

Physiklernen als kognitive Entwicklung

Frau Prof. Dr. Barbara Schenk zum 60. Geburtstag gewidmet

Hans Niedderer

Universität Bremen, Institut für Didaktik der Physik

1 Einleitung

Die Idee, Physiklernen als kognitive Entwicklung zu betrachten und zu analysieren, ist sicher nicht neu. Schon Wagenschein hat in seinen Schriften, zum Beispiel in dem Buch "Kinder auf dem Wege zur Physik" (Wagenschein et al. 1973) die Idee des Lernens als Entwicklungsvorgang mit seinem Begriff "genetisches Lernen" klar entwickelt. Später haben Schenk und Mitarbeiter dieses Modell des genetischen Lernens einem herkömmlichen sogenannten "wissenschaftslogischen Kompetenzerwerbsmodell" gegenübergestellt (Schenk et al. 1982, S.6):

Wissenschaftslogischen Kompetenzerwerbsmodell: Der Lerner ...

- (1) ... lernt einen Begriff, wenn der Begriff mit Bezeichnung, Definitionsgleichung und Dimension eingeführt wird.
- (2) ... überträgt eine mathematische Operation formal auf eine physikalische Relation und lernt (versteht!) damit zugleich die physikalische Relation.
- (3) ... verarbeitet eine Theorie vollständig, während er sie lernt. Am Ende des Lernprozesses hat er seine gesamte geistige Struktur so umgebaut, daß sie völlig in Einklang mit der neu gelernten Theorie ist. Er beschreibt nun alle physikalischen Phänomene in einer Sprache, die gelernte Theorie vollständig integriert,

Die frühe "entwicklungslogische" Alternative war "genetisches Lernen" (Wagenschein, zitiert nach Schenk et al. 1982). Im folgenden sind beide einander gegenübergestellt:

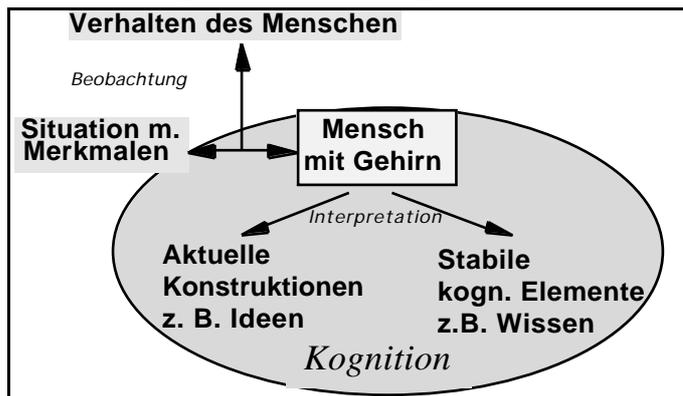
Formales Lernen	Genetisches Lernen
<ul style="list-style-type: none">• Wissenschaftslogisch• "Stoff" ansammeln• "auf Halde" gelernt• "schulisches" Lernen (im Unterricht)	<ul style="list-style-type: none">• Entwicklungslogisch• Verstehen• akkumulierende Assimilation (Piaget)• gebrauchen können (nicht nur im Unterricht)

Im folgenden soll "Physiklernen als kognitive Entwicklung" sowohl als Forschungsprogramm mit entsprechenden empirischen Ergebnissen als auch als Plädoyer für genetisches Lernen im Physikunterricht unter wesentlicher Berücksichtigung der Entwicklungsgesetze des Lernens verstanden werden.

2 Kognitive Beschreibung von Wissen

2.1 Grundstruktur von Kognition

Kognition ist ein schillernder Begriff. Wir beobachten Lernende in Situationen, in denen sie beobachtbares Verhalten zeigen. Direkt empirisch erfaßbar sind also die Merkmale der Situation und das Verhalten von Personen in ihnen. Aus beidem zusammen schließen wir auf Eigenschaften der Person, die dem Gehirn zugeordnet und üblicherweise als Wissen, Fähigkeiten, Vorstellungen usw. bezeichnet werden.



Die Beschreibung von Kognitionen bezieht sich also immer auf nicht direkt beobachtbare Modelle von Grundstrukturen des Denkens, die aus Paaren von beobachtbaren Situationen und beobachtbarem Verhalten interpretativ geschlossen werden (Schecker 1985, Viennot 1995).

2.2 Aktuelle Konstruktionen

Kognitionen können gemäß ihrer Zeitstruktur unterschieden werden in aktuelle Konstruktionen (in der Größenordnung von 10 Sekunden) und stabile kognitive Elemente verschiedener Art, die in der Größenordnung von Stunden bis Monaten und Jahren als stabil angenommen werden. Beispiele für aktuelle Konstruktionen sind "mentale Repräsentationen" (Schnotz 1996), erzeugte Bedeutungen und Ideen (von Aufschnaiter & Welzel 1997) und Beobachtungen, Fragen, Erwartungen, Erklärungen und Bedeutungen (Niedderer & Schecker 1992).

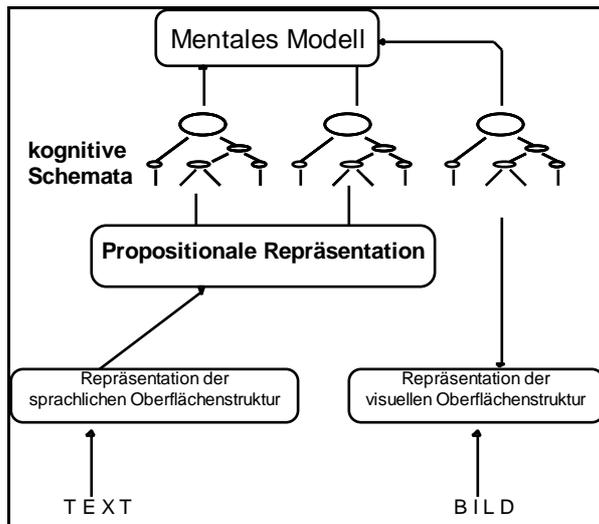
2.3 Stabiles Wissen - verschiedene Formen der Beschreibung

Lernen wird hier als die Veränderung von stabilen kognitiven Elementen wie Wissen, Fähigkeiten, Vorstellungen und anderen aufgefaßt. Deshalb sind die verschiedenen Formen der Beschreibung von stabilem Wissen von besonderer Bedeutung.

2.3.1 A hypothesized conceptual structure

Vosniadou (1998) schlägt am Beispiel des Kraftbegriffs von Grundschulkindern eine kognitive Struktur auf zwei Ebenen vor, einer Ebene der Denkraum ("framework") und einer spezifisch inhaltlichen Ebene, z.B. am Kraftbegriff ("specific"). Sie sieht demnach gewisse ontologische und epistemologische Grundüberzeugung als bestimmend für die Vorstellungen über Kraft im einzelnen an.

2.3.2 Mentale Modelle, kognitive Schemata, propositionale Repräsentation



Schnotz (1996, 24ff) geht aufbauend auf Bruners Theorie der kognitiven Entwicklung davon aus, daß mentale Modelle aus symbolischen Anteilen - "propositionalen Repräsentationen" - und ikonischen Anteilen - "mental Modellen i.e.S." - zusammengesetzt sind. So entstehen verschiedene kognitive Schemata, die zusammen ein mentales Modell konstituieren.

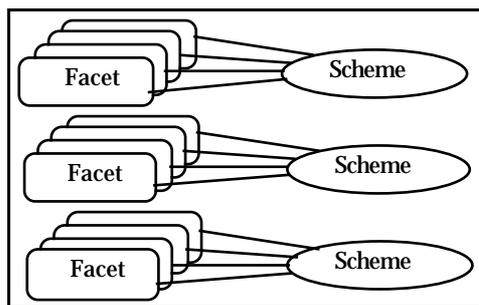
2.3.3 Naturwissenschaftliche Erkenntnisssysteme

Wolze (1989) beschreibt das komplexe Geflecht von theoretischem und empirischem Wissen sowie dem Wissen über seinen spezifischen Gebrauch als naturwissenschaftliches Erkenntnisssystem.

2.3.4 Vorstellungen, Vorverständnis, Lernertheorien

Hericks (1993, S. 103) definiert anschließend an Schenk Lernertheorien "als konsistente Systeme von Begriffen, Kenntnissen und Konzepten, die Schüler auf dem Weg zu den objektiv gültigen physikalischen Theorien ausbilden und über welche sie jeweils aktuell verfügen..."

2.3.5 A structure to represent students' knowledge



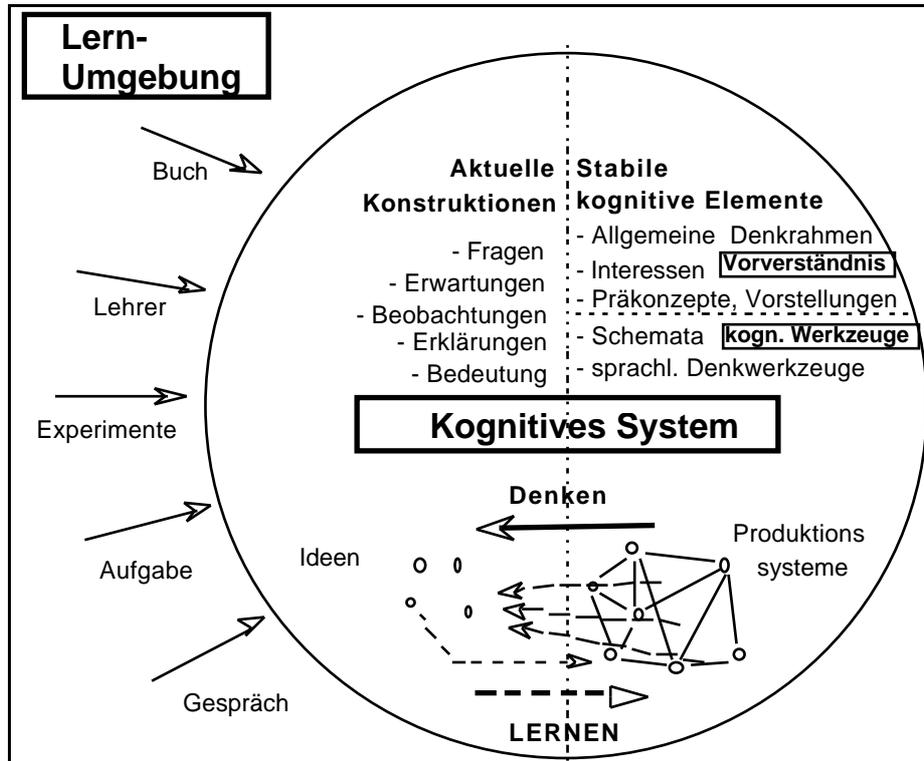
Galili (1998) hat eine Beschreibung von stabilen Wissens-elementen auf zwei Ebenen als "schemes" und "facets" gegeben und an Beispielen aus der Optik exemplifiziert. Sein Begriff von "scheme" erinnert an die kognitiven Schemata von Schnotz (siehe oben).

2.3.6 Kognitives System

Die Idee der Beschreibung von Wissen als kognitivem System wird auch von diSessa (1990, S.5) verfolgt, der damit ebenfalls das Verstehen von Lernen als einen Entwicklungsprozeß verknüpft ("development of knowledge systems").

Aufbauend auf dem Begriff Vorverständnis (Niedderer 1982, Schecker 1985) versuchen Niedderer und Schecker die aktuellen Konstruktionen und die verschiedenen Arten von

stabilen kognitiven Elementen in einem Modell des kognitiven Systems darzustellen (Niedderer&Schecker 1992, Niedderer 1996).



Für die interpretative Analyse empirischer Daten ist die Unterscheidung von "aktuell" und "stabil" von besonderer Bedeutung. Sie wird an der Frage getestet, ob bestimmte - neue - Vorstellungen während eines bestimmten Zeitraumes systematisch immer wieder gebildet werden.

Unter dem Einfluss einer Lernumgebung und auf der Basis stabiler kognitiver Elemente entwickelt das Individuum aktuelle Ideen, die sich bewähren und zu stabilen kognitiven Elementen entwickeln können, um dann als Produktionssysteme für neue Ideen wirksam zu werden.

2.4 Die Suche nach Basiselementen

2.4.1 Die Idee: "kognitive Atome"

Die Idee der Beschreibung von kognitiven Strukturen mit Hilfe von Basiselementen (kognitiven Atomen, Bausteinen, Werkzeugen) hat durch die Diskussion über die Natur von Vorstellungen und Wissen neue Nahrung bekommen (Fischer 1994, S.30). Während einerseits durch die jahrzehntelangen Forschungsergebnisse mit einer konsistenten Beschreibung wiederkehrend auffindbarer Schülervorstellungen zu bestimmten Teilbereichen der Physik ein abgesichertes Wissen über solche stabilen Elemente des kognitiven Systems vorliegt, erscheint es andererseits - zum Teil angestoßen durch neurobiologische Sichtweisen von Aufbau und Funktion des Gehirns - eher

unwahrscheinlich, dass diese Vorstellungen als fertige Repräsentationen wie in einem Warenhaus gespeichert werden (Aufschnaiter & Welzel 1997). Es erscheint jedoch plausibel, bestimmte elementarere und grundlegendere "kognitiven Werkzeuge" anzunehmen, aus denen in Wechselwirkung mit der jeweiligen Situation diese durch Forschung vielfach bestätigten Vorstellungen erst erzeugt werden. diSessa (1990, S. 4) beschreibt das Ziel folgendermaßen: " The aim for this work is to understand the "intuitive sense of mechanism" that accounts for common sense predictions, expectations, explanations, and judgments of plausibility concerning mechanical causal situations, and to understand how those intuitive ideas contribute to and develop into 'school physics'."

2.4.2 *Knowledge in pieces - "p-prims"*

Die von diSessa (1990, S. 5 ff) eingeführten "p-prims" (phenomenological primitives) werden von ihm selbst wie folgt beschrieben: " P-prims are rather short knowledge structures (typically involving configurations of only a few parts) that act largely by being recognised in a physical system or in the system's behaviour or hypothesised behaviour. ... p-prims become the intuitive equivalent of physics laws; they may explain other phenomena, but are not themselves explained with the knowledge system." Das bekannteste Beispiel eines p-prims ist das sogenannte "Ohms p-prim": "An agent which is the locus of an impetus that acts against a resistance to produce some sort of result."

2.4.3 *Facets of knowledge*

Die Idee von "facets of students' knowledge and reasoning" wird von Minstrell (1992) wie folgt beschrieben: "In our descriptions of students' knowledge, we are identifying and cataloguing the pieces of knowledge or reasoning that students seem to be applying in problem situations. We are calling these pieces "facets". A facet is a convenient unit of thought, a piece of knowledge or a strategy seemingly used by the student in addressing a particular situation." Minstrell sieht in dieser Arbeit durchaus das Problem der "Korngröße" ("grain size of knowledge"), in dem er lange Listen solcher facets, die sich aus empirischen Untersuchungen ergeben haben, katalogisiert.

2.4.4 *Kognitive Werkzeuge*

Der Begriff kognitives Werkzeug wurde in unterschiedlicher Weise als "hypothetische kognitive Werkzeuge" (Niedderer & Goldberg 1995) und als "unbekannte kognitive Werkzeuge" ("Bausteine") (Aufschnaiter & Welzel 1997) eingeführt. Im folgenden sollen unter kognitiven Werkzeugen solche stabilen kognitiven Elemente verstanden werden, die qualitativ als "elementar" und die lange vor dem gerade analysierten Lernprozeß als stabil gelten können. Aus der Analyse von Zwischenzuständen im Lernprozeß erhalten wir Hypothesen über solche kognitiven Werkzeuge, die von den StudentInnen bei ihrer

Wissenskonstruktion benutzt worden sein könnten (Niedderer&Goldberg 1995, Petri&Niedderer 1998 a, b).

2.5 Vorstellungen: repräsentiert oder erzeugt?

Von den beiden Arbeitsgruppen Aufschnaiter und Niedderer im Bremer Institut für Didaktik der Physik werden verschiedene Auffassungen zu stabilen kognitiven Elementen (insbesondere Vorstellungen) und zu kognitiven Elementen vertreten, die in der folgenden Übersicht charakterisiert werden:

<u>Gemeinsame Auffassungen</u>	
<ul style="list-style-type: none"> • Vorstellungen werden situativ und immer wieder mit Hilfe von kognitiven Werkzeugen neu erzeugt. Man kann komplexe Vorstellungen nicht "haben". • Lernen als Wissensentwicklung 	
<u>Unterschiedliche oder gegensätzliche Auffassungen</u>	
Arbeitsgruppe Niedderer	Arbeitsgruppe von Aufschnaiter
<ul style="list-style-type: none"> • Wissen wird in Form von inhaltlich beschriebenen kognitiven Elementen (z.B. Vorstellungen) - als immer wiederkehrenden Konstruktionen aufgefasst - beschrieben, • Wissensentwicklung als die Veränderung stabiler kognitiver Elemente, entwickelt unter Zuhilfenahme kognitiver Werkzeuge. • Eine fachdidaktische Beschreibung von hypothetischen kognitiven Werkzeugen ist ein entscheidender Fortschritt auf dem Weg, Lernen als Entwicklungsprozeß zu beschreiben. 	<ul style="list-style-type: none"> • Wissen wird je inhaltspezifisch durch das vom Schüler erreichte Komplexitätsniveau beschrieben, • Wissensentwicklung als die Veränderung der Komplexität inhaltlicher Vorstellungen. • Die Bausteine kognitiver Werkzeuge sind sehr elementar und deshalb fachdidaktischer Forschung (noch) nicht zugänglich.

3 Entwicklungs-Strukturen

Mit dem Begriff Entwicklung soll hier der Überzeugung Ausdruck verliehen werden, daß Lernprozesse auch in der Physik sehr stark durch die Entwicklungsmöglichkeiten des jeweils individuellen kognitiven Systems bestimmt sind. Es geht darum, Lernen als Entwicklungsprozeß des kognitiven Systems zu begreifen, der stärker durch Struktur und Entwicklungsmöglichkeiten dieses Systems als durch die von außen kommenden Vorgaben gesteuert wird. Schnotz (1996) versteht in diesem Sinne Bruners Buch von 1966 als eine "Theorie der kognitiven Entwicklung".

3.1 Conceptual change / growth / development

Duit (1996) sieht den Zusammenhang zwischen Konzeptwechsel und kognitiver Entwicklung wie folgt: "Lernen wird als Prozeß der kognitiven Entwicklung gesehen, der von bestimmten vorunterrichtlichen, also in der kognitiven Struktur bereits vorhandenen, Vorstellungen ausgehend zur naturwissenschaftlichen Sichtweise führt." Konzeptwechsel wird dabei sowohl als conceptual growth und als conceptual change aufgefaßt.

3.2 Lernen und Selbstentwicklung

Stärker als die conceptual change Auffassungen sind die Arbeiten von Wolze (1989) "Zur Entwicklung naturwissenschaftlicher Erkenntnisssysteme im Lernprozeß" und die Arbeiten von Aufschnaiter (1991) "Lernen ist Selbstentwicklung eines kognitiven Systems" und Aufschnaiter & Welzel (1997) "Wissensvermittlung durch Wissensentwicklung" dem Entwicklungsgedanken von Lernen verpflichtet. Fischer (1994, S.25) beschreibt Lernen als Entwicklung subjektiver Erfahrungsbereiche. Auch diSessa (1990, S. 5 f) spricht von "system development" und sieht als Ziel "to understand the genesis and development of the system."

3.3 Systeme und Systemdynamik

Wenn man von Systemen spricht, spricht man im allgemeinen von Strukturen, die aus Elementen verschiedener Art und ihren Wechselwirkungsbeziehungen bestehen. Wenn man von Systemdynamik spricht, bedeutet dies, daß das System allein aus sich heraus oder in Wechselwirkung mit der Umgebung fähig ist, Veränderungen von sich selbst zu generieren. Betrachten wir Lernen in diesem Zusammenhang, so ist es ein Entwicklungsprozeß, in dem die Selbst-Entwicklung des kognitiven Systems in Wechselwirkung mit der Lernumgebung eine zentrale Rolle spielt. Dabei geschehen Einwirkungen der Lernumgebung nur indirekt, sie werden in ihrer Wirkung begrenzt durch die Entwicklungsmöglichkeiten des derzeitigen Entwicklungsstandes des Systems.

3.4 Was heißt "Lernen als kognitive Entwicklung"? Eine Analogie

Mit der folgenden Analogie soll der Entwicklungsgedanke veranschaulicht werden.

Wachstum	Lernen	
• Regen	• Arbeitsmittel	Mit dem Begriff "Entwicklung" wollen wir hier also betonen, daß Lernen neben den Einflüssen aus der Lernumgebung sehr wesentlich durch die Eigengesetzlichkeit der Systementwicklung des kognitiven Systems bestimmt wird. Für die
• Klima	• Belohnung	
• genetische Anlagen	• kognitive Werkzeuge	
• Aufbau der Pflanze	• kognitives System	
• bisheriges Wachstum	• Vorverständnis	
• Gärtner	• Lehrer	

weitere Erforschung der Lernprozesse stellt sich daher eine Beschreibung des kognitiven Systems und seiner Entwicklungsmöglichkeiten als Hauptzielrichtung dar.

4 Empirische Ergebnisse zu Aspekten von Physiklernen als kognitiver Entwicklung

4.1 Erreichbare nächste Zustände als Entwicklungsstadien

4.1.1 *Zwischenzustände als Endresultat des Lernens*

Ein deutlicher Hinweis auf die Entwicklungsmöglichkeiten als begrenzender Faktor für Lernen sind die zahlreichen Resultate darüber, wie Lernen zu anderen als den intendierten Ergebnissen führt. Eines der besten Beispiele ist die von Goldberg und Mitarbeitern gegebene Beschreibung der nach dem Unterricht über geometrische Optik erreichten Vorstellungen als Zwischenvorstellungen, die zwar gegenüber den Anfangs- oder Alltagsvorstellungen als verändert erscheinen, so daß von Lernen gesprochen werden kann, aber doch noch deutlich unterschieden sind von den im Unterrichtsansatz angestrebten Vorstellungen (Galili et al. 1993, Goldberg 1994, S. 45 ff). Die Autoren fanden zu Beginn des Unterrichts eine holistische Vorstellung von der Bildentstehung. Ihr Ziel war es, zu einer Vorstellung der Bildentstehung im Sinne der geometrischen Optik zu kommen, bei der berücksichtigt wird, daß von jedem Gegenstandspunkt beliebig viele Strahlen ausgehen. Die empirischen Ergebnisse zeigten, daß die meisten Studenten nach dem Unterricht eine verbesserte, aber immer noch unzureichende Vorstellung der Bildentstehung haben, die Autoren als "relevant ray diagram" bezeichnen. Diese Vorstellung nach dem Unterricht wird auch als "hybrid conceptualisation of image formation" bezeichnet, die durch die Verwendung ausgewählter Strahlen zur Bildkonstruktion gekennzeichnet ist. Die Studenten kommen damit auch zu ungenügenden Erklärungen von Vorgängen, zum Beispiel der entstehenden Unschärfe bei größerer Entfernung des Bildschirms.

4.1.2 *Zwischenzuständen als mögliche neue Lernziele oder "stepping stones"*

Ähnliche Ergebnisse wurden auch in einer Studie von Tiberghien (1997) erzielt. Das von den Schülern am Ende des Unterrichts erreichte Wissen (step of learning) unterschied sich deutlich von dem angestrebten Wissen (knowledge to be taught). Das Neue an der Arbeit von Tiberghien ist nun, daß sie vorschlägt, die empirisch festgestellten Zwischenzustände am Ende des Unterrichts als realistische Entwicklungsmöglichkeiten aufzufassen und als reduzierte Lernziele vorzuschlagen: "The aim is to allow the design of teaching situations more relevant for learning ... These results show a gap between the teaching aim and the students' acquisition. What is learned by the students was not intended by the designers of the teaching sequence. This gap leads us to propose a modification of the knowledge to be taught. In particular the learning step concerning the

insulation situations is meaningful enough to be considered as an intermediary notion between what is usually intended in curriculum and students' prior knowledge."

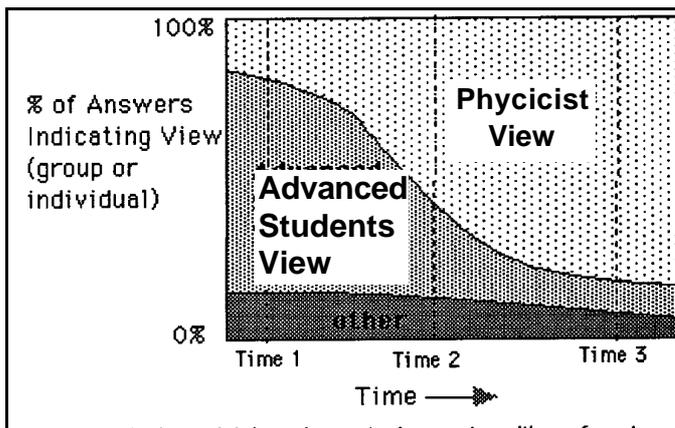
Brown & Clement (1992) haben in ähnlicher Weise vorgeschlagen, vorläufige Begriffe auf dem Weg zum physikalischen Begriff Trägheit zu verwenden. Im einzelnen schlagen sie vor, daß der Lehrer im Unterricht explizit auf folgende Zwischenvorstellungen ("intermediate conceptions") zum Begriff Trägheit hinarbeitet:

- Ein Widerstand gegen Beschleunigung ("hold back tendency")
- Eine Tendenz zum Weiterlaufen ("keeps going tendency")

Diese vorläufigen Begriffe sehen sie als Meilensteine beim Lernen ("stepping stones") und interpretieren ihre Ergebnisse dahingehend, daß das explizite Anstreben solcher Zwischenvorstellungen den Unterrichtserfolg nachweisbar verbessert.

4.1.3 *Zwischenzustände als "conceptual dynamics" im Verlauf des Lernens*

Thornton (1995) beschreibt Lernprozesse als "conceptual dynamics". Er beschreibt den jeweiligen Wissensstand als "view" und unterscheidet verschiedene Stufen eines "student view" und letzten Endes den vom Unterricht angestrebten "physicist view".

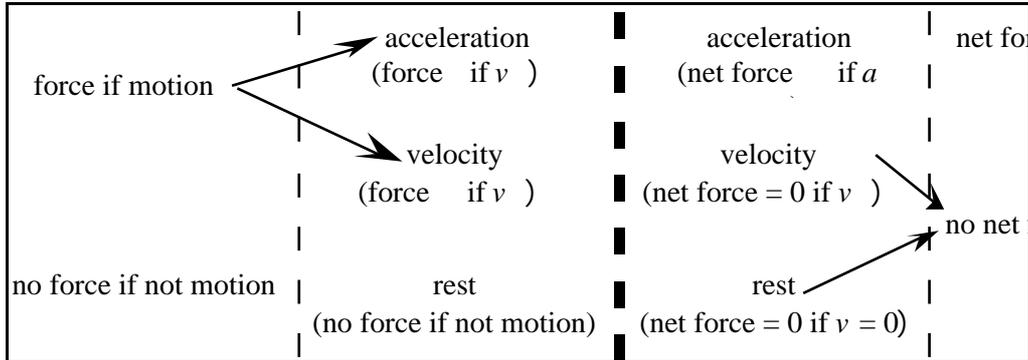


Das nebenstehende Bild zeigt modellhaft den allmählichen Übergang von einem "advanced students view" zu einem "physicist view", wie er sich aus den an drei Zeitpunkten gemessenen Daten (im Mittel) ergibt.

4.1.4 *Lernpfade als nacheinander durchlaufene Zwischenzustände*

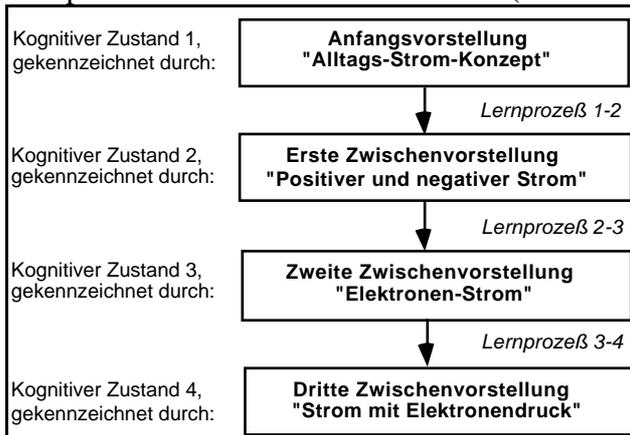
Aus den Diskussionen des internationalen Workshops "Research in Physics Learning" 1991 (Duit, Goldberg & Niedderer 1992) in Bremen hat sich als zentraler Begriff zur Beschreibung von Lernprozessen der Begriff "learning pathway" oder "Lernpfad" ergeben. Diese Darstellung der Lernpfade dient zunächst der qualitativen Beschreibung von Lernprozessen durch ihre stroboskopisch erfaßten stabilen oder metastabilen Zwischenzustände. In den Bremer Untersuchungen werden diese häufig an einem einzelnen Schüler und dessen Lernprozeß erhoben und analysiert. Es folgt zunächst ein Beispiel aus der Mechanik, danach geben wir den Lernpfad aus einer Untersuchung beim elektrischen Stromkreis wieder und enden mit einem Lernpfad im Bereich der Quanten-Atomphysik.

A series of conceptual changes (Dykstra 1992)



In diesem Bild wird die Entwicklung von Schülervorstellungen zum Kraftbegriff über 4 Stationen beschrieben. Als entscheidende Schritte werden die Differenzierung von Beschleunigung und Geschwindigkeit und ihr richtiger Zusammenhang mit Kraft dargestellt.

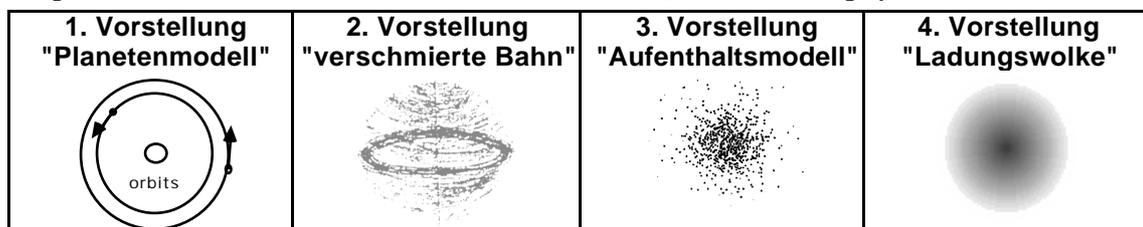
Lernpfad beim elektrischen Stromkreis (Niedererer&Goldberg 1995)



In dieser Studie werden Vorstellungen von drei Studentinnen in einem Kurs für zukünftige Primarstufenlehrerinnen analysiert. Der Prozeß beginnt mit der bekannten Anfangsvorstellung und führt über zwei Zwischenstadien "positiver und negativer Strom" und "Elektronenstrom" zu einem Endzustand "Strom mit Elektronendruck", der jedoch

auch noch deutliche Defizite gegenüber dem wissenschaftlichen und angestrebten Konzept hat.

Lernpfad eines Schülers Carl beim Unterricht über Quanten-Atomphysik (Petri 1996)



Dieser Lernprozeß im Bereich der Atomvorstellungen und ihrer Entwicklung in einem Quanten-Atomphysikkurs in einem Leistungskurs Physik im 13. Schuljahr wird gekennzeichnet durch vier aufeinanderfolgende Atommodelle, die von dem untersuchten

Schüler nacheinander gebildet werden. Sie sind hier nur grafisch repräsentiert, sind aber in der angegebenen Literatur (Petri 1996, Petri&Niedderer 1998 a, b) ausführlich dargestellt und belegt.

4.1.5 Zwischenzustände als "kognitive Attraktoren"

Den Begriff "kognitiver Attraktor" haben wir eingeführt, um solche Zwischenvorstellungen zu beschreiben, die in einem Themengebiet besonders häufig auftreten, häufig unabhängig von der speziellen Art des Unterrichts. Sie sind damit ein direkter Beleg für Gesetzmäßigkeiten der Selbstentwicklung des kognitiven Systems beim Physiklernen. In beiden unten dargestellten Beispielen wurden diese Vorstellungen vom Lehrer nicht angestrebt. Beide beobachteten Zwischenvorstellungen finden sich jedoch als Ergebnis mehrerer Untersuchungen bei anderen Autoren.

Das erste Beispiel stammt aus einer Untersuchung des Lernprozesses mit drei amerikanischen College Studentinnen (Niedderer&Goldberg 1995). Sie entwickelten im Verlauf der experimentellen Aufgabe, ein Lämpchen mit einer Monozelle zum Leuchten zu bringen und anschließenden Beschreibungsaufgaben eine veränderte Auffassung vom elektrischen Stromkreis, die wir als "Plus- und Minusstrom" beschrieben haben: Positive und negative Ladungen kommen durch zwei verschiedene Verbindungen von der Batterie (+, -) zum Lämpchen (Fußpunkt, Gewinde). Durch ihr Zusammentreffen erzeugen sie Licht in der Lampe. Ähnliche Ergebnisse wurden von Shipstone (1985) und Schwedes (1992) beobachtet.

Das zweite Beispiel ist die Bildung einer Zwischenvorstellung "verschmierte Bahnen" im Atom (Petri 1996). Diese Zwischenvorstellung kann in drei verschiedenen Formen vorkommen, einer Wellenbahn, einer verschmierten unscharfen Bahn oder einer Bündelung von benachbarten Bahnen (siehe unten). Sie wurde ebenfalls von verschiedenen Autoren bereits früher beobachtet (Bayer 1986, Bethge 1988).

4.2 Analyse von Physiklernen als kognitive Entwicklung

4.2.1 Kognitive Bausteine

Eine Teilidee zum Physiklernen als kognitive Entwicklung wurde von verschiedenen Autoren schon früh erkannt: Die Möglichkeit, (falsche) Schülervorstellungen nicht nur als zu überwindendes Hindernis für den Unterricht zu betrachten, sondern diese Schülervorstellungen als Bausteine für den Aufbau neuerer verbesserter Vorstellungen zu benutzen. In ihrem Artikel "Not all preconceptions are misconceptions: Finding 'anchoring conceptions' for grounding instruction on students' intuition" (Clement et al. 1989) suchen die Autoren ausdrücklich nach solchen Vorstellungen, die als Ausgangspunkt für den Aufbau intendierter verbesserter physikalischer Vorstellungen hilfreich sein können. Auf dem Weg zu einer richtigen Vorstellung des Newtonschen 3. Axioms am Beispiel "Buch auf dem Tisch", bei dem es um die Frage geht, ob der

"passive" Tisch eine Kraft auf das Buch ausübt, finden sie zum Beispiel Vorstellungen der Schüler beim Drücken mit der eigenen Hand auf eine Feder oder beim Halten eines schweren Buches in der eigenen Hand als Bausteine für eine kognitive Entwicklung.

4.2.2 Analyse der Entwicklung von Zwischenvorstellungen aus der Wechselwirkung von kognitiven Werkzeugen und Unterricht

Niedderer und Goldberg (1995) beschreiben die Entwicklung einer neuen, vom Lehrer nicht beabsichtigten Zwischenvorstellung "Elektronenstrom". Sie entsteht im Laufe eines offenen Unterrichtsgesprächs über den Stromkreis, in dem das Ziel des Lehrers die Einführung des Elektronendrucks und die Vorstellung einer Spannung als Elektronendruck-Differenz ist. Dabei verwendet der Lehrer den Begriff Elektron eher nebenbei, dieser wird jedoch von den Studentinnen bereitwillig und mit großer Resonanz aufgegriffen. Die dabei gebildete Zwischenvorstellung konnte als wirksam in dieser und der nächsten Doppelstunde nachgewiesen werden. Die transkribierten Dialoge zwischen dem Lehrer und den Studentinnen belegen deutlich die große Resonanz auf Seiten der Studentinnen, die das Arbeiten mit dem Begriff Elektron hervorruft. Die kognitive Analyse dieses positiv verlaufenen Lernprozesses gelingt durch Annahme folgender plausibler kognitiver Werkzeuge:

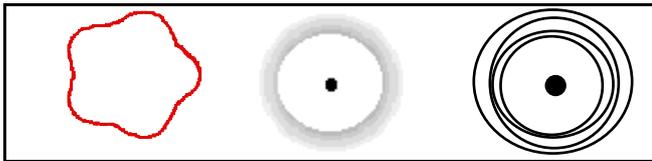
- Hypothetische "kognitive Werkzeuge", die zur Entwicklung der Zwischenvorstellung "Elektronenstrom" beigetragen haben könnten:**
- Denkraum: Elektron ist ein moderner, von Experten benutzter Begriff
 - Physiknahestehende kognitive Werkzeuge (elementare Vorstellungen)
 - Das "Elektron" als "Teilchen"
 - "Positive" und "negative" Ladungen; Abstoßung und Anziehung
 - Kognitive Werkzeuge aus der Alltagswelt (Sprachelemente)
 - Teilchen können sich "bewegen", etc.
 - Teilchen können andere Teilchen oder Atome "stoßen"
 - Man kann die "Anzahl" der Teilchen angeben
 - Teilchen "brauchen freien Raum" um sich zu bewegen.

Wir interpretieren die beobachtete hohe Motivation durch das Erlebnis der eigenen Kompetenz, welches mit dieser kognitiven Entwicklung einhergeht. Hierin ist auch der Antrieb für diese kognitive Entwicklung zu sehen. Im Sinne von Glasersfelds (1992) interpretieren wir den Entwicklungsvorgang als Resonanz zwischen Lernumgebung und kognitivem System.

Im folgenden zweiten Beispiel interpretieren wir die Entwicklung einer Zwischenvorstellung "verschmierte Bahn" beim Unterricht über Quanten-Atomphysik im 13. Schuljahr (Petri&Niedderer 1998 a, b) aus der Wechselwirkung von kognitiven Werkzeugen und Unterrichtsinhalten wie folgt:

Kognitive Werkzeuge	Unterricht
<ul style="list-style-type: none"> • Ein "Elektron" ist ein "Teilchen". (Elementare Vorstellung, Bohrmann 1987) • Ein Atom besteht aus einem Kern und darum kreisenden Elektronen. (Elementare Vorstellung, Knotte 1976, u.v.a.) • Ein Teilchen kann sich bewegen. (Sprachliches Element) 	<ul style="list-style-type: none"> • Für Quanten gilt eine Unschärferelation mit der Planckschen Konstante h. • Mit der Elektronenbeugung wird eine Wellenvorstellung über Elektronen eingeführt. • Die Psi - Funktion macht Angaben über Möglichkeiten und Wahrscheinlichkeiten.

Für die genannten elementaren Vorstellungen gibt es über die genannten Belege hinaus zahlreiche Untersuchungsergebnisse.



Es erscheint plausibel, daß sich aus der Wechselwirkung der genannten kognitiven Werkzeuge und der genannten zentralen Unterrichtsinhalte

Zwischenvorstellungen in den obenstehenden drei möglichen Formen ergeben, die auch beobachtet wurden.

Belege (Aussagen des Schülers Carl (C.) im Unterricht, Petri 1996):

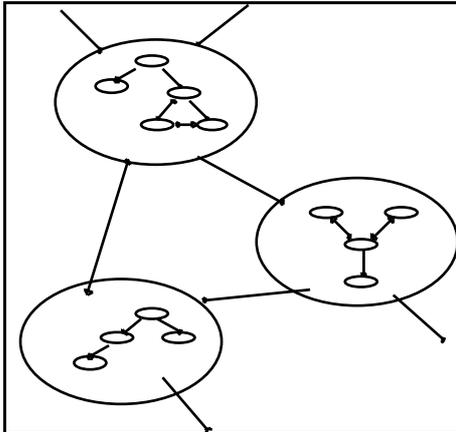
Zu *Zwischenvorstellung 1*:
C: Das kann ja auch so 'ne Bahn sein. Was weiß ich, so 'ne schwingende Bahn.
Zu *Zwischenvorstellung 2*:
C: ... Und von diesem Elektron - das ist ja also ein Quant - können wir ziemlich genau sagen, daß es sich halt auf dieser Bahn bewegt. (...)
C. Nicht ganz genau, nee! Das ist nicht möglich nach der Quantenmechanik!
Zu *Zwischenvorstellung 3*:
C: Stellt Paul (ein anderer Schüler, H.N.) sich das jetzt so vor, daß diese Hülle so 'ne Art Bereich ist, wo sich das Elektron drauf bewegen kann? (Carls Hände vollziehen kreisende Bewegungen in verschiedene Richtungen) (...)

4.3 Endzustand nach dem Lernen

4.3.1 Verschiedene Vorstellungen über den Endzustand

Auf das Problem des Endzustandes nach einem Lernprozeß wurde bereits in dem einleitenden "wissenschaftslogischen Kompetenzerwerbsmodell" (Schenk et al 1982) hingewiesen. Die Erwartung, daß der Endzustand nach dem Lernen den Zielen und Erwartungen des Lehrers bzw. der Wissenschaft Physik gleicht, ist vermutlich bei vielen Fachdidaktikern und Lehrern vorherrschend. Alles andere wird eher als Mißerfolg interpretiert. Nach neueren theoretischen Überlegungen und empirischen Ergebnissen ist jedoch davon auszugehen, daß der Endzustand nach dem Lernen immer ein komplexes Nebeneinander von alten und neuen Vorstellungen, von alten und neuen kognitiven Elementen darstellt, die mehr oder weniger vermischt, getrennt oder verbunden vorliegen können.

4.3.2 Der Endzustand als "Raum möglicher Repräsentationssysteme"



Plötzner (1998) behandelt in seiner psychologisch-physikdidaktischen Habilitationsschrift den Endzustand nach einem Lernprozeß als einen "Raum möglicher Repräsentationssysteme" und einen "Problemraum zweiter Ordnung". In der nebenstehenden Abbildung aus seiner Arbeit wird dies grafisch als ein Nebeneinander von verschiedenartigen Repräsentationen (z.B. mentalen Modellen) dargestellt.

4.3.3 Koexistenz von Vorstellungen

Einer der ältesten Belege für die Koexistenz von mehreren Vorstellungen nach dem Unterricht ist die Arbeit von Scott (1987, 1992). Darin wird durch qualitative Analyse der Dialoge mit einer Schülerin Sharon belegt, daß Sharon nach einem Unterricht über ein Teilchenmodell der Gase zwar bevorzugt dieses neue Modell verwendet, aber auch deutlich die Vorzüge des alten Modells - zum Beispiel in der Kommunikation im Alltag - beschreibt, also beide Vorstellungen parallel aktivieren kann.

4.3.4 Der Endzustand dargestellt mit verschiedenen Schichten

Endzustandes von Carls kognitivem System "Atom"			
Schicht des kognitiven Systems		Stärke	Status
Planetenmodell		hoch	gering
Wahrscheinlichkeitsmodell		mittel	mittel
Elektronenwolke		mittel	hoch

In der Dissertation von Petri (1996) wird der Endzustand von Carls kognitivem Teil-System "Atom" durch mehrere Schichten beschrieben, die durch ihre jeweilige Stärke (= Wahrscheinlichkeit ihrer Aktualisierung) und ihren jeweiligen Status (= Zuweisung von physikalischer Richtigkeit) gekennzeichnet werden.

Diese Darstellung wurde aus der interpretativen Analyse von Unterrichtstranskripten am Ende des Unterrichts, einem Interview direkt nach dem Unterricht und einem Interview 3 Monate danach gewonnen. Sie beschreibt im einzelnen folgende Tatsachen:

- Carl benützt am Ende des Unterrichts außer dem angestrebten Elektronenwolkenmodell auch noch andere Modelle zur Beschreibung des Atoms, insbesondere das Planetenmodell und das Wahrscheinlichkeitsmodell.
- In vielen, insbesondere neuartigen Kontexten benützt Carl zunächst das alte Planetenmodell. Diese Vorstellung scheint am leichtesten verfügbar. Diese kognitive Schicht hat also die größte "Stärke".

- Oft genügt aber schon, daß der Interviewer nur nach der entsprechenden Antwort mit dem Planetenmodell einfach wartet oder irgendeinen kleinen Hinweis gibt, um Carl dazu zu bringen, insbesondere das Elektronenwolkenmodell von sich aus zu verwenden. Er begleitet dies in der Regel mit Aussagen wie "Das ist doch viel besser" oder "Das hat mir im Unterricht viel geholfen". Wir interpretieren das so, daß diese Vorstellung für ihn den höchsten Status hat.

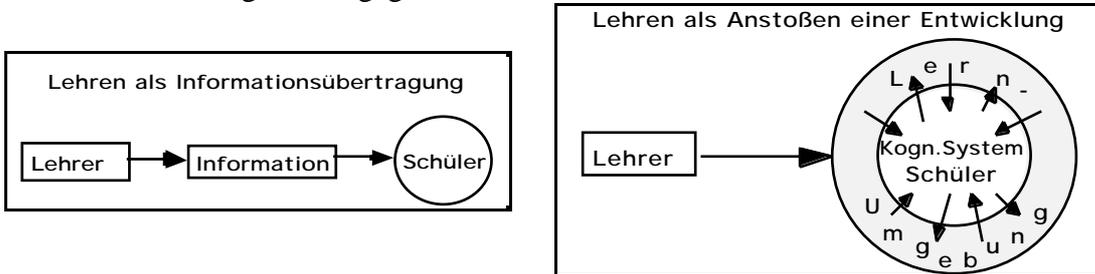
Wir meinen, daß diese neuartige Vorstellung vom Endzustand mit mehreren nebeneinander bestehenden Vorstellungen oder Schichten ein neues Licht auf zahlreiche Ergebnisse aus Vorstellungsuntersuchungen wirft, bei denen nach dem Unterricht häufig nur die alten Vorstellungen gefunden wurden. Es könnte sehr wohl sein, daß die dort verwendeten Untersuchungsmethoden nicht besonders geeignet waren, die neben diesen alten Vorstellungen ebenfalls angelegten neueren Vorstellungen bei den Schülern überhaupt zu erfassen.

5 Antriebskräfte der Entwicklung

Jede Entwicklung braucht Antriebskräfte. Wir interpretieren im Sinne dieses Ansatzes Motivation als Entwicklungsenergie. Auf die Funktion von Kompetenzerleben haben wir oben schon hingewiesen, bei C.v. Aufschnaiter (1999) finden sich entsprechende neuere Detailergebnisse zum Erleben von Kompetenz. Die Verbesserung der Motivation ist eine der wichtigsten Fragen fachdidaktischer Arbeit. Im Rahmen der beruflichen Bildung hat das Konzept der "Entwicklungsaufgabe" von Schenk et al. (1982) große Beachtung gefunden. Der Begriff Entwicklungsaufgabe wurde aus der Bildungssoziologie entnommen und bezeichnet "große" Aufgaben, die das Subjekt in seiner ganzen Person in Anspruch nehmen. Von Schenk et al. (1982) wurden Entwicklungsaufgaben im Zusammenhang mit Physik beschrieben als manipulative und erklärende Aneignung der materialen Umwelt oder als Bewältigung der Aufgaben Berufswahl und Volljährigkeit. Der Ansatz "Lernen im sinnstiftenden Kontext" (Muckenfuß 1995) und der Ansatz "Erlebniswelt Physik" (Labudde 1993) versuchen, die subjektive und objektive Bedeutung der Physik im Leben der Kinder herauszuarbeiten und für den Physikunterricht nutzbar zu machen. In den seit 1990 in Physikgrundkursen der Universität Bremen eingeführten Miniprojekten (die letzten zwei bis drei Wochen eines Experimentalpraktikums) spielt die individuelle Komponente, am besten bezeichnet mit dem Wort "ownership", eine tragende Rolle und führt zu einer hohen Motivation und einem erstaunlichen Einsatz von Zeit bei der Bearbeitung dieser selbstgestellten projektartigen Aufgaben im Praktikum. Ähnliche Beobachtungen wurden in dem Bremer Schulbegleitforschungsprojekt "Kursübergreifende umweltorientierte Projekte in der gymnasialen Oberstufe - Bio/Physik (KUP)" gemacht; auch hier scheint die selbst gewählte Fragestellung und die eigene Verantwortung für die Erarbeitung und Darbietung der entsprechenden Ergebnisse dazu zu führen, daß Motivation und Arbeitseinsatz der Schüler in einem solchen Projektunterricht ein erstaunlich hohes Maß erreichen.

6 Entwicklungsgesetz beim Lernen und Lehren

Zunächst scheinen sich die beiden folgenden Auffassungen von Lehren und Lernen als unversöhnliche Gegensätze gegenüber zu stehen:



Man muß jedoch bedenken, daß das Prinzip "Lernen als kognitive Entwicklung" bei jeder Art von Unterrichtsstrategie gilt, auch wenn der Lerner einem geschlossenen vorlesungsähnlichen Vortrag folgt. Die Praxis von Unterricht ist durch eine Vielzahl von Unterrichtsformen bestimmt, von denen viele eine Berechtigung haben, insbesondere auch der vorlesungsartige darbietende Stil. Bei Vygotsky (1978) findet sich dazu eine verbindende Idee. Er schlägt zwei verschiedene Entwicklungsstufen vor, die Stufe "actual developmental level" und die Stufe "zone of proximal development". Er erklärt die Bedeutung beider Entwicklungsstufen wie folgt: "That what is the zone of proximal development today will be actual developmental level tomorrow. That is what a child can do with assistance to day she will be able to do by herself tomorrow."

Lernen stellt immer einen Entwicklungsprozeß des kognitiven Systems dar. Aber dieser Prozeß kann in verschiedener Weise von außen durch die Lernumgebung beeinflusst werden. In diesem Sinne plädiere ich für die Verbindung von

- darbietendem Unterricht und problemlösendem Unterricht
- lehrer- und schülerorientiertem Unterricht
- Kurs- und Projektunterricht.

Sie scheinen im Sinne Vygotskys einander ergänzende Aufgaben beim Lernen zu haben. Dagegen ist ihre undurchsichtige Vermischung beim sogenannten fragend entwickelnden Unterricht möglicherweise eher eine Hemmung für die eigenständige kognitive Entwicklung des Schülers.



Wenn man in diesem Sinne zwischen "formalem" und "genetischem" Lehren - nicht Lernen - unterscheidet, so gilt für beide: Lernen kann nicht direkt durch den Lehrer bestimmt werden, sondern Lernen ist ein Entwicklungsprozeß des kognitiven Systems in Wechselwirkung mit der Lernumgebung.

vom Lehrer bestimmt werden.

Nur die Lernumgebung kann

7 Literaturangaben

- Aufschnaiter, C.v. (1999). Bedeutungsentwicklungen, Interaktionen und situatives Erleben beim Bearbeiten physikalischer Aufgaben. Dissertation Universität Bremen. In: Niedderer, H. & Fischler, H. (Hrsg.). Studien zum Physiklernen, Bd. 3. Berlin: Logos
- Aufschnaiter, S. v. & Welzel, M. (1997). Wissensvermittlung durch Wissensentwicklung. Das Bremer Komplexitätsmodell zur quantitativen Beschreibung von Bedeutungsentwicklung und Lernen. Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, 3(2), 43-58.
- Aufschnaiter, S. von (1991). Lernen ist Selbstentwicklung eines kognitiven Systems. In: Wiesner, H.: Aufsätze zur Didaktik der Physik II. Festschrift zum 65. Geburtstag von Walter Jung. Bad Salzdetfurth: Franzbecker, 1-11
- Bayer, H.J. (1986). Schuelervorstellungen beim Uebergang vom Bohrschen zum wellen-mechanischen Atommodell. In: Kuhn, W.: Didaktik der Physik. Vortraege auf der Physikertagung 1986 in Giessen. Giessen: DPG-Fachausschuss Didaktik der Physik, 249-256
- Bethge, T. (1988). Aspekte des Schuelervorverständnisses zu grundlegenden Begriffen der Atomphysik - Eine empirische Untersuchung in der Sekundarstufe II. Dissertation Universität Bremen
- Bormann, M. (1987). Das Schuelervorverstaendnis zum Themenbereich "Modellvorstellungen zu Licht und Elektronen". In: Kuhn, W. (Hrsg.): Didaktik der Physik. Vortraege der Physikertagung 1987 in Berlin. Giessen: DPG Fachausschuss Didaktik der Physik, 475-481
- Brown, D.E., Clement, J. (1992). Classroom teaching experiments in mechanics. In: Duit, R., Goldberg, F., Niedderer, H.: Research in physics learning: Theoretical issues and empirical studies. Kiel: IPN, 380-397
- Clement, J., Brown, D.E., Zietsman, A. (1989). Not all preconceptions are misconceptions: finding "anchoring" conceptions' for grounding instruction on students' intuitions. International Journal of Science Education 11, 554-565
- diSessa, A.A. (1990). Toward an estimology of physics. I.R.L. Report Nr. I.R.L. 90-0023. Palo Alto
- Duit, R., Goldberg, F.M., Niedderer, H. (1992). Research in physics learning: Theoretical issues and empirical studies. Kiel: IPN
- Duit, R. (1996). Lernen als Konzeptwechsel im naturwissenschaftlichen Unterricht. In: Duit, R., von Rhoeneck, C.: Lernen in den Naturwissenschaften. Kiel: IPN, Kiel, 145-162
- Dykstra, D.I. (1992). Studying conceptual change: Constructing new understandings. *In: Duit, R., Goldberg, F., Niedderer, H.: Research in physics learning: Theoretical issues and empirical studies. Kiel: IPN, 40-58 #g1,g7,P,M
- Fischer, H.E. (1994). Physiklernen: Eine Herausforderung fuer Unterrichtsforschung - Arbeiten zur Lernprozessforschung im Physikunterricht. Frankfurt am Main: Peter Lang Didaktik und Naturwissenschaften
- Galili, I., Bendall, S., Goldberg, F.M. (1993). The effects of prior knowledge and instruction on understanding image formation. *Journal of Research in Science Teaching 30, 3, 271-301 #g6,P,O,OCI
- Galili, I. (1998). On students' knowledge of light: A perspective of light ray and light flux concepts. In: Deutsche Physikalische Gesellschaft, Fachverband Didaktik der Physik (Hrsg.). Didaktik der Physik: Vorträge - Physikertagung 1998 - Regensburg. Bad Honnef: DPG, 33-48
- Glaserfeld, E. von (1992). A constructivist's view of learning and teaching. In: Duit, R., Goldberg, F., Niedderer, H.: Research in physics learning: Theoretical issues and empirical studies. Kiel: IPN, 29-39
- Goldberg, F. (1994). Overview of physics education research in the United States and development of interactive multimedia programs in geometrical optics. In: Deutsche Physikalische Gesellschaft, Fachverband Didaktik der Physik (Hrsg.). Didaktik der Physik: Vorträge - Physikertagung 1994 - Hamburg. Bad Honnef: DPG 37-56.
- Hericks, U. (1993). Über das Verstehen von Physik. Waxmann, Münster, New York. (Dissertation Universität Münster) .
- Knote, H. (1975). Zur Atomvorstellung bei Dreizehn- bis Fuenfzehnjaehrigen. Der Physikunterricht 4, 86-96
- Labudde, P. (1993). Erlebniswelt Physik. Bonn: Duemmler
- Minstrell, J. (1992). Facets of students' knowledge and relevant instruction. In: Duit, R., Goldberg, F., Niedderer, H.: Research in physics learning: Theoretical issues and empirical studies. Kiel: IPN, 110-128
- Muckenfuß, H. (1995). Lernen im sinnstiftenden Kontext - Entwurf einer zeitgemäßen Didaktik des Physikunterrichts. Berlin: Cornelsen.
- Niedderer, H. (1982). Probleme der Lebenswelt, Vorverstaendnis der Schueler und Wissenschaftstheorie der Physik als Determinanten fuer den Physikunterricht. In: Fischler, H.: Lehren und Lernen im Physikunterricht. Koeln: Aulis, 105-132

- Niedderer, H., Schecker, H. (1992). Towards an explicit description of cognitive systems for research in physics learning. In: Duit, R., Goldberg, F., Niedderer, H.: Research in physics learning: Theoretical issues and empirical studies. Kiel: IPN
- Niedderer, H., Goldberg, F. (1995). Lernprozesse beim elektrischen Stromkreis. Zeitschrift fuer Didaktik der Naturwissenschaften 1, 1, 73-86
- Niedderer, H. (1996). Überblick ueber Lernprozessstudien in Physik. In: Duit, R., von Rhoebeck, C.: Lernen in den Naturwissenschaften. Kiel: IPN, Kiel, 119-144
- Petri, J. (1996). Der Lernpfad eines Schuelers in der Atomphysik. Eine Fallstudie in der Sekundarstufe II. Dissertation Universität Bremen. Aachen: Verlag Mainz, Wissenschaftsverlag
- Niedderer, H., Petri, J. (1998 a). Kognitive Modellierung von physikalischem Wissen am Beispiel Atomphysik - In H. Behrendt (Hrsg.). Zur Didaktik der Physik und Chemie. Alsbach: Leuchtturm, 319-321
- Petri, J., Niedderer, H. (1998 b). A learning pathway in high-school level quantum atomic physics. *Int. J. Sci. Educ.*, Vol. 20, No. 9, 1075-1088
- Petri, J., Niedderer, H. (1998 c). Die Rolle des Weltbildes beim Lernen von Atomphysik - Eine Fallstudie zum Lernpfad eines Schülers. Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften ZfDN 4 (1998), Heft 3, S. 3 - 18
- Plötzner, R. (1998). Flexibilität im Problemlösen und Lernen - Konstruktion, Anwendung und Koordination von Repräsentationssystemen. Psychologia Universalis. Lengerich: Pabst Science Publishers.
- Schecker, H. (1985). Das Schuelerverstaendnis zur Mechanik. Dissertation Universitaet Bremen
- Schenk, B., Hasler, N., Nothold, K., Thol, K. (1982). Bericht I der Physik-Studie: Die vier Evaluationsaufgaben als Testinstrument der Entwicklung physikalisch-technologischer Kompetenz. Wissenschaftliche Begleitung Kollegschule Nordrhein-Westfalen, Münster.
- Schnotz, W. (1996). Psychologische Ansaetze des Wissenserwerbs und der Wissensveraenderung. In: Duit, R., von Rhoebeck, C.: Lernen in den Naturwissenschaften. Kiel: IPN
- Schwedes, H., Schmidt, D. (1992). Conceptual change: A case study and theoretical comments. In: Duit, R., Goldberg, F., Niedderer, H.: Research in physics learning: Theoretical issues and empirical studies. Kiel: IPN, 188-202
- 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. In: Novak, J.: Proceedings of the 2. Int. Seminar "Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics", Vol.II. Ithaca: Cornell University, 404-419
- Scott, P.H. (1992). Pathways in learning science: A case study of the development of one student's ideas relating to the structure of matter. In: Duit, R., Goldberg, F., Niedderer, H.: Research in physics learning: Theoretical issues and empirical studies. Kiel: IPN, 203-224
- Shipstone, D.M. (1985). Electricity in simple circuits. In: Driver, R., Guesne, E., Tiberghien, A.: Children's ideas in science. Milton Keynes: Open University Press, 33-51
- Thornton, R. (1995). Conceptual dynamics. In: Bernardini, C., Tarsitani, C., Vicentini, M.: Thinking physics for teaching. New York: Plenum Press, 157-183
- Tiberghien, A. (1997). Learning and teaching: Differentiation and Relation. Research in Science Education, 27(3), 359-382.
- Viennot, L. (1995). A multidimensional approach to characterise a conceptual 'state' in students: The role played by questions. In: Psillos, D.: European Research in Science Education II. Thessaloniki: Art of Text S.A., 178-187
- Vygotsky, L.S. (1978). Mind in society - the development of higher psychological processes. Cambridge: Harvard University Press.
- Vosniadou, S., Ioannidis, C. (1998). From conceptual development to science education: A psychological point of view. International Journal of Science Education, 20, 10, 1213-1230.
- Wagenschein, M., Banholzer, A., Thiel, S. (1973). Kinder auf dem Wege zur Physik. Stuttgart: Klett
- Wolze, W. (1989). Zur Entwicklung naturwissenschaftlicher Erkenntnisssysteme im Lernprozeß. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.