

Fachdidaktische Forschungen am Beispiel eines Curriculums zur Optik

Thomas Weber, Lutz-Helmut Schön

(aus: H. Bayrhuber et al. (Hrsg.). *Lehr-/Lernforschung in den Fachdidaktiken*. Innsbruck : Studienverlag, 2001)

Vorbemerkung

Am Beispiel fachdidaktischer Forschungen im Rahmen der Entwicklung und Erprobung des Curriculums "Vom Sehen zur Optik" soll deutlich werden, dass solche Arbeiten hinsichtlich ihrer Zielsetzung, ihrer Methoden und ihres theoretischen Hintergrundes sehr unterschiedlich einzuordnen sind. Es wird vorgeschlagen, drei Forschungsansätze der Fachdidaktik zu unterscheiden, *fachinhaltliche fachdidaktische Forschung*, *Evaluationsforschung* und *empirische pädagogische Forschung*. Diese Ansätze werden kurz skizziert und mit Beispielen unserer Arbeiten illustriert.

1 Einleitung

Nahezu alle fachdidaktischen Arbeiten haben ihren Ursprung in einer mehr oder minder großen Unzufriedenheit mit dem Ergebnis des Unterrichts. Diese implizite Evaluation der Praxis bildet die Basis für zahllose Vorschläge zur Veränderung des Unterrichts.

Änderungen der Unterrichtspraxis setzen u.a. voraus, dass die Inhalte einer genauen Prüfung unterzogen werden, ob und in welcher Weise sie als Lerninhalte für das jeweilige Fach geeignet sind. Das Fach selbst wird zu befragen sein, ob es weitere, neue oder alternative Themen bereithält, die dann für den Lernprozess aufbereitet werden müssen. Fachdidaktische Arbeiten die sich diesem Aufgabengebiet widmen, wollen wir hier *fachinhaltliche fachdidaktische Forschung*¹ nennen; in der Mathematikdidaktik wird diese Richtung *Stoffdidaktik* genannt [Jah98, ?].

Die aus solchen Arbeiten entwickelten Vorschläge müssen in der Praxis erprobt werden. Hierfür sind im ersten Schritt zunächst kleine Fallstudien erforderlich, die lediglich nachweisen, dass die vorgeschlagenen Inhalte lehr- und von der Zielgruppe lernbar sind. Gegebenenfalls nach einer Revisionsphase wird eine Feldstudie den Nachweis erbringen müssen, ob die Veränderungen eine Verbesserung der Praxis erbringen. Solche fachdidaktischen Arbeiten werden hier als *Evaluationsforschung* bezeichnet.

¹Auf einen passenderen Terminus sollten sich die Fachdidaktiker bald einigen; der vorgeschlagene Terminus trifft zwar den Inhalt, ist aber doch eher unhandlich.

Nicht nur die Ähnlichkeit der Probleme des Lehrens und Lernens in den unterschiedlichen Fächern, sondern auch die Erfahrungen der empirischen pädagogischen Forschung und deren gesichertes Methodenreservoir machen empirische pädagogische Arbeiten in der Fachdidaktik notwendig. Ohne die Zielsetzung fachdidaktischer Arbeiten – die Verbesserung des konkreten Fachunterrichts – aus dem Blick zu verlieren, sollten Fachdidaktiker ihren *domänenspezifischen* Beitrag zum wissenschaftlichen Verständnis des Lehrens und Lernens leisten; diese Arbeiten bezeichnen wir hier als *empirische pädagogische Forschung*.²

In seinem Übersichtsbeitrag zur Forschung in der Physikdidaktik geht Duit in diesem Band ausführlich auf die unterschiedlichen Forschungsschwerpunkte ein und wählt eine ähnliche Systematik.

2 Fachdidaktische Forschung am Optikcurriculum

Seit Mitte der achtziger Jahre wurde zunächst an der Gesamthochschule Kassel und seit einigen Jahren an der Humboldt-Universität zu Berlin, an einer Neuorientierung der Optik für den Schulunterricht gearbeitet. Es ist ein Curriculum entstanden, das im Anfangsunterricht das Sehen der Dinge zum Ausgangspunkt nimmt und daraus die Grundbegriffe der Optik entwickelt, im zweiten Teil mit dem Fermat-Prinzip eine erste abstrakte Beschreibung des Lichts erarbeitet und in der Oberstufe mit dem Zeigerformalismus von Feynman bis in die Welt der Quantenphysik führt. Von zentraler Bedeutung ist der Begriff des Lichtwegs, der das ganze Curriculum durchzieht (vgl. [ES95]).

Da nur zum Mittelstufenteil des Curriculums, der "Geometrischen Optik nach dem Fermat-Prinzip" Ergebnisse auf allen drei Forschungsebenen vorliegen, wird hier der Schwerpunkt unserer Darstellung liegen.

2.1 Fachinhaltliche fachdidaktische Forschung

Angesichts des Defizits an einer aktuellen und geschlossenen Theorie fachinhaltlicher fachdidaktischer Forschung wurde bei der didaktischen Konzeption des Curriculums im wesentlichen auf drei Quellen zurückgegriffen: ältere didaktische Theorien, beispielsweise von Wagenschein (siehe [Erb94, 7ff]); die jeweils aktuellen Ergebnisse didaktischer Forschung über Präkonzepte in der Optik oder die TIMS-Studie; wissenschaftstheoretische Überlegungen, beispielsweise von Ernst Mach oder Carl Friedrich von Weizsäcker [ES96],[Erb94, 9ff].

Daran anknüpfend wurden "Leitziele" für die Konstruktion des Curriculums festgelegt, die als roter Faden für alle weiteren Arbeitsschritte dienen und für eine gewisse Konsistenz des

²Auch dieser Terminus ist zu diskutieren. Das spezifisch fachdidaktische an dieser Forschung kommt im Terminus nicht zum Ausdruck

Unterrichtskonzepts sorgen sollen: Die Priorität des Verstehens physikalischer Zusammenhänge gegenüber dem Wissen von Fakten, die Bildung physikalischer Erkenntnis aufgrund unmittelbarer Beobachtung, sowie die Tragfähigkeit der Inhalte [Erb94, 11ff]. Speziell auf die Quantenphysik bezogene "Leitziele" für den Oberstufenteil des Curriculums hat Werner in seiner Arbeit formuliert [Wer00, 23ff]. Diese Leitziele sind gewissermaßen das Ergebnis eines eklektizistischen Vorgehens und treten an die Stelle einer geschlossenen didaktischen Theorie.

2.1.1 Physikalische Theorie und Curriculumkonstruktion

Im Mittelpunkt des zweiten Curriculum-Bausteins steht das Fermat-Prinzip. Die Aussage dieses Extremalprinzips – das Licht nimmt zwischen zwei Punkten den Weg, für den es, im Vergleich zu denkbaren Nachbarwegen, die kürzeste Zeit benötigt – ermöglicht eine einheitliche Deutung der geometrischen Optik (vgl. Abbildung 1 auf der nächsten Seite). Durch die im Laufe der Unterrichtseinheit zunehmende Erklärungsmächtigkeit des Fermat-Prinzips sollen die Zusammenhänge zwischen den Phänomenen für den Schüler besser erfahrbar werden als bei der üblicherweise verwendeten Beschreibung der Phänomene mit Hilfe mehrerer eher unverbundener Gesetze (Reflexionsgesetz, Brechungsgesetz, Abbildungsgleichung).

Diese Eigenschaft macht das Fermat-Prinzip nicht nur zu einem Unterrichtsgegenstand, an dem sich nicht nur ein grundlegender Aspekt physikalischen Denkens – das Suchen nach allgemeingültigen Gesetzmäßigkeiten – verdeutlichen lässt, sondern stellt auch einen im Sinne unserer Leitziele tragfähigen Inhalt dar: Eine Regel die immer wieder auf fast alle verschiedenen Fragestellungen der geometrischen Optik angewendet werden kann. Das bloße Lernen einer solchen Regel wird im allgemeinen nicht reichen, sie muss von den Schülern verstanden werden; durch das Verstehen erübrigt sich aber das Lernen isolierter Fakten und Gesetze.

Auf das Lichtstrahlmodell, dessen Gültigkeit auf die geometrische Optik beschränkt ist, wird in dieser Unterrichtseinheit weitgehend verzichtet. Stattdessen wird die Ausbreitung des Lichts mit Lichtwegen beschrieben, die im Oberstufenteil des Curriculums für die Einführung des Zeigerformalismus ebenfalls benötigt werden. Auf diese Weise werden auch die verschiedenen Blöcke des Curriculums miteinander vernetzt.

2.1.2 Durchführung fachinhaltlicher didaktischer Forschung

In diesem Schritt ist der Fachdidaktiker als Fachwissenschaftler, häufig in der gesamten Breite seiner Disziplin, gefordert. Die physikalische Theorie muss schülergerecht dargestellt werden, ohne dass sie dabei falsch wird und sie muss so strukturiert werden, dass sie in einem Unterrichtsablauf erlernbar ist [Erb94, 105ff]; ferner sind in der Regel neue Experimente aufzubauen und zu erproben, für unser Curriculum beispielsweise der aufblasbare Spiegel [Sch84], das Doppelschattenexperiment [WS00], die Schusterkugel [ES91] die hyperbolische Troglinse [Erb94, 70ff], das Loch in der Seifenblase [Web99] und vieles andere mehr. Schließlich muss geeignetes

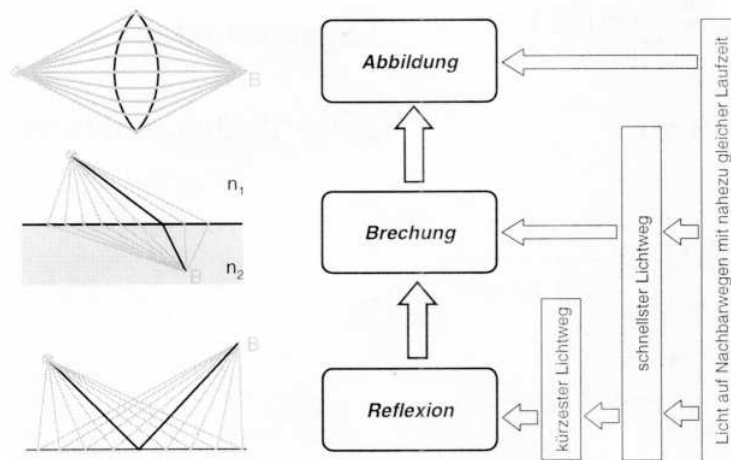


Abbildung 1: Inhaltliche Struktur der geometrischen Optik nach dem Fermat-Prinzip und die darauf aufbauende vertikale Vernetzung von Unterrichtsinhalten. Die in aufeinanderfolgenden Unterrichtsschritten zu erarbeitenden Formulierungen (ganz rechts in Stichpunkten) nehmen an Abstraktion und Allgemeingültigkeit zu. Die zuletzt eingeführte Formulierung des Fermat-Prinzips – Das Licht nimmt solche Wege, dass das Licht auf denkbaren Nachbarwegen die gleiche Laufzeit hat – ist für alle Phänomene gleichermaßen richtig.

Arbeitsmaterial zusammengestellt werden, z.B. Abbildungen, historische Quellen, Übungsaufgaben etc. Bei all diesem sollten unserer Ansicht nach Überlegungen zur Verträglichkeit mit den Lehrplänen und den äußeren Lernbedingungen der Schüler noch keine wesentliche Rolle spielen. Vielmehr sehen wir die Aufgabe der Didaktik an dieser Stelle darin, der Schule neue – gegebenenfalls auch unter den gegenwärtigen Unterrichtsbedingungen "verrückt" anmutende – Ideen für den Unterricht zu liefern.

2.2 Evaluationsforschung am Beispiel des Optik-Curriculums

Diese Stufe stellt unseres Erachtens die wesentliche Verbindungsstelle zwischen Schule und Universität, zwischen didaktischer Forschung und Unterricht dar. Die Schule kann von neuen Konzepten und Unterrichtsmaterialien profitieren, die Universität von der Unterrichtserfahrung der Lehrkräfte. Ohne eine enge Kooperation scheint erfolgreiche Evaluationsforschung grundsätzlich nicht möglich zu sein. Unsere Evaluationsforschung des Curriculums verlief in drei Schritten, die nicht unbedingt als zeitliche Reihenfolge zu verstehen sind. Jeder dieser Schritte ist mit einer Überarbeitung des Unterrichtskonzepts verknüpft:

1. **Planung konkreter Unterrichtsstunden oder -einheiten.** Aufbauend auf dem durch die fachinhaltliche didaktische Forschung zur Verfügung gestellten Unterrichtsmaterial wird der Unterricht nun im Detail und mit Blick auf die spezielle Lernsituation einzelner Schülergruppen geplant. Ergebnis dieser Arbeit sind zunächst einzelne

Stundenverläufe, Arbeitsblätter, Experimentieranleitungen u.a., die später als Handreichungen für den Unterricht zusammengestellt werden können und so für weitere Schulen erreichbar werden [WS00] [Wer00, 109ff]. Schon während der Planungsphase sollte die Diskussion mit den unmittelbar am Unterrichtsprojekt beteiligten Lehrkräften im Rahmen von Fortbildungsveranstaltungen erweitert werden.

2. **Durchführung des Unterrichts.** Alle drei Abschnitte des Curriculums sind in unterschiedlichem Umfang erprobt worden: Bereits im Schuljahr 1989/90 wurde das Curriculum vom "Sehen zur Optik" zum ersten Mal, bis heute weitere 4 mal unterrichtet, die "Geometrische Optik nach dem Fermat-Prinzip" insgesamt 7 mal und die Zeigeroptik nach Feynman 6 mal. Zu einer besonders wirksamen Kooperation kam es immer dann, wenn sowohl die am Projekt beteiligten Lehrer als auch die Fachdidaktiker Unterricht in eigenen Lerngruppen parallel durchführen und dabei wechselseitig hospitieren.
3. **Evaluation des Unterrichts.** In den mit der Erprobung des Optikcurriculums verbundenen Studien ging es weitgehend darum, die Durchführbarkeit der Unterrichtsplanung und die Erreichbarkeit der Zielsetzungen zu prüfen, durch den Unterricht möglicherweise hervorgerufene Verständnisschwierigkeiten und Fehlvorstellungen aufzudecken, Anhaltspunkte zur Akzeptanz des Konzepts bei Schülern und Lehrern zu gewinnen, sowie die Unterrichtseinheiten an die Voraussetzungen und Lernschwierigkeiten der Schüler anzupassen. In jedem Fall ist die Evaluation ausschließlich auf das Unterrichtskonzept selbst bezogen und nicht mit Fragestellungen zu einer außerhalb des Curriculums stehenden theoretischen Grundlage verknüpft. Beispiele für Evaluationsstudien in diesem Sinne finden sich bei Erb [Erb94], Heinzerling [Hei95], Höggebe [Hog96], Schön und Werner [SW99], Schön und Weber [SW00] sowie Werner [Wer00].

Methodisch haben wir auf der Stufe der Evaluationsforschung bewusst auf ein langfristig angelegtes Untersuchungsdesign verzichtet und bevorzugt Erhebungsinstrumente eingesetzt, die in der Schule ohnehin vorhanden sind, z.B. Lernzielkontrollen und Klassenarbeiten, Erfahrungsberichte der Lehrer sowie gemeinsame Reflexionen der beobachteten Unterrichtsstunden, aber auch Concept mapping. Nähe zur Schulrealität und Einbindung der Unterrichtskompetenz der Lehrer haben hier Vorrang vor wissenschaftlicher Präzision und vor Verallgemeinerbarkeit der Ergebnisse.

An zwei Beispielen soll hier verdeutlicht werden, was wir unter Ergebnissen der Evaluation im Rahmen unserer curricularen Forschung verstehen:

- (1) In einer Erprobung des Unterrichts zur geometrischen Optik nach dem Fermat-Prinzip wurde unter anderem der Frage nachgegangen, ob die Tragfähigkeit der Inhalte im Unterricht wirksam wird und – damit zusammenhängend – ob sich die Allgemeingültigkeit der Inhalte im Wissen der Schüler niederschlägt.

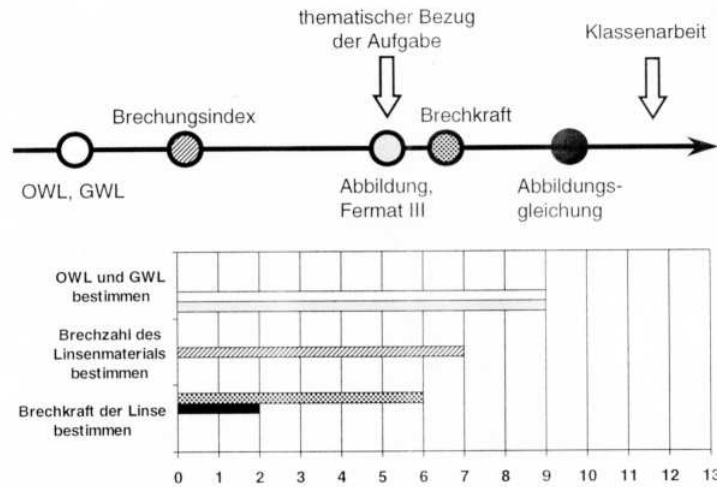


Abbildung 2: Auswertung einer von den Schülern bearbeiteten Aufgabe zur optischen Abbildung aus einer Klassenarbeit am Ende der Unterrichtseinheit. Auf dem Pfeil oben ist die zeitliche Verteilung der Lerninhalte im Unterricht dargestellt, die für die Lösung aller drei Teilaufgaben maßgeblich waren. Das Balkendiagramm zeigt die Zuordnung dieser fünf Lerninhalte zu den drei Teilaufgaben (Bestimmung der optischen und geometrischen Weglänge – Bestimmung der Brechzahl des Linsenmaterials – Bestimmung der Brechkraft der Linse) sowie die jeweilige Anzahl richtiger Lösungen.

Abbildung 2 zeigt die Auswertung einer Aufgabe zur optischen Abbildung durch eine Sammellinse in der Klassenarbeit, die am Ende der Unterrichtsreihe geschrieben wurde: Während nur zwei bzw. sechs von 13 Schülern erfolgreich die wenige Stunden vor der Klassenarbeit eingeführten Inhalte "Abbildungsgleichung" und "Brechkraft einer Linse" anwenden konnten, griffen jeweils neun Schüler erfolgreich auf die einige Wochen früher eingeführten Inhalte "optische und geometrische Weglänge" sowie "optische Abbildung" zurück. Dies erklären wir uns damit, dass in unserem Unterrichtskonzept tragfähige Lerninhalte eingeführt und im nachfolgenden Unterricht konsequent weiter eingesetzt und vertieft wurden (siehe auch [SW00]).

(2) Abbildung 3 auf der nächsten Seite zeigt Begriffsnetze einer Schülerin, die vor Beginn und nach Abschluss unserer Unterrichtsreihe zur Optik angefertigt wurden. Der Schülerin war – wie den anderen Schülern der Lerngruppe auch – die geometrische Optik vor Beginn des Unterrichts bereits bekannt, aber nicht unter dem Blickwinkel des Fermat-Prinzips. Vor Beginn der Unterrichtseinheit hat das Begriffsnetz ausgeprägt fragmentarischen Charakter; es zerfällt in insgesamt 4 Teilnetze, deren größtes 10 Begriffe enthält, siehe oberes Begriffsnetz. Im Begriffsnetz derselben Schülerin nach Ende der Unterrichtseinheit hat sich die Zahl der Komponenten auf ein einziges Teilnetz reduziert, das alle zur Verfügung gestellten Begriffe enthält und um den zentralen Begriff "Licht" herum hierarchisch strukturiert ist. Es liegt die Vermutung nahe, dass sich bei dieser Schülerin der allgemeingültige Charakter der vermittelten Inhalte in einer stärker zusammenhängenden Wissensstruktur niedergeschlagen hat.

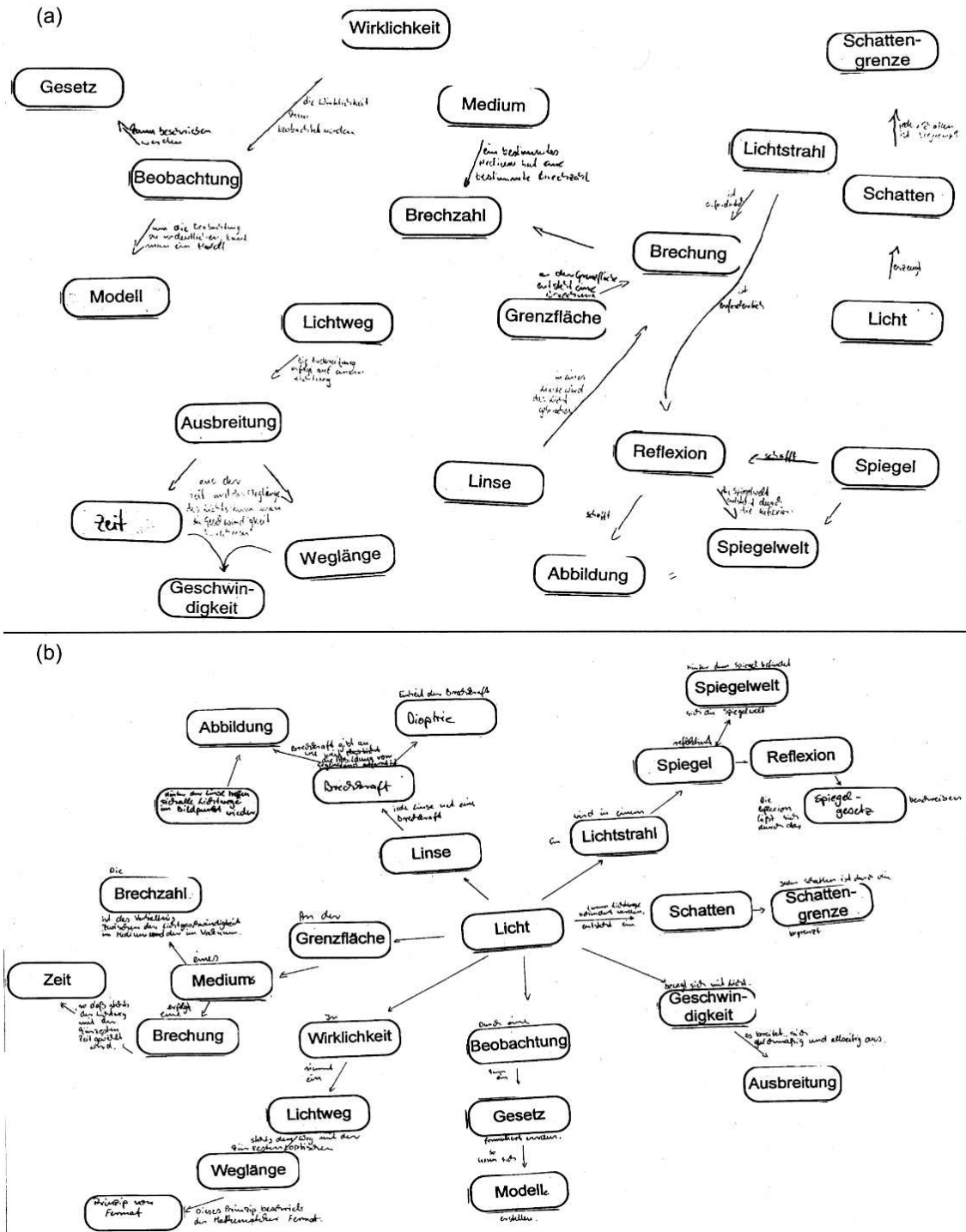


Abbildung 3: Aus Begriffen zur geometrischen Optik gelegtes Concept map einer Schülerin vor Beginn der Unterrichtsreihe (a) und nach deren Abschluss (b).

2.3 Empirische pädagogische Forschung

Zu dieser dritten Ebene curricularer Forschung gehören neben einer zugrundeliegenden Lerntheorie auch aus dieser Theorie begründete Forschungshypothesen, die beantwortet werden sollen, die Bereitstellung eines Untersuchungsdesigns, sowie eines methodischen Instrumentariums. Wie diese Arbeitsschritte für die Forschung an unserem Optik-Curriculum aussehen, können wir an dieser Stelle nur sehr verkürzt andeuten.

2.3.1 Die zugrundeliegende Theorie

Ausgangspunkt unserer Überlegungen sind *Netzwerkmodelle des menschlichen Gedächtnisses*, in denen angenommen wird, dass menschliche Erfahrungen und menschliches Wissen in kognitiven Schemata repräsentiert werden, die thematisch zusammengehörige Teilsysteme eines solchen Netzwerks darstellen (vgl. u.a. Rumelhart und Norman [RN78], sowie Mandl, Friedrich und Hron [MFH94]). Die Qualität der Wissensbasis wird demnach durch den Umfang und die interne Organisation der Schemata, ihre Vernetzung untereinander und mit unterschiedlichen Anwendungssituationen bestimmt [Bun97].

Lernprozesse, in denen die Schüler eine in diesem Sinne gut organisierte Wissensbasis erwerben können, bezeichnen wir in Anlehnung an den Sprachgebrauch neuerer Publikationen von Baumert [Bau98], Baumert, Bos und Watermann [BBW98], Baumert, Lehmann et al. [BL97] sowie Weinert und Helmke [WH93] als kumulativ. Darüber hinaus lassen sich kumulative Lernprozesse noch durch weitere Merkmale wie die langfristige Wirksamkeit des Gelernten, einen "Mitnahmeeffekt", der den Schülern ersichtlich macht, dass sich die vorangegangenen Lernanstrengungen gelohnt haben, eine zunehmende Selbstwirksamkeitserwartung, sowie Veränderungen in der Wissensbasis durch Aufbau- und Differenzierungsprozesse charakterisieren.

Harms und Bündler [HB99] haben theoretische Zusammenhänge zwischen der Sequenzierung von Lerninhalten in einem Curriculum und dem Auftreten kumulativer Lernprozesse aufgezeigt. Da unser Curriculum große Übereinstimmungen mit dem von den Autoren vorgestellten "an Leitfragen orientierten Curriculum" aufweist, sollte es besonders geeignet sein, kumulative Lernprozesse zu fördern.

2.3.2 Forschungshypothese

Am Beispiel unseres Optikcurriculums soll geprüft werden, ob sich der vermutete Zusammenhang zwischen einer vertikal vernetzten Anordnung der Lerninhalte und kumulativen Lernprozessen tatsächlich nachweisen lässt. Dabei sollen unter anderem durch Concept mapping gemessene strukturelle Veränderungen in der Wissensbasis als Indikator für kumulative Lernprozesse genommen werden. Eine unserer Hypothesen lautet also:

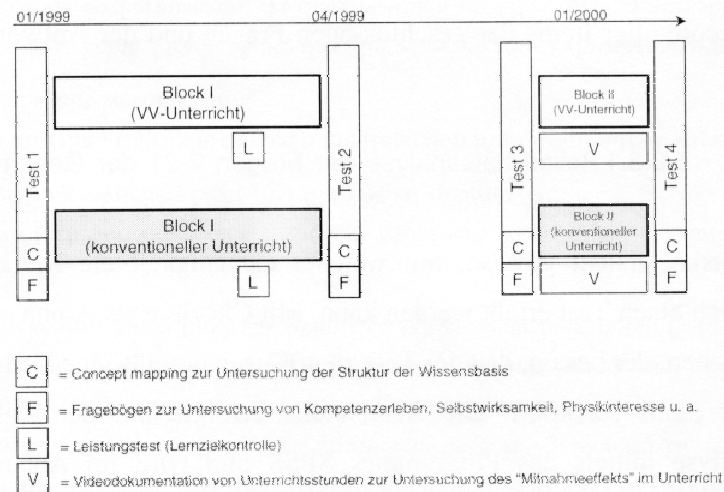


Abbildung 4: Design unserer empirischen Untersuchung.

Nach vertikal vernetztem Unterricht konstruieren die Schüler Begriffsnetze größerer (struktureller) Güte als nach konventionellem Unterricht (Kontrollgruppen).

2.3.3 Untersuchungsdesign und -methode

Der in Abbildung 4 dargestellte Erhebungsplan zeigt die Interventionen und Meßzeitpunkte. Die als "Block I" bezeichnete, acht bis zwölf Wochen dauernde Intervention umfasst jeweils eine vollständige Unterrichtseinheit, die als "Block II" bezeichnete Intervention eine kurze, zwei bis vier Stunden dauernde Unterrichtssequenz, in der ein auf den Inhalten von Block I aufbauendes Problem erarbeitet wird. In den Tests 1 bis 4 wurden von allen Schülern Begriffsnetze zur Optik angefertigt, die Aufschluss über die Struktur der Wissensbasis geben sollten. In unserem Verfahren waren die Begriffe vorgegeben, Begriffspositionen und Relationen frei wählbar.

Um einen von den Schülergruppen und Interventionen möglichst unabhängigen Vergleichsmaßstab für die Bewertung der Begriffsnetze zu gewinnen, ließen wir die Concept mapping-Aufgabe zusätzlich von etwa 20 Experten – Hochschuldozenten, Lehrer, Studenten – durchführen. Aus den einzelnen Expertenmaps wurde anschließend ein Modalnetz (Mittelwertnetz) gebildet.

Bei der Verwendung des Concept mapping als Erhebungsinstrument zur Gewinnung von Daten über die Wissensstruktur der Schüler, beziehen wir uns auf eine Reihe anderer Untersuchungen und verwenden die dort entwickelten Verfahren der Interpretation (Wilson, [Wil94], Friege und Lind [FL00]).

2.3.4 Ergebnisse der empirischen Untersuchung

Da die Untersuchung noch nicht abgeschlossen ist, liegen für den dritten und den vierten Meßzeitpunkt noch keine vollständigen Datensätze vor. Die bisherigen Ergebnisse zeigen dennoch bereits eine deutliche Tendenz.

Als verhältnismäßig unspezifisches Maß für die Struktur der einzelnen Schülernetze wurde zunächst die jeweilige Ähnlichkeit zum Modalnetz der Expertengruppe nach DICE [Wil94] bestimmt. Während sich in der Kontrollgruppe im Laufe der Intervention des Blocks I keine signifikante Veränderung der mittleren Ähnlichkeit ergab, kam es in der Kontrollgruppe im gleichen Zeitraum zu einem signifikanten Anstieg der Ähnlichkeit ($p < 0,01$; $n = 20$); die ansteigende Tendenz setzte sich sogar in dem interventionsfreien Zeitraum zwischen den Meßzeitpunkten 2 und 3 fort (vgl. Abbildung 5).

Weiterhin wurden sowohl für die Untersuchungs- und Kontrollgruppe als auch für die Einzelnetze der Expertengruppe die von Friege und Lind [FL00] diskutierten Strukturparameter gemessen. Abbildung 6 auf Seite 13 zeigt, dass im Laufe der Intervention in der Untersuchungsgruppe im Vergleich zur Expertengruppe für vier der fünf gemessenen Größen eine signifikante Verbesserung der Netzstruktur stattgefunden hat. Eine Varianzanalyse ergab für diese vier Parameter eine signifikante Interaktion zwischen Untersuchungs- und Kontrollgruppe ($p < 0,01$).

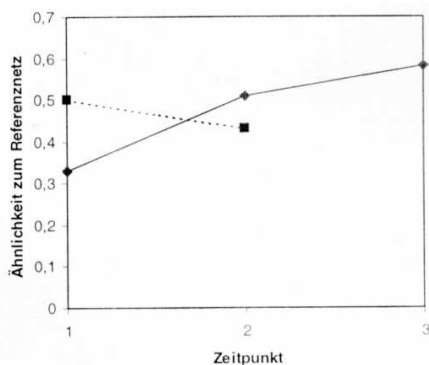


Abbildung 5: Mittlere Ähnlichkeiten nach DICE zwischen den Einzelnetzen der Schüler und dem Modalnetz der Expertengruppe; durchgezogene Linie: Untersuchungsgruppe, unterbrochene Linie: Kontrollgruppe.

3 Schluss

Dieser Beitrag versteht sich als Versuch, anhand einiger Arbeiten an einem mehrere Schulstufen übergreifenden Curriculum aufzuzeigen, dass solche Arbeiten Forschungen auf sehr unterschiedlichen Ebenen erforderlich machen. Jede Forschungsaktivität für sich wird wenig zur Verbesserung des naturwissenschaftlichen Unterrichts beitragen. Wir sind der Überzeugung, dass erst das aufeinander abgestimmte und inhaltlich aufeinander bezogene Zusammenspiel solcher Forschungen, empirisch begründete Alternativen zur gegenwärtigen Praxis bereitstellen kann. Dennoch ist uns bewusst, dass der Weg in die alltägliche Schulpraxis noch sehr weit ist.

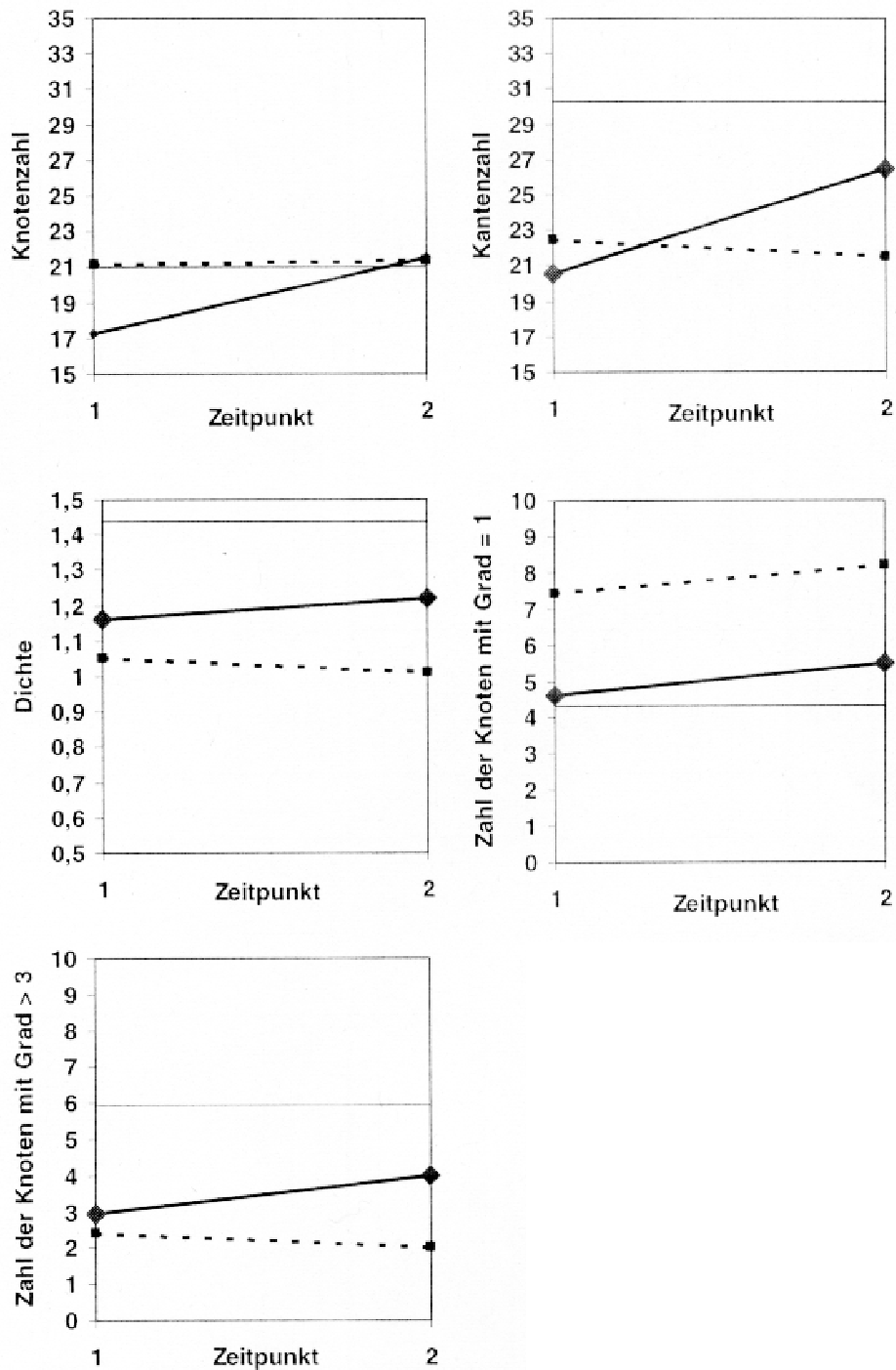


Abbildung 6: Strukturelle Merkmale der Einzelnetze der Untersuchungsgruppe (dickere durchgezogene Linie), der Kontrollgruppe (unterbrochene Linie) und der Expertengruppe (dünne durchgezogene Linie); das Expertenniveau wurde nur einmal gemessen und über die Zeit unverändert dargestellt.

Literatur

- [Bau98] BAUMERT, J.: Physikleistungen am Ende der Schullaufbahn im inter- und intranationalen Vergleich. In: DEUTSCHE PHYSIKALISCHE GESELLSCHAFT: FACHVERBAND DIDAKTIK DER PHYSIK (Hrsg.): *Tagungsband*, 1998, S. 22–32
- [BBW98] BAUMERT, J. ; BOS, W. ; WATERMANN, R.: TIMSS/III – Schülerleistungen in Mathematik und den Naturwissenschaften am Ende der Sekundarstufe II im internationalen Vergleich – Zusammenfassung deskriptiver Ergebnisse. In: *Studien und Berichte H.64*. Berlin : Max-Planck-Institut für Bildungsforschung, 1998
- [BL97] BAUMERT, J. ; LEHMANN, R.: *TIMMS – Mathematisch-naturwissenschaftlicher Unterricht im internationalen Vergleich: Deskriptive Befunde*. Opladen : Leske + Budrich, 1997
- [Bun97] BUND-LÄNDER-KOMMISSION FÜR BILDUNGSPLANUNG UND FORSCHUNGSFÖRDERUNG (Hrsg.): *Gutachten zur Vorbereitung des Programms "Steigerung der Effizienz des mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterrichts"*. Bonn, 1997 . – In: Materialien zur Bildungsplanung und zur Forschungsförderung, H. 60
- [Erb94] ERB, R.: *Optik mit Lichtwegen – Das Fermat-Prinzip als Grundlage für das Verstehen der Optik*. Bochum, Magdeburg : Westarp-Wissenschaften, 1994. – Dissertation
- [ES91] ERB, R. ; SCHÖN, L.: Die Schusterkugel. In: WIEBEL, K.H. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie – Vorträge auf der GDGP-Tagung in Weingarten 1990* Bd. 10. Alsbach : Leuchtturm, 1991, S. 291–293
- [ES95] ERB, R. ; SCHÖN, L.: Lichtwege – zentrales Element unseres Optik-Lehrganges. In: BEHRENDT, H. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie – Vorträge 1994* Bd. 14. Alsbach : Leuchtturm, 1995, S. 224–246
- [ES96] ERB, R. ; SCHÖN, L.: Vom Sehen zur Optik – Ein Curriculum für die Mittelstufe. In: *PdN-Physik* 45 (1996), Nr. 8, S. 31–36
- [FL00] FRIEGE, G. ; LIND, G.: Begriffsnetze und Expertise. In: FISCHLER, H. (Hrsg.) ; PEUCKERT, J. (Hrsg.): *Concept Mapping in fachdidaktischen Forschungsprojekten der Physik und Chemie*. Berlin : Logos-Verlag, 2000
- [HB99] HARMS, U. ; BÜNDER, W. *Zuwachs von Kompetenz erfahrbar machen: Kumulatives Lernen*. 1999
- [Hei95] HEINZERLING, H.: Vom Sehen zur Optik. In: *NiU-Physik* 6 (1995), Nr. 29, S. 11–15

- [Hog96] HOGREBE, G. *Das Fermat-Prinzip als Grundlage für das Verstehen der geometrischen Optik*. 1996
- [Jah98] JAHNKE, T.: Zur Kritik und Bedeutung der Stoffdidaktik. In: *Mathematica didactica* Bd. 21, 1998, S. 61–74
- [MFH94] MANDL, H. ; FRIEDRICH, H. F. ; HRON, A.: Psychologie des Wissenerwerbs. In: WEIDEMANN, B. (Hrsg.) ; KRAPP, A. (Hrsg.): *Pädagogische Psychologie*. Weinheim : Beltz, 1994
- [RN78] RUMELHART, D. E. ; NORMAN, D. A.: Accretion, tuning and restructuring: Three modes of learning. In: COTTON, J. W. (Hrsg.) ; KLATZKY, R. L. (Hrsg.): *Semantic factors in Cognition*. Hillsdale : Erlbaum, 1978
- [Sch84] SCHÖN, L.: Bilder am großen Spiegel – Beispiele für eine Berücksichtigung affektiver Komponenten im Physikunterricht. In: *NiU-Physik* 32 (1984), S. 429–433
- [SW99] SCHÖN, L. ; WERNER, J.: Vom Licht zum Atom. In: *Didaktik der Physik und Chemie* Bd. 19. Alsbach : Leuchtturm, 1999
- [SW00] SCHÖN, L. ; WEBER, T.: Das Fermat-Prinzip in der Schule. In: *Didaktik der Physik und Chemie* Bd. 19. Alsbach : Leuchtturm, 2000
- [Web99] WEBER, T.: Das Loch in der Seifenblase. In: *Physik in der Schule* 37 (1999), Nr. 1, S. 34–36
- [Wer00] WERNER, J.: *Vom Licht zum Atom: Ein Unterrichtskonzept zur Quantenphysik unter Nutzung des Zeigermodells*. Berlin : Logos-Verlag, 2000. – Dissertation
- [WH93] WEINERT, F. ; HELMKE, A.: Wie bereichsspezifisch verläuft die kognitive Entwicklung? In: DUIT, R. (Hrsg.) ; GRÄBER, W. (Hrsg.): *Kognitive Entwicklung und Lernen der Naturwissenschaften*. Kiel : IPN, 1993
- [Wil94] WILSON, J. M.: Network Representations of Knowledge about Chemical Equilibrium: Variations with Achievement. In: *Journal of Research in Science Teaching* 31 (1994), Nr. 10, S. 1133–1147
- [WS00] WEBER, T. ; SCHÖN, L.-H.: Spiegelwelt statt Reflexionsgesetz: Vorschläge zum Anfangsunterricht. In: *Naturwissenschaften im Unterricht Physik* 60 (2000), Nr. 11, S. 30–36