

JÜRGEN PETRI UND HANS NIEDDERER,

Kognitive Schichtenstrukturen nach einer UE Atomphysik (Sek II)

Zusammenfassung:

Mehrere Lernstudien in Bereich der Naturwissenschaften beschreiben den kognitiven Endzustand der Schüler für Konzepte wie z.B. das Teilchenmodell der Materie, Atommodelle oder die chemische Bindung mit einer sogenannten kognitiven Schichtenstruktur (cognitive layers, manifold conceptions, multiple frameworks). Die Hypothese einer Schichtenstruktur unterstellt, dass Schüler für eine gegebene Problemstellung signifikant unterschiedliche „rivalisierende“ Erklärungsmuster bzw. Vorstellungen aktivieren können, ohne dass dafür eine wesentliche Variation des Kontextes bzw. der Situation erforderlich ist.

Hinsichtlich der Atomphysik basiert die Schichtenhypothese gegenwärtig auf Daten einer explorativen Lernstudie (Petri, 1996; Petri & Niedderer, 1998a). Bei sechs Probanden konnten - in Abhängigkeit von individuellen kognitiven und sozial-affektiven Voraussetzungen - charakteristische Unterschiede in der auf die Atomphysik bezogenen kognitiven Schichtenstruktur festgestellt werden. Diese, in diesem Beitrag vorgestellten empirischen Befunde untermauern die wichtige Rolle kognitiver Schichtenstrukturen in Konzeptwechselprozessen.

Abstract:

Several learning studies in the field of Science Education describe the final state of students' concepts like e.g. the particle model of matter, the atomic model or chemical bonding as a multilayered cognitive conceptual structure (manifold conceptions, multiple frameworks). The hypothesis of a multilayered cognitive structure assumes that students - e.g. when asked to explain a specific problem - are able to activate significantly different and competing understandings of a single concept and that therefore no essential shift of context is necessary.

So far, concerning Atomic Physics, the hypothesis of cognitive layers is based on data of an explorative learning process study (Petri 1996; Petri & Niedderer, 1998a). Depending on their individual cognitive and social-affective preconditions the analysis of six students revealed characteristic differences in their cognitive layers related to atomic physics. These findings are discussed in this paper. They confirm the important role of cognitive layers during conceptual change processes.

1. Einleitung

In einer qualitativ-interpretativen Fallstudie an dem 18-jährigen Schüler Carl (Petri 1996; Petri & Niedderer, 1998a) wurde u.a. die Veränderung von Carls „kognitivem Element Atom“, das die Entwicklung seiner Atomvorstellungen beschreibt, im Laufe des regulären Physikunterrichts als Lernpfad (Scott, 1992) mit Anfangs-, End- und mehreren metastabilen Zwischenzuständen analysiert. Der Endzustand von Carls kognitivem Element Atom ist durch die Koexistenz von drei inhaltlich klar unterscheidbaren Atomvorstellungen charakterisiert, auf die er auch innerhalb eines einzigen eng begrenzten Kontextes rekurren kann. Diese Vorstellungen definieren inhaltlich den Rahmen der nach dem zugrundelie-

genden Unterricht potentiell zu erwartenden kognitiven Schichten.

Der Begriff Vorstellung wird hier etwa im Sinne einer „specific theory“ (Vosniadou, 1994) oder eines „scheme of knowledge“ (Galili & Hazan, 2000) verstanden. Er fasst also eine größere Zahl von kontextspezifisch angewandten aber sach- oder zumindest „schülerlogisch“ eng zusammenhängenden „beliefs“ (Vosniadou, 1994) oder „facets“ (Minstrell, 1992) zu einem zeitlich stabilen Konstrukt - beispielsweise etikettiert als Planetenmodell (des Atoms) - zusammen.

Der Begriff der (kognitiven) Schichtenstruktur impliziert, dass die einzelne Schichten konstituierenden Vorstellungen ontogenetisch in einer bestimmten zeitlichen Abfolge entstehen können (nicht müssen) und u.U. - wie

z.B. bei Carls Atomvorstellungen - auch inhaltlich und strukturell aufeinander aufbauen. Einzelne Komponenten der individuellen Schichtenstruktur unterscheiden sich u.a. auch in der Stärke ihrer kognitiven Verankerung und ihrem Status im Sinne von Hewson & Hewson (1992).

Aus weiteren Untersuchungen zu kognitiven Strukturen bzw. zum Konzeptwechsel im Bereich Naturwissenschaften liegen vergleichbare Ergebnisse vor (z.B. Maloney & Siegler; 1993, Tytler, 1998; Taber 2000). Zur Generierung von weiterführenden Forschungshypothesen, deren Untersuchung sowohl zum tieferen Verständnis von Lernprozessen, zur Weiterentwicklung forschungsmethodischer Instrumente als auch zum konstruktiveren unterrichtlichen Umgang mit konzeptuellen Schwierigkeiten von Schülern beitragen kann, wird hier der Frage nachgegangen, in welcher individuellen Ausprägung eine kognitive Schichtenstruktur zum Atommodell bei weiteren in der Untersuchung von Petri (1996) erfassten Schülern aufgetreten ist.

2. Forschungsumfeld

2.1 Kognitive Schichtenstruktur

In der naturwissenschaftsdidaktischen Literatur finden sich bisher nur wenige Untersuchungen, die sich unmittelbar auf ein Modell kognitiver Schichten im oben definierten Sinn beziehen. Einige Studien zu Konzepten wie z.B. Kraft (Thornton, 1995), Luftdruck (Tytler, 1998) oder dem Teilchenmodell der Materie (Scott, 1992) liefern jedoch entsprechend interpretierbare Ergebnisse, die mittlerweile zu einer Neubewertung der Bedeutung kognitiver Schichtenstrukturen in Konzeptwechselprozessen geführt haben (Niederer & Goldberg, 1995; Taber, 2000).

Johansson et al. (1985) stellen fest, dass bei Personen desselben Kulturkreises offenbar nur eine begrenzte Zahl qualitativ verschiedener Vorstellungen zu einem bestimmten Phänomen existiert. Das Ergebnis charakterisieren sie als „layers of meaning“, die sich hier

jedoch lediglich auf eine Gesamtheit von Schülern beziehen. Thornton (1995) konstatiert auch bei einzelnen Schülern, die sich in einem konzeptuellen Übergangsstadium befinden, über mehrere Kontexte betrachtet, einen „mixture of views“. Maloney & Siegler (1993) formulieren auch einen kontextunabhängigen, nicht situierten individuellen kognitiv strukturellen Zusammenhang unterschiedlicher Konzepte. Um abzuschätzen, welche Vorstellung den Konkurrenzkampf im Einzelfall gewinnt, benutzen sie als quantitatives Maß ebenfalls den Begriff der Stärke (strength) eines bestimmten Verständnisses.

Niederer & Goldberg (1992) stellen im kognitiven Endzustand von drei Probandinnen nach einer relativ kurzen Unterrichtseinheit zum elektrischen Stromkreis ein „conceptual enrichment“ fest, das nur unter bestimmten Bedingungen beobachtbar ist:

„The science concepts are used in new problems only after some every day life type of thinking and/or with some help (having seen the experimental result first, getting some hints from an „expert“). Correspondingly, experts sometimes report, that to use scientific concepts in a new problem by themselves often is done only after some explicit control or not being successful with an every day life approach.“ (Niederer & Goldberg 1992, 19)

Niederer & Goldberg (1995) postulieren auf diesem Hintergrund für den Endzustand vieler Lernprozesse eine kognitive Schichtenstruktur. Sie stellen die Ergebnisse zahlreicher Lernstudien, in denen auch nach dem Unterricht im Wesentlichen nur die Anfangsvorstellungen gefunden wurden, insofern in Frage, als mit den dort verwendeten Erhebungsmethoden evtl. nur die stark im kognitiven System verankerten ältesten kognitiven Schichten erfasst wurden.

Tytler (1998) findet bei Primarstufenschülern Vorstellungen zum Luftdruck, die er in die Niveaus „pre-explanatory“, „intermediate“ und „advanced“ unterteilt. Er spricht von „multi-layered“ oder „multiple perspectives“ und schließt die Verwendung verschiedener Konzepte im selben Kontext ein. Das Fungieren von „primitive conceptions“, als „recogni-

tion pathways“ korrespondiert zu der von Petri(1996) gefunden Notwendigkeit, neue Schichten in expliziter Abgrenzung zu den alten Schichten höherer Stärke zu konstruieren (vgl. Abschnitt 3.2):

„Primitive conceptions can persist alongside more advanced conceptions, even with respect to one task. They can act as useful recognition pathways into higher order conceptions, but also as barriers and misleading elements in thinking.“ (Tytler, 1998, 909)

„Children can generate a range of conceptions to create a multi-layered understanding of a phenomenon.“ (Tytler, 1998, 910)

„Children are capable of generating a range of conceptions they bring to bear on one task, in trying to generate a satisfying explanation, expressing what might be thought of as ‘multiple perspectives’ on the same reality.“ (Tytler, 1998, 912)

„Konkurrenzverhalten“ und Verschiebungen von relativen Gewichten bei Komponenten von Vorstellungen und damit letztlich kognitive Schichtenstrukturen im hier definierten Sinn überhaupt, lassen sich grundsätzlich im Rahmen der Theorie der Produktionssysteme und der Theorie kognitiver Schemata verstehen. Schnotz (1994) verwendet dabei ebenfalls den Begriff Stärke:

„Geht man davon aus, daß kognitive Schemata je nach Vertrautheit des Individuums mit entsprechenden Sachverhalten unterschiedliche Stärkewerte besitzen, dadurch mehr oder weniger leicht zu aktivieren sind und sich gegenüber anderen, konkurrierenden Schemata dementsprechend gut behaupten, so kann man außerdem annehmen, daß als Folge der Subsumption eines Sachverhalts unter ein bestimmtes kognitives Schema dessen Stärke erhöht wird. Diese Erhöhung dürfte um so größer sein, je besser das Schema auf den vorliegenden Sachverhalt paßt. Kognitive Schemata dominieren demnach ceteris paribus um so wahrscheinlicher über andere, konkurrierende Schemata, je häufiger und je besser sie sich bisher gegenüber vorliegenden Sachverhalten als passend erwiesen haben.“ (Schnotz, 1994, 88 f)

Wenn einzelne Schüler und Schülerinnen explizit in der Lage sind, einzelnen auf den gleichen Kontext bezogenen qualitativen Konzepten einen bestimmten Status im Sinne von Hewson & Hewson (1992) zuzuschreiben, kann dies im fortgeschrittensten Fall ein

besonders reflektiertes Bewusstsein der entsprechenden kognitiven Schichtenstruktur implizieren. Eines der prägnantesten Beispiele hierfür liefert Scott (1992). Scott stellt bzgl. der Struktur des konzeptuellen Endzustands des Lernpfades einer Schülerin (Sharron) fest, dass Sharron über verschiedene Modelle - hier zum Teilchenmodell der Materie - verfügt, die sie bewusst situationsabhängig verwendet.

„Sharron is thus able to differentiate between her ‘life-world’ and ‘scientific’ knowledge (Solomon 1983) in stating that the former would be more useful in talking to her mother. She has developed a new way of looking at the world but this has not been at the expense of her original, informal perspectives.“ (Scott, 1992, 222)

Neben Stärke und Status bietet sich damit das Gebrauchsniveau (Benennung, Beschreibung, Verwendung zur Erklärung, Transferleistung, Reflexion des Eignungs- und Gültigkeitsbereichs) als dritte Skalierungsgröße innerhalb von kognitiven Schichtenstrukturen an.

Taber (2000) befasst sich explizit mit einem kognitiven Schichtenmodell qualitativer Konzepte. Die Studie zu einem voruniversitären A-level-Unterricht zur chemischen Bindung zeigt *„that an individual learner can simultaneously hold in cognitive structure several alternative stable and coherent explanatory schemes that are applied to the same concept area“ (Taber, 2000, 399).* Taber beschreibt das Antwortverhalten eines Schülers zur Begründung des Entstehens chemischer Bindungen mit drei inhaltlich unabhängigen, über einen längeren Zeitraum stabilen, z.T. in verschiedenen Kontexten, z.T. aber auch auf das gleiche Problem angewandten Konzepten. Er betont, dass es um unterschiedliche, in einem einzigen naturwissenschaftlichen Inhaltsbereich angewandte Konzepte und nicht um verschiedene, einerseits im lebensweltlichen, andererseits im wissenschaftlichen Kontext angewandte Konzepte geht. Er stellt heraus, dass eine solche Struktur ein wichtiges Übergangsstadium beim Konzeptwechsel sein kann.

2.2 Konzeptwechsel

Das Auftreten von kognitiven Schichtenstrukturen steht - so die hier vertretene Grundhy-

pothese - in unmittelbarem Zusammenhang mit gravierenden Lernschwierigkeiten im Bereich zahlreicher naturwissenschaftlicher Konzepte, die als Konzeptwechselproblem etikettiert werden. Dabei wird von einem konstruktivistischen Verständnis des Konzeptwechsels ausgegangen. Statt eines - wie es der Begriff Konzeptwechsel (engl: conceptual change) unglücklicherweise nahelegt - Auswechslens (exchange) oder auch bloßer Addition von Konzepten sind abgestufte Formen von kognitiven Strukturveränderungen, die einen Übergang von intuitiven zu wissenschaftlichen Konzepten markieren, gemeint (vgl. Duit 1996).

Eine erste konstruktivistische mittlerweile von ihren Autoren selbst revidierte Theorie des Konzeptwechsels stammt von Posner et.al. (1982). Nach Posner et.al. setzt ein Konzeptwechsel die Unzufriedenheit des Lernenden mit bereits bei ihm vorhandenen Vorstellungen voraus und erfordert eine Alternative, die aus Sicht des Lernenden sowohl logisch verständliche (intelligible) als auch einleuchtend (plausible) und gleichzeitig erfolgreich anwendbar (fruitful) ist. (vgl. Duit, 1996, 150). Tyson et. al. (1997) kommen in ihrer Analyse der inzwischen entwickelten Ansätze zum Konzeptwechsel zu einer begrifflichen Trennung unterschiedlicher Qualitäten von Konzeptwechsel als „addition“, „weak revision“ und „strong revision“. Newtonsche Mechanik und Atom- und Quantenphysik z.B. erfordern nach dieser Unterscheidung eine „strong revision“ wesentlicher Konzepte. Gegen Ende ihrer Ausführungen stellen Tyson et al. u.a. fest:

„Conceptual change does not imply that initial conceptions are „extinguished“. Initial conceptions, especially those that hold explanatory power in non-scientific contexts, may be held currently with new conceptions. Successful students learn to utilize different conceptions in appropriate contexts.“ (Tyson et al., 1997, 402)

Ähnlich äußert sich z.B. Spada (1994, 115). Die Fähigkeit verschiedene Vorstellungen differenziert zu nutzen, kann wie bei Sharron (Scott, 1992) Ausdruck eines metakonzeptuellen Bewusstseins über die Schichtenstruktur

sein. Zahlreiche Autoren fordern daher als Gegenmittel zur Bekämpfung der Situiertheit von Konzepten vom Unterricht die Entwicklung von metakonzeptuellem Bewusstsein bzw. die Einübung von sinnvollem und reflektiertem Umgang mit Modellen und Vorstellungen (Caravita & Halldén 1994; Spada, 1994; Vosniadou, 1994; Taber, 2000). Vosniadou (1994) stellt die für einen Konzeptwechsel (strong revision) erforderliche Umgestaltung der erkenntnistheoretische und ontologische Positionen der Schüler umfassenden „framework theory“ heraus. Konzeptwechsel wird dann schwierig, wenn neue Lerninhalte der tief in der Alltagserfahrung verankerten framework theory widersprechen. Vosniadou spricht nicht von kognitiven Schichten, sie betont in ihren Ergebnissen zu von Primarstufenschülern konstruierten mentalen Modelle zur Gestalt der Erde eher deren Konsistenz. Sie klassifiziert aber u.a. 11 von 60 entwickelten mentale Modelle als „mixed“. Das Auftreten von kognitiven Schichtenstrukturen als Übergangsstadium in schwierigen und längerfristigen Lernprozessen (Taber, 2000; Thornton, 1995) erscheint daher als eine auch im Rahmen der Theorie von Vosniadou (1994) plausible Hypothese.

Vor dem Hintergrund von Untersuchungen zu Problemlösestrategien bezweifelt Spada (1994), dass die Ergebnisse von Vosniadou auch für abstrakte Begriffe wie Kraft gelten. Er sieht vorrangig die Aufgabe, Anfängern ergänzend zu ihren naiven Konzepten und zu quantitativen Beschreibungen adäquate qualitative Konzepte zu vermitteln. Er verweist auf diesbezügliche von Plötzner und ihm durchgeführten Studien. So untersucht Plötzner (1998) u.a. am Beispiel der Newtonschen Mechanik Erwerb, Anwendung und Koordination von qualitativen und quantitativen Repräsentationssystemen mit Hilfe von wissensbasierten Systemen zur Computersimulation von Repräsentationssystemen. Es zeigte sich u.a., dass Schüler denen zunächst nur ein qualitatives Verständnis der Mechanik vermittelt wurde, Probleme, die eine Koordination quantitativen und qualitativen Wissens erforderten, wesentlich schneller und besser

zu lösen lernen als Schüler, die zunächst ergänzend zu ihren Alltagsvorstellungen nur eine quantitative Repräsentation (Formeln) erlernten.

Spada (1994) konstatiert die nicht direkte Vergleichbarkeit von Problemlösestrategien und qualitativem konzeptuellem Verständnis. Es erscheint daher angebracht, zwischen der etwa von Plötzner untersuchten Fähigkeit zur Koordination verschiedener Repräsentationssysteme eines komplexen physikalischen Inhaltsbereichs und der Fähigkeit zur kontextimmanenten (Re)konstruktion von unterschiedlichen kognitiven Schichten zuzuordnenden Facetten von Vorstellungen deutlich zu differenzieren.

3. Ergebnisse

3.1 Empirische Basis

Der Unterricht erfolgte nach der von H. Niederderer entwickelten „Bremer Konzeption zur Atomphysik“, die im Schuljahr 1993/94 in einem Bremer LK 13/1 erprobt wurde (Niederderer et. al., 1994; Niederderer & Petri, 2000). Die Konzeption favorisiert ein Atommodell auf der Basis der Schrödinger-Gleichung, bei dem sich die Schüler gebundene Elektronen als stationäre Ladungsdichtever-

teilungen, die durch ihre Zustandsfunktionen und entsprechende Orbitale beschrieben werden können, veranschaulichen sollen. Dabei setzt sie sich mit dem den Schülern i.d.R. vertrauten „Planetenmodell des Atoms“ (Bohr) und der statistischen Deutung der Zustandsfunktion (Born) auseinander.

Die Auswertung basiert auf dem Nachinterview zur UE Atomphysik 93/94, das mit einzelnen Schülern im Mai 1994, gut drei Monate nach Abschluss der UE, an der Universität durchgeführt wurde. Es werden sechs von zehn Schülern des Physik-LK 13/1 einbezogen. Neben den vier Schülern - Carl und Tim; Paul und Rolf -, die in zwei Arbeitsgruppen während der gesamten UE video- und audioografiert wurden, werden mit Karin und Stefan zwei Schüler einer dritten, nicht kontinuierlich beobachteten Gruppe erfasst. Das halbstrukturierte Interview dauerte ca. 45 Minuten und erstreckte sich auf die gesamte UE, wobei im Hinblick auf die damaligen Untersuchungsziele die qualitativ-anschaulichen Elemente der Unterrichtskonzeption im Vordergrund standen.

Der Fragenkatalog wurde flexibel gehandhabt. Die tatsächliche Reihenfolge der Fragen wurde dem inhaltlichen Verlauf des Interviews angepasst. „Verbindlich“ waren lediglich die relativ offenen, einleitenden Impulse zu

- Was ist bei Dir vom Unterricht von Herrn Niederderer „hängen geblieben“?
- Was bedeuten die einzelnen „Bestandteile“ dieser Gleichung und was sagt Dir die ganze Gleichung?:

$$\psi_n(r) = - 8\pi^2 \cdot \frac{m}{h^2} (E_n - V(r)) \psi_n(r)$$

- Was muss man zusätzlich beachten, wenn man mit der SGL Atome mit mehreren Elektronen berechnen will?
- Wie stellst Du Dir ein Lithium-Atom vor? Fertige eine Skizze an und erkläre sie!
- Erläutere die Begriffe Schale und Orbital an diesem Beispiel!
- Kommentiere: „Im Orbitalmodell bewegen sich die Elektronen statt auf bestimmten Kreis- und Ellipsenbahnen (Bohr) in ihren Orbitalen“
- Was verstehst Du unter Lokalisation? Kommentiere den Satz eines Schülers: „Aus dem Nichts wird etwas“
- Was verstehst Du unter dem Begriff „Ladungswolke“?
- Kommentiere: „Beim Doppelspaltversuch geht das Elektron offenbar durch beide Spalte“
- Was besagt die Unbestimmtheitsrelation und was kannst Du mit ihr anfangen?

Einige „verbindliche“ Impulse aus dem Interviewleitfaden, zur vollständigen Darstellung siehe Petri (1996, 127f)

verschiedenen Themen. Gezieltere Fragen wurden i.d.R. nur gestellt, sofern ein Schüler nicht von sich aus auf die entsprechenden Themen zu sprechen kam. Die Daten wurden in einem iterativen hermeneutischen Prozess interpretiert (Petri & Niederer, 1998a/b).

3.2 Carls kognitive Schichtenstruktur

Carls konzeptueller Endzustand ist durch die Koexistenz von drei inhaltlich eindeutig abgrenzbaren Atomvorstellungen charakterisiert. Eine „interne Verwaltungsinstanz“ setzt die einzelnen Schichten miteinander in Beziehung. Da neue Vorstellungen in Abgrenzung zum anfangs bereits vorhandenen Schicht „Planetenmodell“ gebildet werden müssen, sind nicht alle Atomvorstellungen gleich stark im kognitivem System verankert. Die Ausgangsvorstellung (Planetenmodell) ist am stärksten verankert (hohe Stärke), sie wird deshalb mehr oder weniger unwillkürlich und spontan assoziiert. Die von Carl in bewusster Abgrenzung stets neu zu konstruierenden Alternativen genießen als quantenphysikalische und im Unterricht bewährte Vorstellungen für ihn selbst aber zunehmend höheres Ansehen, einen höheren Status (Hewson & Hewson, 1992). Carl hat einen nachhaltigen Konzeptwechsel vollzogen, indem er gleichzeitig einen Konflikt auf der Ebene seines „physikalischen Weltbildes“ gelöst hat (Petri

& Niederer, 1998b). Carl ist hoch motiviert, die neuen Atommodelle weiter anzuwenden. Die relative Stärke der entsprechenden kognitiven Schichten verschiebt sich durch den wiederholten Gebrauch allmählich in die im Unterricht intendierte Richtung.

3.3 Kommentierte Belege

Nachfolgend wird für die sechs genannten Schüler die jeweils entsprechende Interviewpassage zum Impuls: „Kommentiere den Satz: Im Orbitalmodell bewegen sich die Elektronen statt auf bestimmten Kreis- und Ellipsenbahnen (Bohr) in ihren Orbitalen“ bzgl. der individuellen Ausprägung einer kognitiven Schichtenstruktur zum Atommodell kommentiert.

3.3.1 Carl

Carls Stellungnahme (vgl. Petri, 1996, 258) fasst den Endzustand seines kognitiven Elements Atom prägnant zusammen: Seine Äußerung, in der er sich vom Planetenmodell abgrenzt, spiegelt den genetischen Prozess, in dem Carls Vorstellungen sich im Unterricht entwickelten. Die diskreten Kreis- und Ellipsenbahnen des Bohrschen Atommodells werden zunächst ungenau, sie sind subjektiv im Rahmen einer Wahrscheinlichkeitsverteilung unbestimmt. Im nächsten Schritt wird die

Inhaltsebene

- Planetenmodell (PM): Elektronen (Korpuskel) umkreisen den Kern in bestimmten Bahnen
- Aufenthaltswahrscheinlichkeitsmodell (AWM): Das Elektron hält sich im Orbital auf.
- Ladungswolkenmodell (LWM): Das Elektron ist ein gemäß dem Orbital geformtes, „bewegungsloses Etwas“.

Verwaltungsebene

- Beziehung: Das AWM geht aus dem PM in expliziter Abgrenzung hervor: Die Bewegung des Elektrons (Korpuskel) wird „gestoppt“. Die Aufenthaltsbereiche des Elektrons werden erweitert: Orbital statt Orbit. Das LWM entsteht in weiterer Abgrenzung von beiden Modellen. Das Elektron wird in eine statische Ladungsverteilung (Ladungswolke) „aufgelöst“.
- Stärke: LWM < AWM < PM
- Status: LWM > AWM > PM

Carls kognitives Element Atom, stark verkürzte, plakative Darstellung des Endzustands (vgl. Petri, 1996, 352)

Kreisbahn als Bewegungsform in Frage gestellt und unmittelbar anschließend die Bewegung überhaupt. Nachdem das Elektron „seine Bewegung eingeübt hat“ und sich nun als Teilchen lediglich noch „befindet“, wird es in ein „verwischtes Etwas“ aufgelöst, das Carl mit Energie vergleicht:

C: (17.05.) Ja das ist halt - die Vorstellung nachher und vorher! Dass es - nicht diese genau bestimmten Kreis- und Ellipsenbahnen sind, dass es nicht immer genau - dass man nicht weiß wo es sich zu einem bestimmten Zeitpunkt befindet, sondern man weiß nur, wo es sich befinden kann, und mit welcher Wahrscheinlichkeit! Und in so einem Orbital - wenn man z.B. so einen Kegel nimmt - dann kann man auch sehen, dass es sich eigentlich gar nicht immer im Kreis bewegen kann - wenn man jetzt überhaupt von so 'ner Bewegung ausgeht! Ich bin am Ende dazu übergegangen, dass ich überhaupt nicht mehr von 'ner Bewegung des Elektrons ausging, sondern dass ich halt angenommen habe, dass es sich da befindet. Und dass es nicht mehr dieses Elektron ist, dieser - wie so ein Ball - sondern halt so ein verwischtes Etwas, so eine Energie, oder was auch immer, was ich mir - damit hab ich auch die meisten Schwierigkeiten, mir das zu erklären, was ein Elektron jetzt eigentlich ist. Dass es sich manchmal bei so 'ner Lokalisation wie so ein Elektron - wie so ein kleines Teilchen verhält, aber wenn es nicht lokalisiert wird, es eben nicht dieses kleine Teilchen ist!

Dass Carl in seinen eigenen Worten über die den im Interview präsentierten Satz ohne weiteres „Nachfassen“ und damit ohne jegliche Kontexterweiterung hinausgeht und sich sowohl der Bewegung als auch vom Teilchenbild des Elektrons in diesem Kontext explizit distanziert, ist ein Indiz für die Qualität des von ihm geleisteten Konzeptwechsels bzw. die starke Ausprägung (hohe Trennschärfe) und das hohe Gebrauchsniveau der spezifischen kognitiven Schichtenstruktur.

3.3.2 Tim

Tim ist Carls Freund und Arbeitspartner, wobei Carl der dominierende und leistungstärkere Schüler ist. Es ist im gesamten Inter-

view nicht erkennbar, dass quantenphysikalische Konzepte Tim einen ernsthaften, Carl vergleichbaren philosophischen Konflikt bereiten. Tim findet die Sache spannend, aber sie berührt ihn nicht tiefer. Seine atomphysikalische Schichtenstruktur ist weniger deutlich und weniger kontextunabhängig stabil ausgeprägt, entsprechendes gilt für den zugehörigen Konzeptwechsel.

Im folgenden Interviewausschnitt bringt Tim im Kontext „Schale“ klassisches Teilchenbild (hohe Stärke) und Aufenthaltswahrscheinlichkeitsdeutung (hoher Status) zusammen. Im Kontext „Orbital“ assoziiert er zögerlich - erst nachdem der Interviewer den Begriff gebracht hat - die Ladungswolke. Die Stärke der entsprechenden dritten kognitiven Schicht ist am geringsten. Tim bleibt bei seinen Abgrenzungen, etwa von Orbitalmodell und Planetenmodell auch eher im Formelhaften und in negativen Aussagen („man kann nicht sagen ...“) verhaftet, seine Aussagen erreichen keine Carl vergleichbarer Authentizität und Intensität.

I: Was war das Problem beim Schalenbegriff?

T: ... sich überhaupt vorzustellen, wie sieht das aus? Ist das jetzt ein richtiges - Gebilde praktisch, wo ein Elektron gefangen ist. — Also vorher war es ja so - von der Chemie her kannte man das Modell, dass ... um den Atomkern bewegt sich das Elektron. Und das ist dann auf so 'ner gewissen Schale rings um den Atomkern rum. Das ist dann die K-Schale - da sind dann 2 Elektronen - hier sind dann halt 4 sozusagen, oder halt mehr. ... So und die bewegen sich dann rum. Und dann haben wir gesagt, so geht das natürlich nicht, weil wir uns das Elektron jetzt ganz anders vorstellen. (...) Und dann haben wir als Schale - ... ich stell mir das halt vor - das ist nun ein Bereich, wo Elektronen einer bestimmten Energie sich aufhalten können, ... Wo die Wahrscheinlichkeit für Elektronen mit dieser Energie am größten ist, dass die sich da aufhalten. ...

I: Kannst Du da den Orbitalbegriff jetzt zuordnen?

T: Ein Orbital, das ist jetzt - bezieht sich mehr auf 'ne Modellvorstellung - würde ich sagen. Orbitalbegriff - ich stell mir das Ganze halt nicht als Gebilde von kleinen Dingen vor, sondern eben als

Orbital! Da ist - der Kern, drumherum ist die Elektronenladungswolke - stell ich mir als kugelsymmetrisches Gebilde zunächst mal vor.

(...)

I: Wie würdest Du diesen Satz kommentieren? „Im Orbitalmodell bewegen sich die Elektronen statt auf bestimmten Kreis- und Ellipsenbahnen (Bohr) in ihren Orbitalen.“

T: Das ist ja hier, da steht ja auch in Klammern, Bohr. Das geht ja davon aus, dass Elektronen sich auf Bahnen bewegen. Das setzt ja den Teilchencharakter eines Elektrons voraus. Und der ist ja in der Orbitalvorstellung nicht gegeben, dass sich irgendwas elektronenmäßiges als Teilchen auf irgendeiner Bahn bewegt, ob sie jetzt ellipsenförmig oder kreisförmig ist.

3.3.3 Rolf

Rolf bildet mit Paul, dem Crack des Kurses, eine Arbeitsgruppe. Er braucht für sein physikalisches Denken Formeln; die stark qualitativ-anschauliche geprägte Bremer Unterrichtskonzeption liegt ihm nicht. Das Bild einer kontinuierlichen Ladungsverteilung ist für ihn besonders problematisch. Er weiß, das Elektron hat Quantencharakter, er argumentiert aber in vielen Kontexten im Teilchenbild bzw. mit der Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Teilchens.

Die Frage zum Orbitalmodell weckt natürlich auch bei Rolf „teilchenhafte“ Assoziationen, die er noch in Beziehung zu den Maximas der ψ -Funktion setzen kann. Weitere kognitive Schichten anschaulicher Atommodelle rekonstruiert Rolf spontan nicht. Er weist lediglich sehr allgemein darauf hin, dass eine Elektronenbewegung auf exakten Bahnen im Atom dem Quantencharakter des Elektrons per Definition widerspricht.

I: Wie würdest Du diesen Satz kommentieren? „Im Orbitalmodell bewegen sich die Elektronen statt auf bestimmten Kreis- und Ellipsenbahnen (Bohr) in ihren Orbitalen.“

R: Das hört sich ja noch immer arg teilchenhaft an, nicht.

I: Ja, hört es sich!

R: Das hört sich ja an, das wir jetzt sagen, wir haben ja jetzt nach der ψ -Funktion unsere

Maxima und irgendwo ja - je nach der Größe dieses Maximas bewegt sich ein Teilchen durch.

I: Und was hältst du davon? Wie findest Du diese Idee? Ich meine, das wäre ja 'ne Möglichkeit, 'nen Zusammenhang herzustellen Das ist ein Gedanke der Schülern manchmal kommt.

R: O.k., der ist mir vielleicht auch schon gekommen. — Ja, aber dann hauen wir an die Grenzen bei der Definition des Elektrons selbst. Wir haben ja gesagt, dass ein Elektron ein Quant ist.

Rolf bringt den Begriff Ladungswolke von sich aus im Interview nicht. Dies deutet darauf hin, dass ein Atommodell mit kontinuierlichen Ladungsverteilungen für ihn sowohl geringe Stärke als auch geringen Status hat. Entsprechend hat bei Rolf der intendierte Konzeptwechsel nicht stattgefunden. Eine Ursache liegt darin, dass Rolf sich den Kollaps der Zustandsfunktion bei der Lokalisation des Elektrons, veranschaulicht durch ein „Zusammenziehen der Ladungswolke“, als deterministischen mechanischen Vorgang vorstellt. Dieser Vorgang ist ihm nicht plausibel: Den einzigen Halt bietet die ihm aus anderem Zusammenhang bekannte Formel $E = mc^2$. Bei der Lokalisation würde demnach eine Ladungswolke (= Energiewolke) in Gestalt des Orbitals in einen Massepunkt umgewandelt. Dabei spielt auch eine Rolle, dass (nicht nur) für Rolf Energie und Ladung recht ähnliche „Substanzen“ sind:

R: ... ich habe ja immer das Problem am Anfang gehabt mit der Lokalisation, dass aus dem Nichts etwas wird, dass im Prinzip 'ne Welle - wenn man so sagen will - plötzlich 'nen Teilchencharakter annimmt, oder beziehungsweise, da ist irgendwo so dies dualistische Denken noch drin. Dass man das vielleicht irgendwie auf diese Einsteinsche Formel $E = mc^2$ zurückführen kann. (...) Das war echt eine Sache, die mich dann aber auch beschäftigt hat, weil - bei den Atomen Masse irgendwo übergeht in Energie und wenn man die Atombausteine einzeln zusammen addiert ... nachher kommt eben eine andere Masse raus als wenn man die jetzt so wiegen würde. Da kam mir jetzt die Frage, wenn man jetzt 'ne Welle hat, 'ne Energie und die trifft jetzt auf irgendwas, ob da viel-

leicht ebenfalls so eine Massendefekterscheinung auftritt, wo jetzt eben Masse erzeugt wird oder Energie. Ja gut jetzt nicht Masse in Energie, sondern andersrum, Energie in Masse.

3.3.4 Paul

Paul ist ein Ausnahmeschüler, der bereits zu Beginn seines Lernprozesses durch ein eher indeterministisches, idealistisches und offenes Weltbild sowie schnelle Auffassungsgebe und hohe Kreativität auffällt. Durch früheren Unterricht ist er bzgl. des Planetenmodells des Atoms relativ unvorbelastet. Er kennt nach eigenen Angaben nur ein nicht geometrisches Energie-Schalenmodell. Modelle sind für ihn vereinfachende Veranschaulichungen ohne „Wahrheitsanspruch“. Er bewegt sich im Interview relativ pragmatisch und flexibel - quasi professionell - im Rahmen der angebotenen Ideen und Modelle. Sein drei Atommodelle umfassendes kognitives Element Atom ist daher kaum als eine den Unterrichtsverlauf und einen Bezugspunkt Planetenmodell spiegelnde Schichtenstruktur organisiert. Paul kann sich schneller vom Teilchenbild des Elektrons als spontane Assoziation in seinen Gedanken lösen. Er grenzt die verschiedenen Modelle im Gespräch nicht dauernd explizit gegeneinander ab, wechselt die Anschauungen offenbar müheloser und transferiert als einziger Schüler die Ladungswolkendeutung auf den Doppelspaltversuch. Die bei vielen Mitschülern zu beobachtende überwiegend kontextspezifische Trennung der verschiedenen Atommodelle ist bei Paul nicht zu beobachten.

Pauls Äußerungen zeigen, dass er sich von der auch für ihn einfacher vorstellbaren klassischen Teilchenbewegung in der Quantenphysik klar distanziert hat. Das Umschalten auf eine Wahrscheinlichkeits- oder eine kontinuierliche Verteilung stellt für ihn kein großes Problem dar. Paul hat ohne erkennbares Konzeptwechselproblem wesentlich Neues gelernt.

P: Ja (...) - Also die (Elektronen) bewegen sich überhaupt nicht mehr, also nicht mehr in Orbi-

talen, sie halten sich nur in den Orbitalen auf - oder in d e m Orbital, wenn das ein Orbital sein soll!

I: Du hast jetzt gesagt, die bewegen sich nicht und halten sich drin auf. Ist das jetzt 'ne Vorstellung, wo Du sagst: Das hab ich so gelernt und deswegen muss das auch so sein. Oder ist das für Dich auch glaubhaft?

P: Ne ich weiß nicht, irgendwie so ein Mittelding. Ich hab das jetzt so gelernt und versuch mir irgendwas drunter vorzustellen, irgendwie dass sich auf diesen Bereich jetzt das Elektron verteilt - Ja okay, das verteilt sich dann eben, es ist nicht mehr ein Pünktchen, sondern da irgendwie so insgesamt ist irgendwie die Ladung verteilt, ja! — Also ich denk jetzt irgendwie nicht, dass es sich mal da aufhält und dann da rüber springt, oder so - ich weiß nicht!

I: Nochmal anders gefragt: Was bedeutet es für Dich, ein Elektron als Quant zu betrachten?

P: Ja es ist eben - was es jetzt bedeutet: Ich kann jetzt nicht mehr ein Elektron so als schönes Teilchen sehen, es ist nicht mehr ganz so nett handhabbar. Wenn ich mir davor vorgestellt hab: Ein Elektron als Teilchen, es hat eben so 'ne Elementarladung, es geht eben nicht kleiner. Ja, das kann ich mir eben gut vorstellen, das kann man irgendwie längs bewegen, damit irgend was aufladen oder beschießen etc.. Jetzt muss ich mir eben immer überlegen - ja dass es eben sich irgendwie da so befindet, dass es irgendwie sich verteilt - ja !

Gegen Ende des Interviews überträgt Paul die Ladungswolkendeutung der ψ -Funktion selbstständig - dies war so nicht explizit Unterrichtsthema - auf das Doppelspaltexperiment; ein Beleg für die bei ihm verglichen mit anderen Schülern relative Kontextunabhängigkeit verschiedener Atomvorstellungen.

I: Macht dieser Satz für Dich 'nen Sinn? „Beim Doppelspaltversuch geht das Elektron offenbar durch beide Spalte.“

P: Ja ... mit der Interpretation, dass eben ein Elektron so 'ne Ladungs- und Massewolke ist, also sich verteilt hat, macht das durchaus Sinn. Dass es eben sich - ja durch beide Spalte - also davor eben hier irgendwie so verteilt, als so 'ne ψ -Kurve irgendwie. Und dann, ja dann interferiert das eben dahinter!

I: Wieso könnte man überhaupt auf die Idee kommen, so 'ne Vorstellung zu gebrauchen?

P: Ja weil wir hatten - wir hatten uns ja überlegt, was passiert, wenn man durch 'nen Doppelspalt wirklich nur ein Elektron schickt. Und dass es ja trotzdem irgendwie hinten ankommt und trotzdem irgendwie interferiert. Also muss es irgendwie, ja dann eben von beiden Spalten!

3.3.5 Karin

Karin arbeitete mit Stefan zusammen. Sie ist ein „ruhiger Typ“ und bleibt „atomphysikalisch konservativ“. Sie bleibt dabei, dass ihr das „altvertraute Bohrsche Atommodell“ plausibler und sympathischer ist als ein quantenphysikalisches Orbitalmodell. Trotz ihrer - nach eigener Einschätzung - bescheidenen physikalischen Kompetenz und ihres geringen Ehrgeizes ist sie durchaus in der Lage, auch komplexeren „verwirrenden Stoff“ noch im Mai korrekt darzustellen. Sie sieht sich jedoch außer Stande, die ihr bekannten „Quantengesetze“ anschaulich entsprechend umzusetzen und bleibt bei eigenen Darstellungen des Elektrons im Bild eines umherfliegenden Teilchens. Ein tiefgreifender Konzeptwechsel ist nicht festzustellen; das Planetenmodell wird in einigen Situationen lediglich durch Wahrscheinlichkeitsaspekte ergänzt. Eine stabile Schichtenstruktur hat sich entsprechend - Rolf vergleichbar - nur sehr rudimentär entwickelt.

Karins Äußerungen zum oben genannten Impuls belegen, dass sie sich nicht von einer klassischen Teilchenbewegung des Elektrons lösen kann. Sie sieht die Problematik, kennt wohl auch das „Bahnverbot“ nach der Unbestimmtheitsrelation, kann aber keine alternative Vorstellung entwickeln.

K: ... Wenn man sich das so wie bei Bohr vorstellt, dass eben auf der ersten Schale nur 2 sind, hab ich eben auch diese Vorstellung: Das ist dieser Kreis und diese Schale ist eben immer gleich weit von dem Kern entfernt. So dass wirklich nur diese beiden immer auf der Schale bleiben und die andern sich eben da bewegen. Während eben bei dieser - diesem Orbitalmodell - ja diese Elektronen — sich in den Bereichen bewegen und

nicht eben auf dieser festen Bahn. Weil ich kann ja nicht sagen: Das Elektron beschreibt jetzt ne Kreisbahn, sondern es schwirrt da ja einfach nur - irgendwie rum! Ich kann ja nicht - sonst könnt ich ja auch den Ort und die Geschwindigkeit des Elektrons sofort festmachen. In dem Moment, zu dem Zeitpunkt wird es sich genau in dem Punkt befinden und das stimmt ja gar nicht, das kann ich ja nicht sagen!

I: Das wäre 'ne Kritik — Bewegung überhaupt. Würdest Du sagen es bewegt sich irgendwie?

K: Ja ich weiß noch nicht mal, ob es sich beschleunigt bewegt, oder ob es 'ne gleichförmige Bewegung ausführt. Und ob es gerade fliegt oder Wellenlinien macht, ich weiß überhaupt nicht, ob es sich überhaupt bewegt!

I: Nehmen wir mal an, wir hätten das Elektron in diesem Zustand - da würde dann dieses Orbital dazugehören. ... Wie ist das denn nun mit der Bewegung und diesen Knoten?

K: Ja an den Knoten würde das Elektron ja überhaupt nicht auftauchen und ich kann mir nicht denken, dass so ein Elektron - meinetwegen bis dahin fliegt, dann meinetwegen nicht mehr existiert und auf einmal hinter dem Knotenpunkt auf einmal wieder auftaucht und weiterfliegt, also dass würde auch heißen, das Elektron ist für 'nen Moment überhaupt nicht da, oder es macht einfach 'nen riesen Sprung!

I: Gibt es 'ne Alternative in der Vorstellung, dass man solche Probleme nicht hat? Für Dich? So ganz allgemein, mein ich jetzt. ... Gibt es eine grundsätzliche Alternative, wo ich sage, da hab ich die ganzen Probleme mit der Bewegung nicht, wenn ich mir das anders vorstelle?

K: Nein ich denk mir das einfach jetzt nur so: Okay es bewegt sich nicht, es ist einfach nur da. Wie es dort hingekommen ist, weiß ich halt nicht, aber es ist da! - Ich mein, es kann ja auch im nächsten Moment ganz woanders sein! Aber ich weiß eben noch nicht, wie es von dem Punkt zu dem Punkt kommt! Es muss sich also bewegen oder — was weiß ich was!

Am ende der Interviews geht es u.a. um die Ladungswolke. Auch hier bleibt Karin konsequent beim Teilchenbild. Der opportunistische Charakter der Ladungswolke widerstrebt ihr offenbar emotional. Er hilft ihr dort, wo ihr die Atomphysik verwirrend erscheint,

nicht weiter, da er ihr ausgesprochen unsympathisch ist, (während andere Schüler - Carl, Tim, Rolf - die Ladungswolke affektiv „aufwerten“ indem sie sie mit einer Energiewolke identifizieren.) Eine tieferer Grund kann darin liegen, dass die Arbeitsgruppe um Karin sich, da sie nicht im Mittelpunkt der Untersuchung stand, vom Lehrer vernachlässigt fühlte und dagegen auch mit Vorbehalten gegen Unterrichtsinhalte protestierte.

I: ... Es gab auch diesen Begriff Ladungswolke ...?

K: Ich käme dazu nur auf die Idee, ja, dass jetzt eben auch mit so 'ner Art Elektronenwolke zu vergleichen! (...) Z.B., wenn aus einem Metall Elektronen rausgelöst worden sind, mehrere, und sich eben weg bewegen. Dann entsteht ja auch zwischen dieser Anode von der sie angezogen werden und diesen Elektronen 'ne bestimmte Spannung!

I: Für Dich bilden viele Elektronen eine Wolke?

K: Ja ich hab jetzt schon wieder diese Teilchenvorstellung und nicht so 'ne Breivorstellung (...)

I: Herr Niederderer hat die Breivorstellung favorisiert. Weißt Du,... Was da der Vorteil ist?

K: Ja was - da muss ich jetzt etwas primitiv an den richtigen Brei denken, weil so 'nen Brei kann man eben in alle Richtungen und Formen verändern. Und so könnte man sich diesen Brei immer so hinbiegen, wie man ihn gerade bräuchte ... für seine Erklärung! - (schmunzelnd, distanziert) (...)

I: Ja! Aber so wie Du das sagst und guckst, ist Dir das nicht geheuer?

K: Ne, also ich kann mir das Elektron wirklich nicht als Brei vorstellen! Das ist recht merkwürdig!

3.3.6 Stefan

Stefan ist ein engagierter und leistungsstarker Schüler. Er artikuliert auch offen Kritik am Unterricht, die z.T. darauf gründet, dass Karin und er sich gegenüber den im Mittelpunkt der Untersuchung stehenden Gruppen benachteiligt fühlen. Stefan bemüht sich im Interview - i.G. zu Karin - quantenphysikalisch korrekt zu argumentieren und auch ent-

sprechende Erklärungen zu verwenden. Es gelingt ihm jedoch nicht, hier überzeugend und konsequent zu bleiben. Er gibt z.B. zu, dass ihm die Stabilität eines Atoms ohne „Fliehkraftkompensation der elektrostatischen Anziehung“ nicht erklärlich ist. Stefan ist im Grunde ebenfalls „atomphysikalisch konservativ“ geblieben. Aufgrund seiner ernsthaften Auseinandersetzung mit den Unterrichtsinhalten ist bei ihm natürlich eine atomphysikalische Schichtenstruktur im Prinzip zu erkennen. Da die quantenphysikalischen Atommodelle für Stefan (ebenso wie für Karin und Rolf) nie den hohen Status erreicht haben, wie es bei Carl und Tim der Fall war, ist diese Schichtenstruktur weit weniger deutlich und stabil ausgeprägt.

Stefan hat zum Interview seine Freundin (G) mitgebracht. Er wird aufgefordert, ihr die Bedeutung eines Orbitals zu erklären. Seine Beschreibungen repräsentieren eindeutig ein Planetenmodell. Die Ladungswolke ist für ihn die „Staubwolke der herumflitzenden Elektronen“. Er erwähnt explizit den lebensweltlichen Bereich des Kurvenfahrens, um die Stabilität des Atoms plausibel zu machen. Nur widerstrebend lässt er sich auf eine Erklärung nicht radialsymmetrischer Orbitale ein. Dann ist er bereit, das sich sehr schnell bewegende Elektron „in einen sich verteilenden Ladungsbrei aufzulösen“. Unter weiterem Druck zieht er sogar eine „Energiewolke“ in Betracht. Die Identifikation von Ladung und Energie als quasi materielle Substanzen ist auch bei Stefan festzustellen.

S: (zu G) Da in der Mitte ist der Kern und hier hast Du so einen kleinen Kreis; das muss 'ne Kugel sein. Und da flitzen jetzt 2 Elektronen drin rum (gestikuliert). Und da die so schnell sind und wir die auch nicht sehen können, bilden die sozusagen für uns 'ne Staubwolke und das ist dieser kleine Kreis. Hier draußen flitzen - je nach Atom - mehrere Elektronen rum, aber ganz weit draußen, weil die vielmehr Energie haben. Das ist wie wenn Du bei Deinem Auto Gas gibst ... in der Kurve fliegst Du weiter raus Hier ist es dann komplizierter ... einige Elektronen flitzen im Kreis drumrum - wieder die Staubwolke - das ist der Raum, wo die rumflitzen können.

G: *Wie kann denn so 'ne Form entstehen („Schnuller“)?*

S: *Da hab ich abgeschaltet! ... Meistens rennt es dann hier immer rum, das Elektron, also im Inneren, aber, da es so schnell ist - wie soll man das erklären? ... Da es so schnell ist und so wenig Masse, dass es für uns fast überall gleichzeitig ist, dass das nicht ein Körper ist, ein Punkt, 'ne Kugel, sondern sich die Kugel in einem Brei auflöst. Dieser Brei verteilt sich dann. (...) Wir könnten aus dem Teilchen eine Energiewolke machen. Und die Wolke können wir ja total verteilen.*

Etwas später wird Stefan der Satz zur Bewegung in Orbitalen vorgelegt. Seine gemäß den Unterrichtszielen gegebene Antwort überzeugt aufgrund seiner vorherigen Äußerungen den Interviewer aber nicht mehr. Er verteidigt sich mit der Unterscheidung zwischen Anschauung und Wissen, räumt dann aber ein, dass die Sache ohne Bewegung eigentlich für ihn nicht plausibel ist.

S: *Ja was heißt bewegen. Von Bewegung kann man eigentlich nicht mehr so richtig reden!*

I: *Wenn ich mich erinnere, wie Du es Deiner Freundin erklärt hast?*

S: *Ja, nein, okay. Das war ja nun mehr anschaulich, bildmäßig. Sagen wir so: Sie befinden sich in ihren Orbitalen! Ja doch - weiß ich nicht. Also 'ne Geschwindigkeit müssen sie ja haben!*

3.3.7 Zusammenfassung


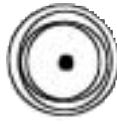

Entsprechend den Unterrichtsinhalten ist eine kognitive Schichtenstruktur notwendigerweise bei jedem Schüler bis zu einem gewissen Grade zu beobachten. Auch Schüler die spontan weiterhin mit der klassischen Vorstellung arbeiten, wissen um Alternativen und können diese auf konkrete Nachfrage benennen und in begrenztem Umfang diskutieren und anwenden. Welche kognitiven Schichten sie zu spezifischen Fragen rekonstruieren können, ist in diesen Fällen relativ stark an den Lernkontext geknüpft. Verglichen mit Carl können signifikante Unterschiede in der Ausprägung einer den Endzustand des kognitiven Elements Atom definierenden Schichtenstruktur aufgezeigt werden. Diese Unterschiede resul-

tieren aus den individuellen Voraussetzungen und Einstellungen der Schüler; sie reflektieren den Verlauf des Lernprozesses bzw. die Qualität des erreichten Konzeptwechsels.

Carls atomphysikalische Schichtenstruktur ist am klarsten entwickelt; sein „kognitives Element Atom“ weist deutliche Status- und Stärkegradienten auf. Die drei zu ihm konstruierten kognitiven Schichten werden nur von ihm selbst und - in gewissem Sinne von Paul (s. unten) innerhalb eines einzigen Kontexts explizit und reflektiert geäußert (hohes Gebrauchsniveau). Carl vollzieht einen nachhaltigen Konzeptwechsel, da er gleichzeitig einen starken philosophischen, sein Weltbild bzw. seine framework theory (Vosniadou, 1994) veränderten Konflikt gelöst hat (Petri & Niedderer, 1998b).

Bei Tim ist eine kognitive Schichtenstruktur noch relativ deutlich ausgeprägt, allerdings z.T. stärker kontextbezogen und eher formelhaft artikuliert. Die neu erworbenen Atommodelle genießen auch bei ihm einen Carl vergleichbar hohen Status. Tim lässt allerdings keinen inneren Konflikt erkennen, er identifiziert sich aus vorwiegend sekundären Motiven (soziale Anerkennung, Überlegenheitsgefühle gegenüber „nicht Eingeweihten“ etc.) mit den quantenphysikalischen Atommodellen.

Rolf, Karin und Stefan zeigen eine sehr rudimentäre Schichtenstruktur, sie bleibt weitgehend auf das bei einer ernsthaften Auseinandersetzung mit den Unterrichtsinhalten ohnehin zu erwartende Maß beschränkt. Neue Schichten und ihre Grenzen werden i.d.R. nur sichtbar, wenn die Umgebung einen „spezifischen Druck“ ausübt (vgl. Niedderer & Goldberg, 1992). Stefan beispielsweise unterscheidet dann (unplausibles) Wissen über quantenphysikalische Atommodelle und ein anschauliches und plausibles Planetenmodell. Er - und ebenso Karin - können sich atomphysikalische Phänomene ohne Elektronenbewegung nicht plausibel veranschaulichen. Alle drei Schüler können bzw. wollen sich nicht mit wichtigen Aspekten der Quantenphysik identifizieren. Der Status quantenphysikalischer Atommodelle bleibt bei allen drei Schülern

Kognitive Schicht	Planetenmodell	Aufenthaltswahrscheinlichkeit	Ladungswolke
Schüler			
Carl	hohe Stärke geringer Status	mittlere Stärke mittlerer Status	mittlere Stärke sehr hoher Status
authentische Konfliktlösung, hohe Trennschärfe, reflektierter Umgang gelungener Konzeptwechsel			
Tim	hohe Stärke geringer Status	mittlere Stärke mittlerer Status	geringe Stärke sehr hoher Status
sekundäre Motivation, fehlende Authentizität, geringeres Gebrauchsniveau Ansatz zum Konzeptwechsel			
Rolf	hohe Stärke hoher Status	geringe Stärke mittlerer Status	sehr geringe Stärke geringer Status
Formelfixierung, Vorbehalte gegen Wahrscheinlichkeitskalkül kein Konzeptwechsel, nur additiver konzeptueller Zugewinn			
Paul	mittlere Stärke geringer Status	mittlere Stärke mittlerer Status	mittlere Stärke hoher Status
professioneller Modellbegriff, Transferleistungen, sehr hohes Gebrauchsniveau kein Problem mit einem Konzeptwechsel			
Karin	sehr hohe Stärke sehr hoher Status	geringe Stärke geringer Status	sehr geringe Stärke sehr geringer Status
affektive Vorbehalte gegen Ladungswolke und Unterricht kein Konzeptwechsel, nur additiver konzeptueller Zugewinn			
Stefan	sehr hohe Stärke sehr hoher Status	mittlere Stärke geringer Status	sehr geringe Stärke geringer Status
Protest gegen den Unterricht kein Konzeptwechsel, nur additiver konzeptueller Zugewinn			

Überblick: Schichtenstruktur zur Atomphysik im Vergleich

geringer als der des Planetenmodells. Ein tiefgreifender Konzeptwechsel findet nicht statt, man kann lediglich von einem additiven konzeptuellen Zuwachs sprechen.

Stefan trägt auf diese Weise einen Beziehungskonflikt mit dem Lehrer aus. Karin ist das Bild einer „beliebig verformbaren Ladungswolke“ zu „opportunistisch“ und deswegen zutiefst unsympathisch. Für Rolf sind Wahrscheinlichkeitsaussagen und Messprozes-

se, die sich nicht in Formeln fassen lassen, äußerst unbefriedigend.

Bei Paul ist eine kognitive Schichtenstruktur insofern weniger schichtenartig ausgeprägt als er keine Probleme hat, sich von einer planetensystemartigen Atomvorstellung zu lösen, die er nach eigenen Angaben nicht verinnerlicht hat. Er verfügt über einen wesentlich weiter gesteckten Denkraum (Schecker, 1985), sowohl in ontologischer als auch epi-

stemologischer Hinsicht, und kann relativ professionell mit den drei unterschiedlichen Atommodellen umgehen. Transferleistungen in neue Kontexte fallen ihm ebenfalls relativ leicht. Paul hat kein Konzeptwechselproblem.

4. Schlussfolgerungen

Eine Analyse, die ausschließlich auf einem punktuellen Interview basiert, hat primär explorativen Charakter. Zur quantitativen Absicherung müssten umfangreichere Analysen mit noch zu entwickelnden, speziell auf die Untersuchung kognitiver Schichtenstrukturen zugeschnittenen Interviewmethoden (Tiefeninterviews) durchgeführt werden. Dennoch lassen sich aus den bisherigen Ergebnissen einige vorläufige Feststellungen und Überlegungen ableiten:

Die Organisation individuellen Wissens nach einem auf Konzeptwechsel angelegten Physikunterricht kann in physikalisch-inhaltlich abgrenzbaren, aber durch ihre bzw. in ihrer Genese verknüpften und voneinander abhängigen kognitiven Schichten beschrieben werden. Unterschiede in fachlicher Qualität, kognitivem Status und Stärke erlauben qualitative und halbquantitative Vergleiche. Dies ist über die kognitionspsychologisch-fachdidaktische Grundlagenebene hinaus auch für die schulische Praxis von Bedeutung, da - wie bereits von Niederer & Goldberg (1995) formuliert - sich aus der Perspektive eines kognitiven Schichtenmodells die Frage nach der adäquaten Messung, Beurteilung und Erklärung von Lern- bzw. Lehrerfolg stellt. Speziell zugeschnittene Tiefeninterviews müssten hier - durch Aktivierung der mit den spontan dominierenden Schichten genetisch verknüpften, kognitiv aber schwächer verankerten Schichten - ein differenzierteres und angemesseneres Bild ergeben als ausschließlich schriftliche Erhebungen wie insbesondere Multiple-Choice-Tests.

Die Datenauswertung bestätigt die u.a. von Taber (2000) postulierte wichtige Rolle einer kognitiven Schichtenstruktur beim Konzeptwechsel. Kognitive Schichtenstrukturen im hier diskutierten Sinn sollten sich in einem

auf den Erwerb bzw. die Veränderung von qualitativem Konzeptverständnis zielenden und entsprechend gestalteten Unterricht in stärkerem Maße als in einem fast ausschließlich auf quantitative Aspekte wie Messen und Berechnen angelegter Unterricht (der in der schulischen Physik immer noch weit verbreitet ist) manifestieren. Folglich müssten Kriterien entwickelt werden, die eine Skalierung der „Konzeptwechselqualität“ des Unterrichts und damit einen Vergleich des Lern- bzw. Lehrerfolgs über die Analyse von Schichtenstrukturen erlauben.

Bezogen auf die Schüler deutet sich an, dass eine kognitive Schichtenstruktur am inhaltlich ausgeprägtesten und zeitlich stabilsten ist, wo ein erforderlicher tiefgreifender Konzeptwechsel im Grundsatz gelungen ist. Zwischen einem nur im Ansatz vorhandenen, einem im Grundsatz gelungenen und einem abgeschlossenen Konzeptwechsel sollte anhand signifikanter Unterschiede hinsichtlich Status, Stärke und Gebrauchsniveau der verschiedenen Schichten unterschieden werden können. Beispielsweise ist ein abgeschlossener Konzeptwechsel durch die relativ höchsten Werte sowohl für Stärke, Status als auch Gebrauchsniveau auf Seiten der intendierten wissenschaftlichen Vorstellungen gekennzeichnet. Das Gebrauchsniveau könnte mit Begriffen wie Benennung, Beschreibung, Verwendung zur Erklärung, Transferleistung sowie Reflexion des Eignungs- und Gültigkeitsbereichs skaliert werden.

Mit einem tiefgreifenden Konzeptwechsel ist grundsätzlich eine nachhaltige Umgestaltung des betreffenden Denkrahmens bzw. der framework theory des Schülers verknüpft (Petri & Niederer, 1998b; Vosniadou, 1994) ist. Bei Lernprozessen, in denen eine tiefgreifende Umgestaltung des Denkrahmens zu beobachten ist, ist nach den oben diskutierten Ergebnissen (auch) auf der spezifisch physikalischen Ebene mit der Bildung einer ausgeprägten kognitiven Schichtenstruktur zu rechnen. Dies schließt nicht aus, dass Schüler etwa aus sozial-affektiven Motiven eine relativ deutliche ausgeprägte Schichtenstruktur auch ohne Revision des Denkrahmens entwickeln.

Weitere Perspektiven sollte ein Vergleich von Teilgebieten der Physik eröffnen. Physikalische Sachgebiete unterscheiden sich etwa in ihrem Lebensweltbezug und im Grad der Abstraktheit beträchtlich. Dies sollte deutliche Auswirkungen auf kognitive Schichtenstrukturen haben.

Literatur

- Caravita, S. & Halldén, O. (1994): Re-framing the problem of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4, 89 - 111.
- Duit, R. (1996). Lernen als Konzeptwechsel im naturwissenschaftlichen Unterricht. In: Duit, R., Rhoeneck, C. von (Ed.), *Lernen in den Naturwissenschaften* (pp. 145-162). Kiel: IPN, Kiel.
- Galili, I., Hazan, A. (2000): Learners' knowledge in optics: interpretation, structure and analysis. *Int. J. Sci. Educ.*, 22, 57-88.
- Hewson, P., Hewson, M. (1992): The status of students' conceptions. In: Duit, R., Goldberg, F., Niedderer, H. (eds.): *Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies*, Proceedings of an International Workshop in Bremen. Kiel: IPN, 59-74.
- Johansson, B., Marton, F., Svensson, L. (1985): An Approach to Describing Learning as Change between Qualitatively Different Conceptions. In: West, L. H. T.; Pines, A L. (eds.): *Cognitive Structure and Conceptual Change*, Orlando et. al.: Academic Press, p. 233 - 258.
- Maloney, D. P., Siegler, R. S. (1993): Conceptual competition in physics learning. *Int. J. Sci. Educ.*, 15, 283 - 295.
- Minstrell, J. (1992): Facets of students' knowledge and relevant instruction. In: Duit, R., Goldberg, F., Niedderer, H. (eds.): *Research in physics learning, Theoretical issues and empirical studies*. Kiel: IPN, 110-128.
- Niedderer, H., Cassens, H., Petri, J. (1994): Anwendungsorientierte Atomphysik in der S II - Zustände und Orbitale von Atomen, Molekülen, Festkörpern. *Physik in der Schule* 32, 266 - 270.
- Niedderer, H., Goldberg, F. (1992): A study of thinking and learning in electric circuits. Paper presented at NARST, Boston, March 21-25, 1992.
- Niedderer, H., Goldberg, F. (1995): Lernprozesse beim elektrischen Stromkreis. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften ZfDN* 1, Heft 1, 73-86.
- Niedderer, H.; Petri, J. (2000): Mit der Schrödinger-Gleichung vom H-Atom zum Festkörper. Unterrichtskonzept für Lehrer. Überarbeitete und ergänzte Fassung des Basistexts von 1997. In: Internet, Projekt QuAP unter: <http://didaktik.physik.uni-bremen.de/niedderer/projekte.htm>
- Petri, J. (1996): Der Lernpfad eines Schülers in der Atomphysik - Eine Fallstudie in der Sekundarstufe II. Aachen: Verlag Mainz.
- Petri, J., Niedderer, H. (1998a): A learning pathway in high-school level quantum atomic physics. *Int. J. Sci. Educ.*, 20, 1075 - 1088.
- Petri, J., Niedderer, H. (1998b): Die Rolle des Weltbildes beim Lernen von Atomphysik - Eine Fallstudie zum Lernpfad eines Schülers. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften ZfDN* 4, Heft 3, 3 - 18.
- Plötzner, R. (1998): Flexibilität im Problemlösen und Lernen. Konstruktion, Anwendung und Koordination von Wissenssystemen. Lengerich: Pabst.
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., Gertzog, W. A. (1982): Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66(2), 211-227.
- Schecker, H. (1985): Das Schülervorverständnis zur Mechanik. Eine Untersuchung in der Sekundarstufe II unter Einbeziehung historischer und wissenschaftstheoret. Aspekte. Bremen: Universität Bremen.
- Schnotz, W. (1994): Aufbau von Wissensstrukturen: Untersuchungen zur Kohärenzbildung beim Wissenserwerb mit Texten. Weinheim: Beltz, Psychologie Verlags Union.
- Scott, P. H. (1992): Pathways in learning science: A case study of the development of one student's ideas relating to the structure of matter. In: Duit, R., Goldberg, F., Niedderer, H. (eds.): *Research in physics learning, Theoretical issues and empirical studies*. Kiel: IPN, 203-224.
- Spada, H. (1994): Conceptual change or multiple representations. *Learning and Instruction*, 4, 113 - 116.
- Taber, K. S. (2000): Multiple frameworks?: Evidence of manifold conceptions in individual cognitive structure. *Int. J. Sci. Educ.*, 22, 399 - 417.
- Thornton, R. K. (1995): *Conceptual Dynamics. Changing student views of force and motion*. In: Bernardini, C., Tarsitani, C., Vicentini, M. (eds.): *Thinking physics for teaching*. New York: Plenum Press.

- Tyson, L. M.; Venville, G. J.; Harrison, A. G.; Treagust, D. F. (1997): A Multidimensional Framework for Interpreting Conceptual Change Events in the Classroom. *Science Education*, 4/1997, 387-404.
- Tytler, R. (1998): The nature of students' informal science conceptions. *Int. J. Sci. Educ.*, 20, 901 - 927.
- Vosniadou, S. (1994): Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4, 45 - 69.

Die Autoren: Dr. Hans Niederer ist Professor für Didaktik der Physik an der Universität Bremen.

Dr. Jürgen Petri war von 1993 bis 1995 wiss. Mitarbeiter zur Promotion bei Prof. Niederer. Nach Referendariat und Schuldienst ist er seit Herbst 1999 wieder am Institut für Didaktik der Physik der Universität Bremen tätig.

e-mail: jpetri@physik.uni-bremen.de
bzw.: niederer@physik.uni-bremen.de