.

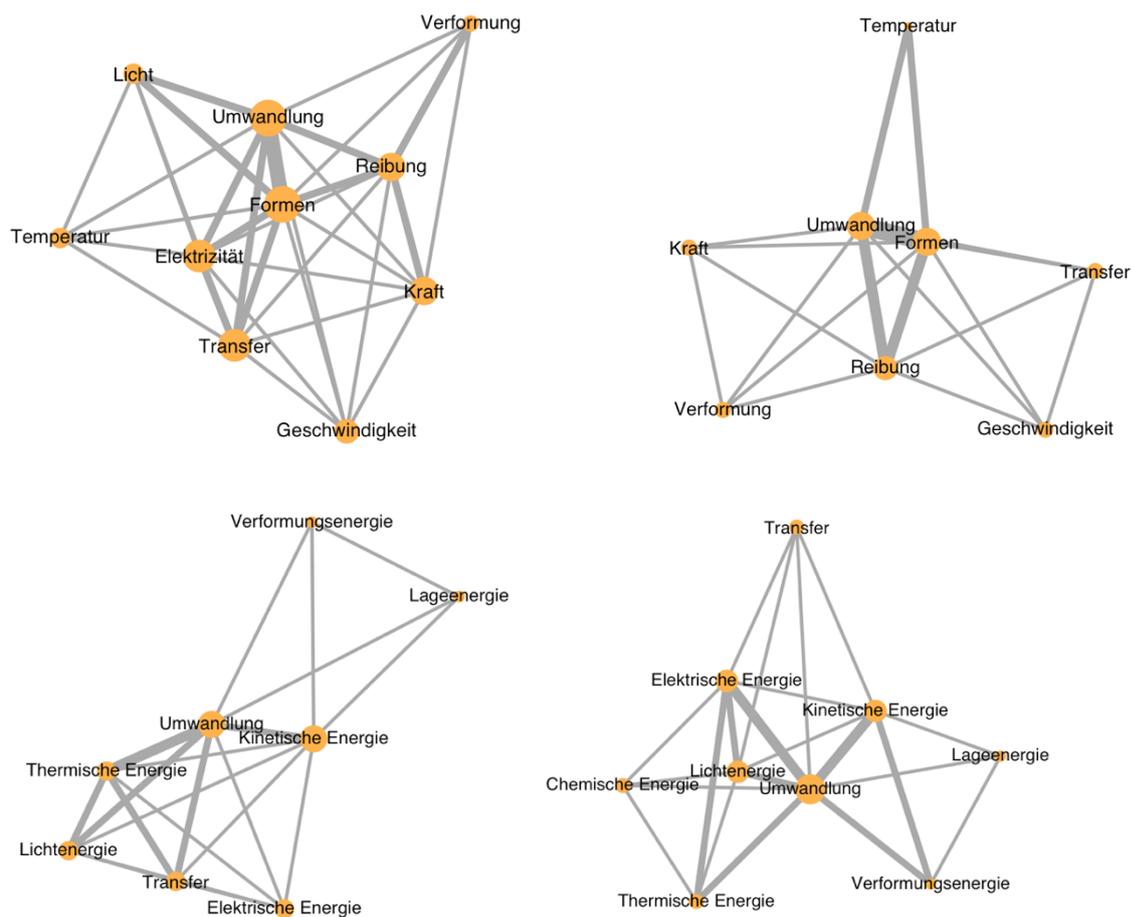


Abb. 30. Dargestellt sind die Wissensnetzwerke (oben) und Energiewissensnetzwerke (unten) der Person 3 vor (links) und nach einer CRU (rechts). Person 3 zeigte von allen interviewten Schülerinnen und Schülern den größten Zuwachs des vernetzten Wissens.

Die Nicht-Nutzung von „Licht“ und „Elektrizität“ zum Postzeitpunkt kann durch die Betrachtung der entsprechenden Energienetze gedeutet werden. Das Energiewissensnetzwerk von Person 3 ändert sich vom Pre- zum Postzeitpunkt quantitativ nur geringfügig (Pre: 8 bzw. Post: 9 Ideen). Jedoch ist auffällig, dass vor allem die elektrische Energie zum Postzeitpunkt vermehrt in Verbindung mit anderen Energieideen zur Erklärung von Phänomenen genutzt wird. So ist zum einen eine stärkere Verbindung zwischen „Elektrische Energie“ und „Umwandlung“ und zum anderen aber auch im Gegensatz zum Prezeitpunkt eine Verbindungslinie zwischen „Elektrische Energie“ und „Lichtenergie“ zu sehen. Ebendiese Energieideen werden während der entsprechenden CRU wiederum thematisiert.

Möglicherweise nutzt demnach Person 3 statt „Licht“ und „Elektrizität“ nun vermehrt die entsprechend zugehörigen Energieformen „Lichtenergie“ und „elektrische Energie“ zur

Erklärung von Phänomenen. Hierdurch entwickelt zwar Person 3 ein zunehmend kohärenteres Energiewissen, verbindet dieses Wissen jedoch (noch) nicht mit weiteren naturwissenschaftlichen Ideen.

#### Person 4

Der Zuwachs des vernetzten Wissens von Person 4 ist von allen teilgenommenen Schülerinnen und Schülern an den Interviews maximal. Die Wissensnetzwerke von Person 4 zum Pre- bzw. Postzeitpunkt sind in Abb. 31 dargestellt. Das Wissensnetzwerk von Person 4 besteht zum Prezeitpunkt noch aus nur wenigen Ideen, die zudem in drei unverbundene Teilbereiche unterteilt sind. In den Teilbereichen sind zudem nur jeweilige Ideen eines physikalischen Inhaltsgebiets zu sehen:

- „Formen“ und „Umwandlung“ zum Inhaltsgebiet „Energie“,
- „Verformung“ und „Kraft“ zur Mechanik und
- „Wärme“, „Temperatur“ und „Licht“ zur Wärmelehre.

Die jeweiligen Ideen werden zudem nur selten und gemeinsam zur Erklärung von Phänomenen genutzt, was an den dünnen Verbindungslinien bzw. den nur kleinen orangefarbenen Kreisen zu sehen ist.

Zum Postzeitpunkt dagegen ist im Wissensnetzwerk nur ein Bereich zu sehen, in dem die Ideen um die Energieidee „Formen“ vernetzt sind. Insgesamt nutzt Person 4 zum Postzeitpunkt auch mehr Ideen zur Erklärung von Phänomenen, die teilweise auch stärker miteinander verbunden sind (z.B. zwischen „Formen“ und „Umwandlung“). Hinzu kommt mit der „Elektrizität“ auch eine Idee aus dem physikalischen Inhaltsgebiet Elektrizitätslehre, die in der entsprechenden CRU thematisiert (Kontext: „Laptop“, vgl. Tabelle 12) und aber auch mit der „Temperatur“ aus dem Inhaltsgebiet Wärmelehre verbunden wird.

Die Zunahme der insgesamt genutzten Ideen bei gleichzeitig zunehmenden stärkeren Verbindungen zwischen den Ideen zeigt sich in den Energienetzwerken im Pre-Postvergleich. Während die Person 4 zum Prezeitpunkt nur drei Energieideen und jeweils nur einmal zur Erklärung eines Phänomens nutzt, verdoppelt sich die Anzahl der genutzten Energieideen zum Postzeitpunkt. Hinzu kommen mit der „Lichtenergie“, der „Thermischen Energie“ und dem „Transfer“ jeweils drei Energieideen der entsprechenden CRU (vgl. Tabelle 12 bzw. hier auch das Beispiel zur CRU in Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Diese Ideen werden auch direkt gemeinsam zur Erklärung von Phänomenen genutzt, was an den Verbindungen zwischen

den Ideen zu sehen ist. Gleichzeitig werden einzelne Energieideen insgesamt auch vermehrt gemeinsam zur Erklärung von Phänomenen genutzt.

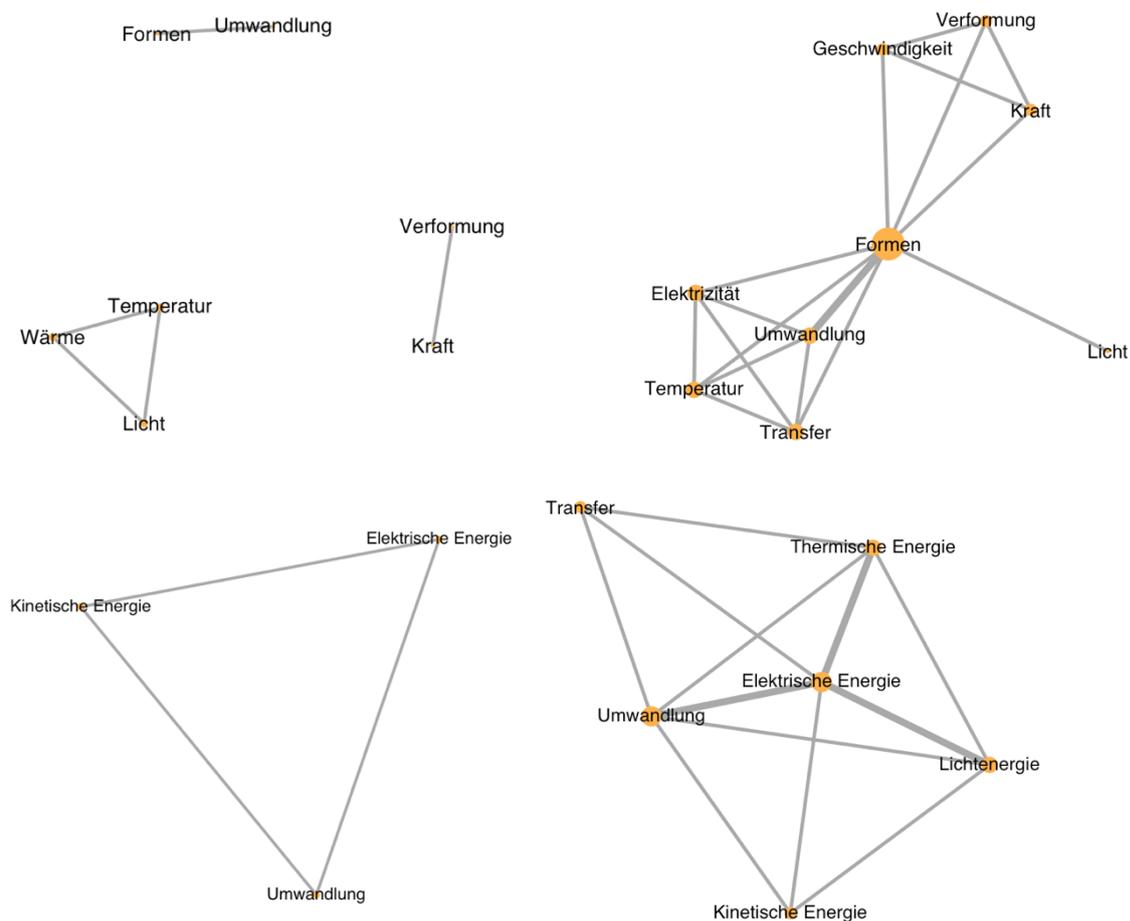


Abb. 31. Dargestellt sind die Wissensnetzwerke (oben) und Energiewissensnetzwerke (unten) der Person 4 vor (links) und nach einer CRU (rechts). Person 4 hatte von allen interviewten Schülerinnen und Schülern die größte Abnahme an vernetztem Wissen.

### Zusammenfassende Analyse der Wissensnetzwerke

Zusammenfassend zeigt sich im Vergleich der vier Schülerinnen und Schüler exemplarisch, wie zum einen Wissensnetzwerk zur qualitativen Analyse visualisiert und zum anderen wie es durch den Einsatz einer auf vernetztes Wissen zielenden Unterrichtseinheit unterschiedlich verändert werden kann. Sowohl Person 1 als auch Person 2 entwickeln durch die CRU ein zunehmend vernetzteres Wissen. Person 1 folgt dabei der Theorie aus Kapitel bzw. dem intendierten Lernverlauf der Einheiten (siehe Beispiel-CRU in Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**), verwendet demnach zunehmend die thematisierten Energieformen der CRU und

verknüpft diese gleichzeitig mit bestehenden naturwissenschaftlichen Ideen zur Erklärung von Phänomenen. Person 2 dagegen verfügt bereits hinsichtlich des Energiekonzepts über ein breit angelegtes und vernetztes Wissen. Person 2 nutzt jedoch nach dem Einsatz einer CRU mehr Ideen abseits des Energiekonzepts, insbesondere Ideen zu Inhalten des jeweiligen Sachgebiets zur Erklärung von Phänomenen, und nutzt sie gemeinsam mit bestehenden Energieideen. Person 3 entwickelt ein weniger vernetztes Wissen durch die CRU. Dies ist jedoch u.a. auf die Ersetzung zuvor genannter Ideen durch Energieideen zurückzuführen. Zudem ist Tabelle 12 zu entnehmen, dass Person 3 bereits vor der CRU über ein hoch vernetztes Wissen gegenüber den anderen drei Personen verfügte und möglicherweise die CRU nicht dem Wissensstand der Person 3 entsprach. Person 4 dagegen verdeutlicht abschließend, dass für eine hohe Zunahme vernetzten Wissens sowohl neue Ideen zum Wissensnetzwerk hinzugefügt als auch diese mit bereits bekannten Ideen verbunden werden müssen. Hier ist jedoch auch Tabelle 12 zu entnehmen, dass die Person 4 über das niedrigste vernetzte Wissen der vier Personen verfügte und möglicherweise demnach den größten Zuwachs an vernetztem Wissen entwickeln konnte.

Insgesamt wird eine Einordnung der interviewten Schülerinnen und Schüler und damit ihr vernetztes Wissen in die Gesamtstichprobe des Feldtests aufgrund fehlender Energiekompetenztests der interviewten Schülerinnen und Schüler erschwert. Hierzu liegen nur zu 15 der 32 interviewten Schülerinnen und Schülern ein vollständiges Datenpaar aus Pre- und Posttests des Energiekompetenztests vor. Betrachtet man das Energiewissen dieser 15 Schülerinnen und Schüler, so zeigt sich im Mittel ein höheres Energiewissen sowohl im Pre- ( $M = 1.02, SD = 1.19$ ) als auch im Posttest ( $M = 1.71, SD = 1.05$ ) gegenüber der Gesamtstichprobe ( $M_{pre} = 0.69, SD_{pre} = 1.16; M_{post} = 0.77, SD_{post} = 1.25$ ). Eine damit verbundene Analyse, inwiefern ein hohes Energiewissen bzw. der Zuwachs des Energiewissens die Entwicklung eines vernetzten Wissens bedingt, kann aufgrund der geringen Datenlage von 15 Schülerinnen und Schüler in dieser Arbeit nicht durchgeführt werden. Entsprechende Hinweise auf einen positiven Zusammenhang zwischen dem Zuwachs eines Energiewissens und dem Zuwachs eines vernetzten Wissens untersuchten hier bereits Kubsch et al. (2019). Dem Zusammenhang sollte in künftigen Arbeiten mit größeren Stichproben nachgegangen werden.

## 5. Zusammenfassung und Diskussion

Das Ziel dieser Arbeit war die Förderung kumulativen Lernens durch den Einsatz von Basiskonzepten. Ausgehend von den zu Beginn der Arbeit theoretisch hergeleiteten Anforderungen an kumulatives Lernen wurde schließlich eine Interventionsmaßnahme zur Förderung kumulativen Lernens im naturwissenschaftlichen Unterricht entwickelt. Die Interventionsmaßnahme umfasst zwölf kurze Unterrichtseinheiten (CRUs) zum Basiskonzept Energie. Die Unterrichtseinheiten sind aufgrund ihrer digitalen Umsetzung, ihrer Kürze und der Adaptionsmöglichkeit (vgl. Marion & Shepard, 2010) flexibel in bestehende Unterrichtsgänge von Lehrkräften im Physikunterricht integrierbar. Die Konzeption und Implementation der Unterrichtseinheiten wurden für eine Nutzung durch Lehrkräfte der Bundesländer Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen und Schleswig-Holstein im Zuge der in der Arbeit durchgeführten Lehrplananalyse abgesichert. Eine teilweise Nutzung der Unterrichtseinheiten auch über die drei Bundesländer hinweg sollte jedoch möglich sein, da aufgrund der hohen Anzahl der Unterrichtseinheiten durchschnittlich drei mögliche Unterrichtseinheiten je Jahrgang der Mittelstufe vorliegen (vgl. auch Euler, 2011).

Im Zuge dieser Entwicklung einer Interventionsmaßnahme ist es zudem gelungen, das erste Beispiel für einen an Basiskonzepten orientierten Unterricht und eine auf diese Weise eine unterrichtspraktische Instruktionsmaßnahme zu entwickeln (vgl. Bernholt et al., 2020). Damit wird auch der zu Beginn dargestellten Kritik und fehlenden Umsetzung der Basiskonzepte in Folge ihrer Einführung durch die KMK-Bildungsstandards begegnet (vgl. Wodzinski, 2020; Hertel & Großmann, 2016; Schecker & Wiesner, 2007). Ausgehend von den gleichen Grundannahmen an fachliches Lernen von bspw. Schecker und Wiesner (2007) - dass „Schülerinnen und Schüler zunächst vielfältige Erfahrungen und Einsichten in den jeweiligen Sachgebieten [benötigen]“ (S. 11) – vertiefen Schülerinnen und Schüler durch die Instruktionsmaßnahmen ihr Verständnis des zugrundeliegenden Basiskonzepts bei gleichzeitiger Vernetzung von physikalischen Inhalten in Sachgebieten. Für die Vernetzung physikalischer Inhalte wird entgegen dem Verständnis eines basiskonzeptorientierten Unterrichts nach Schecker und Wiesner (2007) in den Unterrichtseinheiten jedoch nicht das Basiskonzept vor dem Unterrichten in Sachgebieten vollständig erlernt. Vielmehr benötigen Schülerinnen und Schüler vor den Unterrichtseinheiten zur Vernetzung von Inhalten nur ein Teilverständnis des Basiskonzepts (vgl. Lehrer & Schauble, 2015; Kesidou & Roseman, 2002). In den Unterrichtseinheiten selbst wird schließlich in variablen Kontexten die Anwendung des

Basiskonzepts zur Lösung von Problemen und Erklärung von Phänomenen expliziert (Bernholt et al., 2020; Erickson, 2002). Ebendieser Ansatz des regelmäßigen Aufgreifens von Basiskonzepten zu verschiedenen Kontexten und das Explizieren der Anwendung des Basiskonzepts bei gleichzeitiger Vernetzung von Inhalten und Sachgebieten ist in der Designlösung in Form der CRUs umgesetzt und unterscheidet sich damit in der Umsetzung von einer „top-down-Strategie“ (vgl. Kapitel 1 bzw. Schecker & Wiesner, 2007, S. 11).

Für die Strukturierung der Instruktionsmaßnahme, d.h. welches Teilverständnis des Basiskonzepts Schülerinnen und Schüler in welchen Jahrgängen entwickeln, wurde eine in Querschnittsanalysen empirisch validierte Verständnisenwicklung zum Energiekonzept im Physikunterricht genutzt (vgl. Neumann, 2017). Erst durch die Nutzung einer entsprechenden Learning Progression zur Verständnisenwicklung zum Energiekonzept (vgl. Herrmann-Abell & DeBoer, 2018; Neumann et al., 2013; Liu & McKeough, 2005) konnte die Instruktionsmaßnahme vollständig an den Schülerinnen und Schülern orientiert umgesetzt werden. Für die unterrichtspraktische Umsetzung wurde zudem die Instruktionsmaßnahme zum Energiekonzept einem Design-Based Research-Ansatz folgend in mehreren Entwicklungszyklen optimiert und im Anschluss die Instruktionsmaßnahme, deren Wirkungen im Hinblick auf die Entwicklung eines Energieverständnisses und eines vernetzten Wissens in der Praxis im Zuge dieser Arbeit evaluiert.

Die Evaluation der Instruktionsmaßnahme zeigte auf der globalen quantitativen Ebene, dass Schülerinnen und Schüler durch die Instruktion einer einzelnen Unterrichtseinheit im Allgemeinen kein höheres Energiewissen entwickeln. Tiefergehende Analysen deckten in dem Zuge jedoch eine Abhängigkeit der Energieverständnisenwicklung von der Lehrkraft und auch von der spezifischen CRU auf. So verzeichneten Schülerinnen und Schüler bei zwei Lehrkräften durchaus signifikante Zuwächse im Energiewissen. Jedoch stellt sich insgesamt der Effekt der Lehrkraft zwar als signifikant, jedoch als nicht allzu hoch heraus und zeigt damit entgegen früherer Forschung (z.B. Hattie, 2009) einen relativ geringen Einfluss der Lehrkraft auf das Lernen von Schülerinnen und Schüler. Vielmehr ist auch die Wahl der spezifischen CRU ein wichtiger Einflussfaktor auf den Zuwachs des Energiewissens von Schülerinnen und Schüler. Hier wurden drei spezifische CRUs identifiziert, zu denen Schülerinnen und Schüler durchaus einen Zuwachs ihres Energiewissens verzeichnen. Es bleibt an dieser Stelle jedoch offen, ob die Wahl des Kontexts der CRU, die thematisierten Energieformen oder die spezifischen Instruktionen

für einen Zuwachs des Energiewissens verantwortlich sind. Auch ein Vergleich mit ähnlichen Arbeiten ist hier nicht möglich, da CRUs im Allgemeinen selten in ihrer Wirkung untersucht bzw. noch seltener untereinander verglichen werden (vgl. Roblin et al., 2018; Marion & Shepard, 2010). Eine spezifischere Analyse des Kontexts und dessen Einfluss auf das Energielernen von Schülerinnen und Schüler wurde in dieser Arbeit nicht untersucht, sollte aber in zukünftigen Arbeiten nachgegangen werden. In der Betrachtung der Energieformen der spezifischen CRUs zeigt sich dagegen, dass in den drei CRUs mit einem Zuwachs des Energiewissens überwiegend mechanische Energieformen thematisiert werden. In klassischen Unterrichtsgängen der Physik wird üblicherweise die Energie über die mechanische Arbeit eingeführt (z.B. Duit, 2014). Auch historisch wurde der Energiebegriff im Laufe von Jahrhunderten in der Mechanik entwickelt (vgl. Abschnitt 3.1.1). Möglicherweise fällt im Allgemeinen auch Schülerinnen und Schülern die Entwicklung eines Energieverständnisses leichter, wenn diese im Sachgebiet Mechanik implementiert ist und überwiegend mechanische Energieformen thematisiert. Dieser Vermutung kann in dieser Arbeit nicht genauer nachgegangen werden. Jedoch eignen sich die CRUs in besonderem Maße zur Untersuchung der Hypothese, so dass der Vermutung in einem weiteren Erprobungszyklus nachgegangen werden kann.

Die Ergebnisse zum Einfluss der Lehrkräfte werfen zudem die Frage auf, ob die Unterrichtseinheiten jeweils von den Lehrkräften wie in dieser Arbeit intendiert umgesetzt wurden (vgl. Abschnitt 3.4.1). Die Beschreibung von Umsetzungsszenarien durch Lehrkräfte und der Vergleich mit der Intention der Unterrichtseinheiten war vorgesehen, konnte jedoch leider aufgrund der COVID-19 Pandemie und des damit verbundenen Verbots von Unterrichtsbesuchen nicht umgesetzt werden. Somit können zwar Umsetzungsszenarien nicht qualitativ beschrieben werden, jedoch sind anhand der Artefakte der Schülerinnen und Schüler große Unterschiede im Bearbeitungsverhalten zu erkennen. Demnach haben bspw. nur knapp die Hälfte der untersuchten Schülerinnen und Schüler die Aufgaben der CRUs zu mehr als 75% vollständig bearbeitet. Zudem zeigt sich, dass solche Schülerinnen und Schülern mit einem entsprechend hohen Bearbeitungsverhalten auch einen entsprechenden Zuwachs im Energiewissen durch eine CRUs zeigen. Somit zeigt sich zum einen, dass die CRUs durchaus einen positiven Effekt auf die Energieverständnisentwicklung haben, sofern die CRUs wie intendiert umgesetzt werden. Für die Umsetzung der Intention der CRUs müssen demnach die Schülerinnen und Schüler mindestens die Instruktionen der CRUs bearbeiten. Zum

anderen lässt sich die Vermutung aufstellen, dass Lehrkräfte zu den CRUs vor allem die sinnvolle Bearbeitung der Aufgaben sicherstellen müssen, um die Energieverständnisentwicklung zu fördern. Dieser Hypothese sollte ebenfalls in weiteren Erprobungszyklen, auch unter Rückgriff auf die CRUs, nachgegangen werden.

Mit Blick auf fehlende Energiewissenszuwächse und fehlende oder fehlerhaft ausgefüllte Energiekompetenztests ist auch in Frage zu stellen, ob das Testinstrument Energiewissenszuwächse über den Verlauf einer CRU von 4-6 Schulstunden auflösen kann (vgl. auch Neumann, 2013). Das Testinstrument wurde ursprünglich für eine Erfassung der Kompetenzentwicklung über ein bzw. über mehrere Schuljahre entwickelt (Viering, 2012; siehe auch Weßnigk et al., 2017). Zumal zum einen die Schülerinnen und Schüler, die mehr als eine CRU erhielten, durchaus einen entsprechend großen Zuwachs im Energiewissen zeigten. Zum anderen weisen die Analysen der Interviews durchaus auf ein stärker vernetztes Wissen in Folge der Bearbeitung einer CRU hin.

Im Allgemeinen konnten so die Wissensnetzwerke von Schülerinnen und Schüler in einem Pre-Post-Vergleich sowohl quantitativ als auch qualitativ verglichen werden. Die quantitativen Zuwächse im vernetzten Wissen stehen dabei im Einklang mit der Zunahme des vernetzten Wissens durch Unterricht. So beobachteten Kubsch et al. (2019) mit dem gleichen Messinstrument einen mittleren Zuwachs von  $g \approx 0,25$  im vernetzten Wissen durch eine Intervention einer 10-wöchigen Unterrichtseinheit zum Energiekonzept (Nordine et al., 2018). Entsprechend geringere mittlere Zuwächse von  $g = 0,09$  im vernetzten Wissen von Schülerinnen und Schüler in dieser Arbeit sind kongruent zu der entsprechend kürzen Intervention von 4-6 Schulstunden bzw. einem 3-wöchigen Unterricht.

Zusätzlich zur prinzipiellen quantitativen Betrachtung des Zuwachses des vernetzten Wissens von Schülerinnen und Schüler anhand der Interviews, konnten qualitativ anhand der Wissensnetzwerke vier exemplarischer Schülerinnen und Schüler genauer beschrieben werden. Hier zeigten sich die verschiedenen Arten von Zuwächsen im vernetzten Wissen durch entweder das Hinzufügen neuer (Energie-)Ideen zum Wissensnetzwerk, dem Stärken von Verbindungen zwischen bereits bestehenden Ideen oder dem Hinzufügen neuer Verbindungen zwischen den Ideen und Bereichen im Wissensnetzwerk. Diese unterschiedlichen Möglichkeiten der Entwicklung eines vernetzten Wissens decken sich mit der Beschreibung von Lernen in der der Arbeit zugrundeliegenden Theorie der Wissensintegration von Linn (2006) bzw. dem Modell vertikaler Vernetzung von H. E. Fischer et al. (2007). Insbesondere das Hinzufügen neuer

Energieideen zum Wissensnetzwerk der beispielhaft dargestellten Schülerinnen und Schüler durch eine CRU zeigt auch qualitative Energiewissenszuwächse, die entsprechend jedoch nicht mit dem Energiekompetenztest erfassbar sind.

Ein Zusammenhang zwischen dem Zuwachs des vernetzten Wissens und dem Zuwachs des Energiewissens von Kubsch et al. (2019) konnte nicht untersucht werden. Dieser Analyse sollte ebenfalls in folgenden Arbeiten mit größeren Stichproben nachgegangen werden.

### Limitationen

Mit Blick auf das Ziel der Arbeit wurden kurze Unterrichtseinheiten (CRUs) zum Basiskonzept Energie entwickelt. Für die Entwicklung der CRUs wurde exemplarisch das Basiskonzept Energie gewählt (vgl. Abschnitt 2.3.2). Die Übertragung der Erkenntnisse aus der Entwicklung eines basiskonzeptorientierten Unterrichts am Beispiel des Energiekonzepts auf weitere Basiskonzepte stellt jedoch eine Einschränkung dieser Arbeit dar. So liegen zwar für das Basiskonzept Materie des Physikunterrichts die notwendigen Erkenntnisse zur Verständnisenwicklung in Form ausformulierter Learning Progressions vor (z.B. Hadenfeldt et al., 2014), jedoch ist diese Entwicklung hierarchischer formuliert als die Verständnisenwicklung zum Energiekonzept (vgl. Abschnitt 2.2.3 und Abschnitt 3.1.2). Auch die flexible Anwendung des Energiekonzepts zur Vernetzung von Sachgebieten der Physik (Elektrizitätslehre, Wärmelehre, Mechanik und Optik) ist nicht direkt übertragbar, da bspw. in der Mechanik das Basiskonzept Materie nur eine untergeordnete Bedeutung hat. Entsprechende Übertragungen der Erkenntnisse aus dieser Arbeit hinsichtlich der weiteren Basiskonzepte der Physik System bzw. Wechselwirkung müssten ebenfalls individuell betrachtet werden. Aufgrund fehlender empirischer Erkenntnisse zur Verständnisenwicklung dieser Basiskonzepte wird auf die Betrachtung an dieser Stelle verzichtet.

Die Übertragbarkeit der Erkenntnisse zur Entwicklung eines basiskonzeptorientierten Unterrichts auf andere naturwissenschaftliche Fächer bzw. deren Basiskonzepte ist ebenfalls mit einer Limitation verbunden. So wird zwar im Chemieunterricht das Basiskonzept Energie ähnlich anhand eines Formen-Ansatzes konzeptualisiert und könnte neben einer vertikalen innerfachlichen- auch zur horizontalen überfachlichen Vernetzung von Sachgebieten genutzt werden. Im Biologieunterricht dagegen findet seltener eine Konzeptualisierung anhand des Formen-Ansatzes statt, so dass hier eine vertikale Vernetzung möglicherweise erschwert wird. Die zudem historisch bedingte

starke Trennung des Physikunterrichts in einzelne Sachgebiete ist zudem weniger in den anderen Naturwissenschaften zu finden, so dass hier die Vernetzung von Inhalten einzelner Sachgebiete durch den Einsatz von Basiskonzepten ebenfalls individuell geprüft werden muss (vgl. hierzu KMK, 2004a, 2004b).

Die bisherigen Limitationen beziehen sich vor allem auf die Entwicklung der CRUs und deren praktische Implementation im naturwissenschaftlichen Unterricht. Gleichzeitig sind die Ergebnisse rund um die Erprobungen und Evaluationen der CRUs im Regelunterricht mit Limitationen verbunden. So konnte aufgrund der COVID-19-Pandemie bereits nach wenigen Erprobungen ein Regelunterricht nicht mehr durchgeführt werden und wurde durch einen Fernunterricht ersetzt (vgl. Abschnitt 4.1.1). Die Durchführung der Erprobungen im Fernunterricht wurde zwar möglichst vergleichbar durchgeführt, indem bspw. alle Schülerinnen und Schüler unter gleichen Bedingungen den Energiekompetenztest durchführten. Das Testdesign in Form unterschiedlicher Testfragen für Schülerinnen und Schüler war hier zudem vorteilhaft, so dass sich Schülerinnen und Schüler nicht hinsichtlich einzelner Fragen miteinander austauschen konnten. Jedoch ist auch hier aufgrund bspw. unterschiedlicher digitaler Endgeräte, teilweise fehlender Audio- und Webverbindungen von einer leicht veränderten Durchführung auszugehen.

Die Durchführung der leitfadengestützten Interviews wurde ebenfalls aufgrund fehlender Audioverbindungen im Fernunterricht qualitativ beeinträchtigt. Mit zunehmender Dauer des Fernunterrichts sank zudem die freiwillige Bereitschaft der Schülerinnen und Schüler, an einem Interview teilzunehmen, so dass vollständige Daten von Schülerinnen und Schüler überwiegend aus dem Präsenzunterricht vorliegen.

Durch den Wechsel vom Präsenz- in den Fernunterricht wurde letztlich auch die Interventionsmaßnahme erheblich verändert. Die Lehrkräfte waren aufgrund des plötzlichen Wechsels in den Fernunterrichts ebenfalls überrascht, so dass keine entsprechenden Lehr-Lernkonzepte vorlagen (vgl. auch Usak et al., 2020). Eine Überforderung der technisch-digitalen Umsetzung von Fernunterricht im Allgemeinen war zu beobachten und beeinträchtigte die Interventionsmaßnahme. Hinzu darf angezweifelt werden, ob die Kernpunkte von Project-Based-Learning (z.B. Hohe Situierung und Kontextualisierung, Kooperatives Arbeiten, Entwicklung naturwissenschaftlicher Arbeitsweisen; vgl. Abschnitt 3.1.4) im Fernunterricht vollständig umgesetzt werden konnten (vgl. auch Miller et al., 2021). Zwar wurden möglichst viele Experimente auch im Fernunterricht durch Videos, Live-

Demonstrationen oder Heimexperimente umgesetzt, diese jedoch bspw. nicht kooperativ ausgewertet. Insgesamt berichteten die Lehrkräfte von einer Veränderung bzw. Transformation des Lernens im Fernunterricht; diese neue Art des Unterrichtens musste jedoch erst von Lehrkräften bzw. Schülerinnen und Schülern erlernt werden (Miller et al., 2021; Hamilton et al., 2020). Dieser Lernprozess beeinträchtigt zusätzlich die Vergleichbarkeit der Testergebnisse bzw. der Interventionsmaßnahme.

### Ausblick

Trotz der Limitationen in der Vergleichbarkeit der Studienergebnisse zwischen Präsenz- und Fernunterricht sind Implikationen für zukünftige Arbeiten vor allem im Hinblick auf die Entwicklung eines naturwissenschaftlichen Unterrichts zu nennen. Da das vorrangige Ziel der Arbeit, die Entwicklung einer Interventionsmaßnahme zu einem Problem der Praxis, mithilfe eines Design-Based Research-Ansatzes verfolgt und umgesetzt wurde, wird gemäß diesem Ansatz eine weitere Optimierung der Interventionsmaßnahme empfohlen (vgl. McKenney & Reeves, 2018). Eine Optimierung einer Interventionsmaßnahme erfolgt typischerweise über mehrere Jahre bzw. auch Jahrzehnte, generiert zudem mit jedem Zyklus neue Erkenntnisse (Bakker, 2018). Weitere Zyklen können auf diese Weise nicht nur zur Optimierung, sondern auch zur Erkenntnisgewinnung über diese Arbeit hinaus beitragen. Die Optimierung könnte zudem auf Grundlage der Überarbeitungen der Lehrkräfte erfolgen, da die überarbeitete, adaptierte und individualisierte Interventionsmaßnahme vollständig in digitaler Form vorliegt. Eine mögliche Identifikation von Adaptionstypen unter Lehrkräften im Hinblick auf entwickeltes Unterrichtsmaterial kann verfolgt und in weiteren Erprobungen überprüft werden.

Im Hinblick auf die Förderung kumulativen Lernens durch das regelmäßige Aufgreifen von Basiskonzepten ist zudem festzuhalten, dass mit zwei Ausnahmen alle Lehrkräfte jeweils nur eine CRU je Schulklasse erprobt hat (vgl. Abschnitt 4.1.1). Auf diese Weise konnte in dieser Arbeit zunächst die Wirksamkeit einzelner CRUs überprüft werden. Zukünftige Arbeiten sollten sich jedoch auf den regelmäßigen Einsatz der CRUs zu verschiedenen Kontexten und diversen Sachgebieten im Längsschnitt einzelner Schulklassen fokussieren, um die Interventionsmaßnahme zur Prüfung der Learning Progression abzuschließen (vgl. auch Bernholt et al., 2018; Neumann, 2017). Mit einem entsprechenden Längsschnittdesign können zudem unterschiedliche Lernwege der Verständniserwicklung identifiziert und Lernen verstärkt individualisiert werden. Eine

entsprechende Individualisierung von Lernwegen bietet sich gerade aufgrund der bereits erfolgten digitalen Implementation der CRUs in das Lern-Managementsystem Moodle in hohem Maße an. Eine individuelle Beschreibung und Förderung von Lernprozessen würde in dem Sinne auch die Learning Progression zum Energiekonzept verfeinern und kumulatives Lernen für alle Schülerinnen und Schüler gegeben ihres Vorwissens fördern.

## 6. Abkürzungsverzeichnis

Abk.	Abkürzung
Bzw.	beziehungsweise
Bspw.	beispielsweise
d.h.	das heißt
CRU	Curriculum Replacement Unit
CACS	Curriculum Administration and Customization Service
o.g.	oben genannten
SuS	Schülerinnen und Schüler
z.B.	zum Beispiel

## 7. Literatur

- Abrams, E., Southerland, S. A., & Evans, C. (2008). Inquiry in the classroom: Identifying necessary components of a useful definition. *Inquiry in the classroom: Realities and opportunities*, xi–xiii.
- Anderson, J. R., Reder, L. M., & Simon, H. A. (1996). Situated Learning and Education. *Educational Researcher*, 25(4), 5–11.
- Anderson, J. R., & Schunn, C. D. (2000). Implications of the ACT-R learning theory: No magic bullets. *Advances in Instructional Psychology*.
- Anderson, T., & Shattuck, J. (2012). Design-Based Research: A Decade of Progress in Education Research? *Educational Researcher*, 41(1), 16–25.
- Appel, T. (Hrsg.). (2016). *Spektrum Physik. 7/10, [Schülerband]: ...* (Gymnasium, Niedersachsen, Druck A). Schroedel.
- Aufschnaiter, S. von, & Welzel, M. (1997). Wissensvermittlung durch Wissensentwicklung. Das Bremer Komplexitätsmodell zur quantitativen Beschreibung von Bedeutungsentwicklung und Lernen. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 3(2), 43–58.
- Ausubel, D. P. (1974). *Psychologie des Unterrichts*.
- Bader, F., & Dorn, F. (Hrsg.). (2016). *Physik. Band 7/8, [Schülerband]: ...* (Gymnasium, Berlin, Brandenburg, Druck A). Schroedel.
- Bader, M. (2001). *Vergleichende Untersuchung eines neuen Lehrganges „Einführung in die mechanische Energie und Wärmelehre“* [Ludwig-Maximilians-Universität München; Application/pdf].
- Bakker, A. (2018). *Design research in education: A practical guide for early career researchers*. Routledge.
- Banchi, H., & Bell, R. (2008). The many levels of inquiry. *Science and children*, 46(2), 26.
- Banilower, E. R., Smith, P. S., Malzahn, K. A., Plumley, C. L., Gordon, E. M., & Hayes, M. L. (2018). Report of the 2018 NSSME+. *Horizon Research, Inc.*

- Barab, S. A., & Plucker, J. A. (2002). Smart People or Smart Contexts? Cognition, Ability, and Talent Development in an Age of Situated Approaches to Knowing and Learning. *Educational Psychologist, 37*(3), 165–182.
- Barron, B. J. S., Schwartz, D. L., Vye, N. J., Moore, A., Petrosino, A., Zech, L., & Bransford, J. D. (1998). Doing With Understanding: Lessons From Research on Problem- and Project-Based Learning. *Journal of the Learning Sciences, 7*(3–4), 271–311.
- Bauer, W. (2007). Zur Konzeption von Lernmanagementsystemen–Inter-aktivität, Flexibilität, Kompatibilität und internationale Standards am Beispiel des basiX-Lernmanagement-systems. *Fremdsprachen lernen medial: Entwicklungen, Forschungen, Perspektiven, 5*.
- Baumert, J., Bos, W., & Watermann, R. (2000). Mathematisch-naturwissenschaftliche Grundbildung im internationalen Vergleich. In *TIMSS/III Dritte Internationale Mathematik-und Naturwissenschaftsstudie–Mathematische und naturwissenschaftliche Bildung am Ende der Schullaufbahn* (S. 135–197). Springer.
- Baumert, J., Klieme, E., Neubrand, M., Prenzel, M., Schiefele, U., Schneider, W., Stanat, P., Tillmann, K.-J., & Weiß, M. (2001). *PISA 2000*. VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Baumert, J., Lehmann, R., Lehrke, M., Schmitz, B., Clausen, M., Hosenfeld, I., Köller, O., & Neubrand, J. (1997a). TIMSS. *Mathematisch-naturwissenschaftlicher Unterricht im internationalen Vergleich. Deskriptive Befunde*. Opladen: Leske+ Budrich.
- Baumert, J., Lehmann, R., Lehrke, M., Schmitz, B., Clausen, M., Hosenfeld, I., Köller, O., & Neubrand, J. (1997b). *TIMSS–Mathematisch-naturwissenschaftlicher Unterricht im internationalen Vergleich*, Opladen: Leske+ Budrich.
- Beier, M. E., Kim, M. H., Saterbak, A., Leautaud, V., Bishnoi, S., & Gilberto, J. M. (2019). The effect of authentic project-based learning on attitudes and career aspirations in STEM. *Journal of Research in Science Teaching, 56*(1), 3–23.
- Berland, L. K., & McNeill, K. L. (2010). A learning progression for scientific argumentation: Understanding student work and designing supportive instructional contexts: Learning Progression for Scientific Argumentation. *Science Education, 94*(5), 765–793.

- Bernholt, S., Höft, L., & Parchmann, I. (2020). Die Entwicklung fachlicher Basiskonzepte im Chemieunterricht – Findet ein kumulativer Aufbau im Kompetenzbereich Fachwissen statt? *Unterrichtswissenschaft*, 48(1), 35–59.
- Bernholt, S., Neumann, K., & Sumfleth, E. (2018). Learning Progressions. In *Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 209–225). Springer.
- Blumenfeld, P. C., Soloway, E., Marx, R. W., Krajcik, J. S., Guzdial, M., & Palincsar, A. (1991). Motivating Project-Based Learning: Sustaining the Doing, Supporting the Learning. *Educational Psychologist*.
- Braaten, M. (2019). Persistence of the two-worlds pitfall: Learning to teach within and across settings. *Science Education*, 103(1), 61–91.
- Bransford, J. D., Brown, A. L., & Cocking, R. R. (2000). *How People Learn: Brain, Mind, Experience, and School*. National Academies Press.
- Breuer, J., Vogelsang, C., & Reinhold, P. (2018). Implementation fachdidaktischer Innovation am Beispiel des Münchener Unterrichtskonzepts zur Quantenmechanik. *PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*, 1.
- Brooks, J. G., & Brooks, M. G. (1999). *In search of understanding: The case for constructivist classrooms*. Ascd.
- Brown, A. L. (1992). Design Experiments: Theoretical and Methodological Challenges in Creating Complex Interventions in Classroom Settings. *Journal of the Learning Sciences*, 2(2), 141–178.
- Brown, J. S., Collins, A., & Duguid, P. (1989). Situated Cognition and the Culture of Learning. *Educational Researcher*, 18(1), 32–42.
- Bruner, J. S. (1980). *Der Prozeß der Erziehung. Sprache und Lernen* (5. Aufl., Bd. 4). Berlin-Verlag.
- Bybee, R. (1997). *Achieving Scientific Literacy: Based on Brunner's 5E Instructional Model*.
- Bybee, R. W. (2014). NGSS and the Next Generation of Science Teachers. *Journal of*

- Science Teacher Education*, 25(2), 211–221.
- Chai, C. S., Koh, J. H. L., & Tsai, C.-C. (2013). A review of technological pedagogical content knowledge. *Journal of Educational Technology & Society*, 16 (2), 31–51.
- Chi, M. T., Feltovich, P. J., & Glaser, R. (1981). Categorization and representation of physics problems by experts and novices. *Cognitive science*, 5(2), 121–152.
- Cobb, P., Confrey, J., diSessa, A., Lehrer, R., & Schauble, L. (2003). Design Experiments in Educational Research. *Educational Researcher*, 32(1), 9–13.
- Coburn, W. W., Schuster, D., Adams, B., Applegate, B., Skjold, B., Undreiu, A., Loving, C. C., & Gobert, J. D. (2010). Experimental comparison of inquiry and direct instruction in science. *Research in Science & Technological Education*, 28(1), 81–96.
- Coburn, C. E. (2003). Rethinking Scale: Moving Beyond Numbers to Deep and Lasting Change. *Educational Researcher*, 32(6), 3–12.
- Coelho, R. L. (2009). On the Concept of Energy: How Understanding its History can Improve Physics Teaching. *Science & Education*, 18(8), 961–983.
- Condliffe, B. (2017). Project-Based Learning: A Literature Review. Working Paper. MDRC.
- Coopersmith, J. (2015). *Energy, the subtle concept: The discovery of Feynman's blocks from Leibniz to Einstein*. Oxford University Press, USA.
- Csardi, G., & Nepusz, T. (2006). The igraph software package for complex network research. *InterJournal, complex systems*, 1695(5), 1–9.
- Demuth, R., Ralle, B., & Parchmann, I. (2005). Basiskonzepte—Eine Herausforderung an den Chemieunterricht. *CHEMKON*, 12(2), 55–60.
- Dibner, K. A., Schweingruber, H. A., & Christakis, D. A. (2020). Reopening K-12 Schools During the COVID-19 Pandemic: A Report From the National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. *JAMA*, 324(9), 833.
- DiSessa, A. A. (2013). A bird's-eye view of the „pieces“ vs. „coherence“ controversy (from the „pieces“ side of the fence). In *International Handbook of Research on Conceptual Change*.

- diSessa, A. A. (2018). A Friendly Introduction to “Knowledge in Pieces”: Modeling Types of Knowledge and Their Roles in Learning. In G. Kaiser, H. Forgasz, M. Graven, A. Kuzniak, E. Simmt, & B. Xu (Hrsg.), *Invited Lectures from the 13th International Congress on Mathematical Education* (S. 65–84). Springer International Publishing.
- Doménech, J. L., Gil-Pérez, D., Gras-Martí, A., Guisasola, J., Martínez-Torregrosa, J., Salinas, J., Trumper, R., Valdés, P., & Vilches, A. (2007). Teaching of Energy Issues: A Debate Proposal for a Global Reorientation. *Science & Education*, *16*(1), 43–64.
- Dörfel, G., & Müller, F. (2003). Crookes’ Radiometer und Geißlers Lichtmühle—Kooperation oder Konkurrenz? *NTM International Journal of History and Ethics of Natural Sciences, Technology and Medicine*, *11*(3), 171–190. <https://doi.org/10.1007/s00048-003-0160-0>
- Döring, N., & Bortz, J. (2016). *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften* (5. vollständig überarbeitete, aktualisierte und erweiterte Auflage). Springer.
- Driver, R., & Warrington, L. (1985). Students’ use of the principle of energy conservation in problem situations. *Physics Education*.
- Duit, R. (1973). *Über langzeitliches Behalten von Verhaltensdispositionen in einem physikalischen Spiralcurriculum: Eine empirische Untersuchung bei einer Unterrichtseinheit über "Ausdehnung bei Erwärmung und Temperaturmessungen" im 6. Schuljahr unter Benutzung des lernpsychologischen Ansatzes von Gagné und eines stochastischen Ansatzes zur Beschreibung des Testverhaltens*. Verlag nicht ermittelbar.
- Duit, R. (1986). Energievorstellungen. *Naturwissenschaften im Unterricht-Physik/Chemie*, *34*(13), 7–9.
- Duit, R. (1987). Should energy be illustrated as something quasi-material? *International Journal of Science Education*, *9*(2), 139–145.
- Duit, R. (1995). *Zur Rolle der konstruktivistischen Sichtweise in der naturwissenschaftsdidaktischen Lehr- und Lernforschung*.
- Duit, R. (2014). Teaching and Learning the Physics Energy Concept. In R. F. Chen, A.

- Eisenkraft, D. Fortus, J. S. Krajcik, K. Neumann, J. Nordine, & A. Scheff (Hrsg.), *Teaching and Learning of Energy in K – 12 Education* (S. 67–85). Springer International Publishing.
- Duit, R., Gropengießer, H., Kattmann, U., Komorek, M., & Parchmann, I. (2012). *The Model of Educational Reconstruction – A Framework for Improving Teaching and Learning Science* (S. 13–37). Brill | Sense.
- Duit, R., & Mikelskis-Seifert, S. (2015). Piko-Brief Nr. 5 Kontextorientierter Physikunterricht. *Duit, R.: Piko-Briefe-Der fachdidaktische Forschungsstand kurzgefasst*
- Duit, R., & Treagust, D. F. (2003). Conceptual change: A powerful framework for improving science teaching and learning. *International Journal of Science Education*, 25(6), 671–688.
- Duncan, R. G., & Gotwals, A. W. (2015). A Tale of Two Progressions: On the Benefits of Careful Comparisons: TALE OF TWO PROGRESSIONS. *Science Education*, 99(3), 410–416.
- Duncan, R. G., & Hmelo-Silver, C. E. (2009). Learning progressions: Aligning curriculum, instruction, and assessment. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 606–609.
- Duschl, R. A., Schweingruber, H. A., & Shouse, A. W. (2007). *Taking science to school: Learning and teaching science in grades K-8*. National Academies Press.
- Ejersbo, L. R., Engelhardt, R., Frølund, L., Hanghøj, T., Magnussen, R., & Misfeldt, M. (2008). Balancing product design and theoretical insights. *The handbook of design research methods in education: Innovations in science, technology, engineering and mathematics learning and teaching*, 149–164.
- Erickson, H. L. (2002). *Concept-based curriculum and instruction: Teaching beyond the facts*. ERIC.
- Euler, M. (2011). *Energiebildung als Herausforderung und Chance*. <https://www.lehrer-online.de/unterricht/sekundarstufen/naturwissenschaften/physik/artikel/fa/energiebildung-als-herausforderung-und-chance/>

- Feynman, R. P., Leighton, R. B., Sands, M. L., & Feynman, R. P. (2007). *Mainly mechanics, radiation, and heat* (Nachdr.). Addison-Wesley.
- Fischer, H. E., Glemnitz, I., Kauertz, A., & Sumfleth, E. (2007). Auf Wissen aufbauen-kumulatives Lernen in Chemie und Physik. In *Physikdidaktik* (S. 657–678). Springer.
- Fischer, J. A., Steinmann, T., Kubsch, M., Laumann, D., Wessnigk, S., Neumann, K., & Kerres, M. (2021). Die Rettung der Phänomene! *MNU Journal*, 74(2), 140–145.
- Fließbach, T. (2015). *Mechanik*. Springer Berlin Heidelberg.
- Fortus, D. (2012). *IQWST – Investigating and Questioning our World through Science and Technology*. Sangari Science.
- Fortus, D., Abdel-Kareem, H., Chen, J., Forsyth, B., Grueber, D. J., Nordine, J., & Weizman, A. (2012). *Why do some things stop while others keep going? Transfer, Transformation, and Conservation of Energy*. Activate Learning.
- Fortus, D., & Krajcik, J. S. (2012). Curriculum coherence and learning progressions. In *Second International Handbook of Science Education*.
- Fortus, D., Kubsch, M., Bielik, T., Krajcik, J. S., Lehavi, Y., Neumann, K., Nordine, J., Opitz, S., & Touitou, I. (2019). Systems, transfer, and fields: Evaluating a new approach to energy instruction. *Journal of Research in Science Teaching*, 56(10), 1341–1361.
- Fortus, D., Sutherland Adams, L. M., Krajcik, J. S., & Reiser, B. (2015). Assessing the role of curriculum coherence in student learning about energy: ROLE OF CURRICULUM COHERENCE. *Journal of Research in Science Teaching*, 52(10), 1408–1425.
- Foster. (2022, März 21). *Moodle 1.9.5 is certified SCORM 1.2 compliant*. <https://moodle.org/mod/forum/discuss.php?d=135994>
- Freeman, L. C. (1978). Centrality in social networks conceptual clarification. *Social networks*, 1(3), 215–239.
- Gagné, R. M. (1970). *The conditions of learning* (2. Aufl.). Holt Rinehard and Winston.
- Gaspard, H., Dicke, A.-L., Flunger, B., Schreier, B., Häfner, I., Trautwein, U., & Nagengast, B. (2015). More value through greater differentiation: Gender differences in value

- beliefs about math. *Journal of Educational Psychology*, 107(3), 663–677.
- Geier, R., Blumenfeld, P. C., Marx, R. W., Krajcik, J. S., Fishman, B., Soloway, E., & Clay-Chambers, J. (2008). Standardized test outcomes for students engaged in inquiry-based science curricula in the context of urban reform. *Journal of Research in Science Teaching*, 45(8), 922–939.
- Giancoli, D. C., Eibl, O., & Giancoli, D. C. (2011). *Physik: Lehr- und Übungsbuch* (3., erw. Aufl., [Nachdr.]). Pearson Studium.
- Gleixner, C., Heckmann, G., Lohrer, A., Nürnberger, M., Pippig, R., Schmitter, S., & Spießl, P. (2020). *Dorn Bader–Natur und Technik, Schwerpunkt Physik 8*.
- Gräsel, C., & Parchmann, I. (2004). Implementationsforschung-oder: Der steinige Weg, Unterricht zu verändern. *Unterrichtswissenschaft*, 32(3), 196–214.
- Greeno, J. G. (1998). The situativity of knowing, learning, and research. *American Psychologist*, 53(1), 5–26.
- Greeno, J. G., & Engeström, Y. (2014). Learning in Activity. In R. K. Sawyer (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of the Learning Sciences* (2. Aufl., S. 128–148). Cambridge University Press.
- Hackman, D. A., & Farah, M. J. (2009). Socioeconomic status and the developing brain. *Trends in Cognitive Sciences*, 13(2), 65–73.
- Hadenfeldt, J. C., Liu, X., & Neumann, K. (2014). Framing students' progression in understanding matter: A review of previous research. *Studies in Science Education*, 50(2), 181–208.
- Halloun, I. A. (2004). *Modeling theory in science education*. Kluwer Academic Publishers.
- Halvorsen, A.-L., Duke, N. K., Brugar, K. A., Block, M. K., Strachan, S. L., Berka, M. B., & Brown, J. M. (2012). Narrowing the achievement gap in second-grade social studies and content area literacy: The promise of a project-based approach. *Theory & Research in Social Education*, 40(3), 198–229.
- Hamilton, L., Kaufman, J., & Diliberti, M. (2020). *Teaching and Leading Through a*

- Pandemic: Key Findings from the American Educator Panels Spring 2020 COVID-19 Surveys*. RAND Corporation.
- Hammer, D., & Sikorski, T.-R. (2015). Implications of complexity for research on learning progressions. *Science Education*, 99(3), 424–431.
- Harris, C. J., Penuel, W. R., D'Angelo, C. M., DeBarger, A. H., Gallagher, L. P., Kennedy, C. A., Cheng, B. H., & Krajcik, J. S. (2015). Impact of project-based curriculum materials on student learning in science: Results of a randomized controlled trial. *Journal of Research in Science Teaching*, 52(10), 1362–1385.
- Hattie, J. (2009). *Visible learning: A synthesis of over 800 meta-analyses relating to achievement*. Routledge.
- Helmke, A. (2009). *Unterrichtsqualität und Lehrerprofessionalität*. Seelze: Klett-Kallmeyer.
- Herrmann-Abell, C. F., & DeBoer, G. E. (2018). Investigating a learning progression for energy ideas from upper elementary through high school. *Journal of Research in Science Teaching*.
- Hertel, I. V., & Großmann, S. (2016). *Physik in der Schule: Hauptteil mit Anlage Basiskonzepte*. Deutsche Physikalische Gesellschaft eV (DPG).
- Höbarth, U. (2013). *Konstruktivistisches Lernen mit Moodle: Praktische Einsatzmöglichkeiten in Bildungsinstitutionen* (3., aktualisierte und erg. Aufl). Hülsbusch.
- Hoeksema, K., & Kuhn, M. (2011). *Unterrichten mit Moodle 2: Praktische Einführung in das E-Teaching* (2. Aufl). Open Source Press.
- Immordino-Yang, M. H., & Fischer, K. W. (2010). Brain Development. In I. B. Weiner & W. E. Craighead (Hrsg.), *The Corsini Encyclopedia of Psychology* (S. corpsy0142). John Wiley & Sons, Inc.
- IMS LTI® 1.3 and LTI Advantage. (2022). *IMS LTI® 1.3 and LTI Advantage*. <https://www.imslobal.org/activity/learning-tools-interoperability#ltiresources>

- John, T., & Starauschek, E. (2021). Ein Modell für Kumulatives Lehren im Lehramtsstudium Physik. *PhyDid A-Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, 1(19), 23–44.
- Jung, W. (1983). *Anstöße-ein Essay über die Didaktik der Physik und ihre Probleme*. Diesterweg.
- Kaper, W. H., & Goedhart, M. J. (2002). „Forms of Energy“, an intermediary language on the road to thermodynamics? Part I. *International Journal of Science Education*, 24(1), 81–95.
- Kattmann, U., Duit, R., Gropengiesser, H., & Komorek, M. (1997). *Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion – Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung*. 3, 3–18.
- Kesidou, S., & Roseman, J. E. (2002). How well do middle school science programs measure up? Findings from Project 2061's curriculum review. *Journal of Research in Science Teaching*, 39(6), 522–549.
- Kirk, D., & MacDonald, D. (2001). Teacher voice and ownership of curriculum change. *Journal of Curriculum Studies*, 33(5), 551–567.
- Klieme, E., Avenarius, H., Blum, W., Döbrich, P., Gruber, H., Prenzel, M., Reiss, K., Riquarts, K., Rost, J., Tenorth, H.-E., & Vollmer, H. J. (2003). *Bundesministerium für Bildung und Forschung: Zur Entwicklung nationaler Bildungsstandards. Eine Expertise*. DIPF Frankfurt am Main.
- KMK. (2005). *Beschlüsse der Kultusministerkonferenz: Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Bildungsabschluss*.  
[https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen\\_beschluesse/2004/2004\\_12\\_16-Bildungsstandards-Physik-Mittleren-SA.pdf](https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Bildungsstandards-Physik-Mittleren-SA.pdf)
- KMK. (2016). *Bildung in der digitalen Welt. Strategie der Kultusministerkonferenz*.  
[https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/pdf/PresseUndAktuelles/2018/Digitalstrategie\\_2017\\_mit\\_Weiterbildung.pdf](https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/pdf/PresseUndAktuelles/2018/Digitalstrategie_2017_mit_Weiterbildung.pdf)
- KMK, K. (2003). *Bildungsstandards im Fach Mathematik für den Mittleren Schulabschluss—Beschluss vom 4.12.2003*.

- KMK, K. (2004a). *Bildungsstandards für das Fach Chemie für den Mittleren Schulabschluss – Beschluss vom 16.12. 2004.*  
[https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen\\_beschluesse/2004/2004\\_12\\_16-Bildungsstandards-Chemie.pdf](https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Bildungsstandards-Chemie.pdf)
- KMK, K. (2004b). *Bildungsstandards im Fach Biologie für den Mittleren Schulabschluss— Beschluss vom 16.12. 2004.*  
[https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen\\_beschluesse/2004/2004\\_12\\_16-Bildungsstandards-Biologie.pdf](https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Bildungsstandards-Biologie.pdf)
- Koponen, I. T., & Huttunen, L. (2013). Concept Development in Learning Physics: The Case of Electric Current and Voltage Revisited. *Science & Education, 22*(9), 2227–2254.
- Krajcik, J., McNeill, K. L., & Reiser, B. J. (2008). Learning-goals-driven design model: Developing curriculum materials that align with national standards and incorporate project-based pedagogy. *Science Education, 92*(1), 1–32.
- Krajcik, J. S., Blumenfeld, P. C., Marx, R. W., Bass, K. M., Fredricks, J., & Soloway, E. (1998). Inquiry in Project-Based Science Classrooms: Initial Attempts by Middle School Students. *Journal of the Learning Sciences, 7*(3–4), 313–350.  
<https://doi.org/10.1080/10508406.1998.9672057>
- Krajcik, J. S., & Czerniak, C. M. (2014). *Teaching science in elementary and middle school: A project-based approach.* Routledge.
- Krajcik, J. S., & Shin, N. (2014). Project-based learning. In *The Cambridge Handbook of the Learning Sciences, Second Edition* (S. 275–297). Cambridge University Press.
- Krajcik, J. S., Sutherland, L., Drago, K., & Merritt, J. (2012). The promise and value of learning progression research. *Making it tangible: Learning outcomes in science education, 261–284.*
- Kubsch, M., Nordine, J., Neumann, K., Fortus, D., & Krajcik, J. S. (2019). Probing the Relation between Students' Integrated Knowledge and Knowledge-in-Use about Energy using Network Analysis. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education.*

- Lacy, S., Tobin, R. G., Wiser, M., & Crissman, S. (2014). Looking Through the Energy Lens: A Proposed Learning Progression for Energy in Grades 3–5. In R. F. Chen, A. Eisenkraft, D. Fortus, J. S. Krajcik, K. Neumann, J. Nordine, & A. Scheff (Hrsg.), *Teaching and Learning of Energy in K – 12 Education* (S. 241–265). Springer International Publishing.
- Lam, S., Cheng, R. W., & Choy, H. C. (2010). School support and teacher motivation to implement project-based learning. *Learning and Instruction, 20*(6), 487–497.
- Lau, A. (2011). *Passung und vertikale Vernetzung im Chemie-und Physikunterricht* (Bd. 124). Logos Verlag Berlin GmbH.
- Laumann, D. (2017). *Magnetismus hoch 4: Fachliche Strukturierung und Entwicklung multipler Repräsentationen zum Magnetismus für die Hochschule*. Logos Verlag.
- Laumann, D., Fischer, J., Weßnigk, S., Kerres, M., Wenderoth, D., & Neumann, K. (2018). Entwicklung basiskonzeptorientierter Unterrichtseinheiten zur Energie. *Naturwissenschaftliche Bildung als Grundlage für berufliche und gesellschaftliche Teilhabe. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik Jahrestagung in Kiel 2018*, 815–818.
- Lave, J., & Wenger, E. (1991). *Situated learning: Legitimate peripheral participation*. Cambridge university press.
- Leary, H., Severance, S., Penuel, W. R., Quigley, D., Sumner, T., & Devaul, H. (2016). Designing a Deeply Digital Science Curriculum: Supporting Teacher Learning and Implementation with Organizing Technologies. *Journal of Science Teacher Education, 27*(1), 61–77.
- Lee, H., & Liu, O. L. (2010). Assessing learning progression of energy concepts across middle school grades: The knowledge integration perspective. *Science Education, 94*(4), 665–688.
- Lee, H.-S., & Butler, N. (2003). Making authentic science accessible to students. *International Journal of Science Education, 25*(8), 923–948.
- Lee, O., & Buxton, C. A. (2010). *Diversity and equity in science education: Research, policy, and practice*. Teachers College Press.

- Lehrer, R., & Schauble, L. (2015). Learning Progressions: The Whole World is NOT a Stage. *Science Education*, 99(3), 432–437.
- Lersch, R., & Schreder, G. (2013). *Grundlagen kompetenzorientierten Unterrichtens: Von den Bildungsstandards zum Schulcurriculum*. Budrich.
- Linn, M. C. (2006). The knowledge integration perspective on learning and instruction. In *The Cambridge handbook of: The learning sciences*. Cambridge University Press.
- Lipowsky, F. (2015). Unterricht. In *Pädagogische Psychologie* (S. 69–105). Springer.
- Liu, X., & McKeough, A. (2005). Developmental growth in students' concept of energy: Analysis of selected items from the TIMSS database. *Journal of Research in Science Teaching: The Official Journal of the National Association for Research in Science Teaching*, 42(5), 493–517.
- Llewellyn, D. (2014). *Inquire within: Implementing inquiry- and argument-based science standards in grades 3-8*.
- Luiten, J., Ames, W., & Ackerson, G. (1980). A Meta-analysis of the Effects of Advance Organizers on Learning and Retention. *American Educational Research Journal*, 17(2), 211–218.
- Mandl, H. (2006). *Wissensaufbau aktiv gestalten: Lernen aus konstruktivistischer Sicht*. na.
- Marion, S., & Shepard, L. (2010). *Let's not forget about opportunity to learn: Curricular support for innovative assessments*.
- Mayring, P. (2014). *Qualitative content analysis: Theoretical foundation, basic procedures and software solution*.
- McKenney, S. (2014). Research-Based Design & Design-Based Research: Affordances, Limitations & Synergies. *E-Learn: World Conference on E-Learning 2014*. <https://www.learntechlib.org/p/149084>
- McKenney, S., & Reeves, T. C. (2012). *Conducting educational research design: What, why and how*. Taylor & Francis.

- McKenney, S., & Reeves, T. C. (2018). *Conducting educational design research*. Routledge.
- Merritt, J., Lee, M. Y., Rillero, P., & Kinach, B. M. (2017). Problem-Based Learning in K–8 Mathematics and Science Education: A Literature Review. *Interdisciplinary Journal of Problem-Based Learning, 11*(2).
- Mikelskis-Seifert, S., & Duit, R. (2010). Physik im Kontext–Konzepte, Ideen, Materialien für effizienten Physikunterricht. *Seelze: Friedrich Verlag*.
- Millar, R. (2011). Energy. In D. Sang (Hrsg.), *Teaching secondary physics* (S. 1–48). Hodder Education.
- Miller, E. C., & Krajcik, J. S. (2019). Promoting deep learning through project-based learning: A design problem. *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research, 1*(1), 7.
- Miller, E. C., Reigh, E., Berland, L., & Krajcik, J. S. (2021). Supporting Equity in Virtual Science Instruction Through Project-Based Learning: Opportunities and Challenges in the Era of COVID-19. *Journal of Science Teacher Education, 1–22*.
- Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen. (2008). *Kernlehrplan für das Gymnasium – Sekundarstufe I in Nordrhein-Westfalen. Physik*.
- Ministerium für Schule und Weiterbildung & des Landes Nordrhein-Westfalen. (2008). *Kernlehrplan für das Gymnasium – Sekundarstufe I in Nordrhein-Westfalen Physik*. Ritterbach Verlag.
- Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen. (2019). *Kernlehrplan für die Sekundarstufe I Gymnasium in Nordrhein-Westfalen. Physik* (1. Aufl.).
- Moje, E. B., Collazo, T., Carrillo, R., & Marx, R. W. (2001). "Maestro, what is 'quality'?: Language, literacy, and discourse in project-based science. *Journal of Research in Science Teaching, 38*(4), 469–498.
- Möller, K. (2007). Genetisches Lernen und Conceptual Change. *Handbuch Didaktik des Sachunterrichts, 258–266*.

- Moore, E. B., Chamberlain, J. M., Parson, R., & Perkins, K. K. (2014). PhET Interactive Simulations: Transformative Tools for Teaching Chemistry. *Journal of Chemical Education*, *91*(8), 1191–1197.
- Morell, L., Collier, T., Black, P., & Wilson, M. (2017). A construct-modeling approach to develop a learning progression of how students understand the structure of matter: LEARNING PROGRESSION-STRUCTURE OF MATTER. *Journal of Research in Science Teaching*, *54* (8), 1024–1048.
- Muckenfuß, H. (1995). *Lernen im sinnstiftenden Kontext: Entwurf einer zeitgemäßen Didaktik des Physikunterrichts*. Cornelsen Berlin.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2018). *How People Learn II: Learners, Contexts, and Cultures* (S. 24783). National Academies Press.
- National Research Council (NRC). (2012). *A framework for K-12 science education: Practices, crosscutting concepts, and core ideas*. National Academies Press.
- Neumann, K. (2013). Mit welchem Auflösungsgrad können Kompetenzen modelliert werden? In welcher Beziehung stehen Modelle zueinander, die Kompetenz in einer Domäne mit unterschiedlichem Auflösungsgrad beschreiben? *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, *16*(S1), 35–39.
- Neumann, K. (2014). Rasch-Analyse naturwissenschaftsbezogener Leistungstests. In D. Krüger, I. Parchmann, & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 355–369). Springer Berlin Heidelberg.
- Neumann, K. (2017). Die Entwicklung physikalischer Kompetenz – Stand der Forschung und Desiderata. *Plus Lucis*, *2* (Kompetenz Physik), 5–8.
- Neumann, K. (2020). Die Bedeutung instruktionaler Kohärenz für eine systematische Kompetenzentwicklung. *Unterrichtswissenschaft*, *48*(1), 1–10.
- Neumann, K., Fischer, H. E., & Kauertz, A. (2010). FROM PISA TO EDUCATIONAL STANDARDS: THE IMPACT OF LARGE-SCALE ASSESSMENTS ON SCIENCE EDUCATION IN GERMANY. *International Journal of Science and Mathematics Education*, *8*(3), 545–563.

- Neumann, K., Fischer, H. E., & Sumfleth, E. (2008). Vertikale Vernetzung und kumulatives Lernen im Chemie- und Physikunterricht. *Pädagogische Professionalität als Gegenstand empirischer Forschung*, 141–151.
- Neumann, K., Kauertz, A., Lau, A., Notarp, H., & Fischer, H. E. (2007). Die Modellierung physikalischer Kompetenz und ihrer Entwicklung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 13, 101–121.
- Neumann, K., & Nordine, J. (2021). Instructional Coherence and the Development of Student Competence in Physics. In H. E. Fischer & R. Girwidz (Hrsg.), *Physics Education* (S. 151–173). Springer International Publishing.
- Neumann, K., Viering, T., Boone, W. J., & Fischer, H. E. (2013a). Towards a learning progression of energy. *Journal of Research in Science Teaching*.
- Neumann, K., Viering, T., Boone, W. J., & Fischer, H. E. (2013b). Towards a learning progression of energy. *Journal of Research in Science Teaching*, 50(2), 162–188.
- NGSS Lead States. (2013). *Next Generation Science Standards: For States, By States*. The National Academies Press.
- Niedersächsisches Kultusministerium. (2015). *Kerncurriculum für das Gymnasium. Schuljahrgänge 5-10. Naturwissenschaften*.
- Nolting, W. (1997). *Grundkurs Theoretische Physik 1 Klassische Mechanik*. Vieweg+Teubner Verlag.
- Nordine, J., Fortus, D., Lehavi, Y., Neumann, K., & Krajcik, J. (2018). Modelling energy transfers between systems to support energy knowledge in use. *Studies in Science Education*, 54(2), 177–206.
- Nordine, J., Krajcik, J., & Fortus, D. (2011). Transforming energy instruction in middle school to support integrated understanding and future learning: Transforming Energy Instruction in Middle School. *Science Education*, 95(4), 670–699.
- Nordine, J., Krajcik, J. S., Fortus, D., & Neumann, K. (2019). Using Storylines to Support Three-Dimensional Learning in Project-Based Science. *Science Scope*, 42(6), 86–93. JSTOR.

- Nordine, J., & Torres, R. (2013). Enhancing science kits with the driving question board. *Science and Children, 50*(8), 57.
- Oliver, M., McConney, A., & Woods-McConney, A. (2021). The Efficacy of Inquiry-Based Instruction in Science: A Comparative Analysis of Six Countries Using PISA 2015. *Research in Science Education, 51* (S2), 595–616.
- Opsahl, T. (2009). *Structure and evolution of weighted networks*. Queen Mary, University of London.
- Papadouris, N., & Constantinou, C. P. (2016a). Investigating middle school students' ability to develop energy as a framework for analyzing simple physical phenomena. *Journal of Research in Science Teaching, 53*(1).
- Papadouris, N., & Constantinou, C. P. (2016b). Investigating middle school students' ability to develop energy as a framework for analyzing simple physical phenomena: ENERGY AS A FRAMEWORK FOR ANALYZING SIMPLE PHYSICAL PHENOMENA. *Journal of Research in Science Teaching, 53*(1), 119–145.
- Pekrun, R., Vogl, E., Muis, K. R., & Sinatra, G. M. (2017). Measuring emotions during epistemic activities: The Epistemically-Related Emotion Scales. *Cognition and Emotion, 31*(6), 1268–1276.
- Penuel, W. R., & Bell, P. (2016). Qualities of a good anchor phenomenon for a coherent sequence of science lessons. *STEM Teaching Tool, 28*.
- Petko, D. (2010). Lernplattformen, E-Learning und Blended Learning in Schulen. In D. Petko (Hrsg.), *Lernplattformen in Schulen* (S. 9–27). VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Plomp, T., & Nieveen, N. (2013). *Educational design research. An introduction*. SLO.
- Prediger, S., & Link, M. (2012). Fachdidaktische Entwicklungsforschung—Ein lernprozessfokussierendes Forschungsprogramm mit Verschränkung fachdidaktischer Arbeitsbereiche. *Formate Fachdidaktischer Forschung. Empirische Projekte—historische Analysen—theoretische Grundlegungen. Fachdidaktische Forschungen, 2*, 29–46.

- R Development Core Team. (2013). *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria. <https://www.r-project.org>
- Reinmann, G. (2005). Innovation ohne Forschung? Ein Plädoyer für den Design-Based Research-Ansatz in der Lehr-Lernforschung. *Unterrichtswissenschaft*, 33(1), 52–69.
- Reinmann, G., & Mandl, H. (2006). *Unterrichten und Lernumgebungen gestalten: In Krapp, A.; Weidemann, B.(Hrsg.): Pädagogische Psychologie; 5. Vollständig überarbeitete Auflage.*
- Reiser, B. J. (2017). Developing coherent storylines to support three-dimensional science learning. *Rhode Island Science Teachers Association (RISTA) Conference*.
- Reiser, B. J., Novak, M., & McGill, T. A. (2017). *Coherence from the students' perspective: Why the vision of the framework for K-12 science requires more than simply "combining" three dimensions of science learning.*
- Reiss, K., Sälzer, C., Schiepe-Tiska, A., Klieme, E., & Köller, O. (Hrsg.). (2016). *PISA 2015: Eine Studie zwischen Kontinuität und Innovation*. Waxmann.
- Reiss, K., Weis, M., Klieme, E., & Köller, O. (2019). PISA 2018. *Grundbildung im internationalen Vergleich. Zusammenfassung*. Waxmann. Abgerufen am, 3, 2020.
- Riemeier, T. (2007). Moderater Konstruktivismus. In *Theorien in der biologiedidaktischen Forschung* (S. 69–79). Springer.
- Riga, F., Winterbottom, M., Harris, E., & Newby, L. (2017). Inquiry-based science education. In *Science education* (S. 247–261). Brill Sense.
- Ringeltaube-Stadler, A. (2020). Homeschooling: Hat sich die „Bildungsschere“ weiter geöffnet? *Schwerpunkt BILDUNGSverSUCHE*, 113.
- Rivet, A. E., & Krajcik, J. S. (2004). Achieving standards in urban systemic reform: An example of a sixth grade project-based science curriculum. *Journal of Research in Science Teaching*, 41(7), 669–692.

- Roblin, N. P., Schunn, C., & McKenney, S. (2018). What are critical features of science curriculum materials that impact student and teacher outcomes? *Science Education*, *102*(2), 260–282.
- Romrell, D., Kidder, L., & Wood, E. (2014). The SAMR Model as a Framework for Evaluating mLearning. *Online Learning Journal*, *18*(2).
- Roth, G. (1997). *Das Gehirn und seine Wirklichkeit. Kognitive Neurobiologie und ihre philosophischen Konsequenzen*. Suhrkamp Verlag.
- Sadler, T. D. (2009). Situated learning in science education: Socio-scientific issues as contexts for practice. *Studies in Science Education*, *45*(1), 1–42.
- Sandoval, W. (2014). Conjecture Mapping: An Approach to Systematic Educational Design Research. *Journal of the Learning Sciences*, *23*(1), 18–36.
- Schecker, H., & Duit, R. (2018). Schülervorstellungen zu Energie und Wärmekraftmaschinen. In H. Schecker, T. Wilhelm, M. Hopf, & R. Duit (Hrsg.), *Schülervorstellungen und Physikunterricht* (S. 163–183). Springer Berlin Heidelberg.
- Schecker, H., & Parchmann, I. (2006). Modellierung naturwissenschaftlicher Kompetenz. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, *12*(1), 45–66.
- Schecker, H., Parchmann, I., & Krüger, D. (2018). Theoretische Rahmung naturwissenschaftsdidaktischer Forschung. In D. Krüger, I. Parchmann, & H. Schecker (Hrsg.), *Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 1–9). Springer Berlin Heidelberg.
- Schecker, H., & Wiesner, H. (2007). Die Bildungsstandards Physik, Orientierungen–Erwartungen–Grenzen–Defizite. *Praxis der Naturwissenschaften–Physik in der Schule*, *56*(6), 5–13.
- Schlichting, H. J., & Ucke, C. (2014). Streng geheim: Der ewige Kreisel: Spielwiese. *Physik in Unserer Zeit*, *45*(6), 284–287.
- Schmidt, W. H., Wang, H. C., & McKnight, C. C. (2005). Curriculum coherence: An examination of US mathematics and science content standards from an international perspective. *Journal of Curriculum Studies*.

- Schneider, B. L., Krajcik, J. S., Lavonen, J., & Salmela-Aro, K. (2020). *Learning science: The value of crafting engagement in science environments*. Yale University Press.
- Schulmeister, R. (2017). *Lernplattformen für das virtuelle Lernen: Evaluation und Didaktik*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.
- Schwarz, C. V., Reiser, B. J., Davis, E. A., Kenyon, L., Achér, A., Fortus, D., Shwartz, Y., Hug, B., & Krajcik, J. S. (2009). Developing a learning progression for scientific modeling: Making scientific modeling accessible and meaningful for learners. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 632–654.
- Shwartz, Y., Weizman, A., Fortus, D., Krajcik, J. S., & Reiser, B. (2008). The IQWST experience: Using coherence as a design principle for a middle school science curriculum. In *Elementary School Journal*.
- Siebert, H. (2003). *Pädagogischer Konstruktivismus: Lernen als Konstruktion von Wirklichkeit*. Luchterhand.
- Sikorski, T.-R., & Hammer, D. (2017). Looking for coherence in science curriculum. *Science Education*, 101(6), 929–943.
- Skinner, B. F., & Correll, W. (1971). *Erziehung als Verhaltensformung: Grundlagen einer Technologie des Lehrens*. Keimer.
- Smith III, J. P., diSessa, A. A., & Roschelle, J. (1994). Misconceptions Reconceived: A Constructivist Analysis of Knowledge in Transition. *Journal of the Learning Sciences*, 3(2), 115–163.
- Stokes, D. E. (1997). *Pasteur's quadrant: Basic science and technological innovation*. Brookings Institution Press.
- Swackhamer, G. (2005). *Cognitive resources for understanding energy*.
- Terhart, E. (2012). *Konstruktivismus und Unterricht. Gibt es einen neuen Ansatz in der Allgemeinen Didaktik?*
- The Design-Based Research Collective. (2003). Design-Based Research: An Emerging Paradigm for Educational Inquiry. *Educational Researcher*, 32(1), 5–8.

- Thuneberg, H. M., Salmi, H. S., & Bogner, F. X. (2018). How creativity, autonomy and visual reasoning contribute to cognitive learning in a STEAM hands-on inquiry-based math module. *Thinking Skills and Creativity*, 29, 153–160.
- Tiemann, E. (2006). *Lebendige Kraft wird Energie. Leibniz' Beitrag zur Kinetik*. [http://slubdd.de/katalog?TN\\_libero\\_mab2](http://slubdd.de/katalog?TN_libero_mab2)
- Usak, M., Masalimova, A. R., Cherdymova, E. I., & Shaidullina, A. R. (2020). NEW PLAYMAKER IN SCIENCE EDUCATION: COVID-19. *Journal of Baltic Science Education*, 19(2), 180–185.
- Van den Akker, J. (1999). Principles and methods of development research. In *Design approaches and tools in education and training* (S. 1–14). Springer.
- Viering, T. (2012). *Entwicklung Physikalischer Kompetenz in der Sekundarstufe I: Validierung Eines Kompetenzentwicklungsmodells Für das Energiekonzept Im Bereich Fachwissen* (Bd. 138). Logos Verlag Berlin GmbH.
- Vollrath, H.-J., & Weigand, H.-G. (2009). *Algebra in der Sekundarstufe* (3. Aufl., [Nachdr.]). Spektrum Akademischer Verlag.
- von Aufschnaiter, C. (1999). *Bedeutungsentwicklungen, Interaktionen und situatives Erleben beim Bearbeiten physikalischer Aufgaben: Fallstudien zu Bedeutungsentwicklungsprozessen von Studierenden und Schüler (inne) n in einer Feld- und einer Laboruntersuchung zum Themengebiet Elektrostatik und Elektrodynamik*. Logos-Verlag.
- von Aufschnaiter, S., Fischer, H. E., & Schwedes, H. (1992). Kinder konstruieren Welten. Perspektiven einer konstruktivistischen Physikdidaktik. *Kognition und Gesellschaft. Frankfurt am Main: Suhrkamp*.
- von Glasersfeld, E. (1997). *Radikaler Konstruktivismus: Ideen, Ergebnisse, Probleme* (1. Aufl.). Suhrkamp.
- Vosniadou, S. (Hrsg.). (2013). *International Handbook of Research on Conceptual Change* (0 Aufl.). Routledge.
- Wagenschein. (1976). Rettet die Phänomene! *Scheidewege*.

- Wagenschein, M. (1991). *Verstehen lernen*. (9.). Beltz.
- Warm, T. A. (1989). Weighted likelihood estimation of ability in item response theory. *Psychometrika*, 54(3), 427–450.
- Warren, J. W. (1982). The nature of energy. *European Journal of Science Education*, 4(3), 295–297.
- Weinert, F. E. (1999). Die fünf Irrtümer der Schulreformer. Welche Lehrer, welchen Unterricht braucht das Land? *Psychologie heute*, 26, 28–34.
- Weinert, F. E. (2001). Concept of competence: A conceptual clarification. In Rychen, D. S./Salganik L. H. (Hrsg.): *Defining and selecting key competencies*. Hogrefe & Huber.
- Weßnigk, S., Neumann, K., & Kerres, M. (2020). Energie unterrichten über eine digitale Lehr-Lernplattform. *Unterricht Physik*, 179, 31–36.
- Weßnigk, S., Neumann, K., Viering, T., Hadinek, D., & Fischer, H. E. (2017). The Development of Students' Physics Competence in Middle School. In D. Leutner, J. Fleischer, J. Grünkorn, & E. Klieme (Hrsg.), *Competence Assessment in Education* (S. 247–262). Springer International Publishing.
- Westermann Schulbuchverlag. (2020). *Blickpunkt Physik*.
- Wilhelm, T., Tobias, V., Waltner, C., Hopf, M., & Wiesner, H. (2011). Design-based research am beispiel der zweidimensional-dynamischen mechanik. *Konzepte fachdidaktischer Strukturierung für den Unterricht, Jahrestagung der GDGP in Oldenburg*, 31–47.
- Willerman, M., & Mac Harg, R. A. (1991). The concept map as an advance organizer. *Journal of Research in Science Teaching*, 28(8), 705–711.
- Wodzinski, R. (2020). Physikalische Fachkonzepte anbahnen – Anschlussfähigkeit verbessern. In E. Kircher, R. Girwidz, & H. E. Fischer (Hrsg.), *Physikdidaktik / Grundlagen* (S. 573–602). Springer Berlin Heidelberg.

- Won, M., Krabbe, H., Ley, S. L., Treagust, D. F., & Fischer, H. E. (2017). Science Teachers' Use of a Concept Map Marking Guide as a Formative Assessment Tool for the Concept of Energy. *Educational Assessment, 22*(2), 95–110.
- Zendler, A. (Hrsg.). (2018). *Unterrichtsmethoden für MINT-Fächer: Bausteine für die Verbesserung von Lernwirksamkeit und Unterrichtsqualität*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Zhang, L., Kirschner, P. A., Cobern, W. W., & Sweller, J. (2022). There is an Evidence Crisis in Science Educational Policy. *Educational Psychology Review, 34*(2), 1157–1176.

## 8. Anhang

### 8.1. Interviewleitfaden

*Zeitplanung: Ein Interview pro Schülerin bzw. Schüler sollte max. 15 min dauern.*

- 1) **Für die Durchführung wird ein Tablet/Smartphone zum Abspielen der Videos und ein Aufnahmegerät benötigt. Mithilfe einer App (z.B. Diktiergerät) kann die Aufnahme und das Video auf dem gleichen Gerät stattfinden. Es ist sicherzustellen, dass die Aufnahme beim Abspielen des Videos nicht unterbrochen wird.**
- 2) **Einleitung:** „Hallo, ich heiße ... ich arbeite an der Universität/am Institut ... und möchte dabei helfen, den Physikunterricht zu verbessern. Deswegen machen wir gleich ein kurzes Interview.“

Ich würde gerne mit dir ca. 10 min sprechen und dabei etwas über deine Ideen und Vorstellungen erfahren. Dabei möchte ich nicht wissen, ob du etwas richtig oder falsch beantworten kannst. Ich zeige dir gleich jeweils immer ein kurzes Video und möchte dich dann bitten, das was du gesehen hast, mithilfe naturwissenschaftlicher Ideen zu erklären. Wenn du etwas erklärst, werde ich auch vielleicht auch was nachfragen, aber nur, um deine Ideen besser zu verstehen und nicht, um dich zu verbessern. Es ist vielleicht am Anfang etwas seltsam, so zu sprechen, aber ich möchte ja etwas über deine Ideen und Vorstellungen lernen und nicht, ob du etwas richtig oder falsch beantworten kannst.“

Ich würde außerdem gerne unser Gespräch aufnehmen. Ist das für dich ok?

- 3) **Aufnahme starten und fragen:** “Also habe ich deine Zustimmung, das Gespräch aufzunehmen?“

*Auf Zustimmung warten*

- 4) **Informationen:** Wie ich sagte, ist dies hier kein Test. Du wirst nicht bewertet und ich leite nichts hiervon an deine Lehrerin oder deinen Lehrer weiter. Du kannst auch auswählen, nicht zu antworten, wenn du nicht willst oder auch das Interview abubrechen. Willst du weiterhin an dem Interview teilnehmen?“

*Auf Zustimmung warten*

5) **Aufgabenstellung:** Wie schon gesagt, zeige ich dir jetzt ein paar Videos. Ich frage dich am Ende des Videos, wie du das, was du gesehen hast, naturwissenschaftlich erklären würdest. Es gibt keine falschen Antworten. Hast du noch irgendwelche Fragen, bevor wir beginnen?

6) **Videos präsentieren**

Video #1. Bouncing Ball.mp4.

- Spiel das Video ab und frage, ob er/sie das Video noch einmal sehen möchte.
- **Frage:**
  - „Wie kannst du naturwissenschaftlich die Bewegung des Balls erklären?“
    - Anregungen nur bei Bedarf nutzen!
  - „Gibt es noch andere Möglichkeiten, die Bewegung des Balls zu erklären?“
    - Anregungen nur bei Bedarf nutzen!

Video #2. toaster.mp4

- Spiel das Video ab und frage, ob er/sie das Video noch einmal sehen möchte.
- **Frage:**
  - „Wie kannst du die Vorgänge bei einem Toaster naturwissenschaftlich erklären?“
    - Anregungen nur bei Bedarf nutzen!
  - „Gibt es noch andere Möglichkeiten, die Vorgänge bei einem Toaster zu erklären?“
    - Anregungen nur bei Bedarf nutzen!

Video #3. Cart and Springs.mp4

- Spiel das Video ab und frage, ob er/sie das Video noch einmal sehen möchte.
- **Frage:**
  - „Wie kannst du die Bewegung des Wagens naturwissenschaftlich erklären?“
    - Anregungen nur bei Bedarf nutzen!

- „Gibt es noch andere Möglichkeiten, die Bewegung des Wagens zu erklären?“
  - Anregungen nur bei Bedarf nutzen!

Video #4. Laser and Paper.mp4

- Play the video, then ask if the student would like to see it again.
- **Frage:**
  - „Wie kannst du das Brennen des Papiers naturwissenschaftlich erklären?“
    - Anregungen nur bei Bedarf nutzen!
  - „Gibt es noch andere Möglichkeiten, das Brennen des Papiers zu erklären?“
    - Anregungen nur bei Bedarf nutzen!

Video #5. Dynamo and Light.mp4

- Play the video, then ask if the student would like to see it again.
- **Frage:**
  - „Wie kannst du das Leuchten der Lampe naturwissenschaftlich erklären?“
    - Anregungen nur bei Bedarf nutzen!
  - „Gibt es noch andere Möglichkeiten, das Leuchten der Lampe zu erklären?“
    - Anregungen nur bei Bedarf nutzen!

## 8.2. Anregungen im Interview

### Ziel der Interviews:

Die Schülerinnen und Schüler (SuS) sollen ungestört Phänomene erklären, um zu erforschen, welche naturwissenschaftlichen Ideen über Phänomene hinweg angewendet werden.

### Anregungen der Interviewleitung:

1. Anregungen der Interviewleitung sollen genutzt werden, um nicht eindeutige/unklare Ideen und Äußerungen zu klären.
2. Lass die SuS ausreden! Anschließend können SuS zur Klärung ihrer Äußerungen angeregt werden.
3. Versuche bei den Anregungen die Sprache der SuS zu übernehmen, z.B.

*S: Naja und das ist so, weil es Energie verliert.*

*I: Okay, es verliert Energie, was meinst du damit? Kannst du beschreiben, was du damit meinst?*

*S: Umm, es wird weniger wegen der Luft und Gravitation.*

*I: Was meinst du mit Gravitation?*

4. Anregungen sollen nicht genutzt werden, um eine Idee oder einen Begriff vorzugeben, die bisher von SuS nicht geäußert wurden:

- Wenn SuS bisher noch keine Energiebegriffe benutzt haben:

*Falsche Anregung: Kannst du Energiebegriffe benutzen, um das Phänomen zu erklären?*

- Wenn SuS bisher noch nicht die Worte Wärmeleitung oder Wärmestrahlung benutzt haben:

*Falsche Anregung: Okay. Kannst du dich noch die Worte Wärmeleitung oder Wärmestrahlung erinnern?*

5. Anregungen sollen nicht genutzt werden, um auf bestimmte Aspekte des Phänomens hinzuweisen:

*S: Der Mann lässt einen Basketball fallen und der springt runter und hoch.  
Also die Gravitation zieht den Basketball runter, wenn er ihn fallen lässt  
und das war es, denke ich.*

*I: Ok, was passiert denn mit der Geschwindigkeit des Basketballs während  
des Fallens?*

SuS erwähnten vorher noch nicht die Geschwindigkeit.

## 8.3. Kodierleitfaden

Kategorie	Unterkategorie	Unterunterkategorie	Definition	Beispiel	Grenzfall
Energie	Formen	Lageenergie	S spricht von einem Körper der Höhe $h > 0$ über dem Boden im Zusammenhang mit Energie	„Der Ball hat potentielle Energie, wenn er fliegt.“	„Er hat Energie, weil er oben ist“ Zwar keine explizite Formnennung, aber „weil“ referiert zum Indikator der Energieform
		Kinetische Energie	S spricht von einem sich bewegendem Körper $v > 0$ im Zusammenhang mit Energie	„Der Wagen hat Bewegungsenergie, wenn er fährt.“	„Er hat Energie, weil er sich bewegt“ Zwar keine explizite Formnennung, aber „weil“ referiert zum Indikator der Energieform
		Verformungsenergie	S spricht von Verformungen eines Körpers im Zusammenhang mit Energie	„Die Feder hat Spannungsenergie und ist zusammengedrückt.“	„potentielle Energie“ Wenn diese einem gespannten Körper zugeordnet wird
		Thermische Energie	S spricht von der Wärme eines Körpers im Zusammenhang mit Energie	„Das wird auf dem Boden auch warm also Wärmeenergie.“	„Der Draht hat ja Energie, weil er warm ist“ Zwar keine explizite Formnennung, aber „weil“ referiert zum

					Indikator der Energieform
		Elektrische Energie	S spricht von elektrischem Strom in einem Kabel im Zusammenhang mit Energie	„Und der Strom hat dann auch Stromenergie.“	„Energie wird durch den Strom transportiert“ Zwar keine explizite Formnennung, aber Energie genannt in Verbindung mit (elektrischem) Strom
		Lichtenergie	S spricht über die Ausbreitung von Licht im Zusammenhang mit Energie	„Die Lampe leuchtet dann und sendet Strahlungsenergie aus.“	„und Licht hat ja Energie“ Keine explizite Formennennung, aber im Zusammenhang richtig zugeordnet
		Chemische Energie	S spricht chemische Prozesse im Zusammenhang mit Energie	„Der Mensch hebt den Ball mit chemischer Energie aus der Nahrung an.“	
	Umwandlung		S spricht über die Umwandlung einer Form in eine andere	„ <i>Es wechselt zwischen Lage- und kinetischer Energie hin und her</i> “	„Kinetische Energie geht dann verloren und Spannenergie wird erzeugt“ Wird die Ab- bzw. Zunahme zweier Energieformen beschrieben, wird dies als

					Umwandlung angesehen.
	Transfer		S spricht über den örtlichen Wechsel einer Energieform	<i>„Elektrische Energie wird durch die Kabel transportiert“</i>	
	Entwertung		S spricht über die Umwandlung einer Energieform in eine nicht-nutzbare Form bei gleichzeitiger Abgabe der nicht-nutzbaren Form an die Umgebung	<i>„und dann geht die kinetische Energie nach und nach verloren an die Umgebung“</i>	„Und der Ball verliert nach und nach Energie“ Fragender: <i>„Was meinst du mit ‚Energie verlieren‘?“</i> „Also die Energie vom Ball wird weniger und die Energie geht dann in den Boden (und wird ein bisschen warm).“
	Erhaltung	Korrekt	S spricht über die Umwandlungen und Transfers von Energie in einem System in dem Sinne, dass eine Form ab-, während die andere Form zunimmt und beachtet die Gesamterhaltung der Energie.	<i>„Und da die elektrische Energie mehr wird und die Lampe heller wird, wird die Bewegungsenergie des Rades weniger und es wird langsamer“</i>	

			Die Beachtung der Gesamterhaltung kann auch anhand der Indikatoren der Formen erfolgen.		
		inkorrekt	S. spricht über das Abnehmen einer Energieform ohne Beschreibung, wo die Energie hingeht und kennzeichnet diese auch auf Nachfrage als verloren.	„Und der Ball verliert nach und nach Energie“ Fragender: „Was meinst du mit ‚Energie verlieren‘?“ „Also die Energie ist dann nicht mehr da.“	
	Dummy		S spricht über Energie in einer anderen Art also oben angegeben	-	-
Gravitation			S spricht darüber, dass Gravitation Dinge anzieht.	„Durch die Erdanziehungskraft fällt der Ball runter“	„Die Erde zieht dann den Ball nach unten“ Da durch „ziehen“ Interaktion zweier Körper vorliegt im Gegensatz z.B. zu „Der Ball fällt nach unten.“
Temperatur			S spricht über die Zunahme oder Abnahme	„Und da es Glühlampen sind, werden	“fängt an, warm zu

			der Temperatur eines Körpers.	<i>die Lampen warm und rot glühend</i>	werden/sich zu erwärmen” Auch als “Temperatur” kodieren, da “erwärmen” als Prozess, d.h. eines Temperaturanstiegs, angesehen wird
Wärme			S spricht über Wärme als Substanz, das entsteht, sich örtlich ändert oder mit der Umgebung interagiert.	<i>„Wärme wird dann produziert und ist dann in den Drähten gespeichert.“</i>	
Elektrizität			S spricht über Elektrizität als Substanz, die mit der Umgebung interagiert.	<i>„Der (elektrische) Strom fließt dann durch die Kabel“</i>	<i>„Wenn da beide Kabel anliegen, leuchtet die Lampe.“</i> S nennt keinen Strom, beschreibt jedoch die Notwendigkeit eines geschlossenen Stromkreises für die Wirkung (von Elektrizität).
Teilchen			S spricht über die Zusammensetzung von Materie	<i>„Also in dem Draht fließen dann die Elektronen und sorgen...“</i>	

			bestehend aus kleinsten Teilchen (Atome etc.)		
Geschwindigkeit			S spricht über die Zu- bzw. Abnahme von Bewegungen von Körpern	<i>„Der Ball bewegt sich dann schneller und dort langsamer als vorher“</i>	
Luftwiderstand			S spricht über die bremsende Wirkung der Luft auf einen sich bewegenden Körper	<i>„Und die Luft hält dann auch den Reifen auf und er wird langsamer“</i>	
Reibung			S spricht über die bremsende Wirkung zweier sich berührender Körper	<i>„Und der Ball verliert dann durch die Berührungen auf dem Boden an Höhe“</i>	
Licht			S spricht über die Abstrahlung oder Absorption von Licht S spricht über Eigenschaften des Lichts wie Brechung/Reflexion und Bündelung im phys. Sinne	<i>„und die Lampe sendet dann Licht aus“ „und der gebündelte Lichtstrahl wird am Blatt reflektiert.“</i>	
Verformung			S spricht über Veränderung der Ruhelage eines Körpers	<i>„und die Feder ist ja sonst locker, aber hier</i>	

				<i>gespannt und deswegen...“</i>	
Verbrennung			S spricht über brennende Körper im Sinne eines chemischen Prozesses und deren Voraussetzungen (Sauerstoff, Wärme etc.)	<i>„die Hitze auf dem Papier ist dann groß genug, um das Papier zu entzünden“</i>	
Kraft			S spricht über die Wechselwirkung zweier Körper, die sich gegenseitig ziehen bzw. stoßen	<i>„Die Feder schiebt dann den Wagen und die andere Feder zieht ihn nach links.“</i>	
Felder			S spricht über das Gravitations- oder andere Felder in Verbindung mit Energie	<i>„der Ball wird langsamer und die Energie wird in das Gravitationsfeld übertragen“</i>	
(elektromagnetische) Induktion			S spricht über das Induzieren einer elektrischen Spannung durch Bewegung	<i>„durch die Drehung des Rades ist da eine Spannung in der Spule“</i>	<i>„Da sind eine Spule und ein Magnet und durch die Bewegung fließt da Strom“</i> Kodieren, da Bauteile für Induktion korrekt beschrieben wurden.

## 8.4. Exemplarisches Interview inklusive Kodierung

### 1. Fallender Ball

Gravitation	1	(Vorgespräch)
	2	F: Möchtest du das Video nochmal sehen?
	3	A: Ne.
	4	F: Wie würdest du das, was du da gesehen hast, naturwissenschaftlich erklären?
	5	A: Also sobald der Ball losgelassen wird, fällt er wegen der Erdanziehungskraft, aber er springt, weil ähm ich weiß nicht, wieso er springt. (lachen)
	6	F: Ok. Gibt es noch andere Möglichkeiten, das zu erklären?
	7	A: Äh wie jetzt?
	8	F: Also fallen dir noch andere Möglichkeiten ein, das zu erklären?
	9	A: Das Springen oder das Fallen?
	10	F: Äh das darfst du entscheiden.
Verformung	11	A: Ähm also vielleicht <b>dellt er sich ein und dellt sich wieder aus?</b> Keine Ahnung.
	12	F: Ok. Ja das macht auch nix. Ähm soll ich dann das nächste Video zeigen?
	13	A: Hmh

### 2. Toaster

Elektrizität	1	F: Ähm ja das ist das Falsche, jetzt muss ich erst das nächste Video raussuchen. (Pause) So, jetzt zeig ich mal das nächste Video. (Pause) Möchtest du das Video nochmal sehen?
	2	A: Ne muss, glaub ich, nicht sein.
	3	F: Wie würdest du das, was du da gesehen hast, naturwissenschaftlich erklären?
	4	A: Es geht um die heiß werdenden Drahte, richtig?
	5	F: Äh ja.
Temperatur	6	A: Ja, also Energie oder Strom wird durch die Drahte, Drähte äh Drähte, geschickt und dadurch werden sie heiß.
	7	F: Ja ähm gibt es noch andere Möglichkeiten, das zu erklären? Also du merkst, ich frag einfach mal so wieder –
	8	A: Ähm achso, also nicht wirklich. Dadurch, dass der Strom da durchfließt, wird es halt heiß. Also der Draht in der Glühbirne wird ja auch heiß und leuchtet durch <b>Teilchen?</b>
Teilchen		

## 3. Wagen an Federn

	1	F: Ja ähm willst du das dritte Video sehen?
	2	A: Ok.
	3	F: Ja ist wahrscheinlich gerade ein bisschen ungewohnt, oder?
	4	A: Ja bisschen (lachen).
	5	F: Gut, ok. Dann zeig ich dir jetzt mal das dritte Video. (Pause) Ich zeig das nochmal ohne diese Leiste davor. (Pause) Ok. Gleiche Frage: Wie würdest du das naturwissenschaftlich erklären?
	6	A: Dadurch, dass das Rollbrett in eine Richtung gezogen wurde, wurde die eine Feder auf der einen Seite gespannt und er losgelassen wurde, hat sich die Feder wieder zusammengezogen. Dadurch wurde die Feder auf der anderen Seite gespannt und das ging immer so hin und her, aber es wurde immer ein bisschen weniger, weil die Energie halt durch die Reibung langsam verloren geht.
	7	F: Ja ähm was meinst du mit „verloren“? Also –
	8	A: Also nicht verloren. Es wird umgewandelt in halt <b>thermische Energie</b>
	9	F: Ok ähm gibt es noch andere Möglichkeiten, das zu erklären?
	10	A: (lachen)
	11	F: Du kannst auch einfach weiter sagen. (Lachen)
	12	A: Nein.

## 4. Laser

	1	F: Ok, dann zeig ich dir jetzt das vierte Video (Pause). Möchtest du das Video nochmal sehen?
	2	A: Nein.
	3	F: Wie würdest du das denn naturwissenschaftlich erklären?
	4	A: Also der Laserpointer ist wahrscheinlich jetzt ein ziemlich starker Laserpointer und wenn man das Blatt Papier davorhält und da Papier sehr leicht entflammbar ist, fängt es halt an zu brennen durch die Hitze des Laserpointers?
	5	F: Ja ähm fallen dir noch andere Ideen ein oder andere Möglichkeiten, das zu erklären, besser gesagt?
	6	A: Ne (Lachen) Keine Ahnung. <b>Der Laserpointer bündelt</b> die Energie und oder so?

## 5. Fahrraddynamo

	1	F: Ok Alles gut. Und dann zeig ich dir noch ein letztes Video, ok?
	2	A: Hmh. (Pause)
	3	F: Möchtest du das Video nochmal sehen?
	4	A: Ne das geht, glaub ich.
	5	F: Ok. Ich stell nochmal die Frage: Wie würdest du das denn naturwissenschaftlich erklären?
	6	A: Also das ist, glaub ich, dasselbe Prinzip wie bei einem Dynamo, also die Bewegung des Rades wird also, also das ist dieser Rotor und mit dem (Rotorstartersystem?) wird das mithilfe einer Spule in Energie umgewandelt und der Schwung, was die Lampe zum Leuchten bringt. Und sobald sich das Rad zu langsam dreht und nicht mehr genug Energie entsteht, leuchtet die Lampe nicht mehr.
	7	F: Gleiche Frage wieder: Noch andere Ideen?
	8	A: Ne, eigentlich nicht.
	9	(Abschlussgespräch)

## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Dissertation – abgesehen von der Beratung durch meinen Betreuer – nach Inhalt und Form meine eigene ist. Sie wurde weder im Ganzen noch in Teilen an einer anderen Stelle im Rahmen eines Promotionsverfahrens vorgelegt. Die Arbeit ist unter Einhaltung der Regeln guter wissenschaftlicher Praxis der Deutschen Forschungsgemeinschaft entstanden. Es wurde mir kein akademischer Grad entzogen.

Kiel, den 20.07.2022

Julian Alexander Fischer