

Hans Niedderer

Überblick über Lernstudien in Physik

Zusammenfassung

Untersuchungen über die Veränderung von Schülervorstellungen im laufenden Physikunterricht erscheinen als logische und notwendige Weiterentwicklung der weltweit erfolgreich betriebenen Forschung über Schülervorstellungen vor dem Unterricht. Der vorliegende Beitrag versucht eine Bestandsaufnahme dieser Forschungsrichtung, indem theoretische Positionen, exemplarische inhaltliche Ergebnisse und allgemeine Hypothesen zusammengetragen werden. Basis ist eine *explizite*, fachdidaktisch orientierte kognitive Beschreibung von Lernen mit Ergebnissen über kognitive Zustände und kognitive Prozesse. Wichtige Aspekte betreffen den Nachweis von "Zwischenzuständen", wesentlich beeinflusst durch die Selbstentwicklung des kognitiven Systems der Schüler, eine veränderte Sichtweise des kognitiven Zustandes von Schülern am Ende eines Lernprozesses und die Differenzierung von "conceptual change" in Richtung auf Lernen als Bildung neuer kognitiver Strukturen einerseits und Lernen als Veränderung der Eigenschaften von bereits vorhandenen oder neu gebildeten kognitiven Strukturen andererseits.

Abstract

Investigations about changes of conceptions during physics instruction are the logical and necessary next step to follow the successful international research on students' pre-instructional conceptions. The present paper reviews theoretical issues, selected content specific results and general hypotheses. This is oriented towards *explicit* cognitive descriptions related to contents of physics, coming to cognitive states and cognitive processes. Some evidence is given for "intermediate conceptions", mainly as a result of self development of the cognitive system of students. Further aspects are a different view on the final state of the cognitive system after teaching and a differentiation of "conceptual change" towards learning as formation of new additional cognitive structures vs learning as change of qualities of structures being already there.

In: Duit, R., v.Rhöneck, C. "Lernen in den Naturwissenschaften", Kiel: IPN 1996, S.119-144

1 Warum fachdidaktische Lernprozeßforschung

Das folgende Papier versucht eine Analyse empirischer Lernstudien im Physikunterricht. Von besonderem Interesse sind für mich empirische Arbeiten, die Lernprozesse im realen Unterricht *kontinuierlich* verfolgen und versuchen, die Ergebnisse mit Blick auf Veränderung kognitiver Strukturen zu analysieren. Ergänzend habe ich solche Arbeiten hinzugezogen, in denen der erreichte kognitive Endzustand nach einem Lernprozeß differenziert beschrieben wird.

Nachdem sich eine zunehmende Anzahl von Forschern in der Fachdidaktik der Physik einem konstruktiven Paradigma zuwendet, erscheinen solche Lernprozeßstudien ein vordringliches Ziel zu sein. Wenn man mit von Aufschnaiter (1991) Lernen als Selbstentwicklung eines kognitiven Systems betrachtet, erscheinen Lernprozeßanalysen mit kognitiver Absicht eine zwingende Notwendigkeit. Neben einer sachlogische Orientierung des Lernangebots (Lehrer, Medien, Texte etc.) muß die Analyse der Wirkungen von Unterrichtsumgebungen (insbesondere von Schüleraktivitäten) auf den momentanen Lernprozeß der Schüler im Vordergrund des Interesses stehen. Dabei erscheint eine für fachdidaktische Zwecke geeignete Modellierung des kognitiven Systems der Schüler unausweichlich, um den Lernprozeß der Schüler klar von dem vom Lehrer intendierten Prozeß unterscheiden zu können. Besonders interessante Ergebnisse solcher Lernforschung sind demgemäß der Nachweis von Lernprozessen bei Schülern, die so nicht vom Lehrer intendiert waren (vgl. z.B. Niedderer & Goldberg, 1995).

Ein weiterer Gesichtspunkt spricht für eine fachdidaktische Forschungsrichtung "Lernprozeßanalyse". Die über Jahrzehnte erfolgreichste Forschungsrichtung in der Fachdidaktik war und ist die Untersuchung von Schülervorstellungen (students' conceptions), ausgewiesen durch weltweite Tagungen und Bibliographien (Pfundt & Duit, 1994; Carmichael et al., 1990). Aus kognitiver Sicht stellen die Forschungsergebnisse dieser Arbeitsrichtung Beschreibungen von kognitiven Zuständen, meistens vor dem Unterricht, gelegentlich nach dem Unterricht, dar. Um aber gezielter Lernwirkungen von Curricula, Medien, bestimmten Unterrichtsformen und Lehrerverhalten erfassen zu können, müssen zeitliche Veränderungen solcher kognitiver Zustände im Unterricht und die mit ihnen zusammenhängenden Prozesse untersucht werden. Auch für Lehrer sind vermutlich geeignete kognitive Modelle für ein besseres Verständnis ihres eigenen Tuns wichtig. V. Glasersfeld (1992) schreibt dazu: "... in order to teach one must construct models of those "others" who happen to be the students." Eine Weiterentwicklung der Forschungsrichtung "Schülervorstellungen" in Richtung auf Beschreibung von zeitlichen Veränderungsprozessen dieser Schülervorstellungen erscheint uns also das Gebot der Stunde. Diesem Ziel war auch ein internationaler

Workshop gewidmet, der 1991 in Bremen stattfand (vgl. Duit, Goldberg & Niedderer, 1992).

In Bremen arbeiten derzeit drei Arbeitsgruppen (v. Aufschnaiter, Niedderer und Schwedes) an Lernprozeßstudien im Physikunterricht. Allen gemeinsam ist die Konzentration auf Studien *während* des Unterrichts, mit qualitative Einzelfallstudien an einzelnen Schülern und Studenten und in realen Unterrichtskontexten. Die Gruppen arbeiten jedoch mit teilweise verschiedenen theoretischen Rahmen. In der Gruppe von Aufschnaiter wird Lernen vorwiegend als Komplexitätsentwicklung unter eher strukturellen Aspekten analysiert und beschrieben. In der Gruppe Niedderer wird die inhaltliche Veränderung von kognitiven Elementen wie Denkraumen, Vorstellungen, Schemata u.a. zur Beschreibung von Lernen verwendet. In der Gruppe Schwedes bilden Weiterentwicklungen des "conceptual change"-Ansatzes zusammen mit Analogien die wichtigste theoretische Basis.

2 Anmerkungen zum in fachdidaktischen Untersuchungen benutzten theoretische Rahmen

2.1 Fachdidaktische Beschreibung des kognitiven Systems

Fachdidaktische Beschreibungen von inhaltsbezogenen Teilen des kognitiven Systems sind aus meiner Sicht vor allem in zwei Formen erfolgt:

- *Propositionale Beschreibung ("propositional knowledge")*. Hierbei werden Begriffe ausgewählt und Aussagen mit diesen Begriffen formuliert, die dem Schüler als "Minitheorien" unterstellt werden können und damit sein Verhalten in Äußerungen und Handlungen erklären würden. Zu diesem Bereich gehören (Schüler-)Vorstellungen und mentale Modelle.
- *Beschreibung in Begriffsnetzen (concept maps, conceptual maps)*. Hierbei werden grafisch die wichtigsten Begriffe mit den wichtigsten Relationen dargestellt, die wiederum dem Schüler als verhaltensgenerierende Struktur unterstellt werden.

Die Darstellung von kognitiven Strukturen in Form von "Vorstellungen", "Präkonzepten", "conceptual structure" oder "conceptions" und ihrer Zusammenhänge scheint für die Fachdidaktik wichtig, vielleicht sogar unentbehrlich zu sein. Sie wirft allerdings das folgende Problem auf: Verstellen wir uns mit der Annahme der Repräsentation solcher inhaltspezifischer kognitiver Strukturen vielleicht den Blick auf allgemeinere Produktionssysteme im kognitiven System, welche die beobachteten Konstruktionen und Lernprozessen leichter und allgemeiner erklären? Solche

Produktionssysteme dürften nach unserer¹ Einschätzung noch große, bisher im Bereich von Schemata nur ansatzweise erschlossene Erklärungspotentiale besitzen. Für fachdidaktische Untersuchungen scheint mir allerdings bis zum gelungenen Nachweis solcher allgemeinerer Produktionssysteme der folgende Standpunkt weiterhin besonders fruchtbar sein: Wir behandeln inhaltliche Beschreibungen kognitiver Systeme (z.B. als "Vorstellungen") so, *als ob* sie im Gehirn gespeichert *wären* (Wissensrepräsentation), sind uns aber darüber im klaren, daß dies nur eine bequeme Art der Darstellung ist, die künftig durch die Beschreibung allgemeinerer Produktionssysteme oder "generativer Strukturen" des kognitiven Systems mit deklarativen und prozeduralen Anteilen zu ersetzen sein wird². Damit sind Vorstellungen inhaltliche Charakterisierungen von besonders häufigen oder wahrscheinlichen aktuellen Konstruktionen von Schülern.

2.2 Grundbegriffe "Lernen" und "Lernprozeß"

Aus den Arbeiten insbesondere der Bremer Arbeitsgruppen in den letzten Jahren ergibt sich die Notwendigkeit, Lernprozesse auf verschiedenen Ebenen zu beschreiben: als aktuelle Konstruktionsprozesse der Schüler im laufenden Unterricht, die langfristig zu Lernen führen können, aber nicht müssen; als "Lernwege" mit quasi stabilen kognitiven Zwischenzuständen im Lernprozeß, als Veränderung von Eigenschaften dieser kognitiven Strukturen und schließlich als die effektiven kognitiven Konstruktionsprozesse, die den Übergang von einem kognitiven Zustand zum anderen bewirken. Diese Bedeutungen werden im folgenden Diagramm einander gegenübergestellt:

Die Unterscheidung von aktuellen Konstruktionen und längerfristig stabilen kognitiven Elementen wird auch in dem von Niedderer & Schecker vorgeschlagenen Modell einer fachdidaktischen Beschreibung des kognitiven Systems betont:

¹ Mit "uns" beziehe ich mich auf meine Konstruktion von Konsensen aus der Diskussion im Institut für Didaktik der Physik der Universität Bremen.

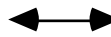
² Die in Niedderer&Goldberg (1995) angegebenen "kognitiven Werkzeuge zur Wissenskonstruktion" enthalten als wesentliche Elemente auch Schemata und andere sprachliche Grundelemente und dürften sehr nahe an solchen "Produktionssystemen" liegen.

1. Lern-Prozeß auf einer Zeitskala von Sekunden bis Minuten als aktueller kognitiver Prozeß ("Denken", "aktuelle Konstruktion"), der zu lernen führen KANN.

(Bedeutungskonstruktion, Erzeugung von "Ideen")

2. Lern-Prozeß auf einer Zeitskala von Viertelstunden bis Wochen, analysiert als

a. "stroboskopische" Wegbeschreibung der kognitiven Zustände ("Lernweg") .



"Kognitive Zustände" beschrieben durch "stabile Elemente des kognitiven Systems"

b. Veränderung der Eigenschaften schon gebildeter Strukturen, z.B. als Zunahme von Schnelligkeit, Sicherheit oder Komplexität angemessener (Bedeutungs-)Konstruktionen.

c. Entwicklungs- oder Konstruktionsprozeß INNERHALB des kognitiven Systems zur Erzeugung neuer kognitiver Zustände ("Selbstentwicklung des kognitiven Systems")

Abb. 1: Verschiedene Bedeutungen von "Lern-Prozeß"

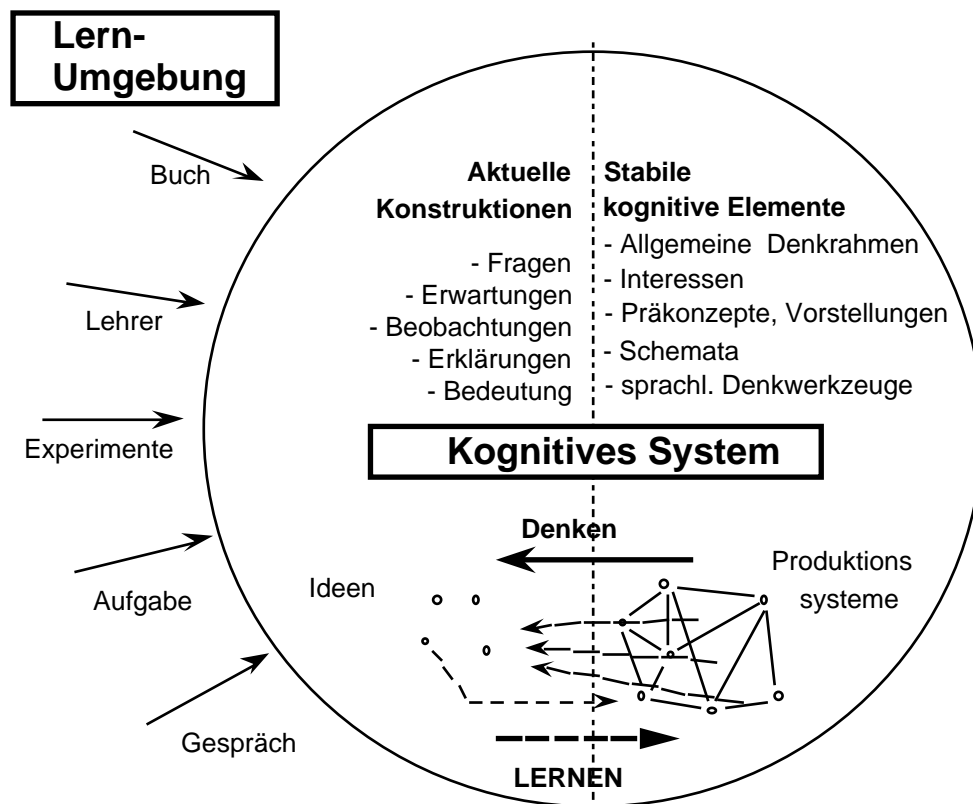


Abb. 2: Ein Modell des kognitiven Systems (Niederer & Schecker, 1992, 84)

Wie die unten dargestellten Ergebnisse verschiedener empirischer Studien aus dem Physikunterricht belegen, wird Lernen zum einen als Bildung neuer kognitiver Strukturen und zum anderen als Veränderungen bestimmter Eigenschaften dieser Strukturen beschrieben:

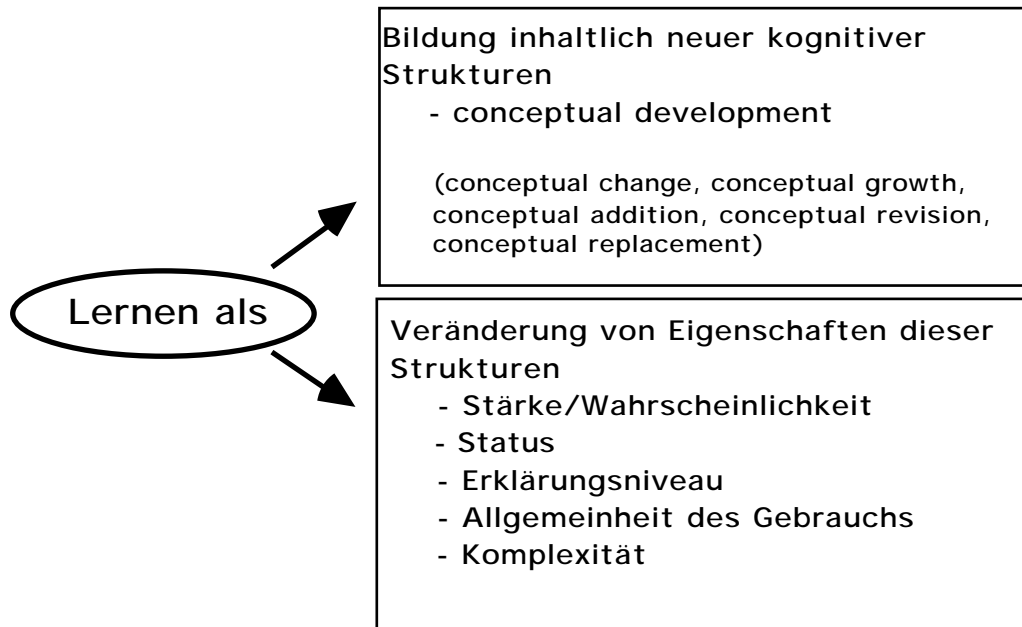


Abb. 3: Zwei Arten von Lernen

Im ersteren Falle gibt es seit langem empirische und theoretische Arbeiten unter dem Begriff Konzeptwechsel ("conceptual change"), wobei sich eine ursprünglich bestehenden Vorstellung des Ersetzens der falschen Vorstellungen durch richtige Vorstellungen allmählich aufgeweicht hat zu einer Überzeugung, daß der Lernprozeß in einer Entwicklung paralleler kognitiver (Teil-) Systeme (conceptual addition, conceptual growth, conceptual development) besteht. Auch zur zweiten Art von Lernen gibt es, wie unten dargestellt schon zahlreiche fachdidaktischen Forschungsergebnisse.

2.3 Inhaltliche Darstellung von Lernprozessen - ein Beispiel

In dem folgenden Beispiel wird ein Lernweg als Serie aufeinander folgender kognitiver Zustände beschrieben. Jeder Zustand wird durch eine conceptual map gekennzeichnet :

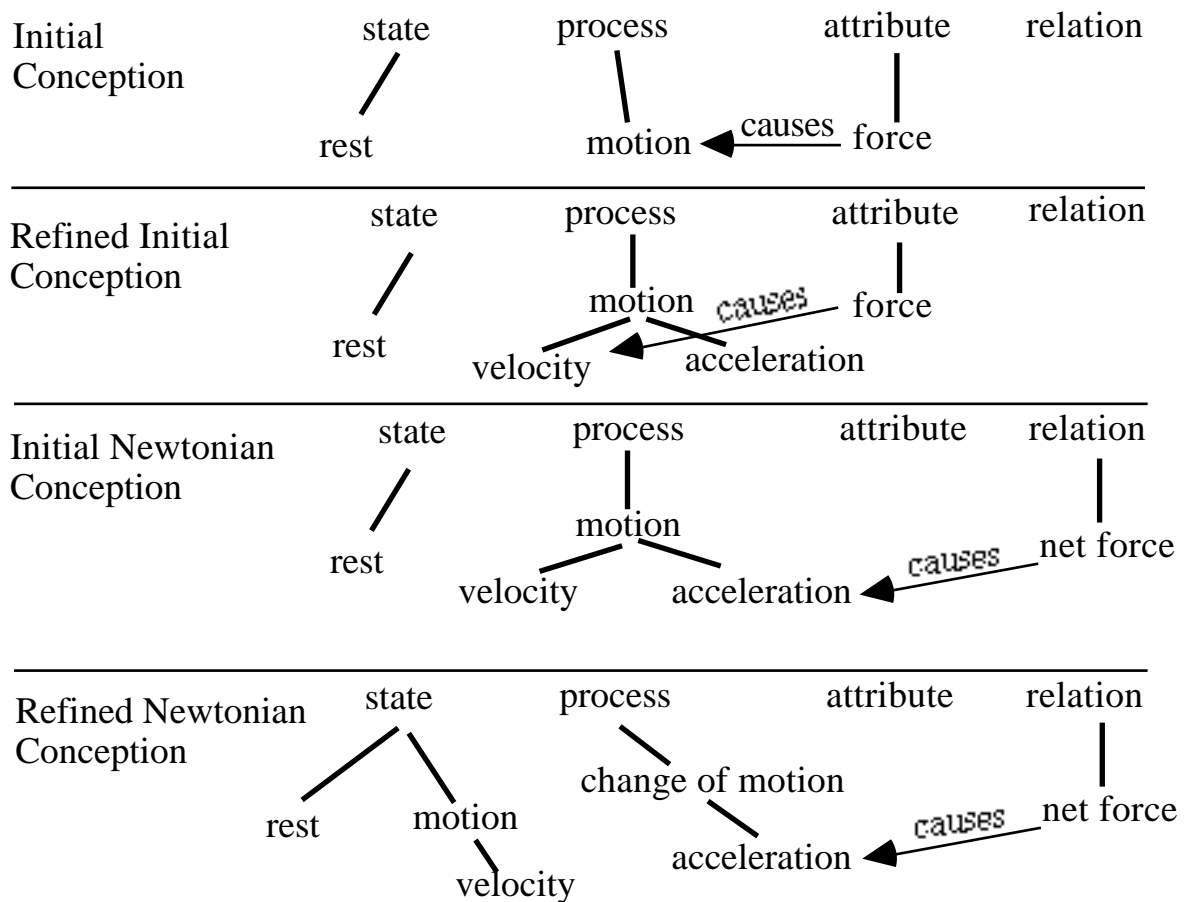


Abb. 4: A series of conceptual maps (Dykstra, Boyle & Monarch, 1992, S.627)

Die Darstellung enthält die Beschreibung von vier kognitiven Zuständen als "Initial Conception", "Refined Initial Conception", "Initial Newtonian Conception" und "Refined Newtonian Conception". Diese vier Zustände werden durch Schlüsselbegriffe und ihre Relationen (Pfeile) beschrieben, aus denen zum Teil veränderte Bedeutungen hervorgehen. Wenn zum Beispiel im ersten Zustand ein Pfeil "force causes motion" (Kraft bewirkt Bewegung) und im dritten sowie vierten Zustand ein Pfeil "net force causes acceleration" (die Summe der Kräfte bewirkt die Beschleunigung) enthalten ist, so bedeutet diese Veränderung auch eine Veränderung des Begriffs Kraft: im ersten Fall wird Kraft im wesentlichen als Ursache für alle Bewegungen gekennzeichnet, während im zweiten Fall die resultierende Kraft nur für die Erzeugung einer Beschleunigung relevant ist.

3. Empirisches Design der Studien

Kontinuierliche Datenerfassung während des Unterrichts

Wie bereits angemerkt, gilt mein Hauptinteresse solchen empirischen Studien, die eine kontinuierliche Datenerfassung während des Unterrichts als Hauptdatenquelle benutzen. Insgesamt sind mir 16 empirische Arbeiten dieser Art aus dem Physikunterricht bekanntgeworden (Scott, 1987; Brown, 1987; Brace, 1988; Fischer, 1989; Schmidt, 1989; Lichtfeldt, 1992; Roschelle, 1991; Lewis, 1991; Katu, 1992; Tytler, 1994; Welzel, 1994; Seibel, 1995; Komorek, 1995; Wodzinski, 1995; Niedderer & Goldberg, 1995; Petri, 1996). Die meisten dieser Arbeiten stellen Dissertationen dar. Sechs davon stammen aus den drei Arbeitsgruppen in Bremen. Hauptdatenquelle in diesen Arbeiten sind Audio- oder Videoaufnahmen des laufenden Unterrichts, die anschließend transkribiert werden. In der dann folgenden interpretativen Analyse unterscheiden sich die Bremer Arbeiten von allen anderen dadurch, daß sie sehr viel mehr im Detail die kognitiven Prozesse einzelner Schüler erfassen, analysieren und modellieren.

Erfassung von Zwischenzuständen durch Interviews

Interviews in gewissen Abständen während des Unterrichtsverlaufs stellen eine weitere wichtige Methode dar, die überwiegend ergänzend zu der kontinuierlichen Datenerfassung verwendet wird (Scott, 1987; Brown, 1987; Lewis, 1991; Hammer, 1991; Lichtfeldt 1992).

Kognitive Analyse des Endzustandes

In der Physikdidaktik gibt es zahlreiche Arbeiten, in denen der Lernerfolg des Unterrichts quantitativ durch Zugewinne zwischen Vor- und Nachtest beschrieben und mit anderen Unterrichtsmethoden verglichen wird. Manchmal wird dabei jedoch eine Art kognitive Analyse des erreichten Endzustandes versucht. Eine solche Analyse der empirischen Ergebnisse scheint mir ebenfalls wichtige Beiträge zur Beurteilung von Lernprozessen zu liefern. Beispielhaft für solche Untersuchungen wird hier nur die Studie von Galili, Bendall & Goldberg (1993) referiert.

4 Ergebnisse

4.1 Lernen als Bildung neuer kognitiver Strukturen

Beschreibung didaktisch relevanter kognitiver Strukturen

Ein wichtiges Teilergebnis aller hier zitierten Untersuchungen ist eine kognitiv orientierte Beschreibung didaktisch relevanter Wissensstrukturen. Soweit es sich um inhaltliche Beschreibungen dreht, können diese fast immer irgendwo zwischen vorunterrichtlichen Alltagsvorstellungen und wissenschaftlichen Vorstellungen als "Zwischenvorstellungen" (intermediate conceptions) eingeordnet werden. Physiklernen stellt sich damit wesentlich als ein Prozeß dar, in dem der Unterricht die Selbstentwicklung des kognitiven Systems anregt und zu kognitiven Zwischenzuständen führt. Diese Zwischenvorstellungen müssen als Entwicklungsschritte auf dem Weg zu einer wissenschaftlichen Sichtweise gesehen werden. Sie sind vielleicht ebenso sehr vom Zustand des kognitiven Systems vor dem Unterricht und den darin enthaltenen Entwicklungsmöglichkeiten als wie von der speziellen Konzeption des Unterrichts bestimmt .

Konzeptwechsel von einem Konzept zum anderen

Eine der ältesten mir bekannten fachdidaktischen Lernprozeßstudien (Schmidt, 1989; Schwedes & Schmidt, 1992) stellt gemäß der damals vorherrschenden Theorie vom conceptual change einen Konzeptwechsel von einem Anfangskonzept "Verbrauch" zu einem Endkonzept "Ohm" dar. Interessant an dieser Arbeit ist auch die Beschreibung eines kognitiven Zustandes als "Konzept " mit Hilfe eines "Nukleus" und spezifischer propositionaler Sätze bezogen auf verschiedene Einzelsituationen. Der Nukleus wird hier kognitiv als das Verhalten organisierende Strukturelement betrachtet, das in Wechselwirkung mit spezifischen Situationen weitere spezifische Sichtweisen produziert. Aus heutiger Sicht würde man den erreichten Endzustand vielleicht dadurch charakterisieren, daß in ihm sowohl das Anfangskonzept als auch das Endkonzept (und möglicherweise noch andere) mit verschiedenen Stärken und verschiedenem Status repräsentiert sind.

Schichten im kognitiven Endzustand

Den Aspekt des Nebeneinanderbestehens verschiedener kognitiver Strukturen in dem erreichten kognitiven Zustand nach dem Unterricht wird erstmals und besonders eindrücklich in der Arbeit von Scott (1987; 1992) beschrieben. Scott untersucht in seinen "pathways in learning science" eine Schülerin Sharon in einem Unterricht, der zu einer Teilchenvorstellung von Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen führen soll.

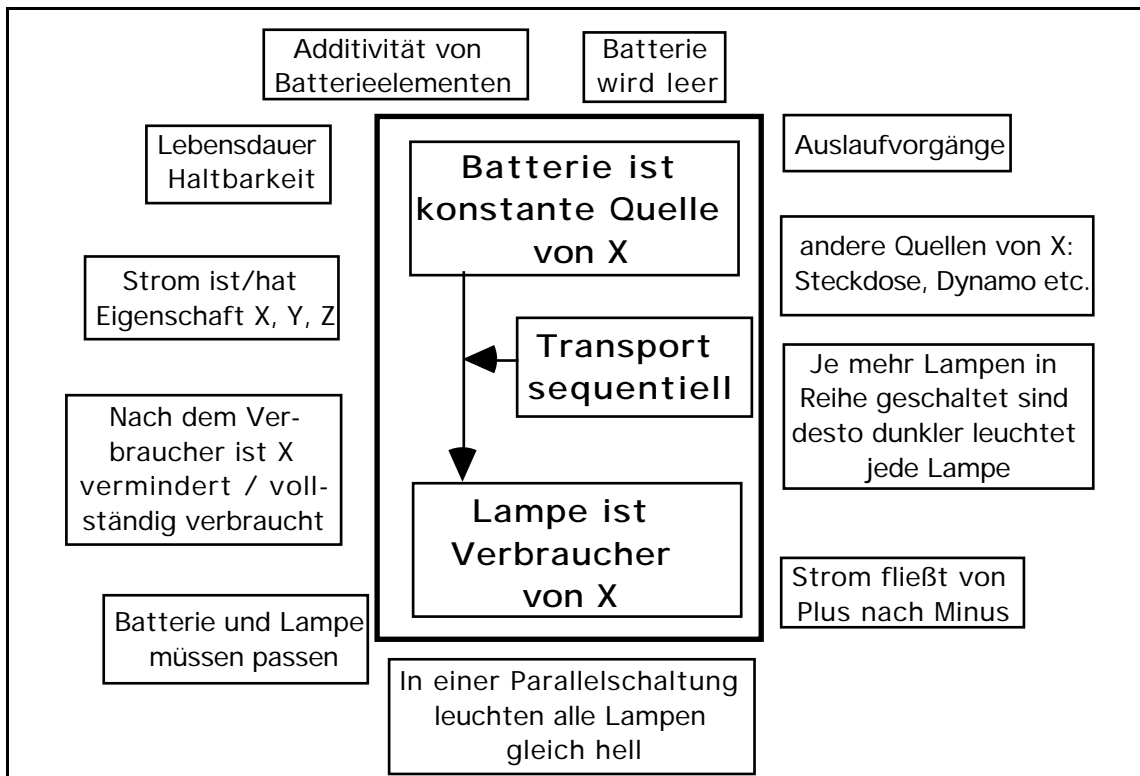


Abb. 5: Anfangskonzept mit Nukleus "Verbrauch" (nach Schwedes & Schmidt 1992)

Sie scheint am Ende des Unterrichts über beide Vorstellungen (Gas als kontinuierliche Substanz und Gas als Ansammlung von kleinen Teilchen) zu verfügen und ist in der Lage, Vorteile von beiden einzuschätzen. Sie würde in der Alltagswelt (z.B. im Gespräch mit ihrer Mutter) eher die alte, kontinuierliche Vorstellung verwenden, ist aber im Gespräch mit dem Lehrer fähig, die neue Vorstellung in verschiedenen Erklärungen zu benutzen (Scott 1992, 222). In ähnlicher Weise finden Niedderer & Goldberg (1992, 15-18) bei der Analyse einer Handlungssequenz am Ende des Unterrichts, daß Studentinnen im Laufe ihrer etwa 20 Minuten dauernden Auseinandersetzung mit der Erklärung eines neuen Versuches verschiedene "Schichten" (layers) ihres kognitiven Systems heranziehen. Zu diesen Schichten gehören unter anderem die Anfangsvorstellung, eine Zwischenvorstellung und Teile der angestrebten wissenschaftlichen Vorstellung.

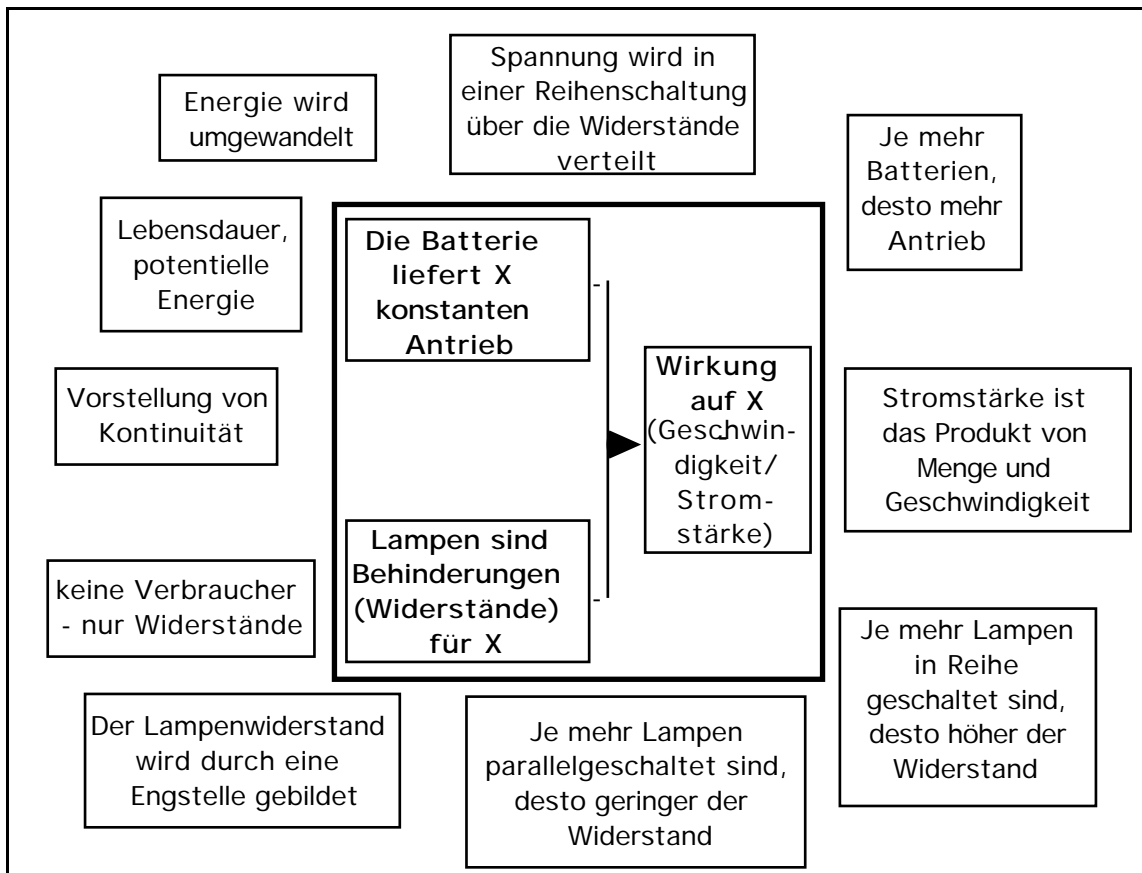


Abb. 6: Endkonzept mit Nukleus "Ohm" (nach Schwedes & Schmidt 1992, S.190-191)

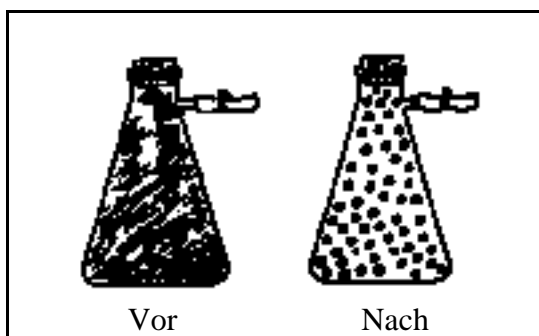


Abb. 7: Luft in einem Erlenmeyerkolben. Zeichnungen der Schülerin Sharon vor und nach dem Unterricht

Nach Scott (1987, 1992)

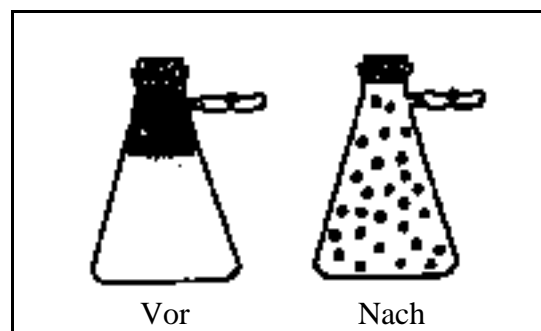


Abb. 8: Luft nach dem Auspumpen. Zeichnungen der Schülerin Sharon vor und nach dem Unterricht

Das Erreichen nicht intendierter kognitiver Zustände

Ein weiteres wichtiges allgemeines Ergebnis von fachdidaktischen Lernuntersuchungen ist der Nachweis darüber, daß Schüler nicht geplante kognitive Zustände erreichen, die in der Regel zwischen Anfangsvorstellungen und wissenschaftlicher Theorie liegen. Ein Beispiel dafür wird in der Untersuchung von Galili, Bendall und Goldberg (1993) gegeben. Die Autoren beschreiben bildhaft die Vorstellung vor dem Unterricht (pre-instruction), die erreichte Vorstellung nach dem Unterricht (post-instruction) und die angestrebte wissenschaftliche Vorstellung (formal physics).

Zusätzlich zu der bildhaften Beschreibung dieser Vorstellung verwenden die Autoren auch verbale propositionale Beschreibungen der "core concepts" und der "main ideas". Die als Ergebnis von Physiklern besonders interessante Zwischenvorstellung, die nach dem Unterricht erreicht wird, nennen sie die "relevant ray conception". Diese ist dadurch gekennzeichnet, daß nur eine Auswahl relevanter Strahlen zur Bildkonstruktion verwendet wird und damit in einigen Situationen charakteristische Fehler verbunden sind, während die wissenschaftliche Konstruktion von Bildern sämtliche von einem Gegenstandspunkt ausgehende Lichtstrahlen berücksichtigt. Die Autoren bezeichnen das nach dem Unterricht erreichte Wissen als "hybrid knowledge", welches einen "intermediate state" kennzeichnet.

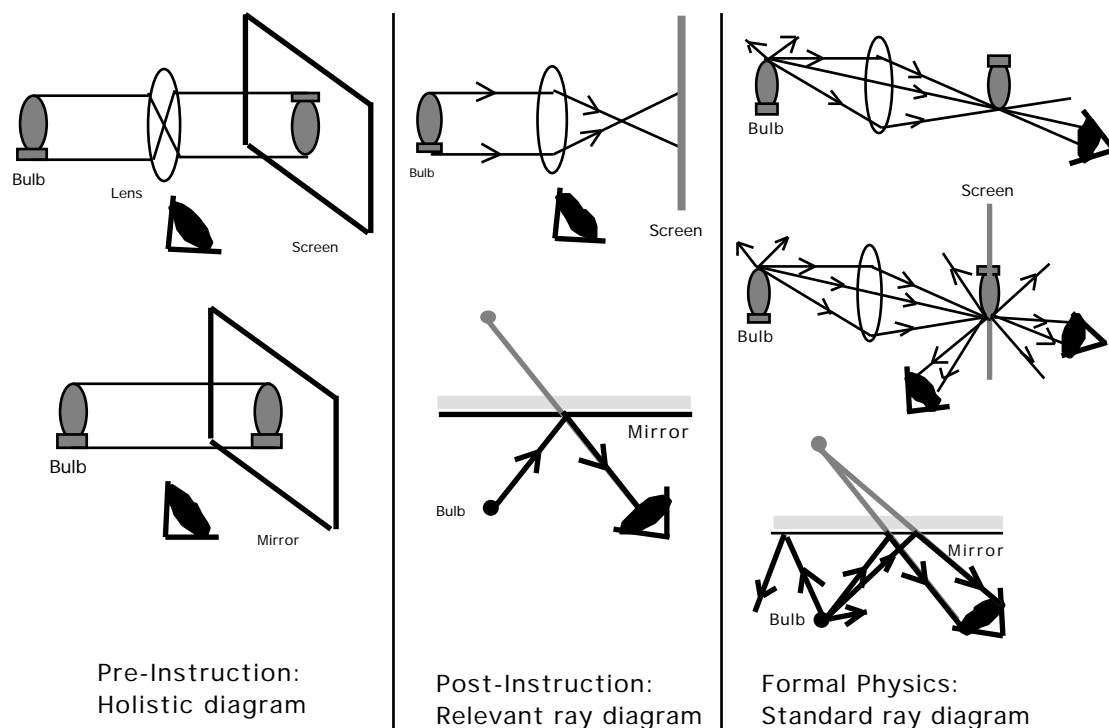


Abb. 9: Optische Bildkonstruktion mit Strahlen. Vergleich von Vorstellungen vor und nach dem Unterricht mit der Vorstellung der Physik. Nach Galili, Bendall & Goldberg (1993, S.296)

Derartige von Schülern oder Studenten im Lernprozeß erreichte Zwischenzustände werden beim elektrischen Stromkreis auch von Niedderer & Goldberg (1995), in der Thermodynamik von Lewis (1991) und bezüglich des mechanischen Kraftbegriffes von Dykstra (1992, 1992a) beschrieben. In Verbindung mit der Idee von der Selbstentwicklung des kognitiven Systems formuliere ich in diesem Zusammenhang eine generelle Hypothese: Es gibt themenspezifische ausgezeichnete Zwischenvorstellungen (intermediate conceptions), die von Schülern oder Studenten beim Lernen von Physik häufig unabhängig von dem speziellen Unterrichtskonzept entwickelt werden. Man könnte sie als "Attraktoren der kognitiven Entwicklung" bezeichnen.

Das Aufzeichnen von Lernwegen

Einige Studien kommen zur Aufzeichnung von Lernwegen mit Hilfe von erreichten Zwischenstationen. Schon Scott (1987, 1992) benützt den Begriff "conceptual pathway" für die Beschreibung eines solchen Lernweges. Deutlicher werden solche Lernwege explizit beschrieben bei Lewis (1991), Lichtfeldt (1992), Niedderer und Goldberg (1995) und Petri (1996).

Lewis (1991) beschreibt zunächst in einer Tabelle (Table 2, S. 46-48) eine Liste von fünf angestrebten wissenschaftlichen Vorstellungen ("target scientific conception"): Thermal equilibrium, conduction, insulation, heat energy und temperature. Diesen wissenschaftlichen Vorstellungen stellt sie jeweils mehrere Zwischenvorstellungen ("intermediate conceptions") und falsche Anfangsvorstellungen ("misleading intuitive conceptions") gegenüber. Der Lernprozeß wird bezüglich jedes dieser fünf angestrebten Konzepte als Weg von der "intuitive conception" zur "target conception" mit insgesamt fünf Erklärungsebenen ("level of explanation") unterteilt und für einzelne Schüler dargestellt (vgl. Abb. 17, unten). Die Zwischenstufen werden als "encoding new facts without explanations", "mixed predictions, idiosyncratic explanations", "mixed predictions, explanations" und "good predictions, mixed explanations" bezeichnet. Diese Darstellung des Lernweges stellt also eine Mischung von qualitativer Beschreibung der Veränderungen von "intuitive conceptions" über "intermediate conceptions" zu "target conceptions" mit einer quantitativen Beschreibung über die Ebene der Erklärung dar.

Lichtfeldt (1992) benützt zur Darstellung kognitiver Zustände sogenannte Begriffsnetze. Insbesondere beschreibt er im Detail den Lernweg eines Schülers beim Thema Quantenphysik als dynamische Entwicklung (Wandel) von Begriffsnetzen mit elf Stationen, die jeweils durch ein solches Begriffsnetz dargestellt werden. In dem Begriffsnetz sind die zentralen Begriffe sowohl der Anfangsvorstellungen wie der angestellten Vorstellungen enthalten, und die eingezeichneten Relationen werden aus

einer Analyse aus Transkripten aus dem Unterricht bzw. aus Interviews gewonnen. Der Lernweg wird als schrittweise Darstellung der Netze über viele Stationen dargestellt und zeigt insgesamt einen Prozeß zunehmender Vernetzung durch neue Relationen zwischen den Begriffen, bei denen auch das Gewicht von einer teilchenorientierten Beschreibung von Elektronen zu einer Beschreibung der Elektronen als Quantenobjekte, also eine qualitative Veränderung der Vorstellungen, sichtbar wird. ("Einzelfalluntersuchung eines Schülers", Lichtfeldt 1992, 295-353).

Niedderer & Goldberg (1995) stellen den Lernweg im Verlauf von zwei Doppelstunden durch eine Abfolge von vier kognitiven Zuständen, gekennzeichnet durch die jeweiligen Vorstellungen, dar:

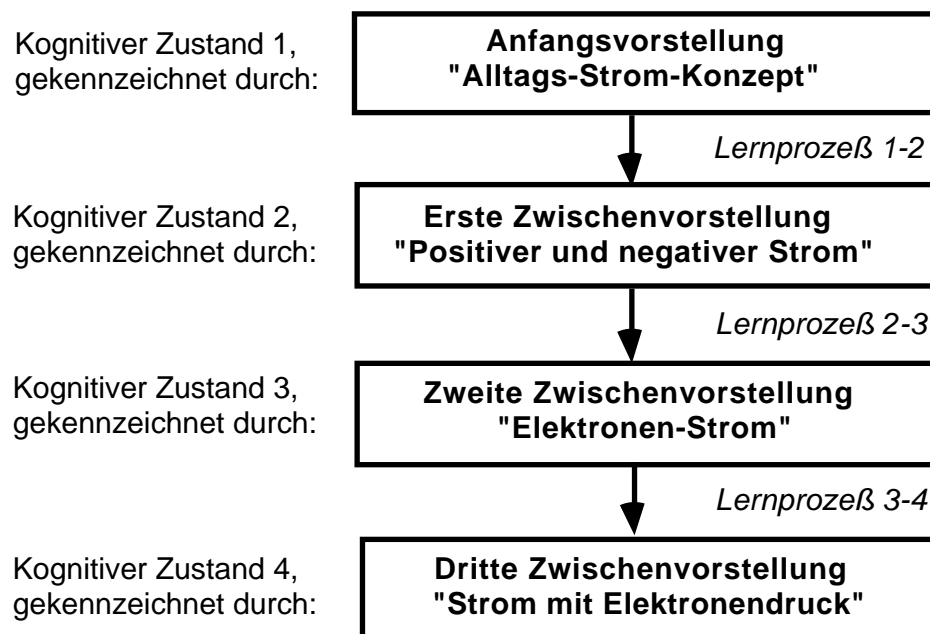
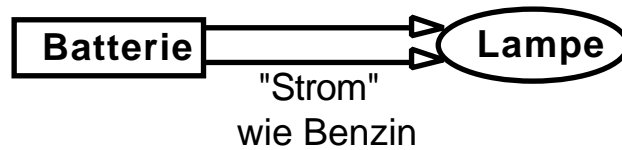


Abb. 10: Übersicht über die kognitiven Zustände von drei Studentinnen beim Unterricht zum elektrischen Stromkreis (Niedderer & Goldberg, 1995, 77)

Jede dieser Vorstellungen wird durch zentrale Kernaussagen und ergänzende Aussagen sowie durch teilweise bildhafte Darstellungen beschrieben. Als Beispiel geben wir hier die Beschreibung der Anfangsvorstellung "Alltags-Strom-Konzept" wieder:

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

Abb. 11: Anfangsvorstellung "Alltags-Strom-Konzept" (Niedderer & Goldberg, 1995, 77)

In Ergänzung der Beschreibung von Lernwegen (oder Lernpfaden) durch kognitive Zustände versuchen sie, auch die eigentlichen Lern-Prozesse als Prozesse der Veränderung des kognitiven Systems 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. Ihre Analyse der "Wissenskonstruktion" hat dabei zwei Ziele:

- Formulierung von Hypothesen über die Auswirkungen einzelner Unterrichtselemente auf die Konstruktion der Zwischenvorstellungen, sowie
- Formulierung von Hypothesen über die von den Schülern im Lernprozeß verwendeten kognitiven Werkzeuge.

Beispiele für solch hypothetischen kognitiven Werkzeuge beim der Bildung des kognitiven Zwischenzustandes "Elektronen-Strom" sind (siehe Abb. 12):

Hypothetische kognitive Werkzeuge

(die zum Erwerb des 2. Zwischenzustandes beitragen):

Physiknahestehende kognitive Werkzeuge (Vorstellungen) :

- Das "Elektron" als "Teilchen" (Voraussetzung für die Verwendung der Alltagssprache).
- "Positive" und "negative" "Ladungen"; "Abstoßung" ("Anziehung") zwischen Ladungen.

Schemata und kognitive Werkzeuge aus der Alltagssprache:

- 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".

Abb. 12: Hypothetische kognitive Werkzeuge zur Bildung der Vorstellung "Elektronen-Strom" (Niedderer & Goldberg 1995, S.81)

Der kognitive Zwischenzustand "Elektronen-Strom" wird dann folgendermaßen beschrieben:

Kernaussage: 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.

Abb. 13: Zweite Zwischenvorstellung "Elektronen-Strom" (Niedderer & Goldberg 1995, S.81)

4.2 Lernen als Veränderung der Eigenschaften von bereits vorhandenen oder neu gebildeten kognitiven Strukturen

Lernen als Statusveränderung

Hewson & Hennessey (1992) beschreiben den Lernprozeß einer Schülerin zum Kraftbegriff als Veränderung des Status von Schülervorstellungen ("status of students' conceptions"). Inhaltlich geht es darum, daß Schüler im Sinne des 3. Newtonschen Axioms lernen, daß ein Buch auf einem Tisch zwei Kräfte erfährt, die Gewichtskraft und eine Gegenkraft von dem Tisch. Die Autoren beschreiben die Vorstellung und ihren Status *vor* dem Unterricht, *während* des Unterrichts, *nach* dem Unterricht und *sechs Wochen später*. Dabei ändert sich die Vorstellung relativ rasch von einer Alltagsvorstellung zur wissenschaftlichen Vorstellung, deren Status im Sinne von "intelligibility", "plausibility" und "fruitfulness" im Laufe des weiteren Unterrichts dann höher wird.

Lernen als Komplexitätsentwicklung

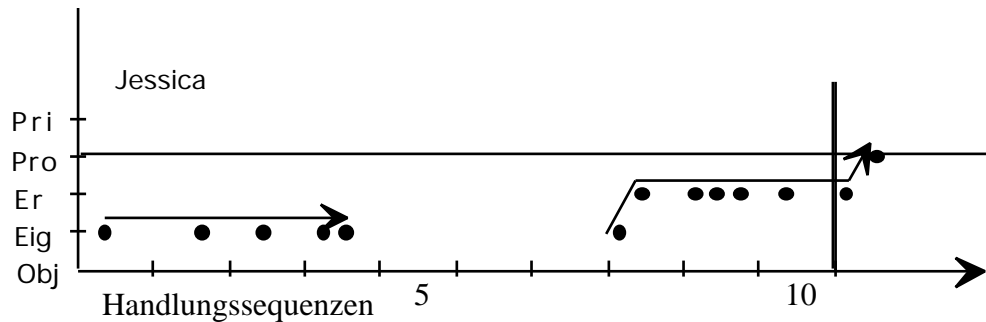
In der Arbeitsgruppe von Aufschnaiter in Bremen wurden im Laufe der letzten zehn Jahre mehrere Forschungsvorhaben bearbeitet, in denen Lernen als Komplexitätsentwicklung von Bedeutungskonstruktionen einzelner Schüler im Physikunterricht untersucht wurde. (Fischer, 1989; Fischer & von Aufschnaiter, 1992; Welzel 1994). Zur Charakterisierung der Komplexitätsebenen wird an einer Taxonomie gearbeitet, die ursprünglich von Powers (1973) stammt. Bei Welzel (1994) werden die folgenden Komplexitätsstufen verwendet: Objektebene, Eigenschaftsebene, Ereignisebene, Programmebene und Prinzipiebene. Diese Komplexitätsebenen können teilweise auch als zunehmendes Abstraktionsniveau gedeutet werden. In diesem Sinne sind vier dieser fünf Ebenen (Objektebene, Eigenschaftsebene, Programmebene und Prinzipiebene) auch in anderen fachdidaktischen Arbeiten gebräuchlich. Die Autorin definiert Lernen als Prozeß, bei dem der Schüler lernt, in zukünftigen ähnlichen Problemlösungssituationen schneller und erfolgreicher zu höheren Komplexitätsniveaus zu gelangen:

"Das kognitive System hat gelernt, wenn vorangegangene Bedeutungskonstruktionen und deren Entwicklung bewirkt haben, daß in neuen (ähnlichen) Situationen schneller erfolgreiche Handlungen organisiert werden und damit schneller Diskrepanzen zwischen Wahrnehmung und Erwartung in der neuen Situation verringert werden. ... Lernen heißt damit, daß die Bedeutungsentwicklungen, die sich bewähren, in den sie erzeugenden Prozeduren verstärkt (und die sich nicht bewähren in ihren Prozeduren geschwächt) werden, sodaß die gestärkten Prozeduren "ihre" Prozesse bei der nächsten

Gelegenheit mit größerer Wahrscheinlichkeit und die geschwächten mit geringerer Wahrscheinlichkeit erzeugen, als dieses Mal." (Welzel, 1994, 32)

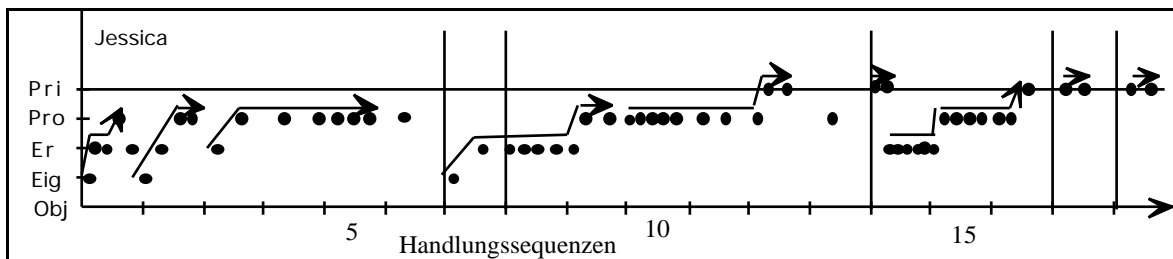
Die beiden folgenden Abbildungen zeigen die Komplexitätsentwicklung von Bedeutungskonstruktionen einer einzelnen Schülerin Jessica in einem Unterrichtsabschnitt von je ca. 20 min. Dauer bei ähnlichen Situationen in der 4. und 6. Doppelstunde:

4. Doppelstunde: Influenz und Erden am Elektroskop erklären



"Die Bedeutungsentwicklung beginnt auf dem Eigenschaftsniveau und endet in der Programmebene ... Danach sind keine Bedeutungsentwicklungszüge mehr unter dieser Rahmung zu erkennen."

6. Doppelstunde: Ladungsrollo demonstrieren und erklären



"Die Bedeutungsentwicklung beginnt auf dem Eigenschaftsniveau und endet in der Prinzipiebene Danach sind keine Bedeutungsentwicklungszüge mehr unter dieser Rahmung zu erkennen."

Abb. 14: Lernen als Entwicklung von Konstruktionen höherer Komplexität (Welzel, 1994, 197)

Aus dem Vergleich beider Diagramme ist das schnellere Erreichen höherer Komplexitätsstufen in der 6. Doppelstunde als Lernen zu interpretieren.

Lernen als Zunahme der "Stärke" oder "Benutzungswahrscheinlichkeit" eines kognitiven Elements

Lernen hat auch im umgangssprachlichen Sinne etwas mit der Gewinnung von Sicherheit bei der Benützung von Wissen zu tun. In diesem Sinne kann Lernen als die Zunahme der "Stärke" oder "Benutzungswahrscheinlichkeit" eines kognitiven Elements verstanden werden. Niedderer (1972, S. 58) gibt hierzu ein Beispiel, in dem er die Zunahme der Häufigkeit richtiger Vorhersagen beim Anschluß verschiedener Quellen und Verbraucher im elektrischen Stromkreis untersucht:

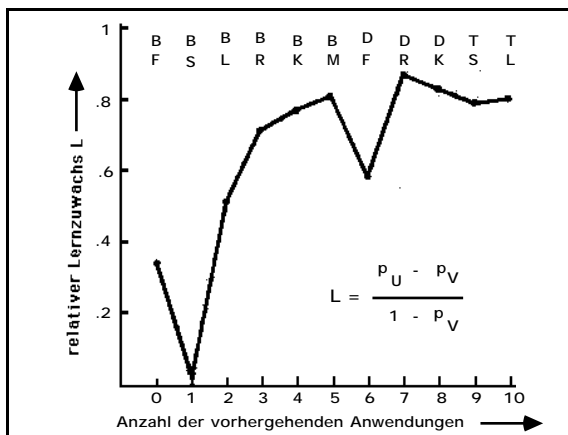


Abb. 15: Lernen als Zunahme der Wahrscheinlichkeit richtiger Vorhersagen (Niedderer 1972, S. 58)

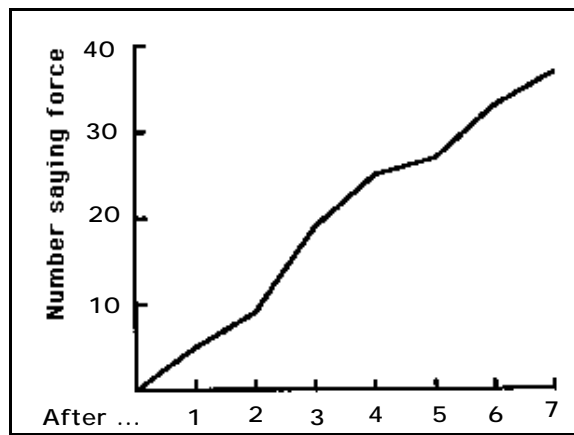


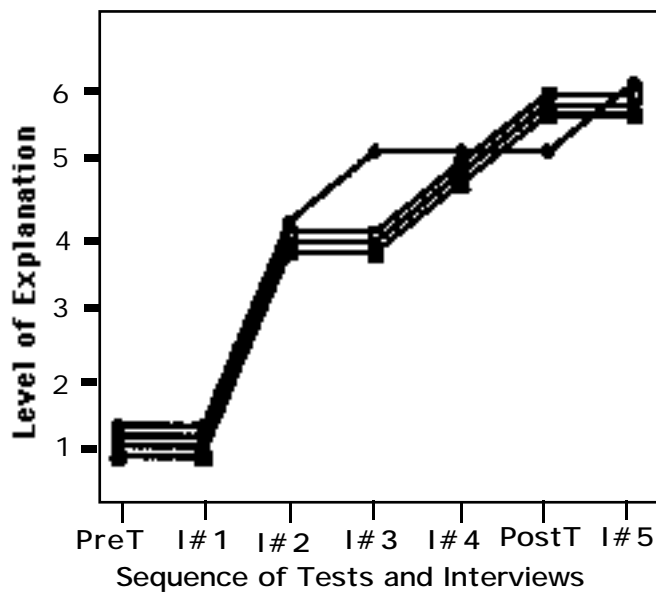
Abb. 16: Lernen als Zunahme des Anteils richtiger Erklärungen (Number of students saying the table exerts a force versus point in the series of explanations, Brown 1994, S.208)

Bei Brown (1994) findet man eine ähnliche Darstellung, die als Zunahme der Benutzungswahrscheinlichkeit für die richtige Antwort ("Gegenkraft des Tisches auf das auf dem Tisch liegende Buch") nach der "Behandlung" von insgesamt 7 ähnlichen Beispielen gelesen werden kann.

Lernen als Erhöhung des Erklärungs niveaus

Eine eher an qualitative Beschreibungen der Veränderungen von kognitiven Elementen anknüpfende Beschreibung findet sich bei Lewis (1991). Sie beschreibt die Veränderung von Erklärungsebenen (level of explanation) während des Unterrichts bezüglich vier verschiedener inhaltlicher Dimensionen. Diese Zunahme des Erklärungs niveaus wird für

einzelne Schüler aus der Analyse von insgesamt sieben Interviews/Tests ermittelt und grafisch wie folgt dargestellt:



Inhaltliche Dimensionen:

- insulation/conduction
- thermal equilibrium
- heat and temperature differentiation
- heat flow

Definition der Erklärungs-Ebenen:

- 1 - intuitive conceptions
- 2 - encoding new facts without explanations
- 3 - mixed predictions, idiosyncratic explanations
- 4 - mixed predictions, explanations
- 5 - good predictions, mixed explanations
- 6 - target conceptions

Abb. 17: Lernen als Erhöhung des Erklärungs-niveaus (Lewis, 1991)

4.3 Unterrichtliche Bedingungen des Lernens

Intermediate conceptions as "stepping stones"

Brown & Clement (1992) berichten über Unterrichtsexperimente in Mechanik, bei denen sie zu einer Verbesserung des Unterrichtserfolgs dadurch kamen, daß der Lehrer in seinem Unterricht explizit auf Zwischenvorstellungen ("intermediate conception") hingesteuert hat. Der Unterricht behandelte unter anderem den physikalischen Begriff Trägheit. Als Zwischenvorstellungen wurden hier vom Lehrer benützt:

- ein Widerstand gegen Beschleunigung ("hold back tendency")
- eine Tendenz zum Weiterlaufen ("keeps going tendency")

Die Autoren bezeichnen diese Zwischenvorstellungen (intermediate concepts) als Meilensteine beim Lernen (stepping stones). Sie sind auf Grund ihrer Ergebnisse überzeugt, daß das explizite Anstreben dieser Zwischenvorstellung den Unterrichtserfolg verbessert hat.

Feststellung von Resonanzen zwischen Unterrichtsinput und der Selbstentwicklung der kognitiven Struktur

Niedderer & Goldberg (1995) gehen in ihrer Untersuchung von einem konstruktivistischen Modell des Lernens aus und sehen den Zusammenhang zwischen Lehrangebot (Lehrerinformationen und Lehrerverhalten, Texte, Experimente, Handlungen) und tatsächlichem Lernen als "Resonanz" ("compatibility" oder "conceptual fit", Glasersfeld, 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 sie von Resonanz zwischen Unterrichtsinformation und kognitivem System des Schülers. 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".

Solche Resonanzen finden sie bei der Einführung der "Elektronen-Sprache", die vom Lehrer nur "nebenbei" erfolgt. Die Studentinnen gehen auf die meisten dieser Lehrerinformationen sehr bereitwillig ein. Dies führen sie auf der Tatsache zurück, daß das angebotene Elektronenmodell des Stroms ihnen erlaubt, zahlreiche bereits vorhandene kognitive Werkzeuge einzusetzen (vergleiche die oben angeführte Liste). Ein anderer Teil der positiven Resonanz wird auf die hohe Wertschätzung dieser Studentinnen für atomare mikroskopische Modelle als "wahre Physik" zurückgeführt.

Anpassung des Lehrer-Komplexitätsniveaus an das der Schüler

Welzel und von Aufschnaiter (persönliche Mitteilung) sehen hypothetisch folgende möglichen Konsequenzen für eine Verbesserung des Unterrichts aus ihren Forschungsergebnissen:

- Lehrer müssen die Komplexitätsstufe, auf der ihre Schüler konstruieren, kennen und diagnostizieren können. Sie müssen ihre eigenen Mitteilungen an Schüler am Komplexitätsniveau der Schüler orientieren.
- Schüler müssen für die Bearbeitung von Konstruktionen auf ihrem jeweiligen Komplexitätsniveau genügend Zeit erhalten.
- Soziale Konstruktionsprozesse der Schüler in frei arbeitenden Schülergruppen sind für den Lernprozeß besonders wichtig.

Bezüglich des Einflusses von Interaktionen auf Lernumgebungen (Welzel, 1994) muß aufgrund dieser Ergebnisse festgehalten werden, daß auch durch Interaktionen keine Informationen übertragen werden können, sondern daß in der Interaktion Prozesse im kognitiven System des Schülers in Gang gesetzt werden. Der Ablauf dieser Prozesse hängt wesentlich vom kognitiven System selbst und seiner Fähigkeit ab, Erfahrungen in Relationen zur Lernumgebung miteinander zu verknüpfen. Bedeutungsentwicklungen sind dadurch (mehr oder weniger überraschend) individuell.

Für eine Beförderung von Bedeutungsentwicklungsprozessen muß also in der Interaktion die Erfahrung des Schülers einfließen können. Da niemand die Erfahrungen eines anderen in ihren Möglichkeiten kennen kann, ist es wichtig, die Handlungen des Lernenden zu beobachten, um festzustellen, auf welchem Niveau er in diesem Augenblick Probleme löst und ihm dann Möglichkeiten für Relationsbildungen von dieser Ebene aus zu geben.

5 Abschließende Bemerkungen

1. Eine kognitive Beschreibung von Lernen im Physikunterricht, bei der die Beschreibungskategorien im Hinblick auf fachdidaktische Interessen gewählt werden, erscheint im Lichte einer konstruktivistischen Sicht von Lernen als einer Selbstentwicklung des kognitiven Systems sowohl fachdidaktisch wertvoll als auch - möglicherweise - psychologisch interessant.

2. Ergebnisse solcher Studien belegen folgende interessanten Befunde:

- Im Unterricht laufen intendierte Lernprozesse mit dem Ziel physikalischer Begriffs- und Theoriebildung häufig nur unvollständig ab und führen zu "Zwischenvorstellungen" ("intermediate conceptions"), welche einen eigenen kognitiven Zustand zwischen Alltagsvorstellungen und wissenschaftlichen Vorstellungen markieren.
- Es können kognitive Zustände nachgewiesen werden, die so vom Lehrer überhaupt nicht intendiert waren.
- Einige dieser Zustände treten mit einiger Wahrscheinlichkeit weitgehend unabhängig von der speziellen Unterrichtskonzeption auf. Man könnte sie "Attraktoren der Selbstentwicklung des kognitiven Systems" nennen.

3. Der Endzustand eines kognitiven Systems nach dem Unterricht kann möglicherweise am besten mit einem Modell "kognitiver Schichten" beschrieben werden (Niedderer & Goldberg, 1995). Diese verschiedenen Schichten enthalten die vor dem Unterricht vorhandenen Anfangsvorstellungen und die im Unterricht neu gebildeten Zwischenvorstellungen mit jeweils verschiedener relativer Stärke oder "status" (Hewson & Hennessey, 1992). Dies kann sich dann zum Beispiel so auswirken, daß ein Schüler am Ende des Unterrichts bei einer neuen, bisher unbekanntem 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 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 neues Licht auf zahlreiche Ergebnisse aus Vorstellungsuntersuchungen, nach denen auch nach dem Unterricht häufig nur die alten Vorstellungen gefunden werden. Aus 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.

Literatur

- Aufschnaiter, S. v.(1991). Lernen ist Selbstentwicklung eines kognitiven Systems. In Wiesner, H. (Hrsg.), Aufsätze zur Didaktik der Physik II. Bad Salzdetfurth: Franzbecker, 1-11.
- Brace, G.R. (1988). The design of an instructional model to transform students' alternative frameworks of dynamics. M.A. thesis. University of British Columbia .
- Brown, D.E. (1987). Using analogies and examples to help students overcome misconceptions in physics: a comparison of two teaching strategies. Dissertation. Amherst, MA: University of Massachusetts, University Microfilms # 8805897 .
- Brown, D. & Clement, J. (1992). Classroom teaching experiments in mechanics. In R. Duit, F. Goldberg & H. Niedderer (Eds.), Research in physics learning - Theoretical issues and empirical studies. Proceedings of an International Workshop in Bremen. Kiel: IPN, 380-397.
- Brown, D.E. (1994). Facilitating conceptual change using analogies and explanatory models. *International Journal of Science Education* 16, 2, 201-214 .
- 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.

- 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.
- Dykstra, D. (1992). Studying conceptual change: Constructing new understandings. In: Duit, R., Goldberg, F. & Niedderer, H. (Eds.): Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies. Proceedings of an International Workshop at the University of Bremen. Kiel: IPN, 40-58 .
- Dykstra, D.I., Boyle, C.F. & Monarch, I.A. (1992a). Studying conceptual change in learning physics. *Science Education* 76, 6, 615-652 .
- Fischer, H. (1989). Lernprozesse im Physikunterricht - Falluntersuchungen im Unterricht zur Elektrostatik aus konstruktivistischer Sicht. Dissertation Universität Bremen .
- Fischer, H.E. & Aufschnaiter, S.v. (1992). The increase of complexity as an order generating principle of learning processes. Case studies during physics instruction. In: Duit, R., Goldberg, F. & Niedderer, H. (Eds.): Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies. Proceedings of an International Workshop at the University of Bremen. Kiel: IPN .
- Fischler, H. & Lichtfeldt, M. (1992). Learning quantum mechanics. In: Duit, R., Goldberg, F. & Niedderer, H. (Eds.): Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies. Proceedings of an International Workshop at the University of Bremen. Kiel: IPN .
- 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(3), pp. 271-301.
- v. Glasersfeld, E. (1992). A constructivist's view of learning and teaching. In R. Duit, F. Goldberg & H. Niedderer (Eds.), Research in physics learning - Theoretical issues and empirical studies. Proceedings of an International Workshop in Bremen. Kiel: IPN, 29-39.
- Hammer (1991). Defeating Common Sense: Epistemological Beliefs in an Introductory Physics Course. Unpublished doctoral dissertation, University of California, Berkeley.
- Hennessey, M.G. (1991). Analysis of conceptual change and status change in sixth gradeers' concepts of force and motion. Unpublished doctoral dissertation, University of Wisconsin-Madison.
- Hericks, U. (1993). Über das Verstehen von Physik. . Waxmann, Münster, New York. (Dissertation Universität Münster) .
- Hewson, P. & Hennessey, M.G. (1992). Making status explicit: A case study of conceptual change. In: Duit, R., Goldberg, F. & Niedderer, H. (Eds.): Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies. Proceedings of an International Workshop at the University of Bremen. Kiel: IPN .
- 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: Academic Press, 233-257

- Jung, W. (1992). Probing acceptance: A technique for investigating learning difficulties. In: Duit, R., Goldberg, F. & Niedderer, H. (Eds.): Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies. Proceedings of an International Workshop at the University of Bremen. Kiel: IPN .
- Katu, N. (1992). Development of Conceptions in Basic Electricity: An Exploratory Study Using Teaching Experiment Methodology. Unpublished Ph.D. dissertation, The Pennsylvania State University: University Park, PA, USA. .
- Katu, Nggandi; Lunetta, Vincent N. & van den Berg, Euwe (1993). Teaching Experiment Methodology in the Study of Electricity Concepts. In: The Proceedings of the Third International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics .
- Komorek, M. & Duit, R. (1995). A learning process study on elementary features of chaos theory. Paper presented at the conference "Science Education Research in Europe", Leeds.
- Lewis, E. L. (1991). The Process of Scientific Knowledge Acquisition Among Middle School Students Learning Thermodynamics. Doctoral Dissertation, University of California at Berkeley
- Lichtfeldt, M. (1992). Schülervorstellungen in der Quantenphysik und ihre möglichen Veränderungen durch Unterricht. Essen: Westarp (Dissertation Freie Universität Berlin) .
- Niedderer, H. (1972). Sachstruktur und Schülerfähigkeiten beim einfachen elektrischen Stromkreis . Dissertation Universität Kiel .
- Niedderer, H. & Schecker, H.(1992). Towards an explicit description of cognitive systems for research in physics learning. In R. Duit, F. Goldberg & H. Niedderer (Eds.), Research in physics learning - Theoretical issues and empirical studies. Proceedings of an International Workshop in Bremen. Kiel: IPN, 74-98
- Niedderer, H. & Goldberg, F. (1995). Lernprozesse beim elektrischen Stromkreis. Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften (ZfDN) 1 (1995), 73-86 .
- Petri, J. (1996). Der Lernpfad eines Schülers in der Atomphysik - eine Fallstudie in der Sekundarstufe II. Dissertation. Universität Bremen
- Pfundt, H. & Duit, R. (1994). Bibliographie Alltagsvorstellungen und naturwissenschaftlicher Unterricht, 4. Auflage. Kiel: IPN.
- Powers, W. T. (1973). Behaviour: The control of perceptions. Aldine Publishing Company, Chicago.
- Roschelle, J. (1991). Students' Construction of Qualitative Physics Knowledge: Learning About Velocity and Acceleration in a Computer Microworld. Doctoral Dissertation. Berkeley, CA: University of California .
- Schmidt, D. (1989). Zum Konzeptwechsel. Frankfurt a.M.: Lang (Dissertation Universität Bremen) .
- Schwedes, H. & Schmidt, D. (1992). Conceptual change: A case study and theoretical comments. In: Duit, R., Goldberg, F. & Niedderer, H. (Eds.): Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies. Proceedings of an International Workshop at the University of Bremen. Kiel: IPN .

- Scott, P. H. (1987). The process of conceptual change in science: A case study of the development of a secondary pupil's ideas relating to matter. Unpublished thesis submitted in partial fulfilment of MEd., University of Leeds
- Scott, P. (1992). Conceptual 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. Proceedings of an International Workshop at the University of Bremen. Kiel: IPN .
- Seibel, C. (1995). Analyse von Lernprozessen im handlungsorientierten Physikunterricht - Fallstudie einer elfjährigen Schülerin zum Thema Kurzschluß. Dissertation. Universität Bremen
- Tytler, R. W. (1994). Children's Explanations in Science: A Study of Conceptual Change. Unpublished doctoral dissertation, Monash University Melbourne.
- Welzel, M. (1994). Interaktionen und Physiklernen. Frankfurt a.M.: Lang, Dissertation Universität Bremen.
- Wodzinski (1995). Untersuchungen von Lernprozessen beim Lernen Newtonscher Dynamik im Anfangsunterricht. Dissertation Universität Frankfurt.