

Kurzfassung

Im naturwissenschaftlichen Unterricht setzt hypothesengeleitetes Experimentieren bei den Lernenden eine Grundvorstellung über die untersuchten Zusammenhänge voraus. Die Arbeit mit einem dynamischen Modell soll im didaktischen Konzept der physikalischen Modellbildung die Lücke zwischen einer naturwissenschaftlichen Fragestellung und einer im Experiment überprüfaren Hypothese schließen.

Die Anwendung des aus erkenntnistheoretischen Überlegungen abgeleiteten Konzepts wird in einer explorativen Studie im Mixed-Methods-Design analysiert, in der sich $N = 41$ Lehramtsstudierende mit GeoGebra-Modellen auf ein Experiment im Praktikum der Optik vorbereiten. Anhand von Videoaufnahmen werden Faktoren und Verhaltensmuster der Arbeit mit einem dynamischen Modell identifiziert. Diese Merkmale werden in Abhängigkeit individueller Lernvoraussetzungen auf Zusammenhänge mit der Qualität und Quantität der formulierten Hypothesen sowie den Handlungen im Experiment untersucht.

Aus den Daten wird ersichtlich, dass die Formulierung komplexer Hypothesen und ihre Überprüfung in einem Experiment erst bei gründlicher Arbeit mit dem dynamischen Modell erfolgt. Als Ergebnis werden Gestaltungsempfehlungen für dynamische Modelle abgeleitet, die eine zielgerichtete Untersuchung des modellierten Systems ermöglichen. Sie werden in einem Unterrichtskonzept für die Optik umgesetzt, das sich durch die Modellierung optischer Phänomene und die Überprüfung der Modellaussagen in Experimenten auszeichnet.

Schlagwörter

- Naturwissenschaftliche Erkenntnisgewinnung
- Modellbildung
- Experimentieren
- Augmented Reality

In fact, equations are just the boring part of mathematics. I attempt to see things in terms of geometry. (S. 43)

Hawking (1988) nach Larsen (2005)

1 Einleitung

Wissenschaftliche Erkenntnisse helfen der Menschheit, die Herausforderungen zu meistern, denen wir im Laufe unserer Geschichte begegnen. Neben den verschiedenen Forschungsgebieten, in denen Lösungen vorgeschlagen werden, spielt die Forschung zum Lehren und Lernen der Naturwissenschaften eine nicht weniger wichtige Rolle. Denn gerade sie vermag es, jungen Menschen wissenschaftliches Denken näher zu bringen. Die Forschungsmethoden der Naturwissenschaften lehren uns, Meinungen darüber, wie sich die Dinge unter welchen Bedingungen entwickeln werden und warum, zu testen und in bewährtes Wissen zu verwandeln. Dieses Wissen wird in Form von wissenschaftlichen Modellen präsentiert, die regelmäßig verfeinert werden und als Grundlage für Vorhersagen und Entscheidungen dienen. Ein Verständnis darüber, wie wissenschaftliche Erkenntnisse gewonnen werden, ist für ihre Akzeptanz in der Gesellschaft unerlässlich.

Um wissenschaftliches Denken zu verinnerlichen, muss es von den Lernenden praktiziert werden. Diese Praxis wird mit Unsicherheiten und Rückschlägen verbunden sein, die jedoch notwendig sind, um neue Fähigkeiten zu entwickeln. Es ist z. B. anstrengender, nach dem Blick in eine Karte den richtigen Weg zu finden, als einer genauen Wegbeschreibung eines Navigationssystems zu folgen. Zuerst muss ein geistiges Bild von der Gegend geschaffen werden. Danach wird die Vorstellung mit den Beobachtungen verglichen und ggf. angepasst. In dem einen Fall wird das Ziel sicher und schnell erreicht, in dem anderen wird die Fähigkeit erworben, sich in einer zuvor unbekanntem Gegend zurecht zu finden. Dieses Beispiel verdeutlicht, wie Lernen und Kompetenzaufbau mit der geistigen Modellbildung zusammenhängen und wie wichtig es ist, geeignete Lernmedien auszuwählen.

Im Fach Physik sind Lernende insbesondere auf Modelle und Modellbildung angewiesen. Raufuß (1989) zählt nach Fruböse (2010) die Übertragung einer komplexen Realität in eine abstrakte Gedankenwelt als eine von vier „Barrieren“ auf, die „nirgendwo sonst“ so stark ausgeprägt sind wie im Physikunterricht (S. 390). In der Arbeit wird zunächst aufgezeigt, wie diese und andere Barrieren in der

1 Einleitung

Natur der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung verankert sind (siehe Kapitel 2). Die Beschränktheit der menschlichen Wahrnehmung erfordert die Konstruktion und Verwendung von Vorstellungen, abstrakten Konzepten und Symbolen zur Beschreibung der uns umgebenden oder von uns in Gang gesetzten Prozesse. Solche Modelle haben zwar einen inneren, mentalen Ursprung, aber sie manifestieren sich in äußeren Repräsentationen, die im Unterricht als Sprache oder Lernmedien verschiedenster Art zum Einsatz kommen.

Auf diesen Überlegungen aufbauend wird ein Ansatz für den Physikunterricht vorgestellt, der das Ziel verfolgt, das wissenschaftliche Denken in den Mittelpunkt zu stellen. Erkenntnistheoretische Überlegungen und fachdidaktische Vorarbeiten werden zum didaktischen Konzept der *physikalischen Modellbildung* zusammengefasst (siehe Kapitel 3). Darin werden naturwissenschaftliche Unterrichtsinhalte gemäß dem *Kreislauf der Erkenntnisgewinnung* strukturiert, um ein Lernen mit Modellen und Experimenten zu ermöglichen. Die Demonstration eines Phänomens oder das Überprüfen von Gesetzmäßigkeiten mit einem Experiment haben bereits einen festen Platz im Physikunterricht. Um jedoch die Arbeit mit Modellen zur Formulierung von Hypothesen zu begünstigen, werden spezielle Lernmedien benötigt. In dieser Arbeit wird dafür die für den Mathematikunterricht entwickelte Dynamische Geometrie-Software (DGS) *GeoGebra* verwendet.¹ *GeoGebra* ermöglicht es, interaktive Lernmaterialien für verschiedene Themen mit einfachen Mitteln zu konstruieren, die die physikalischen Prinzipien dynamisch und damit auf Veränderungen reagierend visualisieren.

Als Repräsentationsform werden symbolische Darstellungen wie Diagramme, Schaltskizzen oder geometrische Konstruktionen in Betracht gezogen. Sie befinden sich auf einem niedrigeren Abstraktionsniveau als die dahinterliegende mathematische Modellierung, was die anfängliche Auseinandersetzung mit den physikalischen Inhalten erleichtert. Die Lernenden können mit *dynamischen Modellen* eigenständig arbeiten und individuelle mentale Modelle physikalischer Vorgänge aufbauen, ohne den mathematischen Formalismus oder die geometrische Konstruktion direkt beherrschen zu müssen. Darüber hinaus verfügen die mobilen Anwendungen von *GeoGebra* über eine Augmented Reality-Funktion (AR,

¹ Diese Schreibweise wird hier gegenüber anderen häufig anzutreffenden Varianten bevorzugt (z. B. „Dynamische Geometriesoftware“), da es sich strenggenommen um eine Software für *dynamische Geometrie* handelt – einen Zugang zu geometrischen Fragestellungen, der vor dem breitflächigen Einsatz von Computern entstanden ist und sich von der klassischen, statischen Elementargeometrie unterscheidet. Die alternative Schreibweise impliziert die Vorstellung einer dynamischen Software für Geometrie, was den mathematischen Kerngedanken ausblendet.

erweiterte Realität), was die Durchführung von *AR-Experimenten* ermöglicht. In AR-Experimenten werden an die reale Situation angepasste Modelle in das Experiment eingeblendet, um die visuelle Überprüfung der Modelle am Experiment zu ermöglichen.

Aus der dargelegten Struktur der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung werden in Kapitel 3.1 Thesen abgeleitet, die als Leitlinien bei der Erstellung von Unterrichtsmaterialien dienen sollen. Alle Thesen können nicht im Rahmen dieser Arbeit empirisch untersucht werden. Stattdessen wird in Kapitel 4 ein spezifisches Anwendungsgebiet für dynamische Modelle aufgezeigt: Studierende arbeiten mit dynamischen Modellen in einer digitalen Lernumgebung, um sich auf einen Versuch im physikalischen Praktikum der Optik vorzubereiten. Im Zentrum der explorativen Untersuchung steht die Frage, wie die Studierenden mit dem Lernmedium umgehen. Um sie zu beantworten, werden einzelne Handlungen erfasst und übergeordnete Strukturen sowie spezifische Verhaltensmuster identifiziert. Des Weiteren wird geklärt, inwiefern und unter welchen Bedingungen Studierende im Speziellen und Lernende im Allgemeinen in der Lage sind, Hypothesen nach der Arbeit mit einem dynamischen Modell zu formulieren.

In Kapitel 5 werden anhand der Studienergebnisse abgeleitete Gestaltungsempfehlungen auf ein Unterrichtskonzept für die Optik der Sekundarstufe I angewendet, das auf der physikalischen Modellbildung basiert. Den Hauptteil bilden dynamische Modelle, die fachliche Konzepte der Anfangs- und der geometrischen Optik visualisieren, um sie in darauffolgenden Experimenten zu überprüfen. Ein wesentliches Merkmal des Unterrichtskonzepts ist die frühzeitige und strikte Trennung zwischen Konstruktion und Wahrnehmung.

Abschließend werden in Kapitel 6 umgesetzte Projekte und Perspektiven für Forschung und Anwendung der physikalischen Modellbildung mit dynamischen Modellen aufgezeigt.

2 Modelle

Der Begriff *Modell* ist im Alltag an vielen Stellen anzutreffen. Er hat je nach Kontext unterschiedliche Bedeutungen. Im deutschen Sprachgebrauch ist seine Verwendung laut dem Eintrag im „Deutschen Wörterbuch von Jacob und Wilhelm Grimm“ (1854) ausgehend von Künstlerkreisen im 16. Jahrhundert nach und nach verbreiteter geworden. Zusammenfassend lassen sich die in verschiedenen Wörterbüchern zu findenden Verwendungen und Unterbegriffe in vier Gruppen einteilen:

1. Verkürzte Abbildung eines bereits existierenden Originals wie z. B. ein Miniaturmodell eines Wahrzeichens einer Stadt
2. Nachzubildende Vorlage, Vorbild oder Muster für ein Produkt wie z. B. ein Architekturmodell oder ein Automodell als Bezeichnung für einen Typ
3. Von einem Künstler abzubildende Person für ein Gemälde oder Foto
4. Gedankliches Konstrukt

Die verschiedenen im Alltag gebräuchlichen Bedeutungen des Modellbegriffs finden sich wieder in dem von Mahr (2008) formulierten epistemischen Muster, in welchen Fällen einer Sache durch ein Subjekt das Modellsein zugeschrieben wird:

1. Ein Gegenstand, der etwas repräsentieren soll, stellt *als Objekt* ein Modell dar.
2. Als Abbildung eines Originals wird er als Modell *von etwas* aufgefasst, wenn er gewisse Anforderungen erfüllt.
3. Aus Beobachtungen am Modellobjekt werden Anforderungen *für etwas* abgeleitet, für das das Modell steht.

Die logische Reihenfolge sieht vor, dass zunächst Modelle hergestellt werden, die sich an einem Original orientieren. Bereits hergestellte Modelle werden von anderen Subjekten verwendet, um Kenntnisse über das Original zu erhalten (siehe Abbildung 1). Aufgrund dieser inbegriffenen Transportfunktion spielen Modelle vor allem als gedankliche Konstrukte eine Rolle in Erkenntnisprozessen, die in der vorliegenden Arbeit auf Unterrichtssituationen übertragen werden. Mittelstraß (2005) definiert Modelle als „Nachbildungen eines realen oder imaginären Gegenstandes mit dem Ziel, etwas über diesen oder mit diesem zu lernen“ (S. 65). Im Physikunterricht bildet das natürliche Phänomen den Gegenstand, der

2 Modelle

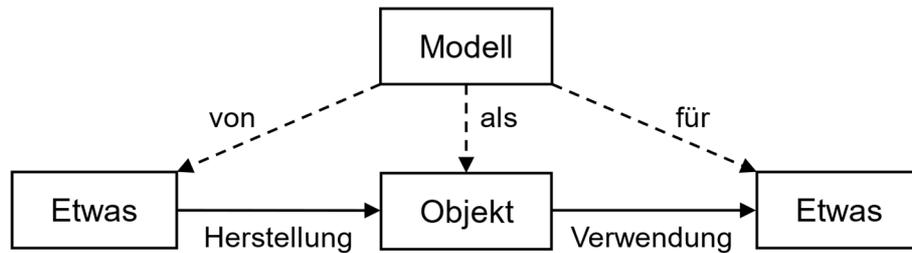


Abbildung 1: Epistemisches Muster nach Mahr (2008)

behandelt und von den Lernenden bewusst oder unbewusst mithilfe von Modellen verstanden wird. Die Notwendigkeit an dieser Stelle über Modelle zu sprechen, liegt in den natürlichen Grenzen der menschlichen Wahrnehmung: Viele Prozesse verfügen über eine unüberschaubare Komplexität oder spielen sich im Mikro- oder Makrokosmos ab. Damit liegen sie außerhalb unseres unmittelbaren Erfahrungsbereichs (dem Mesokosmos nach Vollmer, 1984), sodass eine Vereinfachung und Veranschaulichung komplexer Strukturen unumgänglich ist. In dieser Betrachtung des Modellbegriffs lassen sich Parallelen zu den von Stachowiak (1973) formulierten Merkmalen eines Modells feststellen: Ein Modell als Repräsentation eines Originals (Abbildungsmerkmal) muss nicht zwangsweise alle Attribute des Originals enthalten (Verkürzungsmerkmal), sondern nur die, die zu einer gewissen Zeit für eine gewisse Zielgruppe einem gewissen Zweck dienen (pragmatisches Merkmal). Daraus folgt die legitime Vorstellung, dass es verschiedene Modelle für ein Phänomen geben kann, die unterschiedlichen Zwecken dienen.

Diese Mehrdeutigkeit macht den Modellbegriff umso schwieriger für Lernende, die sich mit ihm entweder gar nicht oder nicht in angemessener Weise auseinandersetzen. Auch in der Fachdidaktik werden solche Begriffe wie *Modellbildung* und *Modellierung* synonym verwendet. Der auf die Konstruktion eines Modells beschränkte Prozess wird im Folgenden als Modellierung bezeichnet, während der Begriff Modellbildung einen umfassenderen Erkenntnisgewinnungsprozess mit Modellen betrifft, der im Zentrum dieser Arbeit steht.

Zunächst wird der Blick auf Modelle innerhalb von verschiedenen Disziplinen exemplarisch behandelt. In der Psychologie spielen Modelle als gedankliche Konstrukte eine wesentliche Rolle und geben einen Einblick darüber, wie Denkprozesse ablaufen (siehe Kapitel 2.1). In der Wissenschaft helfen Modelle als verkürzte Abbildungen eines Ausschnitts der Wirklichkeit, natürliche oder gesell-

schaftliche Prozesse zu beschreiben (siehe Kapitel 2.2). Als Konsequenz kommen Modelle in verschiedener Form im Unterricht vor (siehe Kapitel 2.3). Neben der Arbeit mit didaktisch aufgearbeiteten Modellen findet auch Modellierung als schrittweise Annäherung an das Phänomen mit digitalen Medien statt (siehe Kapitel 2.4).

2.1 Modelle in der Kognitionspsychologie

Die Kognitionspsychologie beschäftigt sich mit der Informationsverarbeitung während des menschlichen Denkens. Das Problemlösen als Untersuchungsgegenstand ist einer der Schlüssel zum Verständnis von Lernen und Wissen eines Individuums (Tobinski, 2017). Während einer Auseinandersetzung mit einem Problem werden *mentale Modelle* beruhend auf der Interaktion von Wahrnehmung und Gedächtnis konstruiert (Dutke, 1994, S. 12). Den Begriff verwendet Johnson-Laird (1983) für Repräsentationen der Wirklichkeit im Kopf. Das Lernen lässt sich im Einklang mit der zuvor erläuterten Transportfunktion von Modellen definieren als „Aufbau interner Modelle der Umwelt, die eine Transinformation auf eben diese Umwelt haben“ (Weltner, 1970, S. 115). Ein internes, mentales Modell wird als ein innerer Gegenstand verstanden, mithilfe dessen – aufgrund struktureller Ähnlichkeit zum Original – Aufgaben und Probleme stellvertretend und mental an diesem inneren Objekt gelöst werden können. Dank der mentalen Repräsentation werden Prozesse vor dem geistigen Auge simuliert, was dem Individuum ermöglicht, Prognosen zu machen und begründet zu handeln. Auch Physiker setzen sich mit den kognitiven Prozessen ihrer Arbeit auseinander. So spricht Hertz (1894) in diesem Zusammenhang von inneren Bildern:

Wir machen uns innere Scheinbilder oder Symbole der äußeren Gegenstände, und zwar machen wir sie von solcher Art, dass die dennotwendigen Folgen der Bilder stets wieder die Bilder seien der naturnotwendigen Folgen der abgebildeten Gegenstände. (S. 1)

Andererseits können aufgrund von Unterschieden in der Wahrnehmung und im Vorwissen verschiedene Aspekte desselben Sachverhalts unterschiedlich gewichtet werden, was zu individuellen mentalen Modellen und anderen Ergebnissen beim Problemlösen führt. Die Aufmerksamkeit wird dadurch gezielt auf bestimmte Lösungen gelenkt, während andere nicht in Betracht gezogen werden können (Moser, 2003, S. 188).

2 Modelle

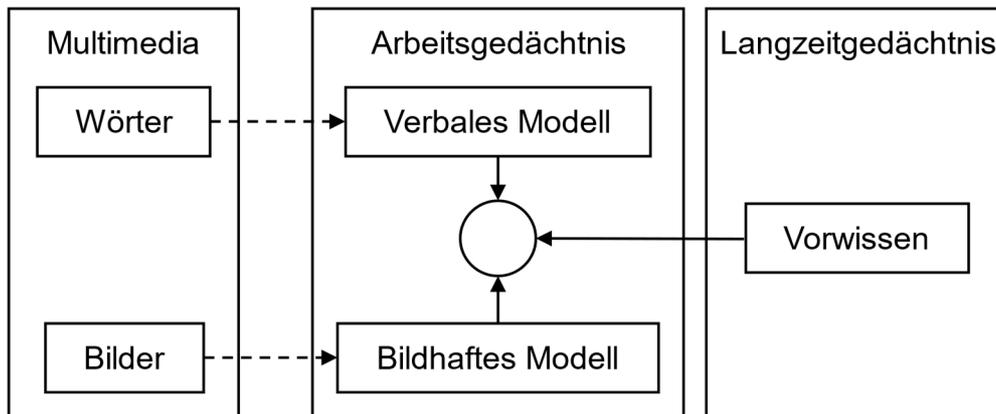


Abbildung 2: Vereinfachter Integrationsprozess verbaler und bildhafter Information in Form von mentalen Modellen und dem Vorwissen in der CTML nach Mayer (2005)

Die Annahme der aktiven Informationsverarbeitung als Konstruktion mentaler Repräsentationen während der Beschäftigung mit Lernmaterial findet sich auch in den Theorien zum multimedialen Lehren und Lernen wie z. B. in der Cognitive Theory of Multimedia Learning (CTML) nach Mayer (2005) wieder. Sensorischer Reize unterschiedlicher Kanäle führen in der CTML zu verbalen und bildhaften mentalen Modellen, die im Arbeitsgedächtnis verarbeitet werden. Einen wichtigen Schritt des multimedialen Lernens stellt die Integration des Vorwissens während der Konstruktion mentaler Modelle dar (siehe Abbildung 2). Außerdem wird auf Auswahlprozesse in der visuellen und auditiven Wahrnehmung sowie interne Organisationsprozesse auf dem Weg zu den mentalen Modellen verwiesen, die in Abbildung 2 vereinfacht wurden (gestrichelte Pfeile). Im integrativen Modell des Text- und Bildverständnisses nach Schnotz und Bannert (2003) wird nicht zwischen verbalen und bildhaften Modellen unterschieden, sondern zwischen visuell-räumlichen, mentalen Modellen und propositionalen Repräsentationen als einfache Informationseinheiten. Während mentale Modelle über direkte Analogiebeziehungen zu Bildern konstruiert werden können, bildet eine lesende Person aus der Textoberflächenstruktur zunächst propositionale Repräsentationen als inhaltliche Basis und konstruiert daraus schließlich ein mentales Modell des im Text beschriebenen Inhalts. Auch der umgekehrte Prozess findet statt: Das über visuelle Kanäle selektierte mentale Modell wird mit propositionalen Repräsentationen aus anderen Kanälen sowie dem Vorwissen abgeglichen und ergänzt. Sie stellen damit die parallele Bild- und Textverarbeitung in Frage, da be-

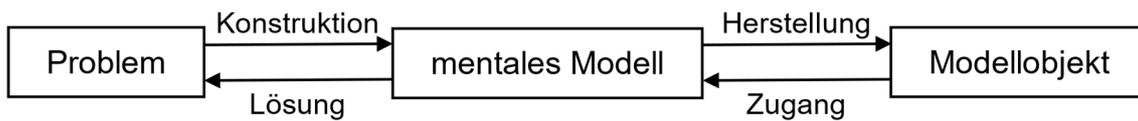


Abbildung 3: Beziehung zwischen einem realen Problem, dem mentalen Modell und dem realen Modellobjekt

schreibende und darstellende Repräsentationen unterschiedlichen Zwecken dienen und mentale Modelle nicht an bestimmte Wahrnehmungskanäle gebunden sind (Schnotz & Bannert, 2003, S. 142f).

Die exakten Strukturen der in unterschiedlichen Situationen individuell entwickelten mentalen Modelle sind für Außenstehende naturgemäß unbekannt. Erst wenn ein Sachverhalt einer anderen Person vermittelt oder zugänglich gemacht werden soll, findet die Herstellung realer *Modellobjekte* als neue äußere Gegenstände statt. Leisen (2005) thematisiert fünf Darstellungsformen, die im Unterricht bei der „Herstellung innerer Repräsentationen“ (mentaler Modelle) zur Verfügung stehen. Sie unterscheiden sich durch ihr Abstraktionsniveau: Zu der untersten Ebene werden (a) gegenständliche Darstellungen und Handlungen gezählt, zu denen auch das Experimentieren gehört. Auf der nächsthöheren Ebene stehen (b) bildliche Darstellungen, die neben Fotos auch vereinfachte Zeichnungen der Gegenstände enthalten können. Danach kommen (c) sprachliche Darstellungen, die durch Fachausdrücke geprägt sind, deren Bedeutung sich aus wissenschaftlichen Modellen ableitet. Das gilt noch stärker für (d) symbolische Darstellungen wie Diagramme, Schaltskizzen oder geometrische Konstruktionen. Auf der höchsten Abstraktionsebene werden schließlich (e) mathematische Darstellungen verortet, da die Mathematik sich einer eigenen, universellen Symbolsprache bedient. Je höher das gewählte Abstraktionsniveau ist, auf dem ein Sachverhalt dargestellt wird, desto höher sind die Anforderungen an die Lernenden. Der Autor empfiehlt Lehrkräften deshalb, einen Wechsel der Darstellungsformen in Abhängigkeit der individuellen Lernvoraussetzungen und des Lerngegenstandes zu vollziehen (S. 11). Welche Ausdrucksform gewählt wird und wie detailreich die Gestaltung ist, hängt somit gemäß dem pragmatischen Merkmal von Modellen nach Stachowiak (1973) von dem Zweck und der Zielgruppe ab, die mit dem Modellobjekt interagieren soll. Ein Modellobjekt und das zugehörige Modell, das der Gegenstand als Modellobjekt repräsentiert, teilen somit nicht dieselben Eigenschaften (Mahr, 2015, S. 331). Außerdem stellt bereits die Verbalisierung der ge-