

Einleitung

Modellieren kommt neben experimentell-empirischen Arbeitsweisen als Erkenntnisgewinnungsmethode in den Naturwissenschaften eine besondere Bedeutung zu. Über die reine Repräsentation von Phänomenen und Problemstellungen hinaus verdeutlichen Modelle naturwissenschaftliche Theorien und verbinden so theoretische Erkenntnisse mit der wahrnehmbaren Realität.

Neben der zentralen Rolle von Modellen in den Naturwissenschaften erfährt Modellieren im naturwissenschaftlichen Unterricht durch die Konzeption der *Scientific Literacy* international und national eine wesentliche Bedeutungszunahme. Die Idee der *Scientific Literacy* mit einer naturwissenschaftlichen Grundbildung für alle Schülerinnen und Schüler als übergreifendes Unterrichtsziel rückt neben dem bisher fokussierten Verständnis grundlegender naturwissenschaftlicher Konzepte die naturwissenschaftlichen Denk- und Arbeitsweisen und deren reflektierte Anwendung ins Blickfeld. Seit der Umsetzung internationaler Schulleistungsstudien wie PISA, deren Rahmenkonzept in den Naturwissenschaften ebenfalls auf der Idee einer *Scientific Literacy* fußt, und der Einführung von Bildungsstandards als Reaktion auf das schlechte Abschneiden der deutschen Schülerinnen und Schüler bei den internationalen Vergleichsstudien, wird Modellieren und Modellieren auch in Deutschland zunehmend Bedeutung für den naturwissenschaftlichen Unterricht beigemessen.

Auch aus der Perspektive konstruktivistischer Lerntheorien bietet Modellieren eine besondere Chance im naturwissenschaftlichen Unterricht. Schülerinnen und Schülern erhalten durch Modellieren den notwendigen Gestaltungs- und Erkenntnisraum, um eigene Vorstellungen von der Welt und den beobachtbaren Phänomenen zu entwickeln und dabei ihr Wissen zu konstruieren. Modellieren wird dabei zur Grundlage für Wissenserwerb und Lernen.

Modellieren hat als Erkenntnisgewinnungsmethode der Naturwissenschaften zwar Eingang in die deutschen Bildungsstandards der naturwissenschaftlichen Fächer gefunden, bei der Evaluation des Bildungssystems, dem Kernelement einer *evidence based policy and practice* zur Weiterentwicklung des Bildungswesens, ist naturwissenschaftliches Modellieren im Vergleich zu Fachwissen bisher allerdings unterrepräsentiert. Deutlich wird dieses Ungleichgewicht im Fehlen evidenzbasierter Kompetenzmodelle für Modellierungskompetenz in den Naturwissenschaften als Basis für Testinstrumente zur Erfassung der Kompetenzen und zur Evaluation der Bildungsstandards in Vergleichsstudien.

Bisherige Ansätze zur Erfassung naturwissenschaftlicher Modellierungskompetenz nehmen entweder die unter *Scientific Modeling* zusammengefassten Beschreibungen von Modellierungs-

prozessen im angloamerikanischen Raum nicht in den Blick, sie vermischen epistemologische Aspekte des Verständnisses von Modellieren zur Erkenntnisgewinnung mit konzeptuellem Wissen oder es fehlt ihnen an empirischer Evidenz.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, diese Lücke mit dem Ansatz theoriegeleiteter, evidenzbasierter Kompetenzmodellierung zu schließen.

Aus Gegenüberstellungen und systematisierter Zusammenschau existierender Theorien, Beschreibungen und Ansätzen zum *naturwissenschaftlichen Modellierungsprozess*, zu *Modellieren als Kompetenz* und zum *Erwerb von Modellierungsfähigkeiten*, die im ersten Teil der Arbeit vorgestellt werden, wird im zweiten Teil ein Kompetenzmodell physikalischer Modellierungskompetenz mit den Subkompetenzen *epistemologisch-metakognitiv*, *prozedural* und *deklarativ* abgeleitet und mit einer kognitionspsychologischen Einteilung von Wissensarten strukturell validiert.

Deklarative und *epistemologisch-metakognitive* Modellierungskompetenz lassen sich aus bisherigen Ansätzen klar umreißen. Die Aspekte *prozeduraler* Modellierungskompetenz sind zwar theoretisch in unterschiedlichen Ansätzen beschrieben und finden sich auch in Teilen in existierenden Kompetenzmodellen wieder, eine Systematisierung und Abgrenzung dieser Teilkompetenz wurde jedoch bisher nicht vorgenommen. Deshalb liegt sowohl in der Modellierung dieser Teilkompetenz als auch in der zugehörigen Testentwicklung ein besonderer Schwerpunkt dieser Arbeit.

Zur Überprüfung des Kompetenzmodells werden im dritten Teil der Arbeit aus den Kompetenzbeschreibungen in den zwei physikalischen Inhaltsbereichen Kinematik und Optik Testinstrumente konstruiert, selektiert und pilotiert und in je einer Hauptstudie eingesetzt, um das theoriebasierte Kompetenzmodell empirisch in beiden Inhaltsbereichen zu überprüfen.

Für die *epistemologisch-metakognitive* Modellierungskompetenz kann dabei auf bereits bestehende, empirisch bestätigte Testinstrumente zurückgegriffen werden. Zur Erfassung der *deklarativen* Modellierungskompetenz werden Bestandteile von Konzeptwissenstest mit eigenentwickelten Testaufgaben zu Charakteristika und Grenzen der in den beiden Inhaltsbereichen relevanten etablierten Modelle kombiniert.

Da *prozedurale* Modellierungskompetenz losgelöst von den beiden anderen Teilkompetenzen in der Naturwissenschaftsdidaktik bisher nicht systematisiert wurde, erfolgt an der Stelle eine systematische Testentwicklung basierend auf dem Subkompetenzmodell prozeduraler Modellierungskompetenz. Eine besondere Herausforderung stellt dabei der Inhaltsbezug dieser Kompetenz dar: als inhaltsbereichsübergreifende Kompetenz der *Erkenntnisgewinnung* zugeordnet, lässt sich die Fähigkeit zu modellieren jedoch nur eingebettet in den jeweiligen Inhaltsbereich erfassen.

Diesem Problem begegnet die vorliegende Arbeit durch eine vom Inhaltsbereich unabhängige Operationalisierung und Entwicklung der Konstruktionsanleitung. Der jeweilige Inhaltsbereich kommt erst bei der Konstruktion der Testitems und des daran anschließenden Kodiermanuals zum Tragen. Die Implementierung der übergreifenden Operationalisierung in zwei unterschiedliche Inhaltsbereiche trägt der Ambivalenz des Inhaltsbezugs ebenfalls Rechnung.

Anhand der empirischen Belege der beiden Hauptstudien lässt sich zunächst die psychometrische Qualität der Testinstrumente beurteilen, um anschließend die Frage nach der Bestätigung des Kompetenzmodells in unterschiedlichen physikalischen Inhaltsbereichen zu beantworten. Ein Vergleich der empirischen Ergebnisse beider Inhaltsbereiche liefert schließlich Belege für die Zuordnung von Modellierungskompetenz zu einem inhaltsbereichsübergreifenden Kompetenzbereich, eben dem der Erkenntnisgewinnung.

1 Kompetenzmodellierung und Kompetenzmessung

Kompetenzmodellierung ist seit Anfang 2000 in der deutschen Forschungslandschaft deutlich präsent. Ausgelöst durch die wenig zufriedenstellenden Ergebnisse in internationalen Schulleistungsstudien wie dem *Programme for International Student Assessment* (PISA, OECD 2001) und der *Third International Mathematics and Science Study*² für die Naturwissenschaften (TIMSS, Harmon et al. 1997), die eine Diskrepanz zwischen den Zielen und Ansprüchen des Bildungssystems und den tatsächlich erworbenen Fähigkeiten aufzeigten (Klieme und Leutner 2006), wurden intensive Bemühungen zur Verbesserung und Erneuerung des Bildungssystems eingeleitet. Die Bildungspolitik vollführte einen Paradigmenwechsel weg von einer Inputorientierung der Fachsystematik hin zu einer Outputorientierung im Sinne der Entwicklung von Fähigkeiten der Lernenden (Huber 2008), die jedoch die fachliche Bildung nicht aus dem Blick verlieren soll. In dem Spannungsfeld zwischen fachinhaltlicher Systematik, lebens- und arbeitsweltlicher Grundfähigkeiten und Voraussetzungen und Entwicklungsbedürfnisse der Lernenden, verschob sich der Fokus dabei auf transferierbare Schlüsselqualifikationen („life skills“) in denen die Nähe zum Kompetenzbegriff bereits erkennbar wurde.

Die Kultusministerkonferenz der Länder der Bundesrepublik Deutschland (KMK) legte in dieser bildungspolitischen Wende nationale *Bildungsstandards für den mittleren Schulabschluss* fest (Kultusministerkonferenz 2005c), die sich auf Basis eines Gutachten für das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Klieme 2007)³ am Konzept der Kompetenz orientieren, jedoch nicht wie im Gutachten empfohlen aus wissenschaftlich fundierten, empirisch abgesicherten Kompetenzmodellen abgeleitet wurden. Die Bildungsstandards sollten im Sinne einer evidenzbasierten Weiterentwicklung des Bildungssystems regelmäßig in Ländervergleichsstudien überprüft werden. Vor diesem Hintergrund etablierte sich in den Bildungswissenschaften ein ganzes Forschungsfeld zur theoretisch und psychometrisch gestützten Kompetenzmodellierung.

1.1 Definition des Kompetenzbegriffs

Das Konzept der Kompetenz wurde erstmals als Voraussetzung für spezielle Tätigkeiten von McClelland (1973) in Bezug auf Intelligenztests begrifflich gefasst. In Deutschland setzte sich der Kompetenzbegriff mit den o.a. Schulleistungsstudien durch, die die Erfassung individueller, spezifischer Kompetenzen zum Ziel haben. Doch der Begriff wird in unterschiedlicher Weise aufgefasst und ist international nicht anschlussfähig (Neumann et al. 2012). Insgesamt

² Seit 2003 Trends in International Mathematics and Science Study

³ Vorstellung der Studie 2003

umfasst der Kompetenzbegriff in den Bildungswissenschaften Dispositionen, Motivation, affektive Voraussetzungen und erlernbare Fähigkeiten, Wissen und Fertigkeiten, die funktional auf Situationen und domänenspezifische Anforderungen bezogen sind (Klieme und Leutner 2006). Er geht zurück auf den Kompetenzbegriff von Weinert, der sich in Deutschland durchgesetzt hat und ebenfalls den Bildungsstandards zugrunde liegt (Schecker und Parchmann 2006). Franz E. Weinert definiert Kompetenzen als *„die bei Individuen verfügbaren oder durch sie erlernbaren kognitiven Fähigkeiten und Fertigkeiten, um bestimmte Probleme zu lösen, sowie die damit verbundenen motivationalen, volitionalen und sozialen Bereitschaften und Fähigkeiten, um die Problemlösungen in variablen Situationen erfolgreich und verantwortungsvoll nutzen zu können“* (Weinert 2001, S. 27f).

Motivationale und volitionale Faktoren sind mit large scale paper and pencil Tests nicht erfassbar (Schecker und Parchmann 2006) und deren Einbeziehung in den Kompetenzbegriff wirft die Frage auf, ob eine an einem Tag unmotivierte Person dadurch insgesamt weniger kompetent ist (Hartig 2008). Ähnliches lässt sich für die verantwortungsvolle Nutzung diskutieren. Deshalb folgt die vorliegende Arbeit der Einschränkung auf Erlernbares und der kontextbezogenen Definition des DFG⁴-Schwerpunktprogramms *Kompetenzmodelle zur Erfassung individueller Lernergebnisse und zur Bilanzierung von Bildungsprozessen* (Klieme und Leutner 2006). Demnach sind Kompetenzen *„kontextspezifische kognitive Leistungsdispositionen, die sich funktional auf Situationen und Anforderungen in bestimmten Domänen beziehen“* (Klieme und Leutner 2006, S. 879).

Auch PISA definiert Kompetenz als *„prinzipiell erlernbare, mehr oder minder bereichsspezifische Kenntnisse, Fertigkeiten und Strategien“*, allerdings mit volitionalen und motivationalen Aspekten und mit der Einschränkung, dass Handlungskompetenzen nur in Teilaspekten erfassbar sind. (Baumert, Stanat et al. 2001, S. 22)

Bei der Begriffsbestimmung von Kompetenz ist auch der Unterschied zu generellen kognitiven Fähigkeiten zu betonen (Hartig 2008). Kompetenz wird im Gegensatz zu Intelligenz als erlernbar aufgefasst (Schweizer 2006). Außerdem lassen sich beide Konstrukte auch in der Bedeutung von Kontext unterscheiden. Während Intelligenz losgelöst von inhaltlichem Vorwissen auf neue Probleme anwendbar ist, sind Kompetenzen kontextspezifisch (Hartig 2008) und damit nur *„in einem gewissen Maß über ähnliche Situationen generalisierbar“* (Hartig und Klieme 2006, S. 129). Dies offenbart einen kritischen Aspekt bei der Kompetenzmodellierung – wird der Kontext zu eng oder weit gefasst, kommt es entweder zu einer „Überdefinition“ von Kompetenzen, die einfache Einzelhandlungen bereits zur Kompetenz macht, oder es entstehen Generalkompetenzen, die sich nur schwierig definieren lassen und umgekehrt

⁴ Deutsche Forschungsgemeinschaft

kaum Indikatoren für Maßnahmen im Bildungssystem zulassen (Hartig, 2008). Um dies aufzulösen, definiert Hartig (ebd., S. 21) Kontext als „eine Menge hinreichend ähnlicher realer Situationen, in denen bestimmte, ähnliche Anforderungen bewältigt werden müssen“.

Gegenstand dieser Arbeit ist die Beschreibung und Erfassung von naturwissenschaftlicher Modellierungskompetenz in Physik, bei der es sich laut Bildungsstandards um eine Teilkompetenz naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung handelt, und die damit eine inhaltsbereichsübergreifende Kompetenz darstellt (s. Abschnitt 1.4.3 und 2.6.1). Insofern erstreckt sich der Kontextbezug im obigen Sinne auf alle Inhaltsbereiche der Physik. Dem wurde mit der Operationalisierung, Testentwicklung und empirischen Prüfung in zwei Inhaltsbereichen der Physik, der Optik und der Kinematik, Rechnung getragen.

1.2 Kompetenzmessung

Bei Kompetenz handelt es sich um ein unterschiedlich konnotiertes (vgl. Abschnitt 1.1) und nicht direkt beobachtbares, latentes Konstrukt, das nur durch Performanz in Situationen erfasst werden kann (Shavelson 2013). Deshalb müssen für die Beobachtung dieser Kompetenz-auswirkung geeignete Messinstrumente entwickelt werden. Valide Messinstrumente von Kompetenz basieren dabei auf theoretisch fundierten und empirisch bestätigten Kompetenzmodellen (Koeppen et al. 2008), die das jeweilige Konstrukt strukturiert beschreiben. Bei der Entwicklung des Kompetenzmodells, erlauben die Messinstrumente ihrerseits die Überprüfung von Annahmen über Eigenschaften des Konstrukts (Köller 2008) und damit die Prüfung des Kompetenzmodells. Mit den so bestätigten Kompetenzmodellen und Testinstrumenten lassen sich schließlich Vergleichsstudien zur Kompetenzmessung durchführen.

1.2.1 Evaluation der Bildungsstandards

Zentrales Element theoretisch und empirisch fundierter Unterrichtsreformen sind Evaluationsinstitutionen, die Ergebnisse an das Bildungssystem liefern und so eine „*evidence based policy and practice*“ (Klieme und Leutner 2006) ermöglichen. Damit kommt der Kompetenzmessung als Kernbaustein von Evaluation eine Schlüsselfunktion für die Optimierung von Bildungsprozessen und für die Weiterentwicklung des Bildungswesens zu (Klieme und Leutner 2006).

Die dafür nötige theoriebasierte Entwicklung und empirische Prüfung von Kompetenzmodellen und dazugehörigen Testinstrumenten ist dabei Aufgabe der Bildungsforschung (Fleischer et al. 2013).