

KNUT NEUMANN, ALEXANDER KAUERTZ, ANNA LAU, HENDRIK NOTARP &amp; HANS E. FISCHER

## Die Modellierung physikalischer Kompetenz und ihrer Entwicklung Modelling structure and development of students' physics competence

### Zusammenfassung

Klieme et al. (2003) bezeichnen die Formulierung und Operationalisierung von Bildungsstandards als vorrangiges Ziel der Qualitätsentwicklung im Bildungssystem. Für den mittleren Schulabschluss in den naturwissenschaftlichen Fächern wurden im Jahr 2005 Bildungsstandards formuliert. Bei der Operationalisierung eines Modells kommt der Entwicklung und empirischen Überprüfung theoretisch fundierter Kompetenzmodelle besondere Bedeutung zu. Diese Aufgabe obliegt den jeweiligen Fachdidaktiken. Ein Modell für naturwissenschaftliche Kompetenz wurde kürzlich von Schecker und Parchmann (2006) beschrieben. In diesem Artikel wird ein alternatives Modell physikalischer Kompetenz vorgeschlagen. Dazu werden zunächst die Stärken und Schwächen bereits vorliegender Modelle analysiert. Darauf aufbauend wird ein Modell für Kompetenzstruktur entwickelt, das neben Kompetenzbereichen vor allem auf der Grundlage der Komplexität physikalischer Inhalte hierarchisch geordnete Kompetenzstufen ausweist. Zur Beschreibung von Kompetenzentwicklung wird dieses Modell erweitert, so dass die Entwicklungsstadien der Konzeptualisierung zentraler physikalischer Konzepte berücksichtigt werden. Abschließend wird das für eine empirische Prüfung der Modelle notwendige Vorgehen erläutert. Schlüsselwörter: Physik, Kompetenz, Bildungsstandards, Fachwissen, Kompetenzentwicklung

### Abstract

The definition and implementation of national education standards are considered by Klieme et al. (2003) to be most important for quality development of an education system. In Germany, national education standards for secondary level science education were formulated in 2005. The implementation, that is description and empirical verification of competence models within these standards is of fundamental relevance and poses a challenge for research in science education. In contrast to a model of natural science competence recently suggested by Schecker and Parchmann (2006), an alternative model describing physics competence is proposed in this paper. To support this proposal, at first strengths and weaknesses of existing competence models are analyzed. On this basis an alternative structural model of physics competence is developed, which describes hierarchically-ordered competence levels for different areas of competence upon the complexity of physics subject matter. This alternative model is extended to cover competence development by integrating a dimension describing the development of fundamental physics concepts. Finally, detailed procedures necessary for empirical testing are presented.

Keywords: physics, competence, knowledge, skills, educational standards

### 1 Einleitung

Nach intensiver Diskussion wurden im Jahr 2005 Bildungsstandards für den Mittleren Schulabschluss in den Fächern Biologie (Sekretariat der Ständigen Kultusministerkonferenz [KMK], 2005a), Chemie (KMK, 2005b) und Physik (KMK, 2005c) verabschiedet. Bildungsstandards formulieren verbindliche Anforderungen an die Resultate des Lehrens und Lernens in bestimmten Abschnitten des Bildungssystems. Sie benennen die Kompetenzen, die Schülerinnen und Schüler nach Durchlaufen dieser Abschnitte erreicht haben

sollen (vgl. Klieme et al., 2003). Damit sind die Ziele der Lern- und Entwicklungsprozesse im naturwissenschaftlichen Unterricht für die einzelnen Fächer normativ festgelegt. Um eine adäquate Aussage darüber treffen zu können, ob diese Ziele angemessen sind und um damit auch Hinweise für die inhaltliche Gestaltung des Unterrichts in den naturwissenschaftlichen Fächern zu bekommen, ist es notwendig, den Verlauf bzw. die Veränderungen in den Lern- und Entwicklungsprozessen mit Blick auf die angestrebten Kompetenzen zu beschreiben. Dazu müssen

die Ergebnisse fachdidaktischer Forschung in ein Kompetenzmodell überführt werden, das die Struktur und die Entwicklung fachlicher Kompetenz zunächst theoretisch beschreibt. Im Folgenden wird nach einer kurzen Diskussion des Kompetenzbegriffs und einer Darstellung des Forschungsstandes im Bereich der Modellierung physikalischer bzw. naturwissenschaftlicher Kompetenz ein Modell physikalischer Kompetenz und ein Verfahren zur empirischen Prüfung dieses Modells vorgeschlagen.

## 1 Kompetenzmodelle

Das Konzept „Kompetenz“ hat im Kontext von Lernen und Lernerfolg eine besondere Bedeutung erlangt, weil die Konzepte „Wissen“ oder „Intelligenz“ als kontextunabhängige und generelle Dispositionen allein nicht ausreichend erschienen, um die Leistungsfähigkeit eines Individuums zu beschreiben beziehungsweise eine entsprechende Leistung vorherzusagen (z.B. McClelland, 1973). In den Bildungsstandards für den Mittleren Schulabschluss (z.B. KMK, 2005a; KMK, 2005b; KMK, 2005c) wurde die Definition von Weinert, „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, 27), als Definition von Kompetenz übernommen.

Kompetenzmodelle sollen die in Bildungsstandards durch Kompetenzanforderungen beschriebenen Bildungsziele systematisch strukturieren. Sie stellen dadurch den Zusammenhang zwischen abstrakten Bildungszielen und konkreten Unterrichts- bzw. Testaufgaben her. Bei der Entwicklung eines Kompetenzmodells spielen die Bereiche, in denen Kompetenz gemessen werden soll (bestimmt durch normative Bildungsziele), und die Ausprägung der Kompetenz (oder die spezifische Fähigkeit, eine Aufgabe zu lösen) eine zentrale Rolle. Aufgrund des Bezugs zu

fachspezifischen Situationen und der damit verbundenen zentralen Rolle fachbezogener Fähigkeiten und fachbezogenen Wissens sind Kompetenzen in hohem Maße domänenspezifisch (Klieme et al., 2003). Außerdem setzt die Entwicklung fächerübergreifender Kompetenzen ebenfalls gut ausgeprägte fachbezogene Kompetenzen voraus (vgl. Hartig et al., 2007). Kompetenzmodelle sind demnach fachspezifisch zu entwickeln.

Schecker und Parchmann (2006) unterscheiden zwei Arten von Kompetenzmodellen: Kompetenzstrukturmodelle und Kompetenzentwicklungsmodelle. Kompetenzstrukturmodelle beschreiben dabei, nach Kategorien (Kompetenzbereichen, Kompetenzausprägungen) gliedert, die Fähigkeiten, über die ein Lernender verfügen soll beziehungsweise verfügt. Kompetenzentwicklungsmodelle beschreiben darauf aufbauend die Veränderung der Kompetenz des Lernenden als Folge eines Lernprozesses. Eine empirisch abgesicherte Beschreibung der Kompetenzstruktur ist eine Voraussetzung für eine systematische Modellierung der Kompetenzentwicklung.

### 1.1 Kompetenzstrukturmodelle

Empirisch gestützte Kompetenzstrukturmodelle existieren bisher nur für einzelne Lernbereiche, Altersgruppen oder Schülerpopulationen; das differenzierteste im Fach Mathematik (Klieme et al., 2000; Klieme, Neubrand & Lüdtke, 2001, Blum, 2004). Empirisch abgesicherte Strukturmodelle physikalischer Kompetenz liegen bisher nicht vor (Schecker & Parchmann, 2006). Der folgende Abschnitt gibt eine Übersicht über die bereits vorliegenden Kompetenzstrukturmodelle und diskutiert Vorzüge und Defizite.

#### *Übersicht*

Die für Physikunterricht diskutierten Kompetenzstrukturmodelle beruhen im Wesentlichen auf der Konkretisierung des Konzepts naturwissenschaftlicher Grundbildung durch Bybee (1997). Er unterscheidet vier hierarchisch geordnete Stufen naturwissenschaftlicher Grundbildung: nominell, funktional, konzeptuell und prozedural, sowie multidi-

mensional. Eine Unterscheidung der naturwissenschaftlichen Grundbildung in Inhaltsbereiche wird nicht vorgenommen, auch wenn das Modell grundsätzlich zulässt, dass Personen, abhängig von Problem, Kontext oder Thema, unterschiedliche Niveaus naturwissenschaftlicher Grundbildung zeigen können.

Ausgehend von der Beschreibung von Stufen naturwissenschaftlicher Grundbildung bei Bybee (1997) oder Shamos (1995) leiten Klieme, Baumert, Köller und Bos (2000) aus den Daten der TIMS-Studie (Harmon et al., 1997) post hoc ein Modell naturwissenschaftlicher Kompetenz mit den folgenden Stufen ab: „Naturwissenschaftliches Alltagswissen“, „Fähigkeit, alltagsnahe Phänomene in einfacher Weise zu erklären“, „Elementare naturwissenschaftliche Modellvorstellungen“ und „Fähigkeit naturwissenschaftliche Fachkenntnisse anzuwenden und in eine Argumentation einzubringen“ (vgl. Klieme et al., 2000).

Auch in PISA 2000 (OECD, 2001; Baumert et al., 2001) wurde ein Kompetenzmodell post hoc beschrieben, das fünf Stufen naturwissenschaftlicher Grundbildung abbildet, die sich an die von Bybee (1997) vorgeschlagenen Stufen anlehnen. Dabei wird die höchste Stufe („multidimensional“) der Beschreibung von Bybee (1997) fallen gelassen und die beiden darunter liegenden Stufen („funktional“, „konzeptuell und prozedural“) werden in jeweils zwei Stufen differenziert. Die fünf Stufen werden jeweils getrennt für vier Aspekte naturwissenschaftlicher Grundbildung beschrieben (vgl. Prenzel, Rost, Senkbeil, Häußler & Klopp, 2001, 202ff).

Im Rahmen der nationalen Zusatzerhebung zu PISA 2000 wurde ein Kompetenzmodell verwendet, auf dessen Grundlage die Aufgaben des internationalen und nationalen Tests sowohl fünf kognitiven Teilkompetenzen als auch einem Fach zugeordnet werden konnten (Prenzel et al., 2001, 225ff). Für die nationale Zusatzerhebung 2003 wurde dieses Modell auf sieben kognitiven Teilkompetenzen erweitert und als Grundlage der Testkonstruktion verwendet (Senkbeil, Rost, Carstensen & Walter, 2005).

Von Schecker und Parchmann (2006) wird ein Modell vorgeschlagen, das insgesamt fünf Dimensionen umfasst („Inhaltsbereich/Basiskonzept“, „Prozess/Handlung“, „Kontext“, „Ausprägung“ und „Kognitive Anforderung“), wobei die Elemente der Dimension „Inhaltsbereich/Basiskonzept“ je nach Fach Physik oder Chemie anders ausfallen. Bezogen auf eine Abstufung von Kompetenz gehen Schecker und Parchmann (2006) zunächst von unterschiedlichen Profilen bezüglich der Dimension „Ausprägung“ aus, die sich an den Anforderungsbereichen „Wissen wiedergeben“, „Wissen anwenden“ und „Wissen transferieren und verknüpfen“ der Bildungsstandards (KMK, 2005b, 2005c) orientieren, ergänzt um einen Bereich, der sich auf lebensweltliches Wissen bezieht.

Während also Modellierungen naturwissenschaftlicher Kompetenz nach Bybee (1997) versuchen, auf der Grundlage der Abstufung naturwissenschaftlicher Grundbildung post hoc (Klieme et al., 2001; Prenzel et al., 2001, 202ff) zu einer Operationalisierung verschiedener Niveaus der naturwissenschaftlichen Kompetenz von Schülerinnen und Schülern zu gelangen, wollen normative Kompetenzmodelle (Prenzel et al., 2001, 225ff; Senkbeil et al., 2005; Schecker & Parchmann, 2006) Kompetenzstufen a priori festlegen und empirisch bestätigen. Post hoc konstruierte Modelle haben sich für die naturwissenschaftlichen Fächer bisher nicht bewährt. Die Zuordnung von Aufgaben zu den deskriptiv gefundenen Stufen war entweder nicht verlässlich (Prenzel et al., 2001) oder eine Bestätigung der Zuordnung durch Experten ist nur eingeschränkt gelungen (Klieme, 2000). Die Ursachen dafür vermutet Franke (2005) in einer unbefriedigenden Systematik bei der Auswahl von Merkmalen zur Beschreibung der Kompetenzstufen. Demgegenüber zeigt das von Prenzel et al. (2001, 225ff) bzw. Senkbeil et al. (2005) a priori vorgeschlagene zweidimensionale Modell mit fünf bzw. sieben Teilkompetenzen in der einen und drei Fächern in der anderen Dimension eine zufriedenstellende Passung: In beiden Fällen ließen sich die kognitiven Teilkompetenzen gut unter-

scheiden (Prenzel et al., 2001, 225ff; Senkbeil et al., 2005). Eine Differenzierung fachspezifischer Inhalte gelang allerdings nicht, da die Leistungen in jedem einzelnen Teilbereich Biologie, Chemie oder Physik „mehr als 80 Prozent der Varianz im Bezug auf die Naturwissenschaftskompetenz über alle drei Fächer“ (Senkbeil et al., 2005, 14) aufklären. Dieses Ergebnis liegt möglicherweise in der Testkonstruktion begründet. So wird der Inhaltsbereich Chemie durch weniger Aufgaben aufgespannt als die anderen Inhaltsbereiche. Außerdem wurden nur solche kognitiven Kompetenzen berücksichtigt, die für alle Fächer relevant sind. Teilkompetenzen, die ausschließlich in einem Fach, dort aber möglicherweise von zentraler Bedeutung sind, wurden nicht aufgenommen (Senkbeil et al., 2005). Das spiegelt sich auch in einer hohen Korrelation der Teilkompetenzen wieder. Entsprechend bietet die Untersuchung weder für eine fachübergreifend modellierte naturwissenschaftliche Kompetenz noch für die Unterteilung physikalischer Kompetenz in kognitive Teilkompetenzen empirische Evidenz. Aus fachdidaktischer Perspektive lassen sich Überschneidungen der in allen naturwissenschaftlichen Fächern gleichermaßen benötigten Kompetenzen nur dann identifizieren, wenn zunächst die für die einzelnen Fächer notwendigen Kompetenzen möglichst vollständig theoretisch modelliert werden. Folglich muss zur Darstellung naturwissenschaftlicher Kompetenz zunächst von einer fachspezifischen Konstruktion von Kompetenzstrukturmodellen ausgegangen werden.

In den neueren Kompetenzmodellen von Prenzel et al. (2001) und Senkbeil et al. (2005) werden unterschiedliche Ausprägungen kognitiver Teilkompetenzen über Skalenwerte operationalisiert, so dass sich Unterschiede in der Kompetenz der Schüler höchstens norm- nicht aber kriterienbezogen beschreiben lassen. Eine auf übergeordnete, theoretisch fundierte Kriterien bezogene Beschreibung unterschiedlicher Kompetenzstufen ist aber notwendig, um die Unterschiede zwischen Schülern inhaltlich beschreiben (vgl. Klieme

et al., 2000) und somit die Entwicklung in defizitären Kompetenzbereichen fördern zu können. Ein entsprechendes Kompetenzmodell muss Kompetenzbereiche beschreiben, in denen sich eine bestimmte Leistung in einem hierarchisch angeordneten System von Stufen zuordnen lässt (Franke, 2005). Nur so kann die Messung von Kompetenz in eine gezielte Entwicklung von Kompetenz z.B. im Rahmen des Unterrichts überführt werden. Aber auch das von Schecker und Parchmann (2006) vorgeschlagene Modell konnte eine solche Stufung bisher nicht empirisch belegen. Damit existiert zurzeit weder ein Strukturmodell für fachspezifische (biologische, chemische, physikalische) noch für naturwissenschaftliche Kompetenz, das Kompetenz durch aufeinander bezogene, hierarchisch geordnete Stufen valide beschreibt. Ein solches Modell erfordert, neben der Beschreibung von Teilkompetenzen in Form von Kompetenzbereichen, eine a priori Stufenkonstruktion, bei der die Stufen aus einem konsistenten logischen Konstrukt stammen und entsprechend systematisch aufeinander aufbauen; die Hierarchie der Stufen muss eine Hierarchie der Schülerfähigkeiten und der Übergang von einer Stufe zur nächsten einen Entwicklungsprozess abbilden. Entsprechend konstruierte Aufgaben als Operationalisierung eines Kompetenzstufenmodells sollten sich deshalb auf einer Schwierigkeitsskala anordnen lassen.

Im Folgenden werden zunächst die Grundlagen der Definition von Kompetenzbereichen und Kompetenzstufen weiter ausgeführt. Auf Grundlage dieser Ausführungen wird dann im nächsten Kapitel ein Stufenmodell physikalischer Kompetenz entwickelt.

### *Kompetenzbereiche*

Für physikalische Kompetenz sind in den Bildungsstandards für den mittleren Schulabschluss für das Fach Physik (KMK, 2005c) die Kompetenzbereiche Fachwissen, Erkenntnisgewinnung, Bewertung und Kommunikation ausgewiesen. Sie können allerdings im Hinblick auf die Bearbeitung einer komplexen

physikalischen Aufgabe inhaltlich vielfältig miteinander vernetzt sein: Die Bewertung eines fachlichen oder gesellschaftlichen Zusammenhangs lässt sich z.B. nicht ohne die Kenntnis fachlicher Fakten und meist nicht ohne Kenntnis davon vornehmen, wie das jeweilige Ergebnis zustande gekommen ist. Im Kontext der Bearbeitung einer Aufgabe erlauben Kompetenzbereiche deshalb eine Einordnung des inhaltlichen Fokus der Aufgabenstellung, bezeichnen jedoch nicht notwendigerweise unabhängige Dimensionen von Kompetenz.

Die normative Vorgabe von Kompetenzbereichen ist nicht unproblematisch, da jede fachinhaltliche Strukturierung kontrovers diskutiert wird, wie u.a. die unterschiedliche Strukturierung der jeweiligen Fachbücher auf Schul- und Hochschulniveau belegt. In jedem Fall jedoch muss der mögliche Inhaltsbereich strukturiert werden. Dies kann nach historisch genetischen Gesichtspunkten geschehen (wie etwa in Lehrbüchern der Physik durch die Inhaltsbereiche Mechanik, Optik, usw.) oder nach anderen Gesichtspunkten, wie z.B. durch die in den Bildungsstandards für das Fach Physik (KMK, 2005c) formulierten Basiskonzepte (Energie, Materie, System, Wechselwirkung). Welche Art der Strukturierung gewählt wird hängt von fachdidaktischen, lerntheoretischen und bildungspolitischen Vorgaben ab. Eine Struktur, die sich an Basiskonzepten orientiert, die sich durch alle Inhaltsbereiche ziehen, berücksichtigt eine Konzeption kumulativen Lernens, eine Strukturierung ausschließlich nach historisch gewachsenen Inhaltsbereichen in Lehrbüchern berücksichtigt diese oder ähnliche Konzeptionen eher nicht.

Nach Klieme et al. (2003) sollen Bildungsstandards die vorhandenen Lehrpläne der Länder berücksichtigen und dementsprechende Kompetenzbereiche ausweisen. Diese Forderung wurde bei der Entwicklung der Bildungsstandards für die naturwissenschaftlichen Fächer (KMK, 2005a, 2005b, 2005c) erfüllt. Außerdem wurden seit der Veröffentlichung der Bildungsstandards in vielen Bundesländern neue, standardkon-

forme Lehrpläne entwickelt. Entsprechend kann zunächst angenommen werden, dass ein auf Grundlage der Bildungsstandards entwickeltes Kompetenzmodell curricular valide ist. Bei der empirischen Prüfung eines Kompetenzmodells muss diese Annahme durch den Abgleich der Testinstrumente mit den Lehrplänen der Länder geprüft werden.

### *Kompetenzstufen*

Kompetenzstufen müssen im Hinblick auf die Messung von Kompetenz so beschrieben werden, dass sie für die jeweiligen Kompetenzbereiche die Konstruktion spezifischer Aufgaben zulassen. Dabei soll die Schwierigkeit der Aufgaben mit den unterschiedlichen Kompetenzstufen verbunden sein, da nur so Aussagen über die Fähigkeiten möglich sind, die zum Lösen einer bestimmten Aufgabe benötigt werden. Zur Konstruktion solcher Aufgaben muss a priori festgelegt werden, aufgrund welcher Merkmale eine Aufgabe schwieriger ist als eine andere. Es muss also ein Konstrukt geben, das sich in kumulativ hierarchisch angeordnete Elemente gliedern und dementsprechend in Aufgaben umsetzen lässt. Mittels Raschskalierung kann dann die notwendige Verbindung zwischen Schülerfähigkeit und Kompetenzstufen hergestellt werden (Kauertz & Fischer, 2006a).

Um Kompetenz differenziert betrachten zu können, wird im Folgenden ein zunächst fachunabhängiger Komplexitätsbegriff entwickelt, der durch Anwendung auf spezifische Domänen eine hierarchische Abstufung der Komplexität fachlicher Inhalte zulässt und zur Beschreibung von Kompetenzstufen in den jeweiligen Kompetenzbereichen einer Domäne benutzt werden kann.

In der Kognitionspsychologie wird Komplexität bei der Betrachtung von Prozessen häufig qualitativ beschrieben, etwa als „Unterscheidung zwischen höheren und niedrigeren geistigen Prozessen“ (Kail & Pellegrino, 1989, 85). Aebli (1980) schlägt bereits ein nach Komplexität hierarchisiertes Modell der Wissensorganisation vor: „Das bedeutet, dass unser Wissen ein organisiertes, nach Sachverhältnissen verknüpftes Gefüge von

Elementen darstellt, wobei diese Elemente Hierarchien der Komplexität bilden: Einheiten niedrigerer Ordnung sind in solchen höherer Ordnung eingebettet“ (Aebli, 1980, 43). Darüber hinaus wird Komplexität zu einem Merkmal eines Informationsverarbeitungssystems (Klix, 1976), zu einer Theorie über Begriffsfelder, Schemata und Konzepte (Anderson, 1996), zu einer Theorie der Bedeutungsentwicklung (Putnam, 1986), zu einer Entwicklungsbeschreibung kognitiver konzeptueller Ebenen (Piaget, 1976) oder zu einer allgemeinen Theorie der Strukturiertheit kognitiver Systeme (Seiler, 1986, 2001). Bei genauerer Betrachtung der unterschiedlichen Ansätze wird deutlich, dass Komplexität in jedem Fall zur Hierarchisierung von Strukturen benutzt wird, die aus einzelnen Elementen bestehen: „Die Tatsache, dass komplexe Zusammenhänge aus identifizierbaren einfacheren Elementen bestehen, gibt Hinweise darauf, dass ein Übergang vom Einfachen zum Komplexen stattgefunden hat“ (Resnick & Ford, 1981, 39). In der Regel wird allerdings nicht versucht, die Elemente, die Relationen zwischen den Elementen oder die Ordnungen auf den Elementen und damit den Übergang vom Einfachen zum Komplexen präzise zu beschreiben. Nicolis & Prigogine (1987) und Luhmann (1984) nähern sich der Problematik von der anderen Seite. Sie wollen Systeme ordnen und benutzen deshalb Komplexität zur Beschreibung der Struktur und der Entwicklung von Systemen allgemein. Ein beliebiges System besteht nach Luhmann (1984) aus Elementen und Relationen zwischen diesen Elementen. Nun bestehen Sachstrukturen aus Inhalten und Beziehungen zwischen diesen Inhalten. Sie sind im Sinne Luhmanns (1984) also Systeme. Entsprechend kann auch die Komplexität von Sachstrukturen durch Komplexitätsebenen mit jeweils definierten Elementen und Relationen charakterisiert werden. Es muss allerdings davon ausgegangen werden, dass die zu ordnenden Inhalte, wie die Systeme bei Luhmann (1984), abgeschlossen sind. Dies kann für die Inhalte der Schulphysik angenommen werden.

Die Komplexität von Sachstrukturen ist damit durch hierarchisch angeordnete Komplexitätsstufen beschreibbar: Jede Stufe ist durch eine Gruppe von Elementen und durch ihre Relationen gekennzeichnet. Die Komplexität einer Aufgabe wird dann durch die Zahl gleichartiger Elemente und die Relationen zwischen diesen Elementen charakterisiert, die zur Lösung benötigt werden. Es wird entsprechend erwartet, dass sich, beschrieben durch entsprechende Aufgaben, sowohl Inhaltsbereiche der Physik als auch kognitive Leistungen von Schülern, die durch das Lösen dieser Aufgaben bestimmt werden können, durch ein solches Komplexitätsmodell beschreiben lassen: Elemente und Relationen eines Komplexitätsmodells, das Inhaltsbereiche der Schulphysik abbildet, können auf der oben ausgeführten theoretischen Grundlage zur Beschreibung von Kompetenzstufen für Kompetenzbereiche herangezogen werden.

## 1.2 Kompetenzentwicklungsmodelle

Kompetenzentwicklungsmodelle beschreiben, wie sich Kompetenz zum Beispiel als Folge eines Lehr-Lern-Prozesses verändert. Sie geben also an, was ein Lernender schon kann, und was er als nächstes können soll bzw. wird. Damit stellen Kompetenzmodelle eine wesentliche Grundlage einer systematischen Strukturierung der Lehr-Lern-Prozesse im Unterricht dar. Ausgangspunkt für die Beschreibung von Kompetenzentwicklung ist zunächst die Modellierung der Kompetenzstruktur durch Kompetenzbereiche und ihre Ausprägungen. Kompetenzentwicklung wird dann als Veränderung der Ausprägungen beschrieben.

### *Übersicht*

In den frühen Kompetenzmodellen (Klieme et al., 2000; OECD, 2001; Baumert et al., 2001) wird Kompetenzentwicklung in der Schulzeit, in Anlehnung an die von Bybee (1997) konzipierte Abstufung naturwissenschaftlicher Grundbildung, als sukzessives Fortschreiten zur jeweils nächst höheren Stufe verstanden (Hammann, 2004). Da sich aber bereits bei

der empirischen Prüfung der Einteilung in Stufen Schwierigkeiten ergeben haben (vgl. Abschnitt 1.1), wurden ausführliche Untersuchungen zur Kompetenzentwicklung durch vertikales Fortschreiten von der niedrigsten zur höchsten Stufe nicht mehr durchgeführt. In neueren Kompetenzmodellen wird die Ausprägung von Teilkompetenzen bzw. Kompetenzbereichen und damit Kompetenzentwicklung als Veränderungen dieser Ausprägungen entweder durch eine Werteskala (Prenzel et al., 2001; Senkbeil et al., 2005) oder durch hierarchisch nicht geordnete Bereiche operationalisiert (Schecker & Parchmann, 2006). Während sich erstere zur Erfassung von Kompetenzentwicklung nachweislich eignet (vgl. Prenzel et al., 2006), muss für letztere noch die disjunkte Einteilung in Bereiche (vgl. Abschnitt 1.1) nachgewiesen werden.

Neben Arbeiten, die Kompetenzentwicklung auf der Basis von Kompetenzstrukturmodellen beschreiben und damit von einer empirischen Absicherung der Kompetenzstruktur abhängig sind, fokussieren andere Arbeiten direkt auf Kompetenzentwicklung.

So untersucht Hammann (2004) die Kompetenzentwicklung beim Experimentieren. Dabei geht er von einem vereinfachten Konzept naturwissenschaftlichen Arbeitens aus, das einem hypothetisch-induktiven Ansatz nach Klahr und Dunbar (1988) folgt. Darauf aufbauend unterscheidet er drei Kompetenzbereiche: Suche im Hypothesen-Suchraum, Suche im Experimentier-Suchraum und Analyse von Daten. Für jeden Bereich beschreibt er verschiedene Stufen, die sich an den Arbeiten von Bybee (1997) bzw. dem PISA zugrunde liegenden Kompetenzmodell (OECD, 2001) orientieren. Ein empirischer Beleg für die postulierte Entwicklung von Kompetenz beim Experimentieren steht noch aus.

Auch die umfangreichen Arbeiten der Arbeitsgruppe von Aufschnaiter an der Universität Bremen zum Verlauf von Lehr-Lernprozessen (Fischer, 1989; Welzel, 1995; S. von Aufschnaiter, 1998; C. von Aufschnaiter, 1999; C. von Aufschnaiter & S. von Aufschnaiter, 2003) in physikalischen Kontexten können

unter der Perspektive der Entwicklung physikalischer Kompetenz betrachtet werden: Auf kurzen Zeitskalen wird Kompetenzentwicklung dabei als Sequenz von Bedeutungskonstruktionen mit zunehmender Komplexität beschrieben. Dabei setzen Lernprozesse, die einen neuen Inhalt betreffen, grundsätzlich das vollständige Durchlaufen hierarchisch geordneter Komplexitätsstufen voraus (vgl. C. von Aufschnaiter, 2006). Eine elaboriertere Kompetenz geht also auch hier mit dem Erreichen einer höheren Komplexitätsstufe, bezogen auf einen Inhaltsbereich, einher. Allerdings sind diese Beschreibungen Ergebnis querschnittlicher Untersuchungen in verschiedenen Jahrgangs- bzw. Altersstufen; eine längsschnittliche Untersuchung über mehrere Alters- oder Jahrgangsstufen hinweg liegt nicht vor.

Über Jahrgangsstufen (Altersstufen) hinweg untersuchen Liu und McKeough (2005) die Ausdifferenzierung von Konzepten anhand der Entwicklung des Energie-Konzepts. Ausgehend von der Forschungslage zum konzeptuellen Verständnis des Energiekonzepts bei Schülerinnen und Schülern (vgl. Solomon, 1983; Watts, 1983; Gilbert & Pope, 1986; Boyes & Stanisstreet, 1990; Driver, Leach, Scott & Wood-Robinson, 1994; Liu, Ebenezer & Fraser, 2002), beschreiben Liu und McKeough (2005) zunächst theoretisch, auf Grundlage der neo-piagetschen Theorie von Case (1985, 1992), wie sich die verschiedenen Konzeptualisierungen in eine hierarchische Ordnung bringen lassen. Ihr Modell einer Entwicklung des Energie-Konzepts testen sie anhand von Daten der TIMSS-Untersuchung (Harmon et al., 1997). Eine Analyse dieser Daten zeigt, dass die Entwicklung des Energie-Konzepts bei Schülern vom 9. bis zum 18. Lebensjahr durch eine hierarchische Entwicklung vom Spezifischen zum Allgemeinen charakterisiert ist (Liu & McKeough, 2005). Offen bleibt mit Blick auf die Arbeiten von Klieme et al. (2000) allerdings, wie zuverlässig die Zuordnung der TIMSS-Aufgaben zu den so definierten Entwicklungsstufen ist und inwieweit TIMSS-Aufgaben zur Erfassung dieser Unterschiede im konzeptuellen

Verständnis der Schüler überhaupt geeignet sind. Eine analoge Untersuchung der Entwicklung des Materie-Konzepts von Liu und Lesniak (2006; s.a. Liu, 2006) kommt auf der Grundlage eines spezifischen, aus Aufgaben der TIMS-Studie, des National Assessment of Educational Progress (NAEP) und des New York State Regents' Exams selbst entwickelten Testinstruments zu dem Schluss, dass die Entwicklung des Materie-Konzepts, im Gegensatz zu der des Energie-Konzepts, nicht in deutlich unterscheidbaren Stufen verläuft.

Während also die Beschreibung von Kompetenzentwicklung normorientiert über die Veränderungen von Skalenwerten gelingt (Prenzel et al., 2006) zeigt sich, dass eine kriterienorientierte Beschreibung von Kompetenzentwicklung, längs festgelegter Stufen, bisher nicht oder nur eingeschränkt erfolgreich war. Schecker und Parchmann (2006) stellen fest, dass empirisch „bisher gar nicht geklärt ist, in welcher Weise und in welcher Verknüpfung sich die Ausprägungen naturwissenschaftlicher Kompetenz beim Individuum zeitlich entwickeln“ (Schecker & Parchmann, 2006, 57). Gegen eine normorientierte Modellierung spricht, dass eine inhaltliche Anbindung fehlt. Die Unterstützung einer systematischen Entwicklung von Kompetenzen im Unterricht kann dadurch nicht erreicht werden. Wie in Abschnitt 1.1 dargelegt, kann dies nur mittels eines kriterienorientierten Modells gelingen. Auch die Beschreibung von Kompetenzentwicklung als (stufenweises) Fortschreiten vom Konkreten zum Abstrakten wird inzwischen angezweifelt. So weist Stern (2002) mit Blick auf Ergebnisse der Expertiseforschung auf den geringen Erklärungswert des Abstraktionsbegriffs hin und stellt in diesem Kontext fest, dass bereits kleine Kinder abstrahieren können (Pinker, 1994; Stern, 1998). Sie konstatiert: „Experten und Novizen unterscheiden sich also nicht im Abstraktionsgrad ihres Wissens, sondern in dessen Vernetzung und Strukturierung.“ (Stern, 2002, 29).

Diese Kritik kann auch für die auf Bybees (1997) Arbeiten beruhenden Kompetenzmodelle gelten, in denen Kompetenzentwicklung

ausschließlich als stufenweises Fortschreiten von einem eher konkreten, alltagsorientierten Verständnis der Naturwissenschaften hin zu einem eher abstrakten, wissenschaftsorientierten Verständnis beschrieben wird. Dabei muss aber berücksichtigt werden, dass Bybee (1997) selbst unter Kompetenzentwicklung sowohl die Entwicklung von Konzepten von einer Stufe zur nächsten als auch die Entwicklung auf einer Stufe (Bybee, 1997) versteht. Danach wäre höhere Kompetenz sowohl als breitere Verfügbarkeit von Wissen und Fähigkeiten auf einem Niveau als auch als Verfügbarkeit von komplexeren Konzepten auf einem höheren Niveau zu interpretieren. Diese Sichtweise wiederum ist konform mit der von Stern (2002), nach der eine höhere Kompetenz einhergeht mit einer breiteren, flexibler zugänglichen „... Basis von konkretem, situationsbezogenem Wissen, das in hierarchisch angeordneten Bündeln (Chunks) zusammengefasst ist.“ (Stern, 2002, 28). Außerdem wird dieser Ansatz durch die Arbeiten von Liu (2006) gestützt, in denen eine Entwicklung zentraler physikalischer Konzepte vom spezifischen zum Allgemeinen, das heißt von einer engen, nur wenig vernetzten Wissensbasis hin zu einer breiten hoch vernetzten Wissensbasis berichtet wird. Allerdings sind solche Entwicklungsverläufe insgesamt bisher empirisch nur unzureichend beschrieben (Dawson-Tunik, 2006). Die wesentlichen Arbeiten zur Entwicklung physikalischer Konzepte werden im folgenden Abschnitt dargestellt.

### *Konzeptentwicklung*

Das Verständnis physikalischer Konzepte wird im angloamerikanischen Raum unter dem Begriff „Conceptual Change“ (Strike & Posner, 1985) und in Deutschland unter dem Begriff „Schülervorstellungen“ (Duit, 2002) diskutiert. Es ist durch die naturwissenschaftlichen Fachdidaktiken umfassend untersucht, Schülervorstellungen sind für zahlreiche Inhaltsbereiche der Physik und verschiedene Altersgruppen beschrieben (vgl. Duit, 2002): Lernen wird im Rahmen der Forschung zu Schülervorstellungen als Entwicklung von

wenig belastbaren zu einer belastbaren Vorstellung verstanden; wobei ein Individuum auch parallel über zwei unterschiedlich elaborierte Vorstellungen verfügen kann. Dieser Ansatz geht zurück auf Strike und Posner (1985), die eine Parallele zwischen der historisch-wissenschaftlichen Entwicklung und dem Lernprozess der Schüler herstellt. Lernen vollzieht sich nach dieser Sichtweise wie der von Kuhn (1962) beschriebene Paradigmenwechsel bei der Entwicklung von Erkenntnis in einer Wissenschaft. Schmidt (1989) kritisiert, dass Strike und Posner (1985) den Prozess des Konzeptwechsels nicht genau beschreiben (vgl. Breuer, 1994). Im Gegensatz dazu beschreibt von Aufschnaiter (2003) die Entwicklung des Verständnisses fachlicher Konzepte explizit als den Übergang von explorativen über intuitive zu explizit regelbasierten Konzeptualisierungen, wobei sie sich auf die Untersuchung kurzer Zeitskalen konzentriert. Insgesamt fokussiert die fachdidaktische Forschung bisher weniger auf die Genese physikalischer Konzepte bei Schülern über einen längeren Zeitraum, als vielmehr auf die querschnittliche Erhebung der Schülervorstellungen zu einem spezifischen physikalischen Konzept und darauf, wie diese Schülervorstellungen in fachwissenschaftliche Vorstellungen entwickelt werden können. Die Beschreibungen waren allerdings nicht immer empirischer Natur: So schlagen zum Beispiel Driver et al. (1994) zwar vor, dass sich die Vorstellungen der Schüler zum Energie-Konzept längs einer Sequenz von „Persönlicher Energie“ hin zu „Energieerhaltung“ entwickeln sollten, sie stellen jedoch keinen Bezug zu einer längsschnittlichen Betrachtung her und bieten auch keine entsprechende Untersuchung an (vgl. Liu & McKeough, 2005). Viele Arbeiten fokussieren auf eine Steigerung von Unterrichtseffizienz im Hinblick auf den Wechsel von bestehenden, so genannten vorunterrichtlichen Konzepten, hin zu neuen wissenschaftlich-physikalischen Konzepten (vgl. Duit, 2002), ohne die Genese solcher Entwicklungen in der Schule zu beschreiben oder in Interventionen zu variieren.

## 2 Ein Modell physikalischer Kompetenz und ihrer Entwicklung

Ausgehend von den vorangegangenen Ausführungen wird in diesem Abschnitt zunächst ein Strukturmodell physikalischer Kompetenz entworfen, das Kompetenzbereiche und hierarchisch geordnete Kompetenzstufen ausweist. Im Anschluss wird dieses Modell auf die Beschreibung der Entwicklung physikalischer Kompetenz erweitert.

### 2.1 Die Struktur physikalischer Kompetenz

Franke (2005, 35) betont, dass Kompetenzen mehr sind als die „Summe der bereits im alltagssprachlichen Kompetenzbegriff enthaltenen Entitäten (Fähigkeiten, Fertigkeiten, Regeln, Normen, Werte, Ziele, Einstellungen, usw.)“. Ihm zufolge bezieht sich ein Kompetenzkonstrukt auf die prozessuale und systemische Verknüpfung der einzelnen Entitäten und auf die ganzheitliche Wechselwirkung der Konstituenten (Franke, 2005). In diesem Sinne kann Kompetenz, durchaus in Übereinstimmung mit Weinert (2001), als Konglomerat von Entitäten verstanden werden, wobei das Besondere gegenüber einer reinen Ansammlung von Entitäten in einer systematischen, fachlich bedingten Vernetzung zu suchen ist. Auch Klieme et al. (2003) vertreten die Sichtweise, dass sich Abstufungen in der Kompetenz durch unterschiedliche Vernetzung von Entitäten unterscheiden lassen. Dabei ist davon auszugehen, dass sich eine höhere Kompetenz durch eine höhere Komplexität der Vernetzungsstrukturen ausdrückt.

Ein Modell zur Beschreibung der Vernetzung von Inhalten wurde von Fischer, Glemnitz, Kauertz & Sumfleth (2006; vgl. auch Sumfleth, Fischer, Glemnitz & Kauertz, 2006) entwickelt. Vernetzung wird dabei als aktiver Prozess im Unterricht verstanden, so dass neben der Vernetztheit der Inhalte, auch auf Vernetzung bezogene Aktivitäten (z.B. beim Lösen von Aufgaben) berücksichtigt werden.

Die Vernetztheit von Inhalten wird über die Komplexität der Vernetzungsstrukturen beschrieben. Dazu werden spezifische Ein-

heiten definiert, die so genannten Fakten, die als kleinste Entität in der jeweiligen Domäne aufgefasst werden. Diese Einheiten und Kombinationen dieser Einheiten werden zu einer Beschreibung hierarchisch angeordneter Stufen genutzt (vgl. Abschnitt 1.1). Die Hierarchisierung beruht dabei zum einen auf einer Steigerung der inhaltlichen Komplexität (Fakt, Zusammenhang, Übergeordnetes Konzept) und zum anderen auf der Steigerung einer rein numerischen Komplexität (Ein Fakt, Mehrere Fakten, Ein Zusammenhang Mehrere Zusammenhänge). Zusammen mit kognitiven Aktivitäten, mit denen ein spezieller Inhalt vom Individuum verarbeitet wird, können Aussagen nach der Komplexität beurteilt werden, in der sich die inhaltliche Struktur widerspiegelt. Im Idealfall findet sich in der Aussage (z.B. der Aufgabebearbeitung) ein übergeordnetes Konzept wieder (Sumfleth et al., 2006). Ein übergeordnetes Konzept gibt dabei einer großen Zahl an Inhalten eine bestimmte Struktur. Übergeordnete Konzepte unterscheiden sich dabei nicht durch die Inhalte auf die sie sich beziehen, sondern durch die Struktur, die durch die Anordnung der Inhalte definiert wird. Anders ausgedrückt: Die Inhalte des Faches besitzen nicht per se eine Struktur, vielmehr ist die Struktur abhängig von der Betrachtungsweise, das heißt dem übergeordneten Konzept. Dieser Gedanke findet sich auch in den Bildungsstandards zum Mittleren Schulabschluss (KMK, 2005a, 2005b, 2005c) wieder, in denen vier Basiskonzepte als strukturgebend für den Kompetenzbereich „Fachwissen“ hervorgehoben werden.

Um Vernetzung und Lernen miteinander in Beziehung zu setzen, werden als Ausgangspunkt für die Beschreibung dieser Aktivität Strategien und Prozesse herangezogen, wie sie in der Psychologie für Lernprozesse modelliert werden. Im Wesentlichen spielen beim Lernen drei zentrale Prozesse eine entscheidende Rolle: Memorieren, Organisieren und Elaborieren (Wild, Hofer & Pekrun, 2001, 248ff). Memorieren beschreibt den Prozess, der durch häufige Wiederholung zum Abspeichern im Langzeitgedächtnis führt; Organisieren führt zum Schaffen von Zusammen-

hängen zwischen völlig neuen Informationen und ermöglicht dann das Elaborieren, das neues Wissen an bekanntes anknüpft (Mielke, 2001; Gläser-Zikuda, 2001). Für das Lösen von Aufgaben, die bestimmte Vernetzungsleistungen voraussetzen, ergeben sich drei neue Prozesse, die so genannten Vernetzungsaktivitäten: Erinnern, Strukturieren, Explorieren. Das Vorwissen wird dabei zur Auswahl, Steuerung und Kontrolle der Aktivität benötigt. Alle drei Vernetzungsaktivitäten werden benötigt, um einen Inhaltsbereich mittels Aufgaben adäquat bearbeiten zu können. Einzelne oder mehrere Elemente müssen benannt, die Struktur des Inhaltsbereichs sollte adäquat erfasst werden können (z.B. in Graphen oder Tabellen) und es sollte möglich sein neue Inhalte so aufzubereiten, dass sie an das Vorwissen angebunden werden können.

Ein Kompetenzmodell, das die Bildungsstandards operationalisieren soll, muss die in den Bildungsstandards normativ beschriebenen Aspekte von Kompetenz berücksichtigen. Die Bildungsstandards unterscheiden vier Kompetenzbereiche: Fachwissen, Erkenntnisgewinnung, Kommunikation und Bewertung. Wie oben beschrieben wird der Kompetenzbereich Fachwissen durch vier Basiskonzepte charakterisiert. Dieser Kompetenzbereich und die Basiskonzepte stellen den Ausgangspunkt für die Entwicklung eines Modells naturwissenschaftlicher Kompetenz dar. Sie können in Anlehnung an das Modell „Vertikaler Vernetzung“ (Fischer et al., 2006; Sumfleth et al., 2006) als übergeordnete Konzepte aufgefasst werden. Um zu betonen, dass die Basiskonzepte in diesem Sinne nicht nur wichtige fachliche Konzepte sind, die es zu erlernen gilt, sondern das Potential enthalten den Inhalten der Sekundarstufe I eine fachtypische Struktur zu geben, werden sie im folgenden als Leitideen bezeichnet. Dabei muss betont werden, dass eine Auswahl von Leitideen (wie in den Bildungsstandards) nicht vollständig sein kann. Damit lässt sich der Begriff der Leitidee wie folgt definieren: Eine Leitidee ist ein übergeordnetes Konzept, das geeignet ist die Inhalte des Faches zu strukturieren. Die Leitideen sind dieser Definition nach keine dis-

junkten Teilmengen, sondern unterscheidbare Strukturen auf demselben Fachinhalt. Neben Kompetenzbereichen muss ein Kompetenzmodell auch Stufen definieren, die die Fähigkeit von Schülerinnen und Schülern diskret beschreiben und damit die Schwierigkeit von Aufgaben erklären kann. Wie bereits beschrieben, leiden bisher benutzte Kompetenzstufenmodelle unter mangelnder Reliabilität und/oder Validität. Das liegt nach Franke an einer mangelnden Systematik bei der Beschreibung der Stufen (vgl. Abschnitt 1.1). Hier bietet die systematische Beschreibung hierarchisch angeordneter Stufen der Vernetzung von Inhalten Abhilfe, wie sie im Modell vertikaler Vernetzung beschrieben ist. Aus dem Modell vertikaler Vernetzung kann also ein Modell naturwissenschaftlicher Kompetenz entwickelt werden, in dem Kompetenz als die Fähigkeit verstanden wird, mehrere Entitäten (Fakten) unter einer genügend großen Auswahl von Leitideen (Energie, System, Materie, Wechselwirkung) auf einem bestimmten Niveau (Zusammenhänge zwischen Fakten) zu bündeln und auf bestimmte Art und Weise (durch Erinnern, Strukturieren oder Explorieren) mit einer gegebenen Situation in Verbindung zu bringen.

Das so entwickelte Kompetenzstufenmodell (Abb. 1) unterscheidet entsprechend den vorangegangenen Überlegungen drei Dimensionen:

- Die Leitidee umfasst die in den Bildungsstandards (KMK, 2005c) für den Kompetenzbereich Fachwissen ausgewiesenen Basiskonzepte Energie, Wechselwirkung, System und Materie. Wie oben ausgeführt, ist diese Auswahl normativ und nicht notwendigerweise vollständig. Eine Erweiterung um andere Leitideen ist durchaus denkbar. Es ist jedoch zunächst davon auszugehen, dass die gewählten Bereiche ausreichend zur Strukturierung des Fachinhalts in der Sekundarstufe und damit für eine empirische Prüfung des Modells sind. Ein Beispiel für die Strukturierung des physikalischen Inhaltsbereichs durch Leitideen ist die Betrachtung eines schwingenden Pendels: Unter der Leitidee Energie würde hier vor allem die Umwandlung potentieller Energie in kinetische Energie (und Wärme) betrachtet werden. Unter der Leitidee System rückt das dynamische System in den Vordergrund und damit entsprechende Charakteristika oder Kenngrößen des Systems, wie zum Beispiel die Periodizität,

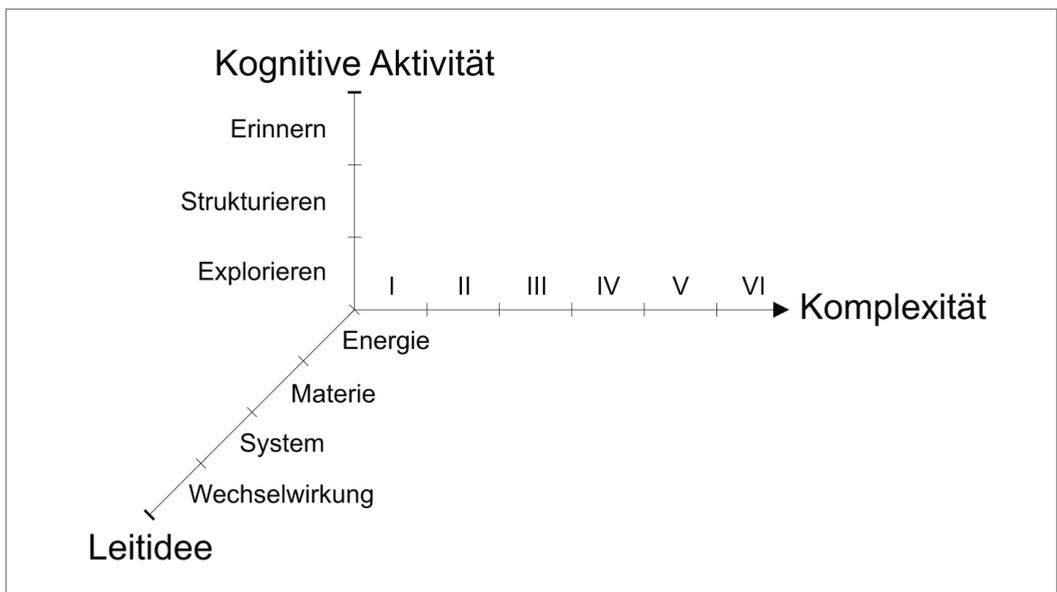


Abb. 1: Vorschlag für ein Strukturmodell physikalischer Kompetenz

die Dämpfung oder die Abhängigkeit der Frequenz von der Fadenlänge.

- Die kognitive Aktivität beschreibt die zur erfolgreichen Anwendung von Kompetenz notwendigen kognitiven Informationsverarbeitungsstrategien im Sinne einer kognitiven Anforderung durch „Erinnern“, „Strukturieren“ und „Elaborieren“. Dabei bezeichnet „Erinnern“, die Anforderung Gelerntes wiederzugeben, wie zum Beispiel die Aufforderung „Nenne eine Energieform“. „Strukturieren“ bezieht sich auf die Anforderung bereits bekanntes Wissen neu zu ordnen, wie zum Beispiel die Aufgabe, einen als Formel bekannten Zusammenhang graphisch darzustellen, und „Explorieren“ entspricht der Anforderung neues Wissen mit Gelerntem zu verbinden, wie zum Beispiel der Aufforderung ein unbekanntes Phänomen zu erklären. Im Gegensatz zu den von Senkbeil et al. (2005) diagnostizierten sieben Teilkompetenzen, etwa der „Umgang mit Graphen“, sind diese Operationen nicht auf konkrete Tätigkeiten bezogen. In einer

gegebenen Problemlösesituation sind sie für ein Individuum jedoch abhängig von der Situation und dem Vorwissen des Individuums und damit vom Curriculum, vom Unterricht und den sonstigen Lernbedingungen. Wurde bei der Behandlung des Fadenpendels die Abhängigkeit der Frequenz von der Fadenlänge behandelt, erfordert das Wiedergeben dieser Abhängigkeit die kognitive Aktivität „Erinnern“. Wurde die Dämpfung im Unterricht nicht behandelt, erfordert die Aufgabe „Erkläre, warum das Pendel stehenbleibt“ die kognitive Aktivität „Explorieren“ zur Lösung.

- Die Komplexität wird durch sechs hierarchisch geordnete Stufen beschrieben: Ein Fakt (I), Mehrere Fakten (II), Ein Zusammenhang (III), Mehrere unverbundene Zusammenhänge (IV), Mehrere verbundene Zusammenhänge (V), Übergeordnetes Konzept (VI). Mit Hilfe dieser Skala lassen sich unterschiedlich Fähigkeiten mittels erbrachter Leistungen beschreiben. Ein Beispiel dafür ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tab. 1: Die Komplexitätsstufen am Beispiel des Fadenpendels

<b>Fakt</b>	Ein Fadenpendel hat potentielle Energie
<b>Mehrere Fakten</b>	Ein Fadenpendel hat potentielle und ein sich bewegendes Fadenpendel hat kinetische Energie
<b>Zusammenhang</b>	Beim (sich bewegenden) Fadenpendel wird potentielle in kinetische Energie umgewandelt.
<b>Mehrere unverbundene Zusammenhänge</b>	Beim (sich bewegenden) Fadenpendel wird potentielle in kinetische Energie umgewandelt. Außerdem entsteht durch Reibung des Fadens am Aufhängepunkt Wärme.
<b>Mehrere verbundene Zusammenhänge</b>	Beim (sich bewegenden) Fadenpendel wird potentielle in kinetische Energie und kinetische Energie durch Reibung des Fadens am Aufhängepunkt in Wärme umgewandelt.
<b>Übergeordnetes Konzept</b>	Beim (sich bewegenden) Fadenpendel wird potentielle in kinetische Energie und Teile der kinetischen Energie werden durch Reibung des Fadens am Aufhängepunkt in Wärme umgewandelt. Die Wärme wird an die Umgebung abgegeben und ist nicht mehr nutzbar. Wird die Reibung vernachlässigt wird die potentielle Energie in kinetische Energie umgewandelt und diese wieder vollständig in potentielle Energie. Die Gesamtenergie bleibt dann erhalten.

Für die physikalische Kompetenz wird mit diesem Modell angenommen, dass sie die Fähigkeit wiedergibt durch eine bestimmte kognitive Aktivität die Vernetzung verschiedener Entitäten unter einer gegebenen Leitidee auf einem bestimmten Komplexitätsniveau zu verbinden. Es wird davon ausgegangen, dass für jede Kombination aus Leitidee und kognitiver Aktivität die Komplexität kumulativ ist. Eine empirische Grundlage für diese Annahme bilden die Arbeiten von (Kauertz & Fischer, 2006a, 2006b). Das hier vorgeschlagene Modell wird für die Konstruktion unterschiedlich schwieriger Aufgaben verwendet. Es wird gezeigt, dass die Schwierigkeit der eingesetzten Aufgaben nur wenig mit der Leitidee oder der kognitiven Anforderung zusammenhängt, wohl aber mit der Komplexität. Allerdings ist die Stichprobe vergleichsweise klein (N=517 Schüler), so dass die Generalisierbarkeit der empirischen Ergebnisse eingeschränkt ist. Das Modell vertikaler Vernetzung, das dem beschriebenen Kompetenzmodell zugrunde liegt, ist ebenfalls für die Untersuchung von Biologie- und Chemieunterricht geeignet (Sumfleth et al., 2006; Fischer et al., 2006; Glemnitz & Sumfleth, 2006; Wadouh, Neuhaus & Sandmann, 2005). Damit ist das Modell grundsätzlich auf diese anderen Domänen übertragbar. Allerdings müssen die Leitideen fachspezifisch formuliert oder ergänzt und das Modell entsprechend anders operationalisiert werden. Deshalb kann bisher nur davon ausgegangen werden, dass sich das Modell zur Beschreibung physikalischer Kompetenz eignet.

Zur Operationalisierung des Modells sind Aufgaben in ausreichendem Maße zu jeder Kombination von Zellen (Abb. 1) zu konstruieren:

- Im Rahmen der oben beschriebenen Beispiele kann eine Aufgabe, die das Erinnern eines Faktis unter der Leitidee Energie abfragt, also der Zelle (Energie, Fakt, Erinnern) zugeordnet wird, wie folgt aussehen: *Im Physikunterricht habt Ihr darüber gesprochen, dass beim Fadenpendel verschiedene Energieumwandlungsprozesse*

*stattfinden. Nenne bitte eine Energieform!* Die richtige Antwort wäre dann entweder „Potentielle Energie“, „Kinetische Energie“ oder „Wärmeenergie“.

- Ein Beispiel für eine Aufgabe in der Zelle (System, Zusammenhang, Strukturieren) ist: *Beim Fadenpendel hängt die Periodendauer  $T$  von der Fadenlänge  $l$  ab. Du hast dazu folgende Wertepaare ( $l/m; T/s$ ) gemessen: (0,1;0,6), (0,5;1,5), (1;2), (2;2,8). Erstelle ein Diagramm zu dieser Messung. Erwartet wird ein Diagramm, in dem die Messwerte eingetragen sind und eine Ausgleichskurve eingezeichnet ist.*
- Wurde im Schulunterricht die Dämpfung des Pendels nicht behandelt, ist dem Schüler aber das Konzept der Reibung vertraut, dann stellt die folgende Aufgabe ein Beispiel für eine Aufgabe dar, bei der ein Sachverhalt unter der Leitidee Energie auf der Stufe „Übergeordnetes Konzept“ exploriert werden soll: *Im Physikunterricht habt Ihr gelernt, dass beim Fadenpendel potentielle in kinetische Energie und diese wieder in potentielle Energie umgewandelt wird. Trotzdem bleibt das Pendel nach einer gewissen Zeit stehen. Erkläre diese Beobachtung.* Die Antwort entspräche der in Tabelle 1 unter Stufe VI ausgeführten Erklärung.

Mit Hilfe solcher Aufgaben, die, gezielt entwickelt, alle Zellen des Modells (Abb. 1) systematisch und umfassend abbilden, können Kompetenztests zusammengestellt werden, mit denen sich physikalische Kompetenz, bezogen auf die im Physikunterricht behandelten Inhalte, feststellen lässt. Dabei kann allerdings Kompetenz zunächst nur bezogen auf den Entwicklungsstand der Schüler gemessen werden. So setzt die beschriebene Aufgabe, in der erklärt werden soll, warum das Fadenpendel stehen bleibt, ein Entwicklungsstadium des Energiekonzepts voraus, das ein Verständnis von Energieumwandlung und -erhaltung einschließt. Wie Liu und McKeough (2005) gezeigt haben, lassen sich

die verschiedenen Entwicklungsstadien des Energiekonzepts hierarchisch ordnen und Jahrgangsstufen zuordnen. Dieses Erkenntnis kann genutzt werden, um das beschriebene Kompetenzmodell auf die Erfassung verschiedener Entwicklungsstadien der physikalischen Kompetenz von Schülern zu erweitern.

## 2.2 Die Entwicklung physikalischer Kompetenz

Im Sinne des Modells vertikaler Vernetzung von Fischer et al. (2006) entspricht die breitere Wissensbasis bei Stern (2002) Strukturen mit einer höheren Zahl von Wissens-elementen. Der Schüler verfügt nach einem Lernprozess über eine größere Zahl von Fakten oder Zusammenhängen, die es ihm letztendlich ermöglicht eine größere Zahl von Problemen erfolgreich zu bearbeiten. Das wiederum bedeutet, dass sich durch Lernen die durch ein übergeordnetes Konzept strukturierten Wissensstrukturen weiter vernetzen und ausdifferenzieren. Die Konzeptualisierung des übergeordneten Konzepts verändert sich. Kompetenzentwicklung bedeutet demnach eine Ausdifferenzierung der übergeordneten Konzepte beziehungsweise, in dem im vorhergehenden Abschnitt vorgeschlagenen Modell, eine Ausdifferenzierung der Leitidee. Diese Sichtweise wird durch Arbeiten von Liu und

McKeough (2005) gestützt, nach denen die Entwicklung des Energiekonzepts, wie in Tabelle 2 dargestellt, Jahrgangsstufen zugeordnet werden kann.

Die Ausdifferenzierung der Leitideen kann wie folgt operationalisiert werden: Je ausdifferenzierter die Leitidee (das heißt je umfangreicher die Wissensbasis) bei einem Schüler ist, desto weniger Informationen müssen für die erfolgreiche Bearbeitung einer Aufgabe mittels eines übergeordneten Konzepts (also auf höchstem Niveau) zur Verfügung gestellt werden.

Eine Aufgabe besteht in dieser Sichtweise aus einem Aufgabentext und der Aufgabenlösung. Dem Aufgabentext und der erforderlichen Lösung kann nach dem Modell vertikaler Vernetzung (Sumfleth et al., 2006) jeweils eine Komplexität zugeordnet werden. Die Komplexität des Aufgabentextes bezieht sich auf die zur Verfügung gestellten Informationen („ein Fakt“, „mehrere Fakten“, usw., vgl. Abschnitt 2.1). Die Komplexität der Aufgabenlösung beschreibt, bezogen auf diese Informationen und die Wissensbasis des Schülers, den Grad der Vernetzung, die der Schüler zur erfolgreichen Bearbeitung der Aufgabe erreichen muss. Damit lässt sich einer Aufgabe insgesamt die folgende Komplexität zuschreiben:  $\text{Aufgabenkomplexität} = \text{Komplexität der Aufgabenlösung} - \text{Komplexität des Aufgabentextes}$ . Ausgehend von

Tab. 2: Entwicklungsstadien des Energiekonzepts nach Liu & McKeough (2005)

Am Ende von	Entwicklungsstadium
Jahrgang 6	Energie ist die Fähigkeit Arbeit zu verrichten; diese Fähigkeit hat verschiedene Quellen und wird durch verschiedene Energieformen beschrieben.
Jahrgang 8	Verschiedene Energieformen können in einander umgewandelt werden, die Umwandlung von Energie in Wärme ist nicht umkehrbar.
Jahrgang 10	In einem geschlossenen System bleibt die Gesamtenergie konstant.

einer maximalen Komplexität der erwarteten Lösung (der Schüler soll ein übergeordnetes Konzept anwenden) ist die Aufgabenkomplexität also immer dann maximal wenn die Komplexität des Aufgabentextes minimal ist (es werden höchstens Fakten präsentiert) und umgekehrt.

Die Entwicklung physikalischer Kompetenz lässt sich mit dieser theoretischen Beschreibung wie folgt erfassen: Die Komplexität von Aufgaben wird bei konstanter (maximaler) Komplexität der erforderlichen Aufgabenlösung systematisch über die Komplexität des Aufgabentextes variiert. Entsprechend variierte Aufgaben zu einem Thema können in allen Jahrgängen eingesetzt werden. Den Schülern wird also eine Aufgabe in unterschiedlichen Komplexitäten zur Bearbeitung vorgelegt. Schüler, die eine Aufgabe mit einer bestimmten Komplexität und einer bestimmten Lösungshäufigkeit erfolgreich lösen, bearbeiten mit hoher Wahrscheinlichkeit ebenfalls alle Aufgaben mit einer geringeren Komplexität erfolgreich. Die Aufgabe mit der höchsten Komplexität, die ein bestimmter Schüler mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit lösen kann, definiert den gegenwärtigen Entwicklungsstand seiner physikalischen Kompetenz. In Tabelle 3 sind beispielhaft Aufgaben zur Erfassung unterschiedlicher Entwicklungsstadien bezüglich der Leitidee Energie dargestellt.

In beiden Aufgaben wird dabei erwartet, dass die Schüler den Prozess der Energieumwandlung beschreiben. Die Lösung der Aufgaben setzt die Betrachtung der beschriebenen Situation unter der Leitidee Energie auf konzeptuellem Niveau voraus. Die Komplexität der Aufgabenlösung muss daher in beiden Fällen dem Niveau 6 („Übergeordnetes Konzept“) zugeordnet werden. Die Aufgabenstellung der oberen Aufgabe bezieht sich auf einen konkreten Zusammenhang zwischen zwei Energieformen. Sie schränkt die zur erfolgreichen Bearbeitung der Aufgabe benötigte Wissensbasis ein. Da die Komplexität der Aufgabenstellung vom Niveau 3 („Zusammenhang“) ist, entspricht die Aufgabenkomplexität als Differenz der Komplexität von Aufgabenlösung und Aufgabenstellung Niveau 3. In der unteren Aufgabe soll der Prozess der Energieumwandlung beim Trampolin allgemein und umfassend beschrieben werden. Das setzt eine umfangreichere Wissensbasis voraus. Die Aufgabenstellung selber bietet nur minimale Informationen und ist entsprechend auf dem Komplexitätsniveau 1 („Fakt“). Daraus ergibt sich eine Aufgabenkomplexität auf dem Niveau 5.

Je größer die Wissensbasis eines Schülers ist, desto komplexer dürfen demnach die Aufgaben sein, die der Schüler noch erfolgreich lösen kann. Je größer also für verschiedene Leitideen und kognitive Aktivitäten die Kom-

Tab. 3: Beispielaufgaben zur Erfassung unterschiedlicher Entwicklungsstadien

Entwicklungsstadium	Aufgabe	Aufgabenkomplexität
Ende Jahrgang 8	Beim Trampolinspringen wird kinetische Energie in elastische Energie umgewandelt. Beschreibe diesen Prozess so genau wie möglich!	3
Ende Jahrgang 10	Beim Trampolinspringen werden verschiedene Energieformen in einander umgewandelt. Beschreibe diesen Prozess so genau wie möglich!	5

plexität der Aufgaben ist, die der Schüler noch lösen kann, desto höher ist die Kompetenz des Schülers entwickelt. Damit kann diese Definition der Aufgabenkomplexität – als Differenz der Komplexität des Aufgabentextes und der Aufgabenlösung – als Maß für die Entwicklung der physikalischen Kompetenz eines Schülers gelten.

### 3 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der Formulierung von Bildungsstandards für den Mittleren Schulabschluss in Physik (KMK, 2005c) sind die Kompetenzen normativ festgelegt, die Schüler in bestimmten Fächern nach der Sekundarstufe I erreicht haben sollen. Die zentrale Aufgabe der Fachdidaktik besteht nun in der Entwicklung und Prüfung theoretisch fundierter Kompetenzmodelle, die eine Adjustierung der Standards einerseits und die Diagnose und systematische Entwicklung von Schülerkompetenzen andererseits erlauben. Dabei werden sowohl Kompetenzstrukturmodelle benötigt, die es erlauben die Kompetenz von Schülerinnen und Schülern bezogen auf die normativen Vorgaben der Standards zu erfassen, als auch Kompetenzentwicklungsmodelle, die die Diagnose von Entwicklungsstadien sowie die Beschreibung der anzunehmenden Entwicklung und der Unterstützung dieser Entwicklung im Unterricht ermöglichen.

Auf der Basis des theoretischen Hintergrunds der Bildungsstandards und des Kompetenzbegriffs wurden ein Kompetenzstufenmodell dargestellt und die Erweiterung dieses Modells um die Beschreibung der Entwicklung physikalischer Kompetenz. Ausgehend vom Modell vertikaler Vernetzung nach Fischer et al. (2006) (vgl. Sumfleth et al., 2006) wird Kompetenz in drei Dimensionen beschrieben: der kognitiven Aktivität, der Leitidee und der Komplexität. Die hierarchische Dimension Schwierigkeit erlaubt dabei auf der Basis einer Theorie der Komplexität von Systemen die Unterscheidung hierarchisch angeordneter Kompetenzstufen, unabhängig von fachlichen Merkmalen. Erste Arbeiten geben Grund zu der Annahme, dass sich das dreidimensionale Modell grundsätzlich

zur Beschreibung physikalischer Kompetenz eignet und dass sich die postulierte Struktur, einschließlich der hierarchischen, inhaltsunabhängig formulierten Ordnung der Schwierigkeit, empirisch abbilden lässt. Für eine umfassende Bestätigung des Modells bleibt aber zu zeigen, dass

- die Komplexität physikalischer Kompetenz sich für jede Kombination von Inhaltsbereich und kognitiver Aktivität hierarchisch ordnen lässt,
- dass die Leitideen unabhängig von einander sind und sich insbesondere nicht hierarchisch ordnen lassen und
- dass die kognitiven Aktivitäten unabhängig von einander sind und sich ebenfalls nicht hierarchisch ordnen lassen.

Zu diesem Zweck sind auf Grundlage des Modells Aufgaben zu konstruieren, die alle Zellen des Modells hinreichend abdecken. Im Anschluss an die Konstruktion der Aufgaben ist zu zeigen, dass die Zuordnung der Aufgaben zu den Zellen verlässlich ist und dass die Aufgaben curricular valide sind. Beides kann durch Expertenratings bestimmt werden (Prenzel et al., 2004). Aus den Aufgaben sind dann systematisch gleichwertige Kompetenztests zusammenzustellen und in einer hinreichend großen Stichprobe einzusetzen. Lassen sich die Kompetenztestdaten so skalieren, dass für jede Kombination aus Leitidee und kognitiver Aktivität eine eigene Raschskala resultiert, so sollte zum einen eine Korrelation zwischen dem Schwierigkeitswert der Aufgabe auf der jeweiligen Skala und der Kompetenzstufe bestehen und zum anderen sollten sich die Schwierigkeitsverteilungen der Items auf den Skalen in Mittelwert und Varianz nicht unterscheiden. Ist dies gegeben kann das Modell gemäß der obigen Forderungen als konsistent angesehen werden. Für eine Überprüfung, ob das Modell tatsächlich physikalische Kompetenz beschreibt, ist bei konvergenter Validierung, parallel zum Kompetenztest, ein weiteres Instrument einzusetzen, das ebenfalls physikalische Kompetenz beschreiben kann. Bei einem starken

Zusammenhang zwischen beiden Instrumenten wird angenommen, dass das vorgestellte Modell physikalische Kompetenz beschreibt. Bei diskriminanter Validierung wären Instrumente einzusetzen, die Konstrukte beschreiben, die einen großen Zusammenhang zu physikalischer Kompetenz annehmen lassen. Dies ist z.B. für einen Mathematikkompetenztest oder einen Intelligenztest der Fall. Bei höchstens schwachem Zusammenhang zwischen beiden Instrumenten, kann wiederum als bestätigt angesehen werden, dass das Modell physikalische Kompetenz beschreibt.

Parallel zur Pilotierung dieser Modellvariante wurde das Modell zu einem Kompetenzentwicklungsmodell erweitert. Dabei wurde auf Grundlage der umfangreichen Vorarbeiten im Bereich der Konzeptentwicklung zunächst eine Operationalisierung der Entwicklungsstufen physikalischer Kompetenz entwickelt.

Zur Bestätigung des Modells werden folgende Ergebnisse einer längsschnittlichen Untersuchung von Klasse 7 bis Klasse 10 erwartet:

- Ein Schüler, der Aufgaben einer bestimmten Entwicklungsstufe erfolgreich bearbeitet, bearbeitet auch die Aufgaben niedrigerer Stufen mehrheitlich erfolgreich.
- Der gleiche Schüler bearbeitet in einer höheren Jahrgangsstufe Aufgaben einer höheren Entwicklungsstufe und auch die Aufgaben niedrigerer Stufen mehrheitlich erfolgreich.

Die Prüfung dieser Erweiterung gestaltet sich wie folgt: Auf Grundlage der vorgeschlagenen Operationalisierung sind Aufgaben für unterschiedliche Stufen der Kompetenzentwicklung zu konstruieren. Diese Aufgaben werden ebenfalls hinsichtlich Zuordnung zu Entwicklungsstufen und ihrer curricularen Validität von Experten eingeschätzt. Daraus werden Kompetenztests erstellt und zunächst in einer Normstichprobe aus Klassen der entsprechenden Jahrgangsstufen eingesetzt. Genügen die erhobenen

Daten dem Raschmodell, kann die erste der oben formulierten Annahmen bestätigt werden. Zum empirischen Nachweis der zweiten Annahme werden jahrgangsspezifische Kompetenztests so konstruiert, dass die Aufgaben im Schwierigkeitsgrad dem entsprechenden Jahrgang angemessen sind. Diese Tests werden im Längsschnitt von Jahrgang 6 bis Jahrgang 10 eingesetzt, um nachzuweisen, dass Schüler in höheren Jahrgängen auch tatsächlich mehrheitlich Aufgaben höherer Kompetenzentwicklungsstufen bearbeiten.

Die bereits pilotierte Modellvariante zur Beschreibung der Kompetenzstruktur wird bis 2009 an großen Stichproben getestet und gegebenenfalls modifiziert. Können die bereits vorhandenen Hinweise auf die Gültigkeit des Modells generalisiert werden, sollen die Ergebnisse in die Normierung der Bildungsstandards 2012 einfließen. Für die Modellerweiterung zur Erforschung der Kompetenzentwicklung wird 2008 mit der Aufgabenentwicklung begonnen. Die Erhebung in der Normstichprobe ist für 2009 geplant. Mit den im Rahmen dieser Modelltestungen konstruierten Aufgaben liegen zusätzlich Instrumente vor, die von Lehrerinnen und Lehrern für unterschiedliche Klassenstufen, Inhaltsbereiche und Schwierigkeitsstufen als Diagnoseinstrumente und zur gezielten Kompetenzentwicklung eingesetzt werden können. Damit können sowohl Lehr- und Lernprozesse im Physikunterricht analysiert und optimiert werden als auch die Bildungsstandards für den Mittleren Schulabschluss adjustiert werden. Die bundesweite Kompetenzdiagnose kann auch die Frage nach den bisher noch nicht formulierbaren Mindeststandards klären.

## 4 Literatur

- Aebli, H. (1980). *Denken - das Ordnen des Tuns: Bd. 1. Kognitive Aspekte der Handlungstheorie*. Stuttgart: Klett.
- Anderson, J. R. (1996). *Kognitive Psychologie. Eine Einführung*. Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft.
- Andersson, B. R. (1990). Pupils' conceptions of matter and its transformations (age 12-16). In P. L. Lijnse, P. Licht, W. de Vos, A. J. Waarlo (Hrsg.), *Relating macroscopic phenomena to microscopic particles: A central problem in secondary Science Education* (S. 12-35). Utrecht: CD-β Press.
- Aufschnaiter, S. von (2001). Wissensentwicklung und Lernen am Beispiel Physikunterricht. In J. Meixner & K. Müller (Hrsg.), *Konstruktivistische Schulpraxis. Beispiele für den Unterricht* (S. 249-271). Neuwied: Luchterhand.
- Aufschnaiter, C. von (1999). *Bedeutungsentwicklung, Interaktionen und situatives Erleben beim Bearbeiten physikalischer Aufgaben*. Berlin: Logos.
- Aufschnaiter, C. von (2003). *Videobasierte Analysen von Lern- und Lehrprozessen in physikalischen Kontexten*. Kummulative Habilitationsschrift, Universität Hannover.
- Aufschnaiter, C. von & Aufschnaiter, S. von (2003). Theoretical framework and empirical evidence on students' cognitive processes in three dimensions of content, complexity, and time. *Journal of Research in Science Teaching*, 40(7), 616-648.
- Baumert, J., Klieme, E., Neubrand, M., Prenzel, M., Schiefele, U., Schneider, W. et al. (Hrsg.). (2001). *PISA 2000: Basiskompetenzen von Schülerinnen und Schülern im internationalen Vergleich*. Opladen: Leske + Budrich.
- Blum, W. (2004). Der Prozess der Itementwicklung bei der nationalen Ergänzungsuntersuchung von PISA 2000: Vom theoretischen Rahmen zu den konkreten Aufgaben. In M. Neubrand (Hrsg.), *Mathematische Kompetenzen von Schülerinnen und Schülern in Deutschland – Vertiefende Analysen im Rahmen von PISA 2000* (S. 31-49). Wiesbaden: Verlag für Sozialwissenschaften.
- Boyes, E. & Stanistreet, M. (1990). Misunderstandings of „law“ and „conservation“: a study of pupils' meanings for these terms. *School Science Review*, 72(258), 51-57.
- Breuer, E. (1994). *Zur Orientierung individueller Entwicklungen im Physikunterricht durch Erfahrungen*. Dissertation, Universität Bremen.
- Bybee, R. W. (1997). Toward an understanding of scientific literacy. In W. Gräber & C. Bolte (Hrsg.), *Scientific literacy, an international Symposium* (S. 37-68). Kiel: IPN.
- Case, R. (1985). *Intellectual development: Birth to adulthood*. New York: Academic Press.
- Case, R. (1992). Neo-Pagetian theories of intellectual development. In H. Beilin & P. B. Pufall (Hrsg.), *Piaget's theory: Prospects and possibilities* (S. 61-104). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Dawson-Tunik, T. L. (2006). Stage-like patterns in the development of conceptions of energy. In X. Liu & W. Boone (Hrsg.), *Applications of Rasch Measurement in Science Education* (S. 111-136). Maple Grove: Jam Press.
- Driver, R., Leach, J., Scott, P. & Wood-Robinson, C. (1994). Young people's understanding of science concepts: Implications of cross-age studies for curriculum planning. *Studies in Science Education*, 24, 75-100.
- Duit, R. (2002). Alltagsvorstellungen und Physiklernen. In E. Kircher & W. B. Schneider (Hrsg.). *Physikdidaktik in der Praxis* (S. 1-26). Berlin: Springer.
- Fischer, H. E. (1989). *Lernprozesse im Physikunterricht. Falluntersuchungen im Unterricht zur Elektrostatik aus konstruktivistischer Sicht*. Dissertation, Universität Bremen.
- Fischer, H. E., Glemnitz, I., Kauertz, A. & Sumfleth, E. (2006). Auf Wissen aufbauen – kumulatives Lernen in Chemie und Physik. In E. Kircher, R. Girwidz & P. Häußler (Hrsg.), *Physikdidaktik. Theorie und Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Franke, G. (2005). *Facetten der Kompetenzentwicklung*. Bielefeld: Bertelsmann.
- Gilbert, J. & Pope, M. (1986). Small group discussions about conceptions in science: a case study. *Research in Science and Technological Education*, 4(1).
- Gläser-Zikuda, M. (2001). *Emotionen und Lernstrategien in der Schule. Eine Empirische Studie mit qualitativer Inhaltsanalyse*. Weinheim: Beltz Deutscher Studien Verlag.
- Glemnitz, I. & Sumfleth, E. (2006). Vertikale Vernetzung an ausgewählten Beispielen. In A. Pitton (Hrsg.), *Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik: Lehren und Lernen mit neuen Medien* (S. 222-224). Münster: Lit.
- Hammann, M. (2004). Kompetenzentwicklungsmodelle: Merkmale und ihre Bedeutung - dargestellt anhand von Kompetenzen beim Experimentieren. *Mathematischer und Naturwissenschaftlicher Unterricht*, 57(4), 196-203.
- Harmon, M., Smith, T. A., Martin, M. O., Kelly, D. L., Beaton, A. E., Mullis, I. V.S. et al. (1997). *Performance Assessment in IEA's Third International Mathematics and Science Study*. TIMSS International Study Center: Boston College.

- Hartig, J., Klieme, E., Jude, N., Jurecka, A., Kröhne, U., Maag-Merki, K. et al. (2007). *Möglichkeiten und Voraussetzungen technologiebasierter Kompetenzdiagnostik. Bildungsforschung Band 20*. BMBF: Bonn.
- Hestenes, D., Wells, M. & Swackhamer, G. (1992). Force concept inventory. *The Physics Teacher*, 30(3), 141-166.
- Kail, R. & Pellegrino, J. W. (1989). *Menschliche Intelligenz* (2. Aufl.). Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft.
- Kauertz, A. & Fischer, H. E. (2006a). Assessing Students' Level of Knowledge and Analysing the Reasons for Learning Difficulties in Physics by Rasch Analysis. In X. Liu & W. Boone (Hrsg.), *Applications of Rasch Measurement in Science Education* (S. 212-246). Maple Grove, MA: Jam Press.
- Kauertz, A. & Fischer, H. E. (2006b). Leistungstest zur Erfassung kumulativ erworbenen Wissens in Physik. In A. Pitton (Hrsg.), *Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik: Lehren und Lernen mit neuen Medien*. Münster: Lit.
- Klahr, D. & Dunbar, K. (1988). Dual space search during scientific reasoning. *Cognitive science*, 12, 1-48.
- Klieme, E. (2000). Fachleistungen im voruniversitären Mathematik- und Physikunterricht: Theoretische Grundlagen, Kompetenzstufen und Unterrichtsschwerpunkt. In: Baumert, J., Bos, W. & Lehmann, R. (Eds.), *TIMSS/III*, 2, (pp. 57-128). Opladen: Leske + Budrich.
- Klieme, E., Baumert, J., Köller, O. & Bos, W. (2000). Mathematische und naturwissenschaftliche Grundbildung: Konzeptuelle Grundlagen und die Erfassung und Skalierung von Kompetenzen. In J. Baumert, W. Bos & R. Lehmann (Hrsg.), *Dritte Internationale Mathematik- und Naturwissenschaftsstudie. Mathematische und naturwissenschaftliche Bildung am Ende der Schullaufbahn: Bd. 1. Mathematische und naturwissenschaftliche Grundbildung am Ende der Pflichtschulzeit* (S. 85-133). Opladen: Leske + Budrich.
- Klieme, E., Neubrand, M. & Lüdtke, O. (2001). Mathematische Grundbildung: Testkonzeption und Ergebnisse. In Deutsches PISA-Konsortium (Hrsg.), *PISA 2000. Basiskompetenzen von Schülerinnen und Schülern im internationalen Vergleich* (S. 139-190). Opladen: Leske + Budrich.
- Klieme, E., Avenarius, H., Blum, W., Döbrich, P., Gruber, H., Prenzel, M. et al. (2003). *Expertise zur Entwicklung nationaler Bildungsstandards*. Berlin: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).
- Klix, F. (1976). *Information und Verhalten*. Verlag Hans Huber, Wien.
- Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland [KMK]. (2005a). *Bildungsstandards in Fach Biologie für den Mittleren Schulabschluss*. München: Luchterhand.
- Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland [KMK]. (2005b). *Bildungsstandards in Fach Chemie für den Mittleren Schulabschluss*. München: Luchterhand.
- Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland [KMK]. (2005c). *Bildungsstandards in Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss*. München: Luchterhand.
- Krnel, D., Glazar, S. & Watson, R. (2003). The development of the concept of "matter": a cross-age study of how children classify materials. *Science Education*, 87, 621-638.
- Kuhn, T. S. (1962). *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago: University of Chicago Press.
- Lijnse, P. L. (1990). Energy between the life-world of pupils and the world of physics. *Science Education*, 74(5), 571-583.
- Liu, X., Ebenezer, J., & Fraser, D. (2002). Structural characteristics of university engineering students' conceptions of energy. *Journal of Research in Science Teaching*, 39(5), 423-441.
- Liu, X. & Lesniak, K. (2005). Students' progression of understanding the matter concept from elementary to high school. *Science Education*, 89(3), 433-450.
- Liu, X. & Lesniak (2006). Progression in children's understanding of the matter concept from elementary to high school. *Journal of Research in Science Teaching*, 43(3), 320-347.
- Liu, X. & McKeough, A. (2005). Developmental growth in students' concept of energy: Analysis from selected items from the TIMSS database. *Journal of Research in Science Teaching*, 45(5), 493-517.
- Liu, X. (2006). Mapping out students' matter concept development from elementary to high school. In X. Liu & W. Boone (Hrsg.), *Applications of Rasch Measurement in Science Education* (S. 165-187). Maple Grove, MA: Jam Press.
- Luhmann, N. (1984). *Soziale Systeme. Grundriss einer allgemeinen Theorie*. Suhrkamp: Frankfurt am Main.
- McClelland, D. C. (1973). Testing for competence rather than for „intelligence“. *American Psychologist*, 28, 1-14.
- Mielke, R. (2001). *Psychologie des Lernens. Eine Einführung*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Nicolis, G. & Prigogine, I. (1987). *Die Erforschung des Komplexen. Auf dem Weg zu einem neuen Verständnis der Naturwissenschaften*. München, Piper.

- Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD]. (2001). *Knowledge and Skills for Life – First Results from PISA 2000*. Paris: Author.
- Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD]. (2004). *Education at a Glance*. Paris: Author.
- Piaget, J. (1976). *Die Äquibration der kognitiven Strukturen*. Stuttgart: Klett.
- Pinker, S. (1994). *The language instinct*. New York, NY: William Morrow & Co.
- Prenzel, M., Rost, J., Senkbeil, M., Häußler, P. & Klopp, A. (2001). Naturwissenschaftliche Grundbildung: Testkonzeption und Ergebnisse. In J. Baumert et al. (Hrsg.), *PISA 2000 – Basiskompetenzen von Schülerinnen und Schülern im internationalen Vergleich* (S. 191-248). Opladen: Leske + Budrich.
- Prenzel, M., Baumert, J., Blum, W., Lehmann, R., Leutner, D., Neubrand, M. et al. (Hrsg.). (2004). *PISA 2003: Der Bildungsstand der Jugendlichen in Deutschland - Ergebnisse des zweiten internationalen Vergleichs*. Münster: Waxmann.
- Prenzel, M., Häußler, P., Rost, J. & Senkbeil, M. (2002). Der PISA-Naturwissenschaftstest: Lassen sich die Aufgabenschwierigkeiten vorhersagen? *Unterrichtswissenschaft*, 30 (2), 120-135.
- Prenzel, M., Baumert, J., Blum, W., Lehmann, R., Leutner, D., Neubrand, M. et al. (Hrsg.) (2005). *PISA 2003: Der zweite Vergleich der Länder in Deutschland – Was wissen und können Jugendliche?* Münster: Waxmann.
- Prenzel, M., Baumert, J., Blum, W., Lehmann, R., Leutner, D., Neubrand, M. et al. (Hrsg.) (2006). *PISA 2003: Untersuchungen zur Kompetenzentwicklung im Verlauf eines Schuljahres* Münster: Waxmann.
- Putnam, H. (1986). Computational Psychology and Interpretation Theory. In Z. W. Pylyshyn & W. Demopoulos (Hrsg.), *Meaning and Cognitive Structure* (S. 101-122). Norwood: Ablex Publishing Corporation.
- Resnick, L. B. & Ford, W. W. (1981). *The Psychology of Mathematics for Instruction*. Hillsdale: Erlbaum Associates.
- Schecker, H. & Parchmann, I. (2006). Modellierung naturwissenschaftlicher Kompetenz. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 12, 45-66.
- Schmidt, D. (1989). *Zum Konzeptwechsel: Eine Untersuchung über den Konzeptwechsel am elektrischen Stromkreis*. Frankfurt/Main: Peter Lang.
- Seiler, T. B. (1986). Kognitive Komplexität. In W. Sarges & R. Fricke (Hrsg.), *Psychologie für die Erwachsenenbildung / Weiterbildung* (S. 282-289). Goettingen: Hogrefe.
- Seiler, T. B. (2001). *Begreifen und Verstehen: Ein Buch über Begriffe und Bedeutungen*. Mühl-tal: Darmstädter Schriften zur allgemeinen Wissenschaft.
- Senkbeil, M., Rost, J., Carstensen, C.H. & Walter, O. (2005). Der nationale Naturwissenschaftstest PISA 2003: Entwicklung und empirische Überprüfung eines zweidimensionalen Facettendesigns. *Empirische Pädagogik*, 19(2), 166-189.
- Solomon, J. (1983). Learning about energy: How pupils think in two domains. *European Journal of Science Education*, 5(1), 49-59.
- Stern, E. (1998). *Die Entwicklung des mathematischen Verständnisses im Kindesalter*. Lengerich: Pabst Publisher.
- Stern, E., (2002). Wie abstrakt lernt das Grundschulkind? Neuere Ergebnisse der entwicklungspsychologischen Forschung. In H. Petillon (Hrsg.), *Jahrbuch Grundschulforschung, Individuelles und soziales Lernen – Kindperspektive und pädagogische Konzepte* (Bd. 5, S. 22-28). Leverkusen: Leske + Budrich.
- Strike, K. A. & Posner, G. J. (1985). A conceptual change view of learning and understanding. In L. H. West & L. A. Pines (Hrsg.), *Cognitive structure and conceptual change* (S. 211–231). New York: Academic Press.
- Sumfleth, E., Fischer, H. E., Glemnitz, I. & Kauertz, A. (2006). Ein Modell vertikaler Vernetzung im naturwissenschaftlichen Unterricht. In A. Pitton (Hrsg.), *Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik: Lehren und Lernen mit neuen Medien*. Münster: Lit.
- Wadouch, J., Neuhaus, B. & Sandmann, A. (2005). Cumulative learning and vertical cross-linking in biology education. *Paper presented at the Conference of the European Science Education Research Association (ESERA) 2005*, August 28th - September 1st in Barcelona, Spain.
- Watts, M. (1983). A study of schoolchildren's alternative frameworks of the concept of force. *European Journal of Science Education*, 5(2), 217-230.
- Weinert, F. E. (2001). Vergleichende Leistungsmessung in Schulen – eine umstrittene Selbstverständlichkeit. In F. E. Weinert (Hrsg.), *Leistungsmessungen in Schulen* (S. 17-31). Weinheim: Beltz Verlag.
- Welzel, M. (1995). *Interaktionen und Physiklernen: Empirische Untersuchungen im Physikunterricht der Sekundarstufe I*. Frankfurt am Main: Lang.
- White, R. W. (1959). Motivation reconsidered: The concept of competence. *Psychological Review*, 66, 297-333.
- Wild, E., Hofer, M. & Pekrun, R. (2001). Psychologie des Lernalters. In A. Krapp & B. Weidemann (Hrsg.), *Pädagogische Psychologie*. Weinheim: Beltz Psychologie Verlag Union.

**Kontakt**

Knut Neumann  
Forscherguppe nwu  
Universität Duisburg-Essen  
Didaktik der Physik  
Schützenbahn 70  
45127 Essen

**Autoreninformation**

Knut Neumann ist promovierter Physikdidaktiker. Er arbeitet seit 2004 als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Forschergruppe Naturwissenschaftlicher Unterricht mit den Schwerpunkten Kompetenzdiagnose, Kompetenzentwicklung und Qualität des Physikunterrichts im internationalen Vergleich.

Alexander Kauertz ist promovierter Physikdidaktiker und Mitarbeiter in der Forschergruppe Naturwissenschaftlicher Unterricht Essen. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Qualitätssicherung im Bildungswesen koordiniert er die Entwicklung von Aufgaben für die Überprüfung der Bildungsstandards im Bereich Physik.

Anna Lau hat Philosophie und Physik für das Lehramt an Gymnasien und Gesamtschulen studiert und ist Doktorandin in der Forschergruppe. Sie promoviert über die Passung zwischen dem Vernetzungsangebot der Lehrperson und der Nutzung des Angebots durch die Schülerinnen und Schüler im Physikunterricht.

Hendrik Notarp hat Lehramt für Gymnasien und Gesamtschulen mit den Fächern Sozialwissenschaften und Physik studiert und ist Doktorand in der Forschergruppe. Er promoviert über das Thema „Kompetenzdiagnose im Physikunterricht der Sekundarstufe I“.

Hans E. Fischer ist Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen und Sprecher der Forschergruppe Naturwissenschaftlicher Unterricht.