

HANS NIEDDERER UND FRED GOLDBERG

Lernprozesse beim elektrischen Stromkreis

Zusammenfassung:

In einer Serie von Lerninterviews wurden die Lernprozesse von drei College-Studentinnen (zukünftigen Primarstufenlehrerinnen) beim elektrischen Stromkreis untersucht. Die empirische Basis für die Analyse ihrer Lernpfade und Wissenskonstruktionen besteht in einer interpretativen Analyse der Transkripte von sechs Unterrichtsdoppelstunden, in denen die Studentinnen sowohl selbst Experimente durchführen als auch mit einer speziellen Computersoftware arbeiteten. Ihre Lernpfade werden durch aufeinander folgende kognitive Zustände (Vorstellungen) und dazwischen ablaufende Prozesse beschrieben. Ausgehend von einem „Alltags-Strom-Konzept“, das aus den Arbeiten zu „Schülvorstellungen“ gut bekannt ist, führt der Lernprozeß in drei aufeinanderfolgenden Schritten zu den Zwischenvorstellungen „positiver und negativer Strom“, „Elektronen-Strom“ und „Strom mit Elektronendruck“. Die Analyse ergibt eine hypothetische Liste von kognitiven Werkzeugen, die von den Studentinnen bei ihren Wissenskonstruktionen benutzt werden, und hypothetische Aussagen über die Auswirkungen des Unterrichts auf die Lernprozesse.

Abstract:

Learning processes of three college students (prospective elementary school teachers) in the content area of electric circuits were investigated in a tutorial study. Empirical evidence for learning pathways and knowledge construction is coming from an interpretive analysis of transcripts of six tutorial sessions, in which the students use hands-on experiments and a special computer software. Their learning pathways are described by subsequent cognitive states (conceptions) and intermediate processes, starting with a prior conception „everyday current“ (well known from previous research) and coming to three new intermediate conceptions „positive and negative current“, „microscopic view of current“, and „current with electron pressure“. The analysis also results in hypotheses of some cognitive tools which are used by students in their construction processes, and in some hypotheses about effects of specific elements of teaching on knowledge construction.

1. Lernprozeßforschung

Eine der erfolgreichsten Forschungsrichtungen der Didaktik der Naturwissenschaften in den letzten 20 Jahren ist die Erforschung von Schülvorstellungen (s. z.B. die umfassenden Bibliographien von Pfundt & Duit, 1994 und Carmichael, Driver, Holding, Phillips, Twigger & Watts, 1990). Diese Forschungsrichtung hat gezeigt, daß Schüler mit einer Reihe von Vorstellungen aus ihrer Alltagswelt in den Unterricht kommen und diese dort aktiv verwenden. Ihr Lernprozeß knüpft an diesen Vorstellungen an und benutzt die in ihnen enthaltenen kognitiven Elemente als Werkzeuge für das Lernen. Da die Alltagsvorstellungen und die zu lernenden wissenschaftlichen Vorstellungen häufig nicht übereinstimmen, ergeben sich Lernschwierigkeiten, die in der Regel dazu führen, daß die wissenschaftli-

che Vorstellung nicht oder doch nur in Ansätzen erlernt wird.

Die Erkenntnisse über Schülvorstellungen legen eine Weiterentwicklung dieser Forschungsrichtung nahe, um mehr über die im Unterricht stattfindenden Lernprozesse der Schüler herauszufinden. Dazu genügen nach unserer Auffassung Untersuchungen vor und nach dem Unterricht nicht; man muß vielmehr versuchen, die während des Unterrichts stattfindenden kognitiven Veränderungen zu beschreiben und als eine Wechselwirkung von bestehender kognitiver Struktur und Lernumgebung zu verstehen.

Wir tun dies, indem wir einen hypothetischen Prozeß der Veränderung des kognitiven Systems durch explizite Angabe von Zuständen und Randbedingungen beschreiben. Das bedeutet, daß wir aus einer fachdidaktischen Forschungstradition heraus unter Einbezie-

hung von Ergebnissen der Wissenspsychologie kognitive Modelle über das Lernen von Schülern konstruieren. Umgesetzt wird dieses Konzept von den Forschungsgruppen zur Physikdidaktik in Bremen insbesondere dadurch, daß Lernprozesse einzelner Schüler, bevorzugt im realen Unterricht, mit Hilfe von Videoaufnahmen qualitativ analysiert werden (Fischer, 1989; Schmidt, 1989; Fischer & v. Aufschnaiter, 1992; Schwedes & Schmidt, 1992; Niedderer & Goldberg, 1992, 1995; Petri & Niedderer, 1994; Welzel, 1995).

2. Theoretischer Rahmen

Es gibt unterschiedliche Ansätze, Lernprozesse im Physikunterricht zu untersuchen. Fischer (1989) und Welzel (1995) bemühen

den in Form von Zwischenvorstellungen darzustellen. Ergänzend beschreiben wir den zwischen zwei Zuständen ablaufenden Prozeß in Form von Hypothesen über kognitive Auswirkungen bestimmter Unterrichtselemente und den dabei benutzten kognitiven Werkzeugen.

Grundlage dieses Ansatzes ist ein fachdidaktisch-pragmatisches Modell zur Beschreibung kognitiver Systeme, das Niedderer und Schecker (1992, 74-98) vorgeschlagen haben (Bild 1). Es basiert auf einer Reihe von empirischen Arbeiten zum „Schülervorverständnis“, die in Bremen durchgeführt worden sind (Niedderer, 1982; Schecker, 1985; Bethge, 1988; Meyling, 1990). Schecker und Niedderer unterscheiden in ihrem Modell zwischen aktuellen Konstruktionen in der jeweiligen

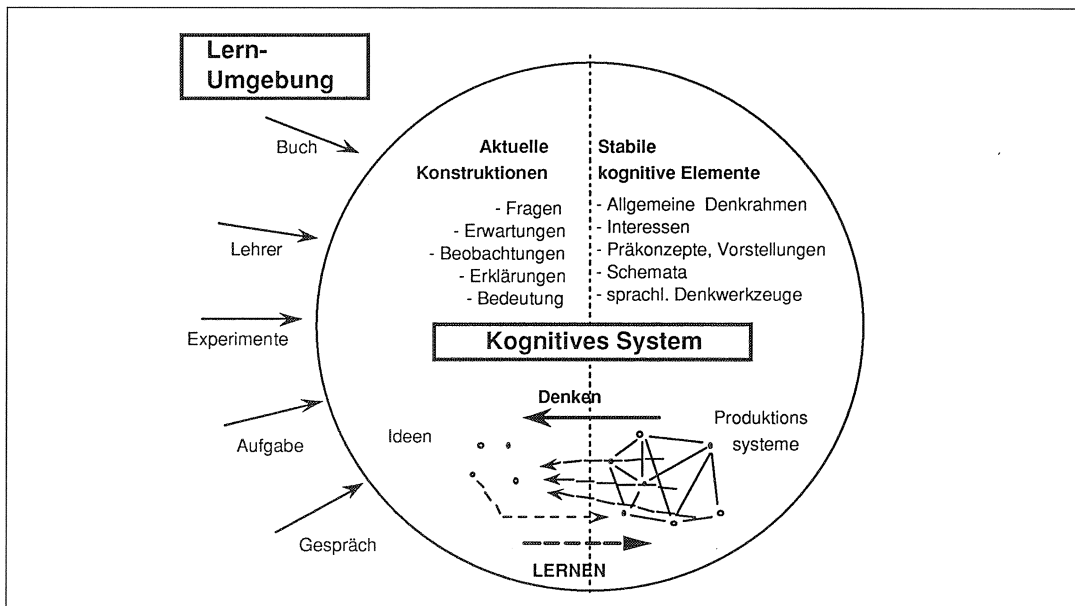


Bild 1: Ein Modell des kognitiven Systems (Niedderer & Schecker, 1992, 84)

sich, die Lernprozesse insgesamt, kontinuierlich zu rekonstruieren. Wir versuchen dagegen, Lernprozesse als Lernpfade durch Angabe von aufeinander folgenden kognitiven Zustän-

Situation und den sie bedingenden stabilen kognitiven Elementen¹ in einer Tiefenstruktur des kognitiven Systems. Letztere kennzeichnen dessen Zustand. Veränderungen in

¹ Solche kognitiven Elemente stellen selbstverständlich Konstruktionen des Forschers dar. Es ist damit – ähnlich wie beim Atommodell – kein unmittelbarer Anspruch auf Realität verbunden. Sie werden vielmehr an der Nützlichkeit ihrer Erklärungen und an der Übereinstimmung mit anderen Forschungsergebnissen gemessen.

der Tiefenstruktur (z.B. Hinzufügen weiterer Vorstellungen) werden als Lernen bezeichnet. Die Unterscheidung zwischen aktuellen Konstruktionen und stabilen kognitiven Elementen der Tiefenstruktur erfolgt dadurch, daß der Nachweis der Stabilität der aus der Analyse von Transkripten vom Forscher hermeneutisch konstruierten kognitiven Elemente empirisch geführt wird.

Über die Natur von Wissensrepräsentationen hat es in den letzten Jahren eine lebhaft Diskussion gegeben (Fischer, 1994, 28 ff). In der Psychologie wird nach deklarativen, prozeduralen und analogen Wissensrepräsentationen unterschieden, während in der Physikdidaktik der Begriff „Vorstellung“ als Zusammenfassung aller Wissensrepräsentationen üblich ist. Eine wichtige dabei diskutierte Frage ist, in welcher Form diese kognitiven Elemente im Denken verankert sind. Wir behandeln „Vorstellungen“ so, als ob sie im Gehirn gespeichert wären (Wissensrepräsentation); wir sind uns aber darüber im klaren, daß dies nur eine bequeme Art der Darstellung ist, die durch Beschreibung allgemeiner Produktionssysteme des kognitiven Systems mit deklarativen und prozeduralen Anteilen zu ersetzen sein wird². Für uns sind Vorstellungen Charakterisierungen von besonders häufigen oder wahrscheinlichen aktuellen Konstruktionen von Schülern.

Bei der Untersuchung von Lernprozessen beschreiben wir zunächst Zwischenvorstellungen, die einen gewissen Lernfortschritt im Sinne einer Veränderung zeitweilig stabiler („metastabiler“) kognitiver Strukturen kennzeichnen. Diese Zwischenvorstellungen erweisen sich in der Regel als gegenüber den Anfangsvorstellungen verändert, aber in charakteristischer Weise als noch von den wissenschaftlichen Vorstellungen verschieden (vgl. Galili, Bendall & Goldberg, 1993; Duit 1994). Bei der empirischen interpretativen Analyse ist vor allem der Nachweis einer mindestens zeitweiligen Stabilität - also des wie-

derholten Auftretens - solcher Zwischenvorstellungen von entscheidender Bedeutung (vgl. Bild 1). Sie stellt das entscheidende Kriterium dar, ob etwas als Zwischenvorstellung anerkannt werden kann und damit Lernen in unserem Sinn überhaupt stattgefunden hat.

Mit diesem Konzept von Zwischenvorstellungen verbinden wir auch eine veränderte Auffassung des Endzustandes eines Lernprozesses. In Arbeiten zum Konzeptwechsel („conceptual change“) aus den frühen 80er Jahren wurde von der Auffassung ausgegangen, daß Lernen darin besteht, eine falsche Anfangsvorstellung durch eine richtige Endvorstellung zu ersetzen (vgl. Duit, 1994, 8). Der Endzustand würde hier also aus der reinen wissenschaftlichen Vorstellung bestehen und wäre andernfalls als nicht erfolgreich zu kennzeichnen. Demgegenüber gehen wir davon aus, daß auch im Endzustand des Lernens nach einem Unterricht frühere Vorstellungen und Zwischenvorstellungen noch vorhanden sind und durch ihre jeweilige relative Stärke oder ihren „status“ (Hewson & Hewson, 1992) gekennzeichnet werden können. Dies kann sich dann zum Beispiel so auswirken, daß ein Schüler am Ende des Unterrichts bei einer neuen, bisher unbekannteren Aufgabe zunächst seine alten Anfangsvorstellungen heranzieht und zu entsprechenden Aussagen kommt. Wenn man ihm jedoch genügend Zeit läßt - und vielleicht kleine Denkanstöße als Hilfen gibt - werden auch andere Vorstellungen von ihm auf dieses neue Problem angewendet. Bei einem zumindest teilweise erfolgreichen Lehr-Lern-Prozeß wird unter diesen Bedingungen dann auch die wissenschaftlich richtige Vorstellung von den Schülern aktiviert. Wenn dieses Schichtenmodell den Zustand des kognitiven Systems nach Beendigung des Unterrichts richtig beschreibt, dann wirft dies ein anderes Licht auf zahlreiche Ergebnisse aus Vorstellungsuntersuchungen, nach denen auch nach dem Unterricht häufig nur die alten Vorstellungen gefunden werden. Aus

² Die von uns im folgenden angegebenen „kognitiven Werkzeuge zur Wissenskonstruktion“ enthalten als wesentliche Elemente auch Schemata und dürften sehr nahe an solchen „Produktionssystemen“ liegen.

der Sicht des Schichtenmodells wären Untersuchungsmethoden nötig, die nicht allein die gewissermaßen spontan zu Tage tretenden Vorstellungen zu erheben gestatten, sondern es erlauben, Vorstellungen der anderen Schichten zu erfassen und ihren jeweiligen Status zu erkunden.

Lernpfade werden von uns also primär als Folge von „metastabilen“ Zwischenzuständen beschrieben. Ganz ähnlich kennzeichnet Scott (1992, 203 ff) Lernpfade als „pathways in learning science“. Brown und Clement (1992, 384 ff) sprechen von Zwischenvorstellungen („intermediate conceptions“) als wichtigen Teilschritten („stepping stones“) im Lernprozeß. Dykstra (1992, 40 ff) gibt ein Beispiel eines Lernprozesses mit vier aufeinander folgenden Vorstellungen zum Kraftkonzept. In gleichem Sinne sprechen Galili, Bendall und Goldberg (1993) von Zwischenzuständen im Bereich Optik („intermediate states of knowledge“), in denen Vorstellungen auftreten, die in charakteristischer Weise aus einer Verknüpfung von Alltagsvorstellungen und wissenschaftlichen Vorstellungen („hybrid knowledge“) bestehen (vgl. zum Konzept von „Hybridbildungen“ Jung, 1993, 92ff).

In Ergänzung der Beschreibung von Lernpfaden durch kognitive Zustände versuchen wir, auch die eigentlichen Lernprozesse aus dem Unterrichtsverlauf heraus zu rekonstruieren. Hier werden aus der Analyse der Transkripte Anhaltspunkte darüber gewonnen, mit welchen kognitiven Werkzeugen – zum Beispiel Alltagsvorstellungen, Schemata oder Elementen aus der Umgangssprache – Zwischenvorstellungen aufgebaut werden. Unsere Analyse der „Wissenskonstruktion“ („knowledge construction“, Lijnse, 1994, 7) hat also zwei Ziele:

– Formulierung von Hypothesen über die Auswirkungen einzelner Unterrichtselemente auf die Konstruktion der Zwischenvorstellungen,

– Formulierung von Hypothesen über die von den Schülern im Lernprozeß verwendeten kognitiven Werkzeuge.

In unserem konstruktivistischen Modell des Lernens gehen wir davon aus, daß es keine direkte Übertragung von Wissensstrukturen gibt. Wir sehen den Zusammenhang zwischen Lehrangebot (Lehrerinformationen und Lehrerverhalten, Texte, Experimente, Handlungen) und tatsächlichem Lernen als „Resonanz“ („compatibility“ oder „conceptual fit“) (Glaserfeld 1992, 33) im folgenden Sinne. Je nach individueller kognitiver Struktur des Schülers haben verschiedene Anteile des Lehrangebots einen mehr oder weniger großen Effekt. Bei positiven Auswirkungen bestimmter Inputs des Unterrichts sprechen wir von Resonanz zwischen Unterrichtsinformation und kognitivem System des Schülers.³

3. Ergebnisse

Im folgenden berichten wir über die Ergebnisse einer Studie, die wir im Jahre 1991 mit drei Studentinnen für das Lehramt an Primarstufen im Alter von ca. 22 Jahren an der San Diego State University in Kalifornien durchgeführt haben. Das Design bestand darin, daß die Studentinnen zeitgleich mit der normalen Lehrveranstaltung (Goldberg) in einem separaten Raum von einem „Privatlehrer“ (Niedderer) unterrichtet und mit zwei Videokameras laufend beobachtet wurden. Der Unterricht bestand aus insgesamt sechs doppelstündigen Sitzungen, verteilt über drei Wochen. Anschließend bearbeiteten diese Studentinnen denselben Test wie ihre Kommilitoninnen und Kommilitonen aus dem Gesamtkurs.

Es ging in den Sitzungen um ein qualitatives Verständnis des elektrischen Stromkreises mit Hilfe der Begriffe Stromstärke, Spannung und Widerstand. Dabei wurde eine spezielle Computersoftware (Goldberg, Pundak, Niedderer,

³ Diese Vorstellung wurde von Ernst von Glasersfeld in einer Diskussion während des Bremer Workshops zu Lernprozeßstudien (Duit, Goldberg & Niedderer, 1992) in besonders eindrücklicher Weise formuliert. Er sprach von einem angezupften Geigenton (Input des Unterrichts), der in einem Raum dann eine Resonanz hervorrufen kann, wenn Ton und Raum „zueinander passen“.

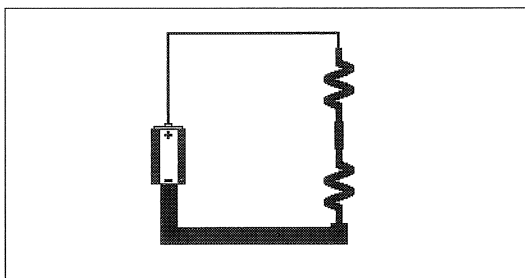


Bild 2: Beispiel eines Stromkreises mit zwei Lämpchen in Serie im Computer-Druck-Modell

Bendall & Bach, 1994) verwendet, bei der Spannung in Analogie zum Druckunterschied eingeführt und der Druck in der grafischen Darstellung der Schaltungen auf dem Bildschirm als Dicke der jeweiligen Verbindungen dargestellt wurde (Bild 2).

Die Videoaufzeichnungen wurden transkribiert und mehrfach in rekursiven Durchgängen einer qualitativ-interpretativen Analyse unterzogen (Niedderer & Goldberg, 1992, 1993, 1994, 1995). Die folgende Darstellung der Ergebnisse beschränkt sich auf eine knappe Darstellung der Lernprozesse in den ersten beiden Doppelstunden.

3.1 Überblick über den Lernpfad

Unsere Analyse hat zu den drei Zwischenvorstellungen geführt, die in Bild 3 zu finden sind. Im folgenden werden wir die vier kogni-

tiven Zustände jeweils mit ihren Kern- und Einzelaussagen sowie mit ausgewählten Belegen insbesondere für deren zeitweilige Stabilität beschreiben. Die dazwischen ablaufenden Lernprozesse werden wir durch die Lernaktivitäten und die vermuteten Wissenskonstruktionen kennzeichnen.

3.2 Kognitiver Zustand 1

Anfangsvorstellung „Alltags-Strom-Konzept“: Strom wird als eine Substanz gesehen, die ähnlich wie Treibstoff Energie enthält und nicht wie Wasser Energie transportiert. Aus dieser Kernaussage ergeben sich zum Beispiel folgende Einzelaussagen: Strom wird in einem Verbraucher verbraucht. Strom bewegt sich von der Batterie zum Verbraucher und nicht umgekehrt. Eine Batterie hat einen begrenzten Vorrat an Strom. Strom muß sich zum

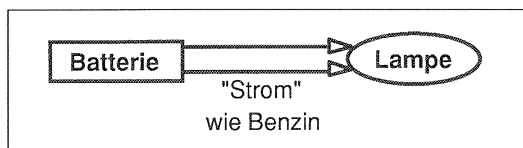


Bild 4: Schema Alltags-Strom

Lämpchen bewegen, um dorthin zu gelangen; die Geschwindigkeit dieser Bewegung ist jedoch kein Kriterium für die Größe der Stromstärke.

Diese Anfangsvorstellung ist aus zahlreichen Untersuchungen insbesondere durch die Arbeiten von Shipstone, Johsua, Dupin, v.

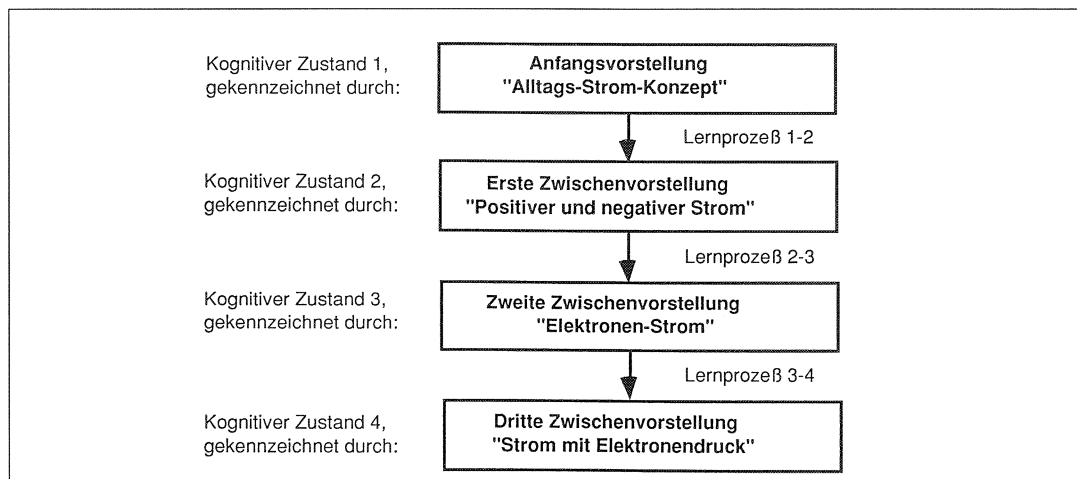


Bild 3: Übersicht über die kognitiven Zustände der drei Studentinnen

Rhöneck, Fredette und Schwedes & Schmidt sehr gut bekannt (vgl. Pfundt & Duit 1994, 79-94). Während in diesen Untersuchungen Einzelheiten der Vorstellung übereinstimmend formuliert werden, gibt es noch keine einheitliche Darstellung ihres Kerns. Schwedes und Schmidt (1992) kennzeichnen als Kern den „Stromverbrauch“; wir sehen hingegen - insbesondere bestärkt durch eine Untersuchung von Solomon (1985) – den Kern des „Alltags-Strom-Konzepts“ darin, daß Strom die Bedeutung eines Treibstoffs gegeben wird.

3.3 Lernprozeß 1-2: Erste Experimente mit Batterie und Lämpchen

Das Entstehen der ersten Zwischenvorstellung ist ein gutes Beispiel dafür, wie ein Lernprozeß in eine vom Lehrer nicht gewollte und auch nicht wahrgenommene Richtung laufen kann. Die Intention des Lehrers in diesem Unterricht war es, die Anfangsvorstellung der Studentinnen explizit zu machen und ihnen erste konkrete Erfahrungen durch eigene Experimente mit Batterie und Lämpchen zu ermöglichen. Der Lernprozeß der Studentinnen führte aber zur Zwischenvorstellung „Positiver und negativer Strom“ (Bild 3), die weiter unten näher beschrieben wird. Der Unterricht verlief wie folgt:

- Kurzer Vortest mit Zeichnung und Erklärung zum Anschluß eines Lämpchens ohne Fassung an eine Monozelle.
- Gespräch über diesen Vortest.
- 30 Minuten eigenes Experimentieren der Studentinnen mit Batterie, Lämpchen und Drähten mit dem Ziel, eine funktionierende Schaltung zu finden.
- Arbeitsbogen mit folgenden Aufgaben: Zeichnung der erfolgreichen und nicht erfolgreichen Schaltungen, Formulierung einer Regel für das Funktionieren des Lämpchens.
- Gespräch über diesen Arbeitsbogen.

Alle drei Studentinnen zeichnen im Vortest zwei Verbindungen vom oberen Anschluß der Monozelle zu einem Anschluß am Lämpchen in eine vorgegebene Skizze ein (Bild 5). Aller-

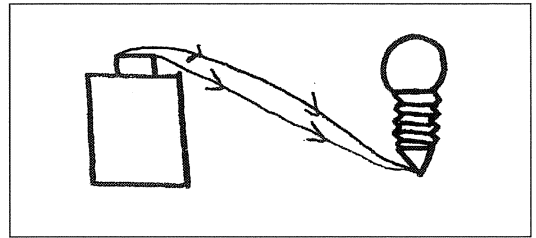


Bild 5: Vortestzeichnung

dings erwähnt die Studentin Lynn sowohl in einer schriftlichen Aussage im Vortest als auch im anschließenden Gespräch die Idee von positiven und negativen Kabeln oder Ladungen, als sie davon berichtet, daß zwei verschiedenfarbige Kabel nötig waren, um eine leere Autobatterie mit einer vollen zu verbinden.

In der eigenen Experimentierphase haben die Studentinnen unerwartet große Mühe, eine funktionierende Schaltung von Batterie und Lämpchen herzustellen. Erst nach 30 Minuten mühsamen Trial-and-Error-Verfahrens gelingt schließlich die erste funktionierende Schaltung. Dieser Erfolg wird dann zum großen Aha-Erlebnis. In der anschließenden Aufgabe, selbst eine Regel für die Herstellung einer funktionierenden Schaltung aufzuschreiben, verwenden alle drei Studentinnen Formulierungen im Sinne der ersten Zwischenvorstellung „positiver und negativer Strom“ (siehe weiter unten).

Die Unterrichtsaktivitäten hatten, so interpretieren wir die Videoaufzeichnungen, positive Auswirkungen auf den kognitiven Konstruktionsprozeß. Dies dürfte auf deren große Offenheit und die – etwas überraschende – Angemessenheit der einfachen Fragestellungen für den Interessenshorizont der Studentinnen zurückzuführen sein. Insbesondere scheint das Zusammenpassen der selbst mühsam gewonnenen Erkenntnis „für eine funktionierende Schaltung braucht man zwei getrennte Verbindungen mit je zwei verschiedenen Anschlußstellen an Batterie und Lämpchen“ mit den vorhandenen kognitiven Werkzeugen (siehe unten) in diesem Lernprozeß eine wesentliche Rolle gespielt zu haben, während Lehrerinformationen daran so gut wie gar nicht beteiligt waren.

Dieser Lernprozeß bestand also im wesentlichen aus einer Verknüpfung mehrerer kognitiver Werkzeuge, über die die Studentinnen bereits verfügten, mit neuen Erfahrungen. Dabei wurde durch Bestätigungen aus den Experimenten und den anschließenden Gesprächen, die vorwiegend zwischen den Studentinnen selbst und nicht über den Lehrer geführt wurden, auch eine Zunahme des „Status“ oder der „Stärke“ der neuen Vorstellung erreicht.

In diesem Lernprozeß wurden, so unsere Interpretation, folgende kognitive Werkzeuge von den Studentinnen benutzt:

- Die oben (Bild 4) genannte Anfangsvorstellung von Strom als Treibstoff.
- Vorkenntnisse der Studentin Lynn: „man braucht zwei verschiedenfarbige Kabel, um eine leere Autobatterie zu laden“.
- Vorkenntnisse aus dem vorangegangenen Unterricht über positive und negative Ladungen.
- Vorstellung „Licht kann in einer Art chemischen Reaktion – hier von positiver und negativer Ladung – erzeugt werden“ (vgl. das Schema „Umwandlung“ bei Voss, 1991, 289).

Am Ende des Lernprozesses drücken die Studentinnen eine große Befriedigung darüber aus, daß sie jetzt etwas verstanden haben. Eine von ihnen formulierte das folgendermaßen:

L:Dieser ganze Bereich Elektrizität schien zunächst sehr kompliziert ... Es ist eigentlich ganz einfach, mit positiv und negativ. Und dann die Stellen, wo sie berührt werden müssen. Wenn man an elektrischen Strom denkt, ist zunächst alles sehr kompliziert. Wenn man aber anfängt, es in solche kleine Einzelheiten zu zerlegen und diese dann zusammenzufügen, dann wird es auf einmal alles klar.

3.4 Kognitiver Zustand 2

Erste Zwischenvorstellung „Positiver und negativer Strom“⁴:

Positive und negative Ladungen kommen durch zwei verschiedene Verbindungen von der Batterie (plus, minus) zum Lämpchen (Fußpunkt, Gewinde). Durch ihr Zusammentreffen erzeugen sie Licht in der Lampe.

Eine der Studentinnen formuliert als allgemeine Regel zum richtigen Anschluß eines Lämpchens an eine Batterie:

„Man braucht sowohl negative als auch positive Ladungen, um Elektrizität zu leiten“.

Eine andere formuliert:

„Man braucht Ströme vom positiven und negativen Ende der Batterie zum Fußpunkt und Gewinde des Lämpchens“.

Der Nachweis der zeitweisen Stabilität dieser Zwischenvorstellung ergibt sich für uns aus folgenden Belegen:

- Mehrere (ca. 10) hartnäckige spontane Fragen während der unmittelbar anschließenden Unterrichtsphase noch in der ersten Sitzung (Gespräch über Elektronenstrom). Diese Fragen betreffen folgende, aus dieser ersten Zwischenvorstellung erklärable Aspekte: Gehen beide Ströme von der Batterie zum Lämpchen? Der Strom besteht doch aus positiven und negativen Ladungen! Die Protonen bewegen sich gar nicht? Wie wird dann das Licht im Lämpchen erzeugt? Sind Protonen schon ohne Strom im Lämpchen vorhanden?
- Benutzung dieser ersten Zwischenvorstellung in der zweiten Sitzung bei neuen Experimenten und ihrer Erklärung.

Eine langfristige Wirkung dieser ersten Zwischenvorstellung sehen wir auch in der großen Bedeutung, die „positiv“ und „negativ“ in der weiteren Diskussion um Stromkreise und ins-

⁴ Diese Vorstellung ist sehr ähnlich der wohlbekannten Vorstellung „clashing current“, d.h. dem Zusammentreffen von positivem und negativem Strom in einem Verbraucher (Shipstone, 1985). In unserer Studie tritt sie jedoch nicht als Anfangsvorstellung, sondern als Zwischenvorstellung nach etwa einer Stunde Unterricht auf. Sie hat zudem Bedeutungen bei der Erklärung der Anschlußbedingungen, in einer ähnlichen Weise wie in der Studie von Schmidt (1989).

besondere bei der Zuordnung von hohem Druck zu minus und niedrigem Druck zu plus haben.

3.5 Lernprozeß 2-3: Strom als Bewegung von Elektronen

Auch dieser Teil des Lernprozesses verlief anders, als es die Intention des Lehrers war. Während er nur eine kurze Einführung der Elektronenvorstellung als Vorbereitung der Elektronendruckvorstellung beabsichtigte, entwickelte sie sich aufgrund der starken Resonanz (im oben beschriebenen Sinne) und vieler spontaner Beiträge der Studentinnen zu einem eigenen Schwerpunkt.

Der Unterricht fand als offenes Gespräch statt, in dem der Lehrer eine Tafel benutzte und Informationen in kleinen Portionen je nach Bedarf in das Gespräch einfließen ließ. Das Gespräch drehte sich um folgende Aspekte: Richtung des Stroms; Strom als Energie oder als Materie; positive Ladungen (nicht beweglich) und negative Ladungen (beweglich); Verfolgung des Stromes auf seinem Weg; was passiert im allerersten Augenblick nach dem Einschalten, was passiert später; Erzeugung des Lichtes durch Wärme, die durch die Bewegung der Elektronen entsteht; Anzahl der Elektronen an verschiedenen Stellen des Stromkreises; zwei Drähte sind als Zu- und Abfluß für die Elektronen nötig.

Der Lehrer gab nach und nach die folgenden Teilinformationen:

- Der Strom ist Träger der Energie, er ist nicht selbst die Energie (dazu gab es keine Resonanz der Studentinnen).
- Es gibt positive und negative Ladungen. Die positiven Ladungen bewegen sich nicht, nur die negativen Ladungen bewegen sich.
- Elektronen bewegen sich durch den dünnen Draht im Lämpchen. Dadurch geraten die Atome in diesem Draht in Schwingung, der Draht wird heiß und dadurch wird Licht ausgesendet.
- Die Anzahl der Elektronen, die in die Lampe hineinfließen, ist gleich der Anzahl der Elektronen, die wieder herausfließen.

- Die Elektronen brauchen einen Draht als Zufluß und einen als Abfluß, sonst ist keine Bewegung möglich.

- Die Batterie liefert zusätzliche Elektronen am Minusende. Dadurch ist es hier sehr voll. Die Elektronen stoßen einander ab, denn sie haben wegen ihrer gleichen Ladung abstoßende Kräfte.

- Plus bedeutet: Hier befinden sich nicht so viele Elektronen.

- In der Batterie werden die Elektronen von plus nach minus transportiert; den Antrieb liefert chemische Energie.

Die Studentinnen gehen auf die meisten dieser Lehrerinformationen sehr bereitwillig und mit großer Resonanz ein. Dies beruht vermutlich auf der Tatsache, daß das angebotene Elektronenmodell des Stroms ihnen erlaubt, zahlreiche bereits vorhandene kognitive Werkzeuge einzusetzen. Ein anderer Teil der positiven Resonanz dürfte von ihrer hohen Wertschätzung für atomare mikroskopische Modelle als „wahre Physik“ herrühren.

Beispiele für physiknahestehende kognitive Werkzeuge (Vorstellungen) sind:

- Das Elektron als Teilchen (Voraussetzung für die Verwendung der Alltagssprache).

- Positive und negative Ladungen; abstoßende und anziehende Kräfte zwischen Ladungen.

Außerdem spielen bei diesem Lernprozeß Schemata und kognitive Werkzeuge aus der Alltagssprache eine bedeutende Rolle. Einige dieser kognitiven Werkzeuge sind:

- Elektronen können sich bewegen, dahin und dorthin gehen; sie können anhalten, zurückgehen; ihre Bewegung hat eine bestimmte Richtung; sie können sich kontinuierlich weiterbewegen und zum Beispiel im Kreis fließen (vgl. das Schema „Transfer“ bei Voss, 1991, 289).

- Elektronen können andere Elektronen oder Atome stoßen und dadurch Bewegung „abgeben“.

- Die Anzahl der Elektronen hat eine klare Bedeutung; es macht keine Schwierigkeit,

von der gleichen Anzahl hineingehender und herauskommender Elektronen zu sprechen.

– Elektronen brauchen freien Raum, um sich zu bewegen; wenn es diesen nicht gibt – zum Beispiel weil keine zweite Verbindung vorhanden ist – kommt die Bewegung zum Stillstand.

Im Dialog während dieses Unterrichtsabschnitts wurden über 20 eigenständige Beiträge der Studentinnen („Resonanzen“) gezählt. Als ein Beispiel soll der folgende Dialog zitiert werden.

Der Lehrer (H) startet ihn mit einer Frage, die sich auf das Anfangsverhalten des Stromkreises bis zum Entstehen eines stationären Zustandes bezieht. Mit Bezug auf eine Tafelzeichnung (Bild 6) fragt er:⁵

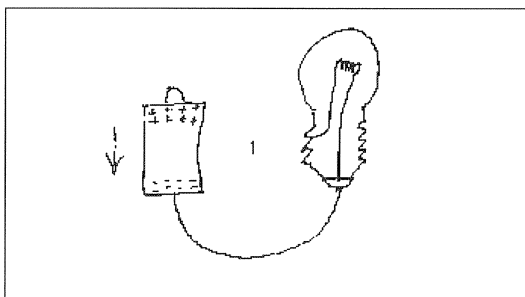


Bild 6: Tafelzeichnung

H: Was passiert im ersten Augenblick, nachdem wir diese Verbindung geschlossen haben?

C: Die Elektronen gehen hier hinauf (in die Lampe). H: ...

C: Und dann ... bleiben sie stehen. H: ...C:...

G: Weil da kein Platz mehr ist, wo sie sich hinbewegen können.

C: Genau. Weil sie keinen Platz haben, sich zu bewegen.

G: Weil sie sich eigentlich weiterbewegen wollen, halt nur so sich weiterbewegen.

C: Die Lampe wird ... hm, negativ geladen, und deswegen wird nichts weiter passieren. ... also wird es auch nicht leuchten.

Der Lehrer setzt den Gedanken fort und fragt, was kurz nach dem Schließen der zweiten Verbindung passieren wird.

G: Nun haben sie Platz, sich zu bewegen. Und gehen rundherum. Und dadurch, deswegen wird es leuchten.

H: Und warum bewegen sie sich?

(Pause von 6 Sekunden!)

G: (sehr leise) Weil da wahrscheinlich zu viele Elektronen in der Batterie sind.

Zu Beginn des folgenden Dialogteils erklärt der Lehrer noch einmal seine Vorstellung von negativer Überschussladung und abstoßenden Kräften am Minuspol der Batterie. Die Studentinnen starten einen sehr spontanen Dialog, indem sie davon sprechen, daß „Elektronen beim Minuspol hinausgestoßen“ und zum Pluspol „wieder hingezogen werden“, „das Ganze geht dann immer so weiter“, „die Batterie stößt die Elektronen mit ihrer chemischen Energie wieder von plus nach minus“, sie sprechen schließlich davon, daß das Ganze nun „wie eine Maschine funktioniert“. Abschließend drücken sie ihre Befriedigung über das erreichte tiefere Verständnis aus.

3.6 Kognitiver Zustand 3

Zweite Zwischenvorstellung „Elektronenstrom“:

Protonen sind in Ruhe; Elektronen bewegen sich in einer kreisförmigen Bewegung, von der Batterie hin zum Lämpchen in dem einen Draht und zurück in dem anderen (unterschiedliche Richtungen). Die Bewegung der Elektronen bewirkt ein Schwingen der Atome im Glühfaden und erzeugt dadurch Wärme und Licht. Die Bewegung wird durch Elektronenüberschuß sowie durch abstoßende und anziehende Kräfte von der Batterie angetrieben.

Eine Erhaltung der Zahl der Elektronen wird von den Studentinnen formuliert, aber nicht in jedem Kontext als konsistente Regel beachtet. Elektronen haben manchmal in einem neuen Kontext die Bedeutung eines „Treibstoffs“, der verbraucht wird. Stromstärke wird nicht konsistent mit Geschwindigkeit der Elektronen in Verbindung gebracht.

⁵ C, G und L sind die Kürzel der drei Studentinnen.

Die Stabilität dieser am Ende der ersten Sitzung entwickelten Zwischenvorstellung wird in der zweiten Sitzung an vielen Stellen deutlich. Zu Beginn fragt der Lehrer, ob die Studentinnen sich an ein Bild an der Tafel erinnern. Darauf antwortet eine Studentin:

G: Die Elektronen bewegen sich hier (aus der Batterie) hinaus und dort hinein (Lämpchen). Wenn sie dann hierhin kommen (Fußpunkt des Lämpchens), gehen sie da hinauf (zu dem Glühdraht) und produzieren, hm, Energie. Und ... Energie bewegt sie auch und bringt sie zum Leuchten. Dann fließen sie hierhin zurück (Plus der Batterie), weil – oh, wie war das noch, weil sie von hier (minus) abgestoßen und von hier (plus) angezogen werden.

Die Elektronenvorstellung kommt in dieser Sitzung noch sehr häufig von den Studentinnen, obwohl der Lehrer das Gewicht seiner Unterrichtsführung jetzt ganz auf Druck und Druckdifferenz richtet. Dieses starre Festhalten des Lehrers an dem geplanten, auf der Druckanalogie und der vorbereiteten Computerrepräsentation beruhenden Unterrichtskonzept betrachten wir aus der Sicht der hier vorgelegten Lernprozessanalysen als Fehler.

3.7 Lernprozeß 3-4: Einführung des Elektronendrucks

Der Schwerpunkt der Intentionen des Lehrers lag darauf, ein qualitatives Verständnis von Antrieb (Druckdifferenz), Stromstärke und Widerstand zu erreichen. Der kognitive Prozeß führte aber nur zu einer begrenzten Annäherung an dieses Ziel.

Der Lernprozeß war in die folgenden Unterrichtsaktivitäten eingebettet:

- Offenes Lehrer-Schüler-Gespräch zur Einführung der Begriffe Druck und Druckdifferenz.
- Gespräch über Strom und Druck in erweiterten einfachen Stromkreisen.
- Spontane Diskussion und Zeichnung über den Verlauf des Drucks entlang eines einfachen Stromkreises mit einer Batterie und einem Lämpchen (Bild 7).

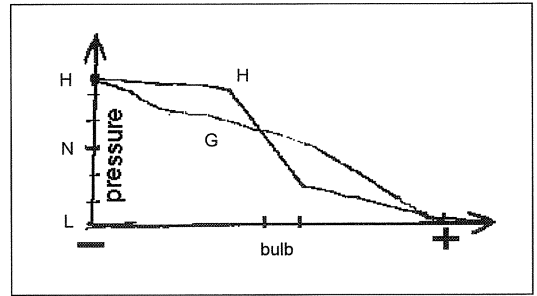


Bild 7: Zeichnung einer Studentin (G) und „feedback“ des Lehrers (H)

- Gespräch über einen Text zum Thema Batterie und Druckdifferenz.
- Arbeitsbogen zum Druck mit vorgegebenen Schaltungen (einfacher Stromkreis mit und ohne Schalter).
- Spontane Diskussion und Zeichnung über den Verlauf des Drucks entlang eines Stromkreises mit zwei Lämpchen in Reihe.
- Erste Druckmodelle auf dem Computer.

Bild 8 zeigt das erste von den Studentinnen auf dem Bildschirm mit der Maus gezeichnete Computer-Druck-Modell und das vom Computer gegebene Feedback. Generell hat sich diese Software in dem Sinne bewährt, daß das Zeichnen der Computer-Druck-Modelle Anlaß zu guten Gesprächen über das physikalische Problem bot.

Der Lehrer verwendete in diesen Unterrichtsabschnitten folgende Ideen:

- Druck und Bewegung: Wenn ein Lämpchen nur mit einer Verbindung an die Batterie angeschlossen wird, so bewegen sich im ersten Moment die Elektronen von der Batterie zum Lämpchen. Dadurch entsteht im Lämpchen ein Gegendruck, der die Elektronen zum Stillstand bringt. Die Druckdifferenz ist dann null, es findet keine Bewegung statt, die Stromstärke ist ebenfalls null.
- Druckdifferenz und Widerstand: Da das Lämpchen einen großen Widerstand darstellt, braucht der Strom hier eine größere Druckdifferenz für die Bewegung. Eine größere Druckdifferenz bewirkt einen schnelleren Strom und damit eine größere Stromstärke. Eine Batterie ist dazu da, eine konstante Druckdifferenz an

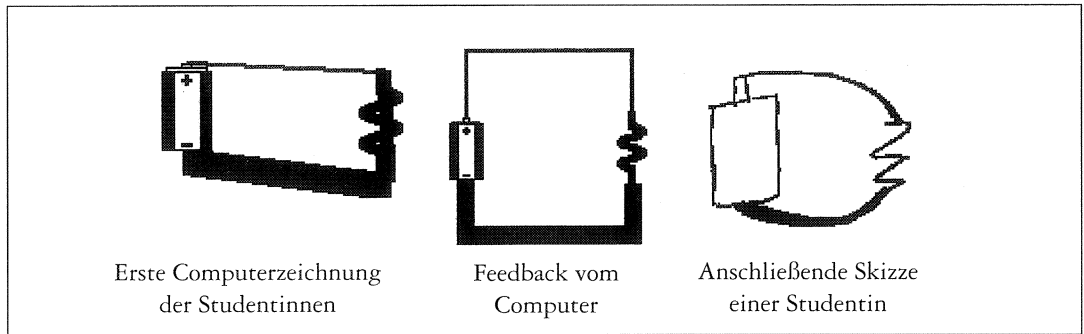


Bild 8: Druckmodelle zum einfachen Stromkreis

ihren Enden aufrechtzuerhalten. Der Druck in einem Leiterstück ist überall gleich.

Die Studentinnen verwendeten in den Dialogen folgende kognitive Werkzeuge:

- Viele Elektronen bedeuten einen großen Druck.
- Druck kann sich aufbauen, Druck kann entweichen.
- Wenn der Druck nicht entweichen kann, dann findet auch keine Bewegung statt.
- Negativ bedeutet großen Druck, positiv bedeutet niedrigen Druck. (Die Anziehungskraft von der positiven Seite ist für die Studentinnen sehr wichtig, findet aber in ihrer Drucksprache keine angemessene Entsprechung.)
- Eingeschränkte Bedeutung von Druckdifferenz: Am negativen Ende der Batterie haben wir einen größeren Druck als am positiven Ende.
- Wenn kein Druck vorhanden ist, dann findet auch keine Bewegung statt (auch hier ist nicht von Druckdifferenz die Rede).
- Der Druck fällt entlang des Stromkreises. Druck kann entlang des Stromkreises oder in einem Lämpchen verbraucht werden. Der Druck kann auch auf verschiedene Lämpchen verteilt werden (vgl. das Schema „Verteilen“ bei Voss, 1991, 289).
- Der Strom braucht genügend Druck, um ein weiteres Lämpchen zum Leuchten zu bringen.

Die folgenden Ideen wurden von den Studentinnen nicht aufgenommen:

- Ein Gleichgewicht von Druck und Gegendruck bedeutet eine Druckdifferenz von null und bewirkt, daß sich die Elektronen nicht mehr bewegen und daß die Stromstärke null ist.
- Der Druck wirkt in allen Richtungen. (Bei den Studentinnen gibt es nur Druck in Richtung des Stromes).
- Keine grundlegende Trennung von Antrieb (als Druckdifferenz), Widerstand und resultierender Bewegung (vgl. Härtel, 1981, 11; di Sessa, 1983, 23).

Diese Schwierigkeiten der Studentinnen mit den Begriffen Druck, Druckgleichgewicht und Druckdifferenz werden durch zahlreiche Untersuchungen über Schülervorstellungen von Druck bei Gasen und Flüssigkeiten bestätigt.

Engel Clough und Driver fanden zum Beispiel, daß Schüler eine geringe Tendenz haben, den Druck in Luft oder Wasser in alle Richtungen wirken zu sehen. Ferner fanden wenige Schüler Erklärungen mit Hilfe von Druckgleichgewichten (Driver, Squires, Rushworth & Wood-Robinson, 1994, 152).

3.8 Kognitiver Zustand 4

Dritte Zwischenvorstellung „Strom mit Elektronen-Druck“:

Elektronen bewegen sich von hohem Druck zu niedrigem Druck. Am negativen Pol der Batterie herrscht hoher Druck, in oder nach dem Lämpchen haben wir Normaldruck und am positiven Ende der Batterie herrscht niedriger Druck. Druck kann aufgebaut werden oder entweichen.

Die Studentinnen unterscheiden, wie erwähnt, kaum zwischen Druck und Druckdifferenz. Wahrscheinlich hat für sie Druck schon selbst einen Teil der Bedeutung, die für uns Druckdifferenz hat. Druck als Ergebnis von Elektronenüberschuß scheint eine geläufige Vorstellung zu sein. Eine der wenigen, von den Studentinnen eigenständig benutzten intuitiven Denkweisen (kognitiven Werkzeugen) im Zusammenhang mit Druck ist die Verwendung von Vorstellungen, nach denen sich Druck in bestimmten Situationen aufbauen kann und in anderen Situationen - zum Beispiel an einem offenen Drahtende - entweichen und damit wirkungslos werden kann.

4. Zusammenfassung der Ergebnisse

1. Die drei College-Studentinnen im Alter von etwa 22 Jahren beginnen mit dem aus der Literatur wohlbekannten „Alltags-Strom-Konzept“.

2. In einem ersten Lernprozeß entwickeln sie beim Experimentieren mit Batterie und Lämpchen und anschließenden schriftlichen und mündlichen Äußerungen eine vom Lehrer nicht beabsichtigte und während des Unterrichts nicht erkannte Zwischenvorstellung „positiver und negativer Strom“, mit der sie zu ihrer eigenen großen Befriedigung alle bisherigen Erfahrungen verstehen können.

3. Ein weiterer nicht beabsichtigter Lerneffekt entsteht dadurch, daß der Lehrer zur Einführung der Vorstellung vom Elektronendruck zunächst über Elektronen und ihre Bewegung spricht. Diese Vorstellung findet bei den Studentinnen große Resonanz und erlaubt es ihnen, mit vertrauten Schemata und sprachlichen Denkfiguren an dieser Vorstellung durch eigene Beiträge im offenen Lehrer-Schüler-Gespräch selbständig weiterzuarbeiten und sie als eine metastabile Zwischenvorstellung zu entwickeln.

4. Die eigentliche Vorstellung von Druck und Druckdifferenz als Antrieb des Elektronenstromes, repräsentiert auch in entsprechenden Computermodellen, findet demgegenüber nicht die erhoffte Resonanz. Insbesondere bereitet den Studentinnen die Vorstellung vom Gleichgewicht von Druck und

Gegendruck und von der zentralen Bedeutung der Druckdifferenz Schwierigkeiten.

5. Abschließende Bemerkungen zur Untersuchung von Lernprozessen

Die vorliegende Studie hatte explorativen Charakter. Sie diente insbesondere der Entwicklung eines theoretischen Rahmens für die empirische Analyse von Lernprozessen im Physikunterricht und der Überprüfung seiner Tauglichkeit zur Interpretation qualitativer Daten aus einem Lernprozeß. Einer der anfänglichen Zweifel an diesem Ansatz war die Frage, ob es in einem laufenden Unterricht überhaupt gelingen kann, die Entwicklung metastabiler kognitiver Elemente und ihrer partiellen Stabilität nachzuweisen. Die vorliegende Lernstudie hat unserer Ansicht nach klar gezeigt, daß dies möglich ist.

Qualitativ-interpretative Analysen von Videomitschnitten und deren Transkripten ist eine im Institut für Didaktik der Physik der Universität Bremen seit vielen Jahren entwickelte Arbeitsweise. Im vorliegenden Fall konnte die Interpretation auf die Ergebnisse von zahlreichen Vorstellungsuntersuchungen und einigen Lernprozeßstudien zum elektrischen Stromkreis aufbauen. Es hat sich gezeigt, daß dies für den Interpretationsprozeß von unschätzbarem Wert ist.

Der hier vorgestellte Interpretationsstand resultiert aus mehrfachen Interpretationsdurchgängen über vier Jahre. In diesem Prozeß entwickelte Interpretationen haben sich dadurch als fruchtbar erwiesen, daß sie – einmal gefunden – einen großen Teil des Transkriptes befriedigend erklären. In diesem Sinne war das Auffinden und der Nachweis der vom Lehrer nicht intendierten, von den Studentinnen als Selbstentwicklung ihres kognitiven Systems gebildeten zweiten und dritten Zwischenvorstellung (Bild 3) ein wichtiges Ergebnis. Dadurch war es möglich, tatsächlich abgelaufene kognitive Veränderungsprozesse zu beschreiben und ihre Ursachen, die im laufenden Unterricht und in den kognitiven Voraussetzungen der Schüler liegen, zu analysieren. Der Interpretationsprozeß hat

bezüglich des dargestellten Lernpfades zu einer hohen Konsistenz und Sicherheit, insbesondere in der Analyse der ersten beiden Sitzungen, geführt. Etwa drei Viertel aller studentischen Äußerungen können mit einer der hier formulierten (Zwischen-) Vorstellungen erklärt werden. In der vorliegende Darstellung konnten, aus Platzgründen, nur wenige derartige Belege demonstriert werden.

Zur Validierung von Ergebnissen dieser Art qualitativ-interpretativer Analysen gehen wir davon aus, daß wir letztlich Lehrer mit unseren Ergebnissen erreichen und ihnen einsichtige und hilfreiche Erklärungen liefern wollen. Die Validierung folgt dieser Intention: zunächst haben wir in Lehrveranstaltungen Studenten die Ergebnisse unserer Interpretation mitgeteilt und erläutert. Danach analysierten sie selbst die betreffenden Video- und Transkript-Daten. Es zeigte sich, daß unsere Interpretationen für sie einen hohen Erklärungswert hatten.

Traditionelle Untersuchungen über Lernen beruhen meistens auf dem Vergleich von Daten, die vor und nach dem Unterricht erhoben wurden. Vergleicht man diese Untersuchungen mit unserer Lernprozeßanalyse, so fallen zwei Unterschiede besonders ins Auge:

– Es gelingt mit dieser Methode, auch nicht beabsichtigte Lernprozesse zu identifizieren. Die Entwicklung der nichtbeabsichtigten kognitiven Zustände während des hier analysierten Unterrichts als Ergebnis der Selbstentwicklung des kognitiven Systems der Schüler (v. Aufschnaiter, 1991) wäre z.B. mit einem Nachtest wohl nicht entdeckt worden.

– Die Wirkungen von Unterricht können wesentlich kleinschrittiger analysiert werden. Das verspricht bessere und genauere Aufschlüsse darüber, wie Lernen als Selbstentwicklung des kognitiven Systems der Schüler besser gefördert werden kann.

Literatur

- v. Aufschnaiter, S. (1991). Lernen ist Selbstentwicklung eines kognitiven Systems. In H. Wiesner (Hrsg.), Aufsätze zur Didaktik der Physik II. Bad Salzdetfurth: Franzbecker, 1-11.
- Bethge, T. (1988). Aspekte des Schülervorverständnisses zu grundlegenden Begriffen der Atomphysik. Dissertation Universität Bremen.
- Brown, D. & Clement, J. (1992). Classroom teaching experiments in mechanics. In R. Duit, F. Goldberg & H. Niedderer, a.a.O., 380-397.
- Carmichael, P., Driver, R., Holding, B., Phillips, I., Twigger, D. & Watts, M. (1990). Research on students' conceptions in science: A bibliography. CLIS Group, University of Leeds.
- diSessa, A. A. (1983). Phenomenology and the evolution of intuition. In D. Gentner & A.L. Stevens (Eds), Mental models. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 15-33.
- Driver, R., Squires, A., Rushworth, P. & Wood-Robinson, V. (1994). Making sense of secondary science - Research into children's ideas. London: Routledge.
- Duit, R., Goldberg, F. & Niedderer, H. (Eds.) (1992). Research in physics learning – Theoretical issues and empirical studies. Proceedings of an International Workshop in Bremen. IPN: Kiel.
- Duit, R. (1994). Conceptual change approaches in science education. Paper presented at the „Symposium on Conceptual Change“, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 1.-3.9.1994.
- Dykstra, D. (1992). Studying conceptual change: Constructing new understanding. In R. Duit, F. Goldberg & H. Niedderer, a.a.O., 40-58.
- Fischer, H. E. (1989). Lernprozesse im Physikunterricht. Falluntersuchungen im Unterricht zur Elektrostatik aus konstruktivistischer Sicht. Dissertation Universität Bremen.
- Fischer, H. E. (1994). Physiklernen: Eine Herausforderung für Unterrichtsforschung - Arbeiten zur Lernprozeßforschung im Physikunterricht. Frankfurt/Main: Lang.
- Fischer, H. E. & v. Aufschnaiter, S. (1992). The increase of complexity as an order generating principle of learning processes. Case study during physics instruction. In R. Duit, F. Goldberg & H. Niedderer, a.a.O., 225-239.
- Galili, I., Bendall, S. & Goldberg, F. (1993). The effects of prior knowledge and instruction on understanding image formation. Journal of Research in Science Teaching 30, 271-301.
- v. Glasersfeld, E. (1992). A constructivist's view of learning and teaching. In R. Duit, F. Goldberg & H. Niedderer, a.a.O., 29-39.
- Goldberg, F., Pundak, D., Niedderer, H., Bendall, S. & Bach, G. (1994). Electric circuits. San Diego State University, Center for Research in Mathematics and Science Education.

- Härtel, H. (1981). Stromstärke, Spannung, Widerstand. IPN-Curriculum Physik für das 7. und 8. Schuljahr. Stuttgart: Klett.
- Hewson, P. & Hewson, M. (1992). The status of students' conceptions. In R. Duit, F. Goldberg & H. Niedderer, a.a.O., 59-73.
- Jung, W. (1993). Hilft die Entwicklungspsychologie dem Physikdidaktiker? In R. Duit & W. Gräber (Hrsg.), Kognitive Entwicklung und Lernen der Naturwissenschaften. Kiel: Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften, 86-108.
- Lijnse, P. L. (1994). Trends in European research in science education? Paper presented at the Second European Summerschool, Thessaloniki.
- Meyling, H. (1990). Wissenschaftstheorie im Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe. Dissertation Universität Bremen.
- Niedderer, H. (1982). Probleme der Lebenswelt, Vorverständnis der Schüler und Wissenschaftstheorie der Physik als Determinanten für den Physikunterricht. In H. Fischler (Hrsg.), Lehren und Lernen im Physikunterricht. Köln: Aulis, 105-132.
- Niedderer, H. & Goldberg, F. (1992). A study of thinking and learning in electric circuits. Paper presented at the annual meeting of NARST. Boston, USA.
- Niedderer, H. & Goldberg, F. (1993). Qualitative interpretation of a learning process in electric circuits. Paper presented at the annual meeting of NARST. Atlanta, USA.
- Niedderer, H. & Goldberg, F. (1994). An individual student's learning process in electric circuits. Paper presented at the annual meeting of NARST. Anaheim, USA.
- Niedderer, H. & Goldberg, F. (1995). Learning pathway and knowledge construction in electric circuits. Paper presented at the European Conference on Research in Science Education. University of Leeds, 7th - 11th April.
- Niedderer, H. & Schecker, H. (1992). Towards an explicit description of cognitive systems for research in physics learning. In R. Duit, F. Goldberg & H. Niedderer, a.a.O., 74-98
- Petri, J. & Niedderer, H. (1994). Learning pathways in atomic physics. Paper presented at the Second European Summerschool, Thessaloniki.
- Pfundt, H. & Duit, R. (1994). Bibliographie Alltagsvorstellungen und naturwissenschaftlicher Unterricht, 4. Auflage. Kiel: IPN.
- Schecker, H. (1985). Das Schülervorverständnis zur Mechanik. Dissertation Universität Bremen.
- Schmidt, D. (1989). Zum Konzeptwechsel: Eine Untersuchung über den Konzeptwechsel am elektrischen Stromkreis. Frankfurt/Main: Lang
- Schwedes, H. & Schmidt, D. (1992). Conceptual change: A case study and theoretical comments. In R. Duit, F. Goldberg & H. Niedderer, a.a.O., 188-202.
- Scott, P. H. (1992). Conceptual pathways in learning science: A case study of the development of one student's ideas relating to the structure of matter. In R. Duit, F. Goldberg & H. Niedderer, a.a.O., 203-224.
- Solomon, J. (1985). The pupils view of electricity. European Journal of Science Education 7, 281-294.
- Voss, H. P. (1991). Fehlvorstellungen und der Gebrauch genereller Schemata in der elementaren Elektrizitätslehre. In H. Wiesner (Hrsg.), Aufsätze zur Didaktik der Physik II. Bad Salzdetfurth: Franzbecker, 274 - 290.
- Welzel, M. (1995). Interaktionen und Physiklernen. Frankfurt/Main: Lang.

Dr. Hans Niedderer ist Professor für Didaktik der Physik an der Universität Bremen. Dr. Fred Goldberg ist Professor for Science Education am Centre for Research in Mathematics and Science Education der San Diego State University, USA

Prof. Dr. Hans Niedderer
Institut für Didaktik der Physik
Universität Bremen
Postfach 330440
28334 Bremen