

1 Einleitung

Experimente sind ein zentraler Bestandteil des naturwissenschaftlichen Unterrichts und können, je nachdem wo der inhaltliche Fokus liegt und welches didaktische Ziel verfolgt wird, unterschiedliche Funktionen einnehmen. Die wohl am häufigsten mit dem Experimentieren in Verbindung gebrachte Strategie der Hypothesenüberprüfung ist dabei nur eine von vielen (Höttecke & Rieß, 2015).

Auch wenn das Experimentieren im Schulunterricht nicht als direktes Abbild der Arbeitsweisen naturwissenschaftlicher Forschung beschrieben werden kann, so stellen Experimente für den Unterricht grundlegende Erkenntnisquellen dar, so wie das für die Wissenschaft auch der Fall ist (Girwidz, 2020a).

Für das im Physikunterricht zentrale Thema des Aufbaus der Materie stellt sich jedoch die Frage, welche Form die Erkenntnisse annehmen, die zu diesem Thema anhand von Experimenten gemacht werden können. Schließlich kann Materie auf einer submikroskopischen Ebene nicht direkt beobachtet werden, es können höchstens Hinweise gefunden werden, die für einen strukturierten Aufbau der Materie sprechen.

Welche dieser experimentellen Hinweise für Schüler*innen überzeugend sind, ist die zentrale Fragestellung dieser Arbeit. Dabei ist unumgänglich, auch die Modelle zu thematisieren, die für die Beschreibung des Aufbaus der Materie im Unterricht eingesetzt werden. Diese sind Teil eines Spannungsfeldes, welches sich aufgrund der Kompromisse auftut, die bei der Elementarisierung komplexer Themen für den Unterricht gezwungenermaßen eingegangen werden. De Vos & Verdonk (1996) verdeutlichen dies folgendermaßen:

On the one hand, modern theories about the structure of matter are too complex or abstract for most secondary school students. On the other hand, the ideas these students are able to understand will often be rejected by experts as naive, if not false. (de Vos & Verdonk, 1996, S. 657)

Aus diesem Grund steht der naturwissenschaftliche Unterricht vor der Herausforderung, den Aufbau der Materie auf eine verständliche Weise einzuführen, ohne dabei Vorstellungen zu fördern, die dem Verständnis fortgeschrittener Theorien in der späteren Schullaufbahn im Wege stehen.

1 Einleitung

Die Analyse von Experimenten, die für solch eine Einführung des Teilchenmodells geeignet sind, ist der Fokus dieser Arbeit. In einer vergleichenden Betrachtung wird dabei der Schwerpunkt auf die wahrgenommene Überzeugungskraft der Experimente gelegt. Es werden jedoch auch weitere Aspekte untersucht, wie die inhaltliche Schwierigkeit der Experimente und die Komplexität des Versuchsaufbaus.

Um den dafür benötigten theoretischen Rahmen aufzuspannen, werden im ersten Teil dieser Arbeit die relevanten lernpsychologischen Grundlagen vorgestellt, mit besonderem Fokus auf den kognitiven Prozessen, die am Aufbau fachlicher Konzepte und insbesondere dem Teilchenkonzept beteiligt sind (Kapitel 2.1). Dabei wird auch das Lernen mit digitalen Inhalten thematisiert (Kapitel 2.2), was im späteren Kapitel zum Experimentieren im Physikunterricht durch die Beschreibung digitalisierter Experimente vertieft wird (Kapitel 4.2).

Die restlichen Kapitel des Theorieteils widmen sich zum einen dem Konstrukt der Überzeugungskraft (Kapitel 2.3) und einer Beschreibung des Teilchenmodells der Materie aus fachlicher und fachdidaktischer Perspektive (Kapitel 3).

Der zweite Teil der Arbeit stellt die empirische Erhebung und deren Ergebnisse vor, die im Rahmen dieses Promotionsprojektes in mehreren Klassen der achten Jahrgangsstufe durchgeführt wurde. Die leitenden Forschungsfragen und die Vorstellung des Studiendesigns sind in Kapitel 5 aufgeführt. Ebenso werden an der Stelle die ausgewählten Experimente zum Teilchenmodell und deren Gestaltung als interaktive Experimentiervideos vorgestellt.

Nach einer Beschreibung der eingesetzten Erhebungsmethoden werden in Kapitel 6.4 die zu überprüfenden Forschungshypothesen vorgestellt, woraufhin die Vorstellung der Ergebnisse (Kapitel 7) und deren Interpretation folgen (Kapitel 8).

Theoretischer Teil

2 Lerntheoretische Grundlagen

Eine der grundlegenden Ausgangsfragen der Pädagogischen Psychologie ist, was es bedeutet zu lernen. Auch wenn sich verschiedene Lerntheorien darüber einig sind, dass Lernen ein Prozess ist, der unmittelbar an Erfahrungen gebunden ist und eine nachhaltige Veränderung des Verhaltenspotenzials¹ zur Folge hat, so gibt es verschiedene Auffassungen darüber, was diesen Lernprozess genau ausmacht oder welchen Gesetzmäßigkeiten er unterliegt (Hasselhorn & Gold, 2022). Für die vorliegende Arbeit ist ein genauere Blick in zumindest eine Auswahl von lerntheoretischen Annahmen von Interesse, insbesondere mit Bezug auf die Rolle von individuellen Vorstellungen auf den Lernprozess.

Dass individuelle Vorstellungen über ein Thema für das Lernen dieses Themas relevant sind, findet sich in zahlreichen Lerntheorien wieder. So ist beispielsweise in der Grundannahme, dass Lernen ein Prozess des Wissenserwerbs ist, der Abgleich von neu aufgefassten Informationen mit bereits vorhandenem Wissen ein wesentlicher Schritt erfolgreichen Lernens und für die Festigung des neuen Wissens nötig (Hasselhorn & Gold, 2022). Wissenserwerb wird hier jedoch aus einer kognitionspsychologischen Perspektive betrachtet, bei der mentale Bilder des Reizmaterials „als Resultate von Informationsverarbeitung in Form von Regeln und Konzepten produziert und gespeichert werden“ (Hasselhorn & Gold, 2022, S. 60).

Die inzwischen am häufigsten vertretene Auffassung darüber, wie Lernen funktioniert, erweitert diese Vorstellung des Wissenserwerbs mit einer konstruktivistischen Sichtweise. Diese schreibt lernenden Personen eine aktive Rolle zu. Sie konstruieren das Wissen selbst, durch eine „aktive mentale Auseinandersetzung mit dem Lerngegenstand“ (Renkl, 2020, S. 6) und sind nicht lediglich automatisch ablaufenden Informationsverarbeitungsprozessen ausgesetzt.

Diese Perspektive der aktiven Informationsverarbeitung hat ihren Ursprung in den Ideen von zahlreichen Lerntheoretikern, unter ihnen auch Jean Piaget (Hasselhorn & Gold, 2022).

¹ Das Lernergebnis äußert sich nicht zwangsläufig in unmittelbar beobachtbarem Verhalten. Deshalb ist hier von einem Verhaltenspotenzial die Rede und nicht von dem Verhalten selbst (s. Hasselhorn & Gold, 2022, S. 36).

2 Lerntheoretische Grundlagen

Die kognitiven Vorgänge, die für solch eine aktive Informationsverarbeitung gebraucht werden, werden mithilfe des sogenannten Arbeitsspeichers oder Arbeitsgedächtnisses beschrieben. Dieses ist dafür verantwortlich, aus den von außen aufgenommenen Daten die relevanten Informationen herauszuarbeiten und zu interpretieren. Dieser Schritt geschieht durch das Abgleichen mit dem individuellen Vorwissen aus dem Langzeitspeicher des Gedächtnisses (Renkl, 2020). Relevant für diesen Prozess ist auch die begrenzte Kapazität des Arbeitsspeichers (s. Kapitel 2.2.2).

Mit dieser konstruktivistischen Sicht auf das Lernen wird schnell ersichtlich, dass das Vorwissen und individuelle Vorstellungen eine bedeutende Rolle haben. Sie sind der Gegenstand, anhand dessen neue Informationen interpretiert und eingeordnet werden, und sie bilden deshalb in gewisser Weise die Rahmenbedingungen des aktiven Wissensaufbaus (Hasselhorn & Gold, 2022).

Mit dem Blick auf Themen, bei denen im Schulunterricht erfahrungsgemäß größere Schwierigkeiten bestehen, angemessenes Fachwissen aufzubauen, haben Forschungsergebnisse aus der Naturwissenschaftsdidaktik bereits früh gezeigt, dass vergleichsweise wenige und ähnliche (nicht wissenschaftliche) Vorstellungen zu diesen Themen bei Schüler*innen vorhanden sind. Da gemäß der konstruktivistischen Sichtweise diese Vorstellungen das weitere Lernen maßgeblich beeinflussen und dementsprechend Lehrsituationen für eine bestmögliche Unterstützung angepasst werden müssen, beschäftigt sich die fachdidaktische Forschung mit der themenspezifischen Untersuchung solcher Vorstellungen besonders intensiv seit den 1970ern (Schecker, Wilhelm, Hopf & Duit, 2018).

Aus der Untersuchung gängiger Schülervorstellungen zu fachlichen Themen entwickelte sich außerdem die Forschung zum sogenannten Conceptual Change, dem Konzeptwechsel. Mit Konzepten sind im Allgemeinen die mentalen Repräsentationen von Ideen gemeint, die als grundlegende Wissensstrukturen des Verstehens und der Emotionen vorliegen (Krajcik & Shin, 2023, S. 124). Die Conceptual Change-Forschung befasst sich mit tiefergehenden Fragen zum Konzeptverständnis bei Kindern, beispielsweise was ein Konzept ausmacht, wie starr diese Konzepte sind, ob sie in kleinere Teile aufgetrennt werden können oder jeweils als Ganzes bestehen, und, für die Disziplin der Naturwissenschaftsdidaktik wohl am relevantesten: wie sich wissenschaftliche Konzepte im Kontext „naiver“ Konzepte bei Schüler*innen entwickeln (diSessa, 2022). Im Folgenden wird auf die

Conceptual Change-Forschung näher eingegangen, mit einem speziellen Blick auf die Entwicklung wissenschaftlicher Konzepte zum Thema Struktur der Materie.

2.1 Conceptual Change

Die Conceptual Change-Forschung hat ihren Ursprung in der Arbeit von Thomas Kuhn (1970, zitiert nach diSessa, 2022; Vosniadou, 2013a), in der er die Umstände betrachtet, die für die Veränderung von wissenschaftlichen Theorien verantwortlich sind (Vosniadou, 2013a). Nach ihm agieren Theorien in der Wissenschaft im Rahmen geteilter Vorstellungen, Annahmen, Verpflichtungen und Praktiken, die sich unter dem Begriff „Paradigma“ zusammenfassen lassen. Wenn sich nun über die Zeit hinweg wissenschaftliche Entdeckungen ansammeln, die nicht in das vorherrschende Paradigma passen, dann betritt die Wissenschaft eine Krisenzeit, die nur durch einen Paradigmenwechsel gelöst werden kann. Als Beispiele für solche wissenschaftlichen Umbrüche nennt Kuhn bedeutende Theorien verschiedener Disziplinen: Newtons Gesetze aus der Physik, Kopernikus' Theorie aus der Astronomie, Darwins Evolutionstheorie aus der Biologie. In all diesen Fällen wurden neue Ansätze entwickelt, um bereits bekannte oder neue Phänomene zu erklären. Es musste ein Paradigmenwechsel, ein Conceptual Change stattfinden, damit angemessen auf die derzeit aktuellen Erkenntnisse eingegangen werden konnte (Thagard, 1992, zitiert nach Vosniadou, 2013a).

Ausgehend von dieser wissenschaftshistorischen und -philosophischen Betrachtung fand sich die Idee des Conceptual Change auch in Arbeiten der Entwicklungspsychologie und Naturwissenschaftsdidaktik wieder (Vosniadou, 2013a). Posner, Strike, Hewson und Gertzog (1982, zitiert nach diSessa, 2022; Vosniadou, 2013b) formulierten die Theorie, der zufolge die Konzepte von Lernenden ähnlich zu betrachten sind wie die Konzepte von Wissenschaftler*innen: An bestehenden Vorstellungen wird so lange festgehalten, bis die Gründe, diese aufzugeben, gut genug sind (diSessa, 2022). Dementsprechend besteht die Theorie von Posner et al. aus vier Bedingungen, die erfüllt sein müssen, damit Conceptual Change stattfinden kann: (1) Die Lernenden müssen mit den bereits vorhandenen Vorstellungen unzufrieden sein, (2) es muss eine alternative Vorstellung geben, die logisch und verständlich ist, (3) die neue Vorstellung muss darüber hinaus intuitiv plausibel sein und (4) die neue Vorstellung sollte für neue Situationen fruchtbar, also erfolgreich sein (Posner et al., 1982, zitiert nach Duit, 2015).

2 Lerntheoretische Grundlagen

Auch wenn die Theorie von Posner et al. nach eigenen Angaben bloß erkenntnistheoretischer Natur ist, keine psychologische Realität widerspiegelt und nicht als Anleitung für unterrichtliche Gestaltung gedacht war (diSessa, 2022), beeinflusste sie in den folgenden Jahren die Ausrichtung naturwissenschaftlicher Forschung und Lehre maßgeblich (Vosniadou, 2013b). Sie wurde Teil des später so genannten „klassischen“ Conceptual Change-Ansatzes, welcher Vorstellungen von Schüler*innen ähnlich wie wissenschaftliche Vorstellungen behandelt: Die Schüler*innen sollen durch Evidenz von der „korrekten“ Sichtweise überzeugt werden (Vosniadou, 2013b). Da laut dieses Ansatzes eine Unzufriedenheit mit der bisherigen Vorstellung bestehen muss, wurde die Erzeugung eines sogenannten kognitiven Konflikts eine gängige Lehrmethode (Vosniadou, 2013b).

Auch wenn sich dieser Ansatz oder Teile dieses Ansatzes in aktuellen Lehrbüchern beispielsweise der Naturwissenschaftsdidaktik (z. B. in Kircher, Girwidz & Häußler, 2015) noch häufig wiederfinden, hat sich die Conceptual Change-Forschung in verschiedene Richtungen weiterentwickelt. Neben der direkten Konfrontation mit Fehlvorstellungen, mit der Absicht diese zu ersetzen (Smith et al., 1993, zitiert nach Vosniadou, 2013b), standen über die darauffolgenden Jahre auch alle weiteren Hauptpunkte des klassischen Ansatzes unter Kritik (Vosniadou, 2013b): Forschende beschrieben Conceptual Change nicht als Phänomen, das plötzlich und radikal stattfindet, sondern langsam und schrittweise (Caravita & Halden, 1994; Vosniadou & Brewer, 1992, zitiert nach Vosniadou, 2013b). Fehlvorstellungen wurden nicht als falsche oder missverstandene Theorien betrachtet, sondern als fehlerhafte Erweiterungen produktiven Wissens (Smith, diSessa & Roschelle, 1993, zitiert nach Vosniadou, 2013b). Neben kognitiv-rationalen Faktoren wurde auch die Wichtigkeit affektiver und motivationaler Faktoren für einen Conceptual Change betont (Pintrich, Marx, & Boyle, 1993; Sinatra & Pintrich, 2003, zitiert nach Vosniadou, 2013b) und dass soziale und situationale Aspekte ebenfalls eine signifikante Rolle spielen (Hatano & Inagaki, 2003, zitiert nach Vosniadou, 2013b).

Untersuchungen dieser und weiterer Aspekte des Conceptual Change führten die Theorien in der Forschung der vergangenen Jahrzehnte in verschiedene Richtungen. Dennoch lassen sich die gängigsten Theorien im Wesentlichen zwei Arten von Ansätzen zuordnen (diSessa, 2022; Özdemir & Clark, 2007): dem theoriebasierten Ansatz und dem fragmentbasierten Ansatz. Der eine ordnet Wissen eine theorieartige Struktur zu, während der andere von einem eher fragmentartigen Aufbau

ausgeht. Die zwei Ansätze unterscheiden sich also in ihren Auffassungen darüber, wie Wissen aufgebaut wird, wie es strukturiert ist und wie es verändert werden kann. Es gibt allerdings auch grundlegende Annahmen, die die beiden Ansätze einengen, zum Beispiel, dass Lernende in ihrem individuellen Wissensaufbau maßgeblich durch alltägliche Erfahrungen beeinflusst werden und dass die „naiven“ Konzepte, die dadurch entstehen, auch das Wissen der Lernenden, das sie im Rahmen des Schulunterrichts aufbauen, beeinflussen. Die zwei Theorieansätze sind sich außerdem darin einig, dass individuelle Vorstellungen in der Regel schwer zu ändern sind und dies einen zeitaufwändigen Prozess benötigt (Özdemir & Clark, 2007).

Die Vorstellungen darüber, wie Wissen aufgebaut ist und verändert werden kann, sind nicht nur für die Forschung, sondern auch für die Gestaltung von Lernsituationen und -materialien ausschlaggebend. In den folgenden Unterkapiteln wird deshalb auf die relevantesten Aspekte beider Theorieansätze eingegangen.

2.1.1 Der theoriebasierte Ansatz

Den theoriebasierten Ansatz zeichnet in erster Linie die Annahme aus, dass naives Wissen bei Kindern in strukturierter Form vorliegt, mit Ähnlichkeiten zu einer wissenschaftlichen Theorie. Auch wenn mehrere prominente Theorien grundsätzlich diesem Ansatz zugeordnet werden können (beispielsweise Chi, 2005; Ioannides & Vosniadou, 2002, Carey, 1999, zitiert nach Özdemir & Clark, 2007), so gibt es innerhalb dieses Ansatzes differenzierte Vorstellungen zu dem Conceptual Change-Vorgang.

Careys *The Origin of Concepts* (2009) ist das wohl prominenteste Beispiel einer rein theoriebasierten Sichtweise und wird oft als Vertreter des sogenannten Theory Theory-Ansatzes genannt (s. diSessa, 2022; Vosniadou, 2013b). So wie andere Theory Theory-Ansätze, beschreibt der von Carey, dass Konzepte bei Kindern in theoretische Strukturen eingebettet sind und dass Conceptual Change dann stattfindet, wenn diese Konzepte im Licht neuer Theorien reinterpretiert werden müssen (Carey, 2008, zitiert nach Vosniadou, 2013b). Dabei liegt oft das Problem der Inkommensurabilität vor, der Unvergleichbarkeit eines neuen konzeptuellen Systems mit dem alten. Inkommensurabilität beschreibt also die Beziehung zwischen diesen beiden Systemen: Das eine besteht nicht nur aus Konzepten, die in dem anderen fehlen, die Konzepte können aus Sicht des jeweils anderen Systems nicht einmal beschrieben werden, sie sind nicht interpretierbar (Carey, 2009). Die Idee

2 Lerntheoretische Grundlagen

der Inkommensurabilität hat ihren Ursprung in den Arbeiten von Kuhn (1970, zitiert nach diSessa, 2022).

Um das Problem der Inkommensurabilität zu lösen, bietet Carey (2009) das sogenannte Quinian Bootstrapping als Prozess des Konzeptwechsels an (benannt nach dem Philosophen Willard Van Orman Quine). Wortwörtlich genommen beschreibt der Begriff die Idee des unmöglichen Vorgangs, sich an den eigenen Stiefelriemen, den bootstraps, hochzuziehen. Er wurde als Bild gewählt, um auf die hohe Schwierigkeit hinzuweisen, die mit der Erstellung völlig neuer Konzepte einhergeht, wenn diese neuen Konzepte nicht in den vorangehenden fundiert sind (Carey, 2009, S. 22). Es wird also ein Lernmechanismus beschrieben, der nicht lediglich bereits bekannte Konzepte auf neue Art kombiniert, sondern etwas neues erschafft (Wiser & Smith, 2016, S. 2f).

Quinian Bootstrapping kann im Wesentlichen heruntergebrochen werden auf mehrere Schritte (ebd., S. 3): Es umfasst immer explizite Symbole, die als Platzhalter für neue Konzepte dienen und sich bestenfalls nur teilweise durch bereits bekannte Konzepte interpretieren lassen. Bootstrapping macht sich die Fähigkeit einer Person zunutze, (a) neue Symbole zu generieren oder zu erlernen, und (b) neue Verbindungen zwischen diesen Symbolen in Form von Sätzen oder Gleichungen zu entdecken oder vermittelt zu bekommen. Diese dienen dann als größere Platzhalter-Strukturen und stellen Informationen über die Beziehungen zwischen den Konzepten bereit. Im letzten Teil des Bootstrapping-Prozesses wird (c) eine Interpretation der Symbole vorgenommen, durch eine Reihe koordinierter Vorgänge: dem Herstellen von Analogien, dem Durchführen von Gedankenexperimenten, dem induktiven und abduktiven Schlussfolgern. All diese Vorgänge haben das Ziel, Verbindungen zwischen den neuen mentalen Repräsentationen herzustellen und sind dann erfolgreich, wenn sie angemessen orchestriert und mit dem Zweck eingesetzt werden, ein neues Konzept zu erlernen (ebd.).

Als Szenarien, in denen Bootstrapping-Prozesse für das Lernen verwendet werden sollten, nennt Carey die Mathematik und naturwissenschaftlichen Fächer. Der Grund dafür liegt darin, dass diese Fächer typischerweise neuartige, alltagsferne Konzepte beinhalten, für deren Verständnis ein Conceptual Change nötig ist (Carey, 2009, S. 436ff). Als Beispiel dafür, wie das funktionieren kann, weist Carey auf Studien von Kolleg*innen hin, unter anderem Smith (2007), die ein sich an Bootstrapping-Mechanismen bedienendes mehrwöchiges Curriculum zum Thema

Volumen und Gewicht von Gegenständen entwickelt und eingesetzt hat (Carey, 2009, S. 439ff).

Neben solchen experimentellen Momentaufnahmen („snapshot studies“), wie sie von diSessa genannt werden (diSessa, 2022, S. 126), ist die Arbeit von Carey vor allem entwicklungswissenschaftlicher Natur. Das lässt sich auch daran erkennen, dass ein Hauptfokus ihrer Theorie auf der Beschreibung des Ursprungs von Konzepten bei sehr jungen Kindern liegt. Sie geht davon aus, dass mentale Repräsentationen nicht lediglich durch sensorische Reize entstehen, sondern dass es auch angeborene Repräsentationen („conceptual representations“) gibt (Carey, 2011). Diese sogenannten developmental primitives unterscheiden sich von Repräsentationen, die durch äußere Reize entstehen, da sie konzeptionellen Inhalt in sich tragen und die sogenannte core cognition (Kernkognition) bilden (Carey, 2011).

Neben Konzepten der core cognition beschreibt Carey auch Repräsentationen sogenannter intuitiver Theorien, die sich von der core cognition unter anderem dadurch unterscheiden, dass sie nicht angeboren sind und sich erst später entwickeln. Sie sind zwar auch durch feste Strukturen organisiert, diese sind jedoch nicht über die Kindheit hinweg konstant (Carey, 2009, S. 22). Damit erinnern die Überlegungen von Carey an die Framework Theory von Vosniadou (z. B. 2013b) welche ebenfalls einen theoriebasierten Ansatz verfolgt und in der wissenschaftlichen Community zu den am häufigsten unterstützten gehört (Potvin et al., 2020).

Auch die Framework Theory beschreibt das Wissen von Kindern als theorieartig vernetzt. Anders als bei Carey (2009) wird dabei jedoch nicht der Frage nachgegangen, ob naive Konzepte angeborenen Ursprungs sind, der Fokus liegt stattdessen auf älteren Kindern und auf der Frage nach der Reorganisation ihres Wissens, besonders im Kontext von Unterricht (Vosniadou, 2013b).

Die Framework Theory beschreibt den Prozess des Wissenserwerbs als die Konstruktion einer „naiven Physik“, die nicht lediglich aus bruchstückhaften Beobachtungen besteht, sondern ein in sich relativ stimmiges Netzwerk, eine framework theory (Rahmentheorie) bildet (ebd., S. 13). Neben der Physik nennt Vosniadou noch drei weitere Domänen, in welchen schon im frühen Kindesalter framework theories aufgebaut werden: Psychologie, Mathematik und Sprache.

Diese framework theories sind definiert als gerüstartige Strukturen, die aus den grundlegendsten ontologischen Festlegungen bestehen, hinsichtlich derer sich jede