

Einleitung

1.1 Einführung

Energie ist ein fundamentales Konzept. Sie spielt nicht nur für die Wissenschaft eine bedeutende Rolle, sondern auch für unseren Alltag. Neben alltäglichen Anwendungen ist das Thema Energie auch im Zuge von Klimakrise, Ressourcenknappheit und der Frage nach ‚erneuerbarer Energie‘ relevant für die Gesellschaft. Als gleichzeitig zeitloses und zeitgemäßes Konzept ist ein fundiertes Grundverständnis ihrer Relevanz für unsere Lebenswelt ebenso erstrebenswert wie notwendig. Mit der Aufgabe von Schulen, Schüler*innen auf ihrem Weg zu mündigen und verantwortungsvoll handelnden Bürger*innen auszubilden, kommt der Energie ein hoher Bildungsanspruch zu. Dies spiegelt sich auch in den Lehrplänen der Sekundarstufe wider. Dort spielt die Energie eine jahrgangs- sowie fächer- und kontextübergreifende Rolle. Konkret ist das Betrachten von Energie bedeutend für die Beschreibung und Erklärung von Phänomenen. Mit dem grundlegenden Prinzip der Energieerhaltung steht der Physik ein mächtiges Werkzeug zur Verfügung, mit dem sich Prozesse analysieren lassen.

Dennoch gelingt es bisher nicht, Schüler*innen ein angemessenes und nachhaltiges Verständnis von Energie zu vermitteln. Zahlreiche Studien legen offen, dass das Konzept nicht besonders attraktiv ist und Schüler*innen Prozesse nur selten aus der Energieperspektive betrachten. Viele Lernende verfügen auch nach ihrem Schulabschluss noch über ein unzureichendes Energieverständnis. Trotz seiner Relevanz für Wissenschaft, Technik und Alltag erkennen Schüler*innen nur selten

den Mehrwert des Konzeptes (Nordine et al., 2019). Forscher*innen vermuten, dass dies nicht zuletzt auch an der Herangehensweise des traditionellen Energieunterrichts liegt. Typischerweise wird Energie in der Mechanik über Kräfte und das Konzept der Arbeit eingeführt und über diverse Energieformen zu den Prinzipien der Energieübertragung, -umwandlung und -erhaltung hingeführt. Aus fachlicher und didaktischer Sicht bringt die Einführung verschiedener Energieformen aber einige Probleme mit sich. Insbesondere Formen potenzieller Energie stehen unter Verdacht, eher einer Umbenennung eines eigentlich universellen Konzeptes zu dienen, als ein sinnstiftendes Verständnis zu fördern. Wie ein wirksames und umfassendes Unterrichtskonzept aussehen kann, ist noch nicht vollständig geklärt.

Um der Forderung nach einem sinnstiftenderen Energieunterricht zu begegnen, gibt es verschiedene Vorschläge und Ansätze, wie eine lernwirksame Alternative zum traditionellen Ansatz aussehen könnte. Das in dieser Arbeit beschriebene Dissertationsprojekt adressiert die Problematik, indem es existierende Vorschläge aufgreift und ein Unterrichtskonzept entwickelt und evaluiert, das Energie mit Feldern verknüpft. Dieser *Energie-Feld-Ansatz (EFA)* ist für die Sekundarstufe II konzipiert und wird mit Schüler*innen an österreichischen Gymnasien evaluiert. Im Kern führt der Ansatz die zahlreichen Energieformen des traditionellen Unterrichts auf Bewegungsenergie und Feldenergie zurück. Dabei werden Formen potenzieller Energie über Felder beschrieben. Das Prinzip der *Umwandlung* von Energie wird im EFA obsolet und der in der fachdidaktischen Literatur kritisierte Blackbox-Charakter der Energieformen wird inhaltlich angereichert. Prozesse können dann durch die zu Grunde liegende Wechselwirkung über die Veränderung von Bewegungen und Feldern beschrieben werden.

Zentral für den EFA ist die Einführung eines sogenannten *Gesamtfeldes*, welches die Wechselwirkung verschiedener Objekte abbildet und eine aktive Rolle in Prozessen der Energieübertragung übernimmt. Über Felder können Phänomene in beliebiger Größenordnung beschrieben werden. Von der Bewegung eines Satelliten oder Luftballons, über die Bindung von Atomen oder dem Zerfall von Kernen bis zur Annihilation und Entstehung von Elementarteilchen – der EFA beschreibt Phänomene der klassischen und modernen Physik durch ein konsistentes Unterrichtskonzept.

1.2 Vorgehensweise und Gliederung der Arbeit

Das Projekt reiht sich in das Paradigma der didaktischen Entwicklungsforschung (Design-based Research, DBR) ein. Gemäß dem Modell der didaktischen Rekonstruktion werden fachliche Klärung und Erkenntnisse zu Lernendenvorstellungen zum Thema miteinander in Beziehung gesetzt und die Inhalte didaktisch strukturiert. Das Ergebnis der didaktischen Rekonstruktion sind sogenannte Konzeptideen und passende Kontexte, die das Unterrichtskonzept bilden. Entsprechend dem Vorgehen von Design-based Research (DBR) wird der Entwurf des Unterrichtskonzeptes mittels Akzeptanzbefragungen formativ evaluiert und zyklisch weiterentwickelt. Die gewonnenen Erkenntnisse über Benefits und Schwierigkeiten aus insgesamt $N = 21$ Befragungen bestimmen dabei die Weiterentwicklung der Designs in insgesamt drei Entwicklungszyklen. Neben einem für die Praxis vielversprechenden Unterrichtskonzept entstehen lokale Lerntheorien zum Lernen mit dem EFA. Zusätzlich zur Evaluation in Akzeptanzbefragungen wird das Konzept in einem authentischen Klassensetting mit drei Lehrpersonen und insgesamt $N = 84$ Schüler*innen erprobt und evaluiert. So werden Einblicke in die Umsetzbarkeit des Konzeptes unter Realbedingungen erhalten.

Die Dissertation gliedert sich in die folgenden Abschnitte: Beginnend mit einer Darstellung des theoretischen Rahmens in Kapitel 2 werden grundlegende Lehr-Lern-Theorien aufgezeigt, die bei der Konzeption eine Rolle spielen. Außerdem wird auf das Paradigma der Designforschung und das Modell der didaktischen Rekonstruktion eingegangen. Anschließend folgt Kapitel 3 zur Darlegung der Merkmale und Probleme des traditionellen Energieunterrichts sowie der Darstellung alternativer Ansätze. Darauf baut die fachliche Klärung des Themas mit Kapitel 4 auf, begleitet von der Beschreibung einer Expert*innen-Befragung zum Ansatz. In Kapitel 5 wird das methodische Vorgehen der Arbeit erläutert, bevor dann in Kapitel 6 neben der Klärung zentraler Begriffe und normativen Festlegungen auch wesentliche Vorüberlegungen zu Grundgedanke und Mehrwert des EFA dargelegt werden. In diesem Rahmen werden auch die für die Konzeption essentiellen Designprinzipien definiert.

Die Kapitel 7 bis 12 beschreiben alternierend die Konzeption und Evaluation der drei Entwicklungszyklen durch Akzeptanzbefragungen. Dazu werden die Entscheidungen zum Design von Konzeptideen und Kontexten begründet und in der qualitativen Auswertung Benefits und Probleme herausgestellt und zu einem Überarbeitungsvorschlag für die jeweils nächste Konzeptversion hingeführt. Im Anschluss

berichten die Kapitel 13 und 14 zu Design und Erprobung sowie Evaluation des EFA im Klassensetting. Abschließend wird in den Kapiteln 15 und 16 eine Erweiterung des EFA um die mathematische Komponente der Formeln beschrieben. Auch hier werden Designentscheidungen und Erkenntnisse aus der qualitativen Evaluation berichtet. Die Arbeit schließt mit Kapitel 17, welches die wesentlichen Erkenntnisse zusammenfasst und diskutiert, offene Fragen formuliert und einen Ausblick für Ideen zu Folgestudien gibt.

Theoretischer Rahmen

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den theoretischen Grundlagen der Dissertation. Hier werden die zu Grunde liegenden theoretischen Modelle erläutert. Ausgangspunkt stellt eine Darstellung des physikdidaktischen Paradigmas der Designforschung dar. Daran schließt eine kurze Beschreibung typischer Lehr-Lern-Modelle zum Konzeptwechsel im Physikunterricht an, gefolgt von einer kurzen Beschreibung des Modells der Didaktischen Rekonstruktion.

2.1 Physikdidaktische Forschung

Um die Physikdidaktik als Wissenschaft zu verstehen, muss man ihren Forschungsgegenstand und ihre Methoden definieren (Hopf, 2009). Gegenstand ist das Lehren und Lernen von physikalischen Inhalten. Dieser Prozess wird erforscht, indem meist empirische Methoden der Sozialforschung entlehnt und angepasst werden (Hopf, 2009). Dabei wird sowohl auf qualitative als auch quantitative Methoden zurückgegriffen, je nachdem welchen Untersuchungsschwerpunkt eine Studie besitzt. Da die Didaktik nicht nur die Erforschung von Lehr- und Lernprozessen zum Ziel hat, sondern auch auf den Bedarf an empirisch fundierten Vorschlägen für Unterricht eingehen will, gliedern sich die Methoden in erforschende Methoden zum Erkenntnisgewinn und entwickelnde Methoden mit einem Ertrag zum praktischen Nutzen. Wenn man die Zielsetzung von Wissenschaft durch die zwei Parameter „Nutzen“ und „Erkenntnis“ beschreibt, lassen sich verschiedene wissenschaftliche Disziplin bzw. Forschungsinteressen nach Stokes (1997) in ein soge-

nanntes *Quadrantenmodell* einteilen.¹ Bestimmte Bereiche der Bildungsforschung können dann in den „Pasteur-Quadranten“ (Interesse an Nutzen und Erkenntnis) eingeordnet und als „nutzenorientierte Grundlagenforschung“ bezeichnet werden (Fischer et al., 2005).

Um nicht nur theoretische Erkenntnisse über das Lehren- und Lernen zu gewinnen, sondern auch nützliche Produkte wie beispielsweise lernwirksame Unterrichtskonzeptionen zum Ergebnis zu haben, wird die Physikdidaktik auch auf Grundlage von Postulaten von Comenius (1657) als „nutzenorientierte Grundlagenforschung“ beschrieben (Hopf, 2009). So können die wissenschaftlichen Erkenntnisse genutzt werden, um aktiv den Unterricht zu verbessern, z. B. durch die Bereitstellung von Unterrichtskonzeptionen und -modellen, Schulbüchern, Materialien und Ratgebern (Krüger et al., 2014).

2.2 Didaktische Entwicklungsforschung

Fachdidaktische Entwicklungsforschung (auch „Designforschung“)² verfolgt das Ziel, entsprechend der obigen Ausführungen neben dem Gewinn von Erkenntnissen über Lehr-Lernprozesse auch für den Unterricht nützliche Konzeptionen hervorzubringen. Sie grenzt sich also von der reinen Erkenntnis gewinnenden Grundlagenforschung ab. Hier wird gezielt auf Laborstudien mit kontrollierten Variablen verzichtet, um Unterrichtskonzepte bewusst unter realen Bedingungen zu untersuchen (Krüger et al., 2014). Dabei steht der Praxisbezug und die Nutzenorientierung im Vordergrund. Konzepte werden folglich an der Erfahrung gemessen und mit diesen über geeignete Evaluationsmaßnahmen weiterentwickelt, auch unter Einbezug der Lehrpersonen (Krüger et al., 2014). Als an der Theorie orientierter Entwicklungsprozess liefert die Designforschung Lösungen für konkrete unterrichtliche Probleme aus der Praxis (Design-Based Research Collective, 2003; Hopf und Wiesner, 2008). Zentral für die Designforschung ist die Entwicklung und Weiterentwicklung der Konzeptionen (Designs) in einem Zyklus aus Design, Umsetzung, Analyse und Weiterentwicklung (Re-Design) (Design-Based Research Collective, 2003; Haagen-Schützenhöfer und Hopf, 2020). Damit werden die folgenden Anforderungen adressiert (aus Collins et al., 2004):

¹Die Quadranten gliedern sich dabei in die folgenden vier: 1. keine Erkenntnis und keinen Nutzen (nicht durch sinnvolle Forschung vertreten), 2. hoher Nutzen und geringes Erkenntnisinteresse (repräsentiert durch Thomas Edison), 3. hoher Erkenntnisgewinn ohne spezielles Interesse am Nutzen (repräsentiert durch Nils Bohr) und 4. Fokus auf gleichzeitigem Nutzen und Erkenntnis (repräsentiert durch Louis Pasteur); siehe Fischer et al. (2005).

²Auch als „Design-based Research“ (DBR; Design-Based Research Collective, 2003) oder „Design Science“ (Fischer et al., 2005) bezeichnet.

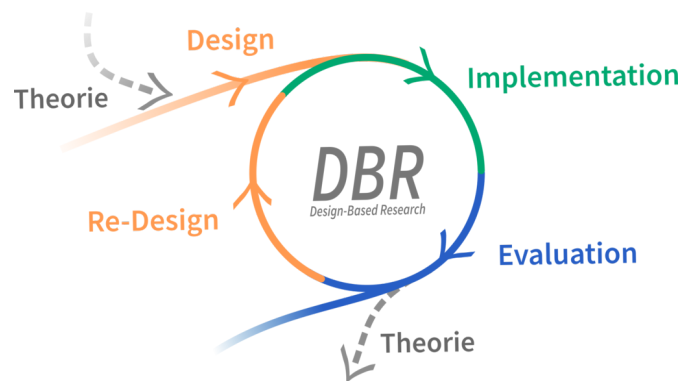


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des Prozesses von Design-based Research (Designforschung, DBR). Auf Basis theoretischer Erkenntnisse wird ein Konzept entwickelt (Design), im Unterricht erprobt bzw. umgesetzt (Implementation) und mit geeigneten Methoden evaluiert. Dabei werden Erkenntnisse über Schwierigkeiten und Benefits des Konzeptes gewonnen (Theorieelemente), welche dann in einer Weiterentwicklung (Re-Design) zur Verbesserung des Konzeptes beitragen. Dieses kann dann erneut evaluiert werden. Bild: „Vorgehensweise bei Design-Based Research“ von Sarah Zloklikovits, lizenziert unter CC BY 4.0

- Beantwortung theoretischer Fragen zur Natur des Lernens im Kontext
- Erschaffung von Ansätzen zur Untersuchung des Lernens im Realfall anstelle von Laborsettings
- Exploration von Lernen als ein breites Spektrum von Faktoren
- Ableitung von Erkenntnissen aus formativen Evaluationen

Das Ergebnis von Designforschung sind also sowohl Theorien über das Lehren und Lernen zu einem bestimmten Sachverhalt als auch ein Produkt, das in einem authentischen Unterrichtssetting funktioniert. „DBR geht [also] über das designen [sic] und testen [sic] von bestimmten Interventionen hinaus.“ (Design-Based Research Collective, 2003). Abbildung 2.1 veranschaulicht den beschriebenen Prozess der Designforschung schematisch.

2.3 Lehr-Lern-Modelle und Konzeptwechsel

Moderne physikdidaktische Forschung basiert auf kognitivistischen Lerntheorien. Dabei stehen die Lernenden im Fokus und Lernen kann als Konzeptwechsel verstanden werden (Bünder et al., 1999). Dabei liegt die Konzentration auf Theorien und Ansätzen, wie das Lehren und Lernen so gestaltet werden kann, dass sich Erkenntnisse durch geeigneten Unterricht in eine bestimmte Richtung verändern (Riemeier, 2007). Der Unterricht bedient sich dabei Methoden zum Aufbauen und Verändern vorunterrichtlicher Vorstellungen durch geeignete Lehr-Lern-Settings (Plotz, 2017). Um einen Konzeptwechsel zu erreichen (insbesondere

bei existierenden aus fachlicher Sicht oder für das Lernen ungünstigen Vorstellungen), müssen Erklärungsangebote mit sinnstiftenden Kontexten geschaffen werden (Bransford et al., 2000); insbesondere auch, um Begriffe und ihre Bedeutung zu erlernen (Rückl, 1991). So muss vorunterrichtlichen Vorstellungen von Lernenden durch das Angebot geeigneter Konzepte angemessen begegnet werden.

Lernendenvorstellungen

In dieser Arbeit wird der Begriff „Lernendenvorstellung“ verwendet. In der Literatur werden (Fach-)Begriffe zu vorhandenen kognitiven Ideen, Konstrukten und Vorstellungen von Schüler*innen unterschiedlich gefasst. So ist beispielsweise der Begriff „misconception“ (Driver und Easley, 1978) im englischen Sprachraum verbreitet und wird im Deutschen z. B. mit „Fehlvorstellung“ übersetzt. Inhaltlich können sich die Bedeutungen allerdings je nach Verwendung unterscheiden. Egal, ob von Fehlvorstellungen (die per Definition unangemessene Ideen und Vorstellungen bezeichnen), Schülervorstellungen, naiven Vorstellungen, misconceptions oder Lernendenvorstellungen gesprochen wird, wird sich allgemein auf von Schüler*innen mitgebrachte Vorstellungen zu bestimmten Inhalten bezogen (Plotz, 2017). Um sowohl lernförderliche als auch hinderliche sowie angemessene und unangemessene Vorstellungen von Lernenden jeder Altersstufe (auch außerhalb des schulischen Kontexts) mit einem Begriff abzudecken, wird im Folgenden der Terminus „Lernendenvorstellungen“ verwendet.

Konzeptwechsel

Didaktische Lehr-Lern-Theorien versuchen, die Entstehung und Manifestation sowie die Beeinflussung von Vorstellungen zu beschreiben. Dabei spielt insbesondere auch der Konzeptwechsel (*Conceptual Change*) als Hinwendung von Alltagsvorstellungen zu fachlich angemessenen Konzepten eine zentrale Rolle. Eine erste Theorie zum *Conceptual Change* stammt von Posner et al. (1982), in der Voraussetzungen und Merkmale für einen erfolgreichen Konzeptwechsel gerahmt werden. Dabei wird die Veränderung von Vorstellungen durch Akkommodation beschrieben, d. h. das Ersetzen von alten durch neue fachlich begründete Vorstellungen (s. auch Krüger, 2007). Dies ist in der Regel kein spontaner, sondern ein allmählicher kognitiver Anpassungsprozess (Vosniadou und Brewer, 1992), der z. B. durch die Erzeugung eines kognitiven Konfliktes (Dissonanz von existierenden und fachlich angemessenen Vorstellungen) eingeleitet werden kann.

Um den Konzeptwechsel selbst auch im Rahmen des Kognitivismus zu beschreiben, existieren verschiedene Theorien, die sich in ihren Schwerpunkten unterschei-

den. Ihnen ist gemein, dass sie Lernendenvorstellungen in kognitive Sinneinheiten unterteilen und versuchen, so die kognitiven Prozesse der Schüler*innen zu beschreiben. Im Folgenden werden drei prominente theoretische Auffassungen der Didaktik zu diesem Thema kurz skizziert: das Modell von *Knowledge-in-Pieces* (dt. Wissen in Teilen oder Wissensbausteine), der Gebrauch von *P-Prims* und die Rahmung mit *Cognitive Resources* (dt. kognitive Ressourcen) sowie die „Synthetic Models“ (dt. synthetische Modell).

2.3.1 Knowledge-in-Pieces und P-Prims

In Kaiser et al. (2018) beschreibt DiSessa die Auffassung und Rahmung des *Conceptual Change* und definiert dabei den Begriff *Knowledge-in-Pieces* wie folgt:

„Knowledge in Pieces (KiP) names a broad theoretical and empirical framework aimed at understanding knowledge and learning. It sits within the field of *conceptual change*, which studies learning that is especially difficult.“ (DiSessa, 2018, S. 65)

Es handelt sich also um einen Theorierahmen, der den Konzeptwechsel bei Schüler*innen beschreibt. Im Rahmen dieser Wissensbausteine definiert DiSessa auch die sogenannten *P-Prims* („phenomenological primitives“; DiSessa, 1993), welche Elemente intuitiver Kognition darstellen. Diese werden von Schüler*innen genutzt, um zu entscheiden, welche Prozesse plausibel oder unwahrscheinlich sind und wie man diese erklären kann (DiSessa, 2018). So hilft beispielsweise die phänomenologisch nützliche Relation des Ohm’schen P-Prims beim Argumentieren von kausalen Zusammenhängen: ‚Mehr Aufwand erzeugt/führt zu mehr Ergebnis‘ (DiSessa, 2017). Diese und ähnliche basale Regeln stellen P-Prims dar und werden nach DiSessa herangezogen, um Sachverhalte zu erklären. Eine von einem Schüler formulierte logische Kette zum thermischen Gleichgewicht sieht dann beispielsweise wie folgt aus:

„Difference in temperature causes ‘freaking out’, ‘freaking out’ causes ‘working harder’, ‘working harder’ characterizes the first slot in Ohm’s p-prim, which is linked causally to a greater result, a greater speed toward equilibrium.“ (DiSessa, 2017, S. 17)

2.3.2 *Cognitive Resources*

Eine weitere Rahmung des *Conceptual Change* geht auf David Hammer zurück, der die Zusammensetzung von Lernendenvorstellungen über *Cognitive Resources* beschreibt. Die Theorie kann als Weiterentwicklung des KiP-Modells gesehen werden. Der Begriff ‚resource‘ lehnt sich dabei an den Begriff Ressourcen der Informatik an, wo er sie mit einem Stück Programm-Code vergleicht, das in verschiedenen Programmen eingeflochten werden kann, um eine bestimmte Funktion auszuführen (aus dem Englischen; Hammer, 2000, S. 53). Eine *Cognitive Resource* stellt also ein kognitives Wissenselement dar, das in verschiedenen Kontexten auf unterschiedliche Weise für Argumentationen genutzt werden kann. Als Vorteil des Ressourcen-Systems gegenüber dem KiP-Rahmen mit P-Prims als Theorie der Lernendenvorstellungen führt er an, dass sich *Cognitive Resources* zu größeren Einheiten zusammensetzen können, P-Prims hingegen nicht, da diese dann zwar ein größeres Element bilden würden, aber kein P-Prim mehr seien (per Definition kleinste logische Einheit; Hammer, 2000). Eine Ressource kann zwar ein P-Prim sein, allerdings auch eine größere Einheit bilden. Hammer grenzt sein Ressourcen-System allerdings vom Rahmen der *misconceptions* ab, da dieses System nicht erkläre, wieso die Erklärungen von Schüler*innen in verschiedenen Kontexten variieren (Hammer, 1996; Smith III et al., 1994). Zudem lasse die ausschließliche Beschreibung von *misconceptions* keine produktiven Ressourcen oder Anwendungen zu und gebe keine Auskunft über die zu Grunde liegenden kognitiven Mechanismen. Bei den Ressourcen unterscheidet er produktive und unproduktive Ressourcen, je nachdem, ob sie für eine Erklärung zielführend sind oder nicht. Außerdem unterteilt er sein System in *Conceptual Resources* (für das Verständnis spezieller physikalischer Phänomene und Konzepte) sowie *Epistemological Resources* (für das allgemeine Verständnis von Wissen und Lernen). Er plädiert dafür, dass Schüler*innen freier mit ihren kognitiven Ressourcen umgehen und diese in Kontexten erproben („messing about“). Damit kritisiert er das für den typischen Unterricht häufige Einprägen von „magic words“ anstelle des Aufbaus eines Verständnisses für grundlegende Mechanismen (Hammer, 2000).

2.3.3 *Synthetische Modelle*

Nach Vosniadou und Brewer (1992) wird ein nachhaltiger Konzeptwechsel nur dann erzielt, wenn Schüler*innen ihre problematischen Vorannahmen in Richtung fachlich angemessener Sichtweisen uminterpretieren. Dies geschieht aber nicht immer bzw. vollständig. Sie beschreiben, wie Schüler*innen der Grundschule beispielsweise sogenannte *Synthetic Models* (Synthetische Modelle) bilden. Diese ent-