

Physik und Physis – Fachdidaktische Wechselwirkungen

Andreas Müller

- (1) Ein kräftefreier Körper bewegt sich gradlinig gleichförmig (Trägheitsprinzip).
 (2) Wenn eine Kraft F auf einen Körper mit der Masse m wirkt, beschleunigt sie ihn mit $a = F/m$ (Aktionsprinzip)
 (3) Wenn die Kraft F , die auf einen Körper wirkt, ihren Ursprung mit einem anderen Körper hat, so wirkt auf diesen die entgegengesetztgleiche Kraft $-F$ (Reaktionsprinzip)
 Newtonsche Axiome¹
 Aus: Meschede, D. (2001). «Gerthsen Physik»

*As I have uncreasingly repeated,
 logical and mathematical operations derive from action, and [...] they presuppose experience in the true sense of the word, at least in their initial phases*

Piaget, J. (1977). «The role of action in the development of thinking».

Eine auf der konzeptuellen und epistemologischen Ebene begründete doppelte Spannung zwischen Physik und Physis führt auf genuin didaktische Fragen: Zum einen die Spannung kognitiver Art, die durch die «Entkörperlichung», die starke Abstraktion in der Physik entsteht. Zum anderen die Entsinnlichung, die mit der Preisgabe des physischen Körpers einhergeht, woraus grosse Schwierigkeiten auf der motivationalen Ebene resultieren.

Diese Fragen werden unter Bezug auf mehrere fachdidaktische und pädagogisch-psychologische Forschungslinien unter dem Leitgedanken «Der Körper als Lernkontext der Physik: Selbst- und Lebensweltbezug» für die motivationalen Aspekte, und unter dem Leitgedanken «Der Körper als Lernmedium der Physik: «Schème Moteur», operationale Intelligenz, kinästhetisches Feedback» für die kognitiven Aspekte diskutiert, und daraus Perspektiven für Forschung und Unterricht entwickelt.

Einführung

Körper, body, corps/corpo/cuerpo, corpus, σώμα, τέλο – wie etwa die Newtonschen Axiome (s.o.) in verschiedenen Übersetzungen belegen, spielt der Körper eine grosse Rolle in der Physik, quer durch die (zumindest) europäischen Sprachfamilien. Und zwar ist es in allen Fällen das Wort 'Körper' das uns aus der aus der Alltagssprache und vom eigenen Leib höchst vertraut ist, das hier zu einem physikalischen Fachbegriff wird.

Es ist eine seltsame «Entkörperlichung», die der Körper in der Physik da durchmacht, s. Abb. 1. Sie zeigt links die Bahn, die eine Tänzerin bei der Ballett-Figur des «Grand Jeté» zurücklegt. Es handelt sich um eine Parabelbahn, d.h. die Überlagerung von horizontal gleichförmiger und vertikal beschleunigter Bewegung unter dem Einfluss der Schwerkraft. Da ist in der physikalischen Darstellung rechts fast nichts mehr von dem Körper des Tänzers oder der Tänzerin zu sehen, den wir im Ballett doch sehen wollen, die Strichmännchen dienen nur noch zur visuellen Verbindung mit der Realsituation. Aber offenbar zeigt die Physik dafür etwa anderes, das auch von Interesse ist. Für den Eindruck des Schwerelosen, Schwebenden, soll die Zeit ohne Bodenberührung möglichst lange sein, der Sprung möglichst weit (und hoch) führen. Was sind die Grenzen des Möglichen, die hier gesetzt sind? Sprungweite, -höhe und -dauer (l, h, t_s) etwa sind bei gegebener Absprunggeschwindigkeit v_0 (und optimalem Absprungwinkel von 45°) für den Körperschwerpunkt gegeben durch

$$(1) \quad l = \frac{v_0^2}{g}, \quad h = \frac{v_0^2}{4g}, \quad t_s = \sqrt{2} \frac{v_0}{g}$$

Alle diese Grössen sind also durch die Absprunggeschwindigkeit bestimmt ($g = 9.81 \text{ m/s}^2 \approx 10 \text{ m/s}^2$ ist die Schwerebeschleunigung, die an der Erdoberfläche einen festen Wert hat). Mit $v_0 = 5 \text{ m/s}$ (das ist die halbe Geschwindigkeit eines Weltklassesprinters, aber zu erreichen mit den wenigen Metern Beschleunigungsstrecke, die auf der Bühne zur Verfügung stehen), ergeben sich

$$(2) \quad l \approx 2.5 \text{ m}, \quad h \approx 0.6 \text{ m}, \quad t_s \approx 0.7 \text{ s.}$$

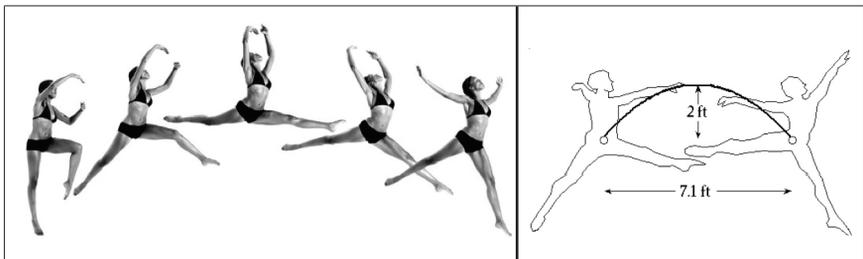


Abb. 1: Der «Grand Jeté» – eine Parabelbahn (Gollin, 2015)

Wie Abb. 1 zeigt, kann der tänzerische Eindruck dieser Leistung noch gesteigert werden durch das Stecken der Beine am Scheitel der Bahn, die damit noch an Leichtigkeit und Weite gewinnt.

Solches Hintergrundwissen ist für Balletttänzer und –trainer von einigem Interesse, und folgerichtig bietet «Physics and the Art of Dance» (Laws, 2002) einschlägige Grundlagen, Performance und Sicherheit in der Praxis zu verbessern, und entwickelt anregende Beziehungen zwischen Kunst und Wissenschaft in dem Bereich. Darüber hinaus regeln Bahngleichungen ähnlich (1) und (2), ebenso auf der Grundlage der Newtonschen Axiome, wahrhaft weitreichende Dinge, wie die Bahn der Erde um die Sonne, oder den Umlauf des Sonnensystems um das Zentrum der Galaxis. In der Tat wird hier auf Seiten der Physik beispielhaft zweierlei sichtbar, das für Bildung insgesamt, und nicht nur für die naturwissenschaftliche von Interesse ist:

Zum Ersten die z.T. enorme Bedeutung, die manche Ergebnisse und Erkenntnisse der Physik für unser Weltbild haben¹. Speziell für die Newtonsche Mechanik schlägt sich das historisch nieder u.A. in Voltaires Rolle als deren Wegbereiter in Frankreich, zusammen mit seiner Geistes- und zeitweiligen Lebensgefährtin, Emilie du Châtelet (Newton/du Châtelet, 1759), und Kants Entwurf einer Kosmologie auf Newtonscher Grundlage («Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels»; Kant 1755/2009). Die Rezeption der Newtonschen Physik durch zwei der grössten Philosophen der Zeit, und durch eine herausragende Pionierin des Beitrags von Frauen in Mathematik und Naturwissenschaften² mögen als Beleg für deren geschichtliche Bedeutung für Bildung und Weltbild genügen. Als aktuelles Beispiel kann man z.B. nennen die Landung der Sonde Philae auf einem 500 Mio. km entfernten Kometen, von der sich man neue Erkenntnis über die Entstehung des Sonnensystems und des Lebens erwartet (European Space Agency, 2014), und bei der jeder Meter auf dieser phantastischen Reise ins Unerforschte von den Newton'schen Axiomen registriert wurde.

Zum zweiten die Universalität grundlegender Naturgesetze (Popper, 1959; Hamedani, 2008), die weite und ganz unvermutete inhaltliche Verbindungen stiftet, zwischen dem Fall des legendären Apfels bei Newton und der Bahn des Mondes (Stukeley, 1752), oder eben zwischen der Bewegung bei einem Ballettsprung und der der Himmelskörper. Nicht zu Vergessen die ungeheure Emanzipation, die diese Universalität mit sich brachte, zwischen Irdischem und Himmlischen, zwischen Unbelebtem und Belebtem³, und anderen in Antike und Mittelalter als ontologisch konstitutiv gedachten Gegensätzen; welche Kämpfe gegen Macht und herrschende Ideologie für diese Emanzipation notwendig waren, muss wohl kaum in Erinnerung gebracht werden. In heutiger Zeit lebt dieser emanzipatorische Grundgedanke der Universalität der Naturwissenschaften fort u.a. in der Formulierung einer Art Menschenrecht auf einen universellem Zugang zu Wissenschaft – ihre Ausübung ebenso betreffend wie Ihre Nutzung – und die von keinem individuellen, sozialen oder politi-

schen Faktor (ethnische oder religiöse Zugehörigkeit, Geschlecht, politische und weltanschauliche Überzeugung u.a.m.) eingeschränkt sein soll (Principle of Universality of Science) (International Council of Science, 2014).

Mit dem Beispiel 'Ballett' – zwischen Tanz als Kunst und der Wissenschaft Physik – und den oben diskutierten Aspekten wird auch schon die doppelte Spannung zwischen Physik und Physis erkennbar, der in diesem Beitrag unter der Perspektive des Lernens und Lehrens nachgegangen werden soll:

Erstens die Spannung auf der kognitiven Ebene, die durch die Entkörperlichung, die extreme Abstraktion in der Physik entsteht. Auf der einen Seite ein extremer, fokussierter Gewinn für manche Fragestellungen, ohne Zweifel Bildungsgegenstände von hohem Wert erschliessend (Weltbild, Universalität), auf der anderen Seite aber die Preisgabe der unmittelbaren Anschauung und ihres Reichtums, oft sogar der direkten Erfahrung ganz wider den Strich; man muss das Ziel des Weges erst erkennen, bevor man sich als Lernender an den Anfang macht – ein ernstes pädagogisches Dilemma. Einsicht durch Entkörperlichung also ja, weitreichend, bildend, aber es bleibt dennoch eine Art Einsicht auf den 2. Blick, verborgen durch ein formidables gedankliches Hindernis. Im Sinne Bachelards (1938) kann man es zu den wesentlichen «epistemischen Hindernissen» des Physiklernens zählen.

Zweitens die Entsinnlichung, man kann auch sagen Entfremdung, die mit der Preisgabe des physischen Körpers einhergeht, und die zu beträchtlichen Schwierigkeiten auf der Ebene von Emotion und Motivation führen. Der physische, lebendige Körper schrumpft zum physikalischen Massepunkt, und mit ihm schrumpfen die sinnliche Wahrnehmung, die Empfindungen und auch die Freude, die an Betrachtung von z.B. Tanz (s. Abb. 1) und erst recht die eigene Bewegung geknüpft sein können. Ganz ähnlich schrumpft das Licht mit seinem sinnlichen, künstlerischen und emotionalen Reichtum zum ausdehnungslosen physikalischen Lichtstrahl (und ggf. der Angabe einer Wellenlänge); diese physikalische Verarmung des Lichtes insbesondere war schon für Goethe in seiner Farbenlehre völlig inakzeptabel (Heisenberg, 1968a,b; Martin 1979).

Der Vorwurf der Entkörperlichung, Entsinnlichung und Verarmung an die Physik ist also gut bekannt. Auf der anderen Seite gibt es auch die starken positiven Gefühle durch Entdeckung und Erkenntnis, die durch die Physik eröffnet werden, von der Faszination, die Weltbild und Bilder, z.B. vom Bau des Sonnensystems und des Weltalls bei den meisten Menschen auslösen, bis zu dem Triumph, mit der Newtonschen Mechanik einen neuen Planeten(!) an der Stelle am Himmel vorherzusagen, an der er dann tatsächlich entdeckt wird (Neptun, 1846: Vorhersage durch Adams und Leverrier; Beobachtung durch Galle). Dazwischen liegt Freude und Kompetenzerfahrung einer Schülerin, wenn sie mit der Newtonschen Mechanik z.B. die Gesetzmässigkeit – und Gemeinsamkeit! – hinter einem Ballettsprung oder dem Parabelflug eines Flugzeuges versteht. Für die Maxwell'schen Gleichungen, die die elektrischen und magnetischen Erscheinungen in ähnlicher Weise äusserst kompakt und abstrakt zusammenfassen,

wie dies die Newtonschen Gleichungen für die Mechanik leisten, und dabei insbesondere Licht als elektromagnetische Welle mit spezifischen Eigenschaften vorhersagen(!), drückt Boltzmann (1893) seine Empfindungen in pointierter und durchaus gefühlstarker Weise aus so: «War es ein Gott, der diese Zeichen schrieb?» (in Anlehnung an den berühmten Faust-Monolog bei Goethe). Freude (und andere positive Gefühle) durch die entkörperlichte, entsinnlichte Physik also ja, durchaus stark empfunden, bis hin zu einer fast religiösen Prägung, aber dennoch eine sehr mittelbare Freude, verborgen durch ein emotional-motivationale Hindernis mit hoher Wirksamkeit.

Dieses Doppelproblem, hier untersucht für das Spannungsverhältnis zwischen physischem und physikalischen Körper, durchzieht das gesamte Lehren und Lernen von Physik¹: die Abstraktion der Physik schafft Möglichkeiten weitreichender Erkenntnis (und auch geistiger Freude), aber zunächst einmal enorme didaktische Hürden sowohl auf kognitiver wie motivationaler Ebene. Was tun?

Wir gehen der Frage im folgenden unter einer besonderen Perspektive nach, die die Körperlichkeit – getreu dem Leitmotiv des Themenheftes – ein zweites Mal wesentlich ins Spiel bringt, nämlich auch bei möglichen *Antworten*, die fachdidaktisch für jenes Doppelproblem gegeben werden können, das durch die «Entkörperlichung» der Physik entsteht. Wir gehen dabei zunächst dem Motivations-, dann dem Kognitionsaspekt nach.

Selbst- und Lebensweltbezug: Der Körper als Lernkontext der Physik

Befragt man Jugendliche nach ihrem Interesse für Physik, so stösst man auf einen bemerkenswerten – und für den Unterricht sehr fruchtbaren – Zusammenhang zwischen Physik und dem biologischen Körper. Man kann ja einen physikalischen Begriff wie z.B. den Druck $p = F/A$ auf verschiedenste Zusammenhänge anwenden, und Abb. 2 zeigt den zeitlichen Verlauf des Interesses von Schülern und Schülerinnen an Physik (hier für das Thema 'Druck') in Abhängigkeit von verschiedenen Anwendungsbereichen oder «Kontexten». Es fällt zum einen der allgemeine Abwärtstrend über die Schuljahre 5 – 10 hinweg auf, der aber nicht überraschend und im wesentlichen ähnlich zu dem Abwärtstrend in vielen andern Fächern und des Schulinteresses überhaupt ist. Die Schüler in dieser Altersgruppe (Pubertät) haben ganz andere Lebensthemen, u.a. die Entwicklung des eigenen Körpers und die Entdeckung von dessen Sexualität. Überraschend ist die einsame Kurve, die bei den Mädchen dem (entwicklungspsychologischen) Trend entgegenläuft, und die zu biomedizinischen Kontexten gehört (das Herz als Blutpumpe); als Kontrast halte man etwa den technischen Kontext (Förderpumpe für Erdöl) dagegen. Interessant ist noch, dass dieses Thema auch für die Jungen in der oberen Hälfte der Interesseneinschätzung liegt, was einen alten Grundsatz der Physikdidaktik bestätigt: «Wenn man sich

nach den Mädchen richtet, so ist es auch für die Jungs richtig, umgekehrt aber nicht» (Wagenschein, 1965, S. 350).

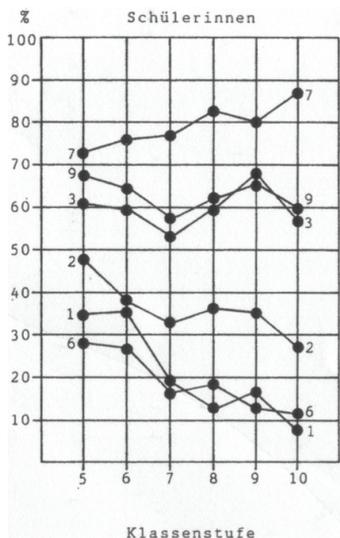


Abb. 2: Entwicklung des Interesses (Anteil der Schülerinnen mit grossem oder sehr grossem Interesse) für verschiedene Anwendungsbereiche der Physik (Thema Druck) über die Klassen 5 bis 10 hinweg. Als einziger Anwendungsbereich zeigt Medizin/Biologie (Herz als „Blutpumpe“, Kurve 7) einen Anstieg. Alle anderen Anwendungsbereiche (z.B. Technik: Förderpumpe für Erdöl; Kurve 2) zeigen einen Abfall (Häussler et al., 1998).

Collicchia (2002) hat auf dieser Grundlage eine umfangreiche fachdidaktische Entwicklungsarbeit und empirische Untersuchung unternommen, in welcher für drei verschiedene Gebiete eine Kontextualisierung physikalischer Themen durch systematische Bezüge zum dem menschlichen Körper hergestellt und auf Interessensweckung und Lernwirkung geprüft wird:

- 1) Hebelgesetze – Kontext 'Bewegung und Kraftentfaltung des Unterarms'
- 2) Hydrostatischer Druck – Kontext 'Blutkreislauf'
- 3) Linsen – Kontext 'Auge und Sehen'.

In der Arbeit wurden in der Tat deutliche positive Effekte der Intervention bei der Interessenweckung für das Schulfach Physik gefunden. In einem prä-post Kontrollgruppenvergleich war die Interessensentwicklung in inhaltsgleichem Physikunterricht mit Kontextualisierung positiv ($p = 0.002$, Cohen $d = 0.45$), ohne jedoch negativ ($p = 0.01$, Cohen $d = -0.52$). Es handelt sich also um statistisch signifikante und praktisch relevante Effekte bio-medizinischer Kontexte. Siehe Kuhn, Müller, Müller, & Vogt (2010) für eine ausführliche Vorstellung der Methodologie und weiterer quantitativ-empirischer Ergebnisse zum kontext-basierten Lernen in den Naturwissenschaften. In der Gruppe von Wiesner, aus der auch die Arbeit von Colicchia (2002) stammt, wurden umfangreiche weitere Entwicklungs- und Forschungsarbeiten zum der didaktischen Nutzung der Verbindung Physik – menschlicher Körper durchgeführt (Wiesner & Colicchia, 2008).

Weitere Themen in diesem Bereich sind z.B. Physik und Sport (siehe z.B. Mathelitsch (2014), und die dort angegebene Literatur), oder optische und akustische Wahrnehmung (Huhn, 1997), einschliesslich ästhetischer Aspekte. Auf welche Beschränkungen der didaktischen Praxis diese Chance der Kontextualisierung der Physik durch den biologischen Körper stösst, wird in der abschliessenden Diskussion der Perspektiven noch einmal aufgegriffen.

«Schème Moteur», operationale Intelligenz, kinästhetisches Feedback: Der Körper als Lernmedium der Physik

*...ce fait fondamental que toutes connaissances est liée à une action et
que connaître un objet ou un événement,
c'est les utiliser en les assimilant à des schèmes d'action*
J. Piaget (1967), in «Biologie et connaissance»

*Connaître un objet c'est agir sur lui, et le transformer,
pour en saisir les mécanismes de transformation en liaison
avec les actions transformatrices elles-mêmes.*
J. Piaget (1969) , in «Psychologie et pédagogie»

In diesem Abschnitt geht es um den kognitiven Aspekt der didaktischen Beziehung von Physik und Physis. Es wird zunächst ausgeführt, dass es eine lange und weit entwickelte pädagogisch-psychologische Denktradition dazu gibt, dann ein Beispiel zu modernen Entwicklungen vorgestellt.

Pädagogik und Psychologie: Ein Grundgedanke mit Tradition

Körper und Körperlichkeit als wesentliche Grundlage auch der kognitiven Entwicklung und Funktionen anzusehen stellt eine fruchtbare Gedankenlinie in Pädagogik und Psychologie dar. Sie ist auch für diesen Beitrag bedeutsam, und hier deshalb in einigen wichtigen Etappen anzusprechen (ohne Anspruch auf Vollständigkeit).

Bergson (1896) formuliert zum ersten mal den im engeren Sinne psychologischen Gedanken des «schème moteur», der Eigenwahrnehmung des Körpers als Ausgangspunkt der Sprachenwicklung. Am wichtigsten in dem gegenwärtigen Zusammenhang (und in wohlbekannter Aufnahme Bergsonschen Denkens) (Ducret, 2015) ist unbestreitbar die Psychologie Piagets, die mit der Entwicklung vom sensomotorischen bis zum formal-operationalen Stadium gewissermassen auch eine zunehmende «Entkörperlichung» (oder «Vergeistigung», im wörtlichen Sinne) des ursprünglich in der direkten körperlichen Handlung und Wahrnehmung verankerten Denkens beschreibt. Es ist einerseits offensichtlich, dass die Entkörperlichung in der Physik (wie auch in der

Mathematik), etwa das Beispiel der Balletttänzerin (s. Abschnitt 1) bis hin zu der Formel (1), sehr gut in diese Entwicklung passt, als ein Art auf die Spitze getriebenes formal-operationales Denken. Andererseits bleibt bei Piaget die Körperlichkeit doch Ausgangspunkt und Grundlage der psychischen Entwicklung, die auch auf den am stärksten abstrahierenden Stufen kognitiver Funktionen immer wieder durchscheint (siehe das Zitat am Anfang dieses Beitrags). Schlüsselbegriff ist dabei die operationale Intelligenz, von der Wahrnehmung des Kindes von Regelmässigkeiten in gelingendem (und misslingendem) Handeln in Raum und Zeit, bis hin zu daraus gewonnenen, zunehmend abstrakten und reichhaltigen Operationen, die zu Denkformen Werkzeugen höchster Flexibilität und Reichweite werden (man denke hier z.B. an die «Reichweite» vom Fall des Apfels bis zur Himmelsmechanik, s. Abschnitt 1). Das «Primat der Handlung» nennt Piaget (1977, S. 30) dies in einer späten Arbeit, die eine Übersicht zu diesem Grundgedanken bietet, der sich bekanntermassen durch sein ganzes Werk zieht: zwei weitere eingangs dieses Abschnitts angeführten Zitate decken gewissermassen zwei Pole davon ab, von der Biologie als Ursprung bis zur Pädagogik als Anwendung der psychologischen Prinzipien menschlichen Denkens, und mögen hier als Beleg genügen.

In der ebenfalls wohlbekanntenen Verbindung der Psychologie Piagets zur Epistemologie hat unser Thema ebenfalls seinen Platz, in einer Debatte mit ideengeschichtlich sehr reicher Tradition. Es handelt sich um das, was im englischen *mind-body problem* genannt wird (Robinson, 2012; der deutsche Begriff «Leib-Seele-Problematik» ist etwas unglücklich, da er zu ausschliesslich auf die christliche Denktradition verweist). Piaget beschreibt sehr klar, dass in seiner Sicht die *Wechselwirkung* Subjekt-Objekt, und darauf beruhendes *Handeln* die Grundlage von Erkenntnis darstellen, im philosophischen Sinne ebenso wie im psychologischen (Piaget, 1977). Die enge Verbindung von Wechselwirkung und Handeln wird im Englischen und Französischen mit «interaction» und «action» auch semantisch sichtbar.

In der späteren Entwicklung ist in dieser pädagogisch-psychologischen Gedankenlinie als weiteres Konzept die «enaktive» Repräsentationsform bei Bruner (1964) zu nennen, das aber theoretisch viel weniger weit ausgeführt wird als die operationale Intelligenz bei Piaget. Vorstellungen eines kinästhetischen und anderer «Lernstile» (die sich u.a. auf Bruner und Piaget berufen), und der Anpassung didaktischer Aktivitäten auf die bevorzugte Sinnesmodalität des Lerners werden heute als nicht mehr haltbar angesehen (Pashler, McDaniel, Rohrer & Bjork, 2008).

Lerntechnologie und Neue Medien: «Mechanik in den Knochen»

Während ein kinästhetischer *Lernstil* wie gerade festgestellt heute als empirisch und theoretisch nicht mehr haltbares Konzept gilt, spielen kinästhetische *Erfahrungsformen* eine zunehmende Rolle für Lehr-Lern-Ansätze. Eine wichtige

Ursache hierfür ist eine beträchtliche, z.T. ungeahnte Erweiterung einschlägiger technischer Möglichkeiten, die durch die neuen Medien zur Verfügung gestellt werden; es gibt gewiss aber auch ganz klassische Formen, die etwa im Sinne von Pestalozzis «Hand, Herz und Kopf» gerade auch dem ersten einen festen Platz in einer zunehmend «virtualisierten» Welt einräumen. Einem Feld von verschiedenen, aber verwandten Konzepten: kinesthetic learning activities (Richards & Etkina, 2013); haptic augmentation (Jones, Minogue, Tretter, Negishi & Taylor, 2006); tactile models (Clark, & Jorde, 2004); (s.a. 4.3 für neuere Entwicklungen in diesem Bereich) ist der Grundgedanke gemeinsam, physische Aktivität als wesentliches Element von Lernprozessen zu betrachten. Das folgende Beispiel fokussiert dabei auf zwei Aspekte: Bewegung und damit verbundene Fehlkonzepte als Lerngegenstand der Physik, und kinästhetisches Feedback als wirksame Lernmethode für diesen Gegenstand.

In diesem Kontext hat eines der ersten mehrjährigen Entwicklungs- und Forschungsprojekte zu computerunterstütztem Lernen in den Naturwissenschaften – sowohl durch seinen spezifischen Ansatz, das gefundene Resultat, wie die zu seiner Erklärung herangezogenen Argumente – so etwas wie eine Kursbestimmung für eine ganze Reihe einschlägiger Arbeiten des damals gerade anbrechenden PC-Zeitalters geleistet. Mokros und Tinker (1987) haben im Rahmen dieses Projektes vier Unterrichtseinheiten mit Computer-basierten Experimenten («microcomputer-based laboratories», MBL) zu den Themen 'optische Täuschungen', 'Wärme und Temperatur', 'Schall' und – besonders intensiv – 'Bewegung' untersucht (Alter: 7th/8th grade; Dauer: 20 Unterrichtsstunden, 5 pro Einheit, über drei Monate). Die Hauptkomponenten des Unterrichtsansatzes waren dabei: Erstens Feedback, d.h. die Gegenüberstellung von Realexperimenten und deren Ergebnissen mit Vorhersagen von Schülerinnen. Bei der Unterrichtseinheit 'Bewegung' ist dabei besonders die Möglichkeit hervorzuheben, dass die Schülerinnen durch Datennahme mit Ultraschall-Entfernungsmessern ihre *Eigenbewegungen* mit erwarteten Kurvenverläufen konfrontieren konnten. Zweitens die Interpretation von Funktionsgraphen, der eine Hauptrolle im Lernprozess zugewiesen wurde; ein wichtiger Lernschritt war insbesondere, dass die Schülerinnen ihre vorhergesagten mit den gemessenen Funktionsgraphen verglichen. Dieser Ansatz stützt sich auf mehrere Hauptargumente, die in Anlehnung an Mokros und Tinker (1987) in Tab. 1 in Form von vier Arbeitshypothesen formuliert werden, zusammen mit einer kurzen theoretischen Einordnung (dazu kommt eine weitere Hypothese aus einer anderen Arbeit). Diese Hypothesenübersicht dient als roter Faden für die nun folgende Darstellung der empirischen Befunde.

In der Untersuchung von Mokros und Tinker (1987) konnte ein merklicher Lernerfolg verbucht werden. Zum ersten wurden speziell zwei typische Fehlvorstellungen wirksam berichtigt, die in Voruntersuchungen diagnostiziert worden waren, nämlich die sehr ausgeprägte, das Thema 'Bewegung' betreffende «Graph-Bild-Verwechslung» (Maxima und Minima in einem Geschwindig-

keitsgraphen werden an den Bergen und Tälern einer Fahrtstrecke lokalisiert) und die allgemeinere, etwas schwächer ausgeprägte «Steigungs-Höhe-Verwechslung» (Punkte maximaler Änderungsrate einer Größe werden an Punkten mit maximalen *Funktionswerten* lokalisiert). Zum zweiten wurde in einem Vor/Nachtest generell ein besseres Verständnis von Funktionsgraphen festgestellt.

Brasell (1987) hat in einer brillanten und beispielhaft klaren Untersuchung die Arbeit von Mokros und Tinker (1987) fortgeführt. Mit derselben MBL-Einheit 'Bewegung' wurde die Lernwirkung einer kurzen Lernphase (40'; eine Schulstunde) auf das Verständnis von Orts- und Geschwindigkeitsgraphen von High-School-Schülerinnen (Alter: 17.7J) untersucht, insbesondere auf die o.g. typischen Fehler. Zunächst wurde der noch ausstehende Vergleich einer Lerngruppe, die mit Echtzeit-MBL gearbeitet hatte (MBL_e) mit einer traditionell unterrichteten Vergleichsgruppe (T) durchgeführt, mit einem deutlichen Vorteil für die MBL_e -Gruppe ($d = 0.98$; der gefundene Unterschied blieb auch bei Korrektur auf die ebenfalls erhobenen Ergebnisse eines Vortests und eines allgemeinen sowie verbalen Intelligenztests erhalten). Darüber hinaus wurde aber auch, und das ist das eigentlich Interessante, ein weiterer Vergleich mit einer MBL-Gruppe durchgeführt, die die Orts- und Geschwindigkeitsgraphen nicht in Echtzeit, sondern mit 20-30 Sekunden Verzögerung erhalten hatte (MBL_v). Das Ergebnis lautet, dass die MBL_v -Gruppe sich nicht signifikant von der T-Gruppe unterscheidet, d.h. eine Verzögerung von weniger als einer halben Minute ist bei Lernen mit MBL's ausreichend, um einen Lernvorteil mit sehr hoher Effektstärke völlig verschwinden zu lassen!

Interpretation: Das *Auftreten* eines Lerneffektes bei MBL's mit gleichzeitiger Darstellung von Funktionsgraph und Realexperiment (Mokros und Tinker, 1987; Brasell, 1987) bestätigt die Hypothese 1 (Tab. 1): die doppelte Modalität (z.B. kinästhetisch und optisch) ist eine förderliche Voraussetzung für das Verstehen von Funktionsgraphen in verschiedenen Teilgebieten der Physik. Aber auch das *Verschwinden* dieses Lerneffektes bei verzögerter Darstellung von Funktionsgraph und Realexperiment (Brasell, 1987) lässt sich im Rahmen dieses Modells verstehen, und es zeigt sich, dass Hypothese 2 in Tab. 1 nicht nur eine förderliche, sondern eine notwendige Bedingung für einen Lernvorteil des MBL-Ansatzes zumindest im Teilgebiet 'Bewegung' formuliert:

Ohne Echtzeitdarstellung verschwindet die Information über das Realexperiment aus dem Kurzzeitgedächtnis, und kann nur noch, wenn überhaupt, aus dem Langzeitgedächtnis abgerufen werden. Dieser Prozess stellt eine zusätzliche kognitive Belastung dar und bindet Ressourcen, die für eine Integration der beiden Codierungen bzw. Modalitäten nötig wären, mit einem vollständigen Verlust des Lernvorteils gegenüber der Kontrollgruppe als Folge. Gleichzeitig blieben auch für die MBL_v -Gruppe die Gesichtspunkte der Authentizität und der Entlastung von Routinearbeit erhalten, sodass aus dem ausbleibenden Lernvorteil folgt, dass die Hypothesen 3 und 4 aus Tab. 1 sicher nicht hinreichende Bedingungen für eine Überlegenheit des MBL-Ansatzes formulieren.

1. Multiple Kodierung und Multimodalität (Weidenmann, 1997): Die gemeinsame Darstellung von Realexperiment (direkte Wahrnehmung) und Funktionsgraph (logische Bilder) stellt eine doppelte Kodierung dar. Darüber hinaus sprechen die Mehrzahl der MBL-Einheiten von Mokros und Tinker (1987) natürlich neben dem Sehen immer noch eine andere Sinnesmodalität an, nämlich die Einheit 'Wärme' den Temperatursinn, die Einheit 'Schall' den Hörsinn und die Einheit 'Bewegung' die mechanische Propriozeption. Die durch MBL's ermöglichte Datennahme und Visualisierung erlaubt es also, nicht nur das Abstrakte (Funktionsgraphen) darzustellen, sondern zusätzlich das Reale und Konkrete (das Experiment) sehen und sogar gewissermassen «hören» oder «fühlen» zu lassen, was eine Brücke zwischen den beiden Bereichen herstellen sollte (Hypothese 1).
2. Echtzeit-Darstellung: Das vorgenannte Argument erhält sein volles Gewicht durch die Tatsache, dass die Erfahrungen im Realexperiment und die Darstellung des Funktionsgraphen (nahezu) gleichzeitig vorliegen. Es ist eine Hauptbotschaft der Theorie multimedialen Lernens (Mayer, 2001), dass es bei der Integration von Information verschiedener Kodierungen oder Modalitäten auf die Gleichzeitigkeit ankommt, und da gerade hierfür MBL's die technischen Voraussetzungen liefern, sollte eine positive Lernwirkung zu erwarten sein. (Hypothese 2).
3. Authentizität, Realitätsscharakter: Eng mit dem Echtzeit-Charakter des MBL-Unterrichtes zusammenhängend ist seine Echtheit als genuin naturwissenschaftliches Arbeiten. Auf der kognitiven Ebene bedeutet dies Konfrontation mit realen, nicht ausgedachten Problemen einschliesslich Anfälligkeit für Störfaktoren, auf der Motivationsebene bedeutet dies, Schülerinnen und Schulunterricht auch für «das wirkliche Leben» ernst genug zu nehmen. Ein Lernvorteil gegenüber der künstlichen Welt mancher Schulaufgaben scheint plausibel (Hypothese 3).
4. Entlastung von Routearbeit: Ein offensichtlicher Vorteil von MBL's ist, dass das Erstellen von Graphiken (und Tabellen) schneller und fehlerfreier von der Hand geht; dass dabei auch der Kopf freier für den neuen Lernstoff und Lernen also erleichtert wird, lässt sich zwanglos aus der Theoriekomponente 'Kognitive Belastung' der Theorie multimedialen Lernens folgern (Mayer, 2001; Hypothese 4).
5. Echtzeit-Feedback: Es ist schliesslich eine technische Besonderheit der Unterrichtseinheit 'Bewegung', gleichzeitig reale Eigenbewegungen mit Funktionsgraphen vergleichen zu können (was gewissermassen eine Kombination der Gesichtspunkte 1. bis 3. in dieser Tabelle darstellt). Daraus ergibt sich dann die Möglichkeit des simultanen Feedback, d.h. etwa die eigenen Bewegungen einem vorgegebenem Graphen anzupassen, und so buchstäblich am eigenen Leibe zu fühlen, wann z.B. Geschwindigkeiten hoch und wann sie niedrig sind. Ein positiver Beitrag zur Überwindung der Graph-Bild-Verwechslung (s.o.) ist zu erwarten (Hypothese 5).

Tabelle 1: Psychologischpädagogische Hypothesen zu MBLs und Graphikverständnis (insbes. von Bewegungsvorgängen): Eine gute Idee – Quelle vieler Fragestellungen! Nach Mokros, Tinker (1987; Hypothesen 1-4) und Beichner (1990, Hypothese 5)

Beichner (1990) leistete in einem wichtigen Aspekt eine Ausschärfung der Arbeit von Mokros und Tinker (1987). Untersuchungsgegenstand war wie dort das Verständnis von Funktionsgraphen der elementaren Kinematik. Die Hauptfrage war, ob man, wenn es auf die *Gleichzeitigkeit* ankommt, die zu der Darstellung der Funktionsgraphen simultane Ausführung und Auswertung der realen Eigenbewegungen (Datennahme über Ultraschall-Sensoren) auch ersetzen kann durch eine simultane Darstellung einer Videoaufnahme von solchen Bewegungen. Versuchspersonen mit dieser Lernbedingung (V&G) wurden mit Versuchspersonen mit traditionellem Unterricht (T). Es ergab sich kein signifikanter Unterschied zwischen der V&G-Gruppe und der T-Gruppe. Darüber hinaus waren sowohl die V&G- wie die T-Versuchspersonen in Untergruppen mit (R_+) bzw. ohne (R_-) zusätzliche Vorführung eines Realexperimentes eingeteilt worden, wieder ohne signifikanten Unterschied.

Interpretation: Das Fehlen eines signifikanten Unterschiedes zwischen allen vier Erprobungsgruppen ($V\&G/R_{\pm}$, T/R_{\pm}) bedeutet, dass a) die Gleichzeitigkeit der Darstellung von Realereignis und Funktionsgraph und b) der Realitätscharakter eines wirklich durchgeführten Experimentes weder einzeln noch zusammen eine hinreichende Bedingung für einen Lernvorteil bieten. Das Bestehen eines signifikanten Unterschiedes in allen diesen Gruppen zwischen Vortest und Nachtest schliesslich bedeutet, dass sehr wohl grundsätzlich etwas gelernt wurde, und nicht etwa überhaupt versteckte, lernuntaugliche Bedingungen vorlagen. D.h. die in den Hypothesen 2 und 3 von Tab. 1 genannten Bedingungen sind beide nicht hinreichend, um den Vorteil von MBL's für das Lernen von Funktionsgraphen der Kinematik zu erklären.

Es stellt sich also die Frage, was nun der entscheidende Unterschied zwischen den Erprobungsgruppen 'Echtzeit-MBL' (MBL_e) (Brasell, 1987) und 'Simultane-Video/Graph-Darstellung' ($V\&G$) (Beichner, 1990) war, sodass sich im ersten Fall eine Überlegenheit gegenüber der Vergleichsgruppe mit traditionellem Unterricht (T) ergeben hat, im andern Fall aber nicht. Eine Besonderheit in der MBL-Einheit von Brasell (1987) war ja, dass die Schülerinnen dabei ihre *Eigenbewegungen* untersucht haben, d.h. gleichzeitig fühlen und im Graphen sehen konnten, wann z.B. Geschwindigkeiten hoch sind und wann niedrig. Mit Beichner (1990) ist zu folgern «in the case of kinematics laboratories, kinaesthetic feedback could be the most important component of the MBL learning experience». Die Folgediskussion hat auf weiter differenzierte fachdidaktische und lernpsychologische Einsichten geführt, und natürlich gibt es auch einen grossen technischen Fortschritt bei den betreffenden Lernmedien, aber es ist doch ein bemerkenswerter Sachverhalt: Für Lernen im Bereich der Kinematik ist die simultane Angleichung an die konkrete und vertraute Erfahrung von Eigenbewegungen ein wirksamer Mechanismus, ganz im Sinne von Piagets operationaler Natur der Intelligenz. Oder um es im Hinblick auf das vorgestellte konkrete Beispiel plakativ zu sagen: MBL's mit Einbindung von Eigenbewegungen haben ein Erfolgsmotto, nämlich – «Mechanik in den Knochen».

Perspektiven für Forschung und Unterricht

Sie können zusammen nicht kommen...?

Zu dem Motivationspotential der Verbindung Physik – menschlicher Körper (Abschnitt 2) gibt es von den sehr ermutigenden empirischen Ergebnissen bis zu fachlich und didaktisch reichhaltigen Anwendungen einen breiten fachdidaktischen Konsens in der Sache, seit mindestens 25 Jahren (Duit, Häussler & Lauterbach, 1992), bis zu aktuellen Lehrbüchern (Kircher, Girwidz & Häußler, 2009, S. 590).

Die Konsequenz für Unterrichtsentwicklung, Schulorganisation und Lehrerbildung ist eigentlich klar: Solche Querverbindungen Physik–Biologie/Medizin sind ein genuines Thema für fächerübergreifenden Unterricht (s. Labudde

(2009) für eine allgemeine Einführung und definitorische Abgrenzung des Begriffsspektrums⁴ und Müller (2009) für die Rolle speziell in den Naturwissenschaften). Während diese Konsequenz in der Unterrichtsentwicklung nun schon über Jahrzehnte hinweg systematisch gezogen wird, hinkt die Lehrerbildung immer noch nach; eine politisch erzwungene (und letztlich rein finanziell begründete) Einrichtung eines Schulfaches des Typs «Integrierte Naturwissenschaften» wie in manchen deutschen Bundesländern bei gleichzeitiger Ausdünnung der fachlichen Grundlagen in der Lehrerbildung (teilweise mit dem irrwitzigen Argument, weil man ja das Fachliche ja weniger mehr brauche) kann jedenfalls nur ein Schuss nach hinten sein.⁵ Der Status Quo für die Realisierung der konkreten Voraussetzungen naturwissenschaftlichen fächerübergreifenden Unterrichtes in der Lehrerbildung in der Schweiz und Deutschland ist jedenfalls alles andere als zufriedenstellend (Brovelli, 2014).

Das gleiche ist für die Ebene der organisatorischen und praktischen Rahmenbedingungen zu sagen. Labudde (2006) nennt in einem Überblick als Hauptprobleme Unterrichtsgefässe, zeitliche Ressourcen, Prüfungsmethoden (Sekundarstufe I und II), Unterrichtsmaterialien (Sekundarstufe II) u.a.m. Binggeli (2006) fasst unter der Überschrift «Fächerübergreifender Unterricht: Ein Ding der Unmöglichkeit» die Situation wie folgt zusammen: «Die Schule ist nicht bereit zur systematischen Integration der Interdisziplinarität in den Unterrichtsalltag. Dies zeigt ein rascher Überblick über die Schullandschaft aller Stufen» (S. 34).

Sie können also zusammen nicht kommen, Physik und Physis, als Paradebeispiel eines forschungsbasierten, aussichtsreichen Unterrichtsansatzes? Derzeit allzuoft noch nein, und mit Fullan und Scott (2009) müssen wir auch bezüglich dieser besonderen didaktischen Chance sagen: «Failed implementation is the bane of all change aspirations» (S. 73).

Piaget überall – und seither nichts Neues?

Hinsichtlich der kognitiven Aspekte des Themas `Körper und Körperlichkeit` in der Naturwissenschaftsdidaktik kann der Stand der Dinge etwas optimistischer bewertet werden. Aber es drängt sich doch eine kritische Nachfrage auf: Der theoretische Hintergrund der in Abschnitt 3.2 vorgestellten Gruppe von Arbeiten fügt sich fast fugenlos in das Gedankengebäude der Psychologie Piagets (siehe z.B. auch die Folgearbeit von Druyan, 1997). Was also, so kann man fragen, ist in der Fachdidaktik und pädagogischen Psychologie für dieses Forschungsfeld überhaupt hinzugekommen?

Man kann durchaus einen wichtigen Fortschritt sehen in der Verbindung von Piagets Theorierahmen mit den detaillierten Modellen der kognitiven Psychologie (und den quantitativen Untersuchungsmethoden, die damit einhergehen). Es kommt dabei zu einer fruchtbaren Synthese verschiedener Perspektiven, die in verschiedenen Forschungstraditionen unterschiedlich ausgeprägt sind, nämlich der entwicklungspsychologischen Prozesse und Voraussetzungen (stärker in der Piagetschen Tradition) und der kognitionspsychologischen Prozesse und Rahmen-

bedingungen (stärker in den neuen Strömungen). Mit Blick auf die Physikdidaktik, insbesondere forschungsbasierte Interventionen soll für das Beispiel der *Microcomputer-based Laboratories* (s. 3.2) einerseits das Neue der kognitionspsychologisch-quantitativen Perspektive, andererseits die Fruchtbarkeit dieser sich abzeichnenden Konvergenz konkret benannt werden: *Einerseits* ist es

(i) auf der konzeptionellen Ebene für das Verstehen und Gestalten von Lernprozessen sinnvoll, multiple Repräsentationen (z.B. kinästhetisch und visuell) zu betrachten; gerade in der Naturwissenschaftsdidaktik gewinnen Lehr-Lern-Ansätze dieser Art immer mehr an Bedeutung (Tytler, Prain, Hubber & Waldrip, 2013; Docktor & Mestre, 2014);

(ii) auf der quantitativen Ebene sinnvoll zu wissen, dass die Kohärenz dieser Repräsentationen schon bei einem Zeitabstand von 20-30 Sekunden zerreisst, also Gleichzeitigkeit ein entscheidendes Merkmal für die fachdidaktische Wirksamkeit von Multimedia-Lernmedien ist;

(iii) auf der methodischen Ebene sinnvoll zu wissen, dass die Effektstärke für eine lernwirksame Gestaltung solcher Medien (konkret: simultane kinästhetische und visuelle Repräsentationen) in der Tat sehr hoch ist (Cohen $d = 0.98$ gegenüber ohne MBL unterrichteter Kontrollgruppe⁶);

(iv) auf der Ebene der praktischen Intervention sinnvoll zu wissen, dass damit der *mittlere* Schüler der MBL-Gruppe im Lerntest etwa so gut abschneidet wie die *besten 20%* der Kontrollgruppe (genauer: die besten 17%, d.h. ein Perzentil-Gewinn von 33%) (Marzano, Pickering und Pollock, 2001).

Andererseits ist es sinnvoll und fruchtbar, diese neuen Einsichten zum momentanen Lernprozess vor dem Hintergrund und im Zusammenhang mit dem langfristigen Entwicklungsprozess zu betrachten, der den Aufbau der kognitiven Strukturen des Individuums beschreibt, und in dem nach Piaget ebenfalls eine starke Wechselwirkung (genauer sogar: Vorgängigkeit) konkreter motorischer Erfahrung mit dem Erwerb formaler Denkopoperationen besteht. Diese wichtige Rolle des Körperlichen für das Lernen und Lehren zu erschliessen, ist eine grosse Chance wirksamer fachdidaktischer Ansätze, hier für die Physikdidaktik an konkreten Beispielen aufgezeigt (bio-medizinische Kontexte, Abschnitt 2; kinästhetisches Feedback, Abschnitt 3.2), und wohl auch für den interdidaktischen Dialog, wie er in diesem Themenband beabsichtigt wird.

Die offensichtlich sinnvolle Verbindung der Piagetschen und der kognitionspsychologischen Perspektive ist dann auch ein Beispiel, wie in erziehungswissenschaftlichen und fachdidaktischen Fragen überhaupt stärker kumulatives, kohärentes Wissen entstehen kann, gegen den oft kritisierten zu grossen Einfluss von Moden und Schulen (Oelkers & Tenorth, 1995; Benner, 2005), und insbesondere als inhaltliche Basis für die Lehrerbildung, in der diesbezügliche Defizite deutlich konstatiert werden (Kunina-Habenicht et al., 2012).

Aktuelle Entwicklungen

In diesem Sinne schliesst dieser Beitrag mit einigen Verweisen auf aktuelle Entwicklungen, die aus Sicht der Naturwissenschaftsdidaktik für den interdi-

daktischen Dialog zu dem gemeinsamen Thema dieses Bandes fruchtbar sein können.

Grundlegende und vielfältige Verbindungen bestehen zu dem Denkansatz der «embodied cognition», der seit einiger Zeit in der Schnittstelle mehrere Disziplinen (Kognitions- und Sozialpsychologie, Informatik, Philosophie) intensiv verfolgt wird (Wilson, 2002). Er postuliert (und erforscht) ebenfalls die fundamentale Rolle des Körpers (Motorik, Propriozeption, Wechselwirkung mit der Umgebung u.a.m.) für Entwicklung und Wirkungsweise auch höherer kognitiver Funktionen; insbesondere auch in der Naturwissenschaftsdidaktik wird der Gedanke einer «Verkörperung von kognitiven Prozessen» (wie Euler (2009) «embodied cognition» in einem aktuellen Lehrbuch übersetzt, sehr nahe an unserem Thema!) zunehmend beachtet für so zentrale Fragen wie «Repräsentation von Wirklichkeit, die Generierung mentaler Modelle und die Entwicklung abstrakter mathematisch-naturwissenschaftlicher Konzepte» (Euler, a.a.O.). Eine spezielle Form hiervon sind (manuelle) Gesten, deren lernförderliche Wirkung z.B. in der Mathematik nachgewiesen wurde (Goldin-Meadow, Cook, & Mitchell, 2009). Unter dem Stichwort «Embodiment» firmiert eine noch breitere Bewegung, ein Sammelband behandelt die Rolle des Körpers, über das Kognitive hinaus, für Sinnggebung, Bewusstsein, und – als besonders wichtige weitere Dimension – Emotionen des Menschen (Overton, Müller & Newman, 2009). Bezüglich letzterer ist von einem «affective turn» die Rede, aufgrund einer wachsenden Überzeugung, die Dai & Sternberg (2004) wie folgt formulieren: *Motivation and emotion are often seen as peripheral or epiphenomenal in that regard, or worse, as potentially detrimental to reason and sound judgment. [...] We argue that an exclusive emphasis on cognition misses some essential components of intellectual functioning and development (S. 11).*

Ähnlich kann man, vor dem Hintergrund der og. Arbeiten, und nicht zuletzt auch dieses Themenbandes, von einem «embodiment turn» sprechen. Gemeinsam ist den beiden «turns» eine Emanzipation von Platonischer Gering-schätzung von Körper und Gefühl als angenommenen Widersachern der Reinheit des Geistes, und es ist interessant zu sehen, welche Anregungen das derzeit zu beobachtende Zusammenwachsen dieser Strömungen für das Lehren und Lernen in den Naturwissenschaften (und ggf. anderen Fächern) haben wird.

Ein letzter Ausblick betrifft die Rolle von Körper und Körperlichkeit für eine besonders wichtige geistige Fähigkeit des Menschen, nämlich die Sprache. In der «kognitiven Linguistik» (Johnson, 1987) wird die Entstehung grundlegender *gedanklicher* Schemata («Kontakt», «Gleichgewicht») aus der *körperlichen* Erfahrung erklärt, erkennbar insbesondere an Metaphern, die sich in vielen Gegenstandsbereichen finden, auch in den Naturwissenschaften. In Arbeiten aus den letzten Jahren wird dieser Gedanke zunehmend auch in der Naturwissenschaftsdidaktik aufgegriffen (Niebert, Marsch & Treagust, 2012).

Tatsächlich ist es so, dass Körper und Körperlichkeit selbst Quelle einer Vielzahl von Begriffen und Bildern speziell in der Physik sind: ausser 'Körper'

(s. o.) z.B. auch 'Kraft' und 'Arbeit', oder das Bild von einem «Tanz» der Atome oder Planeten. Deren metaphorischer Gehalt, und dessen didaktische Bedeutung, wären ausserordentlich interessant zu untersuchen. Aber dies ist schon ein weiteres Thema, das in dem hier gesetzten Rahmen nicht mehr bearbeitet werden kann. Mögen die fachdidaktischen Ergebnisse und Überlegungen sowie die interdidaktischen Verbindungen, die hier zum Thema «Körper und Körperlichkeit» vorgestellt wurden, fruchtbar für den weiteren wissenschaftlichen Dialog über Lernen und Lehren sein.

Anmerkungen

- 1 Eine Reihe von Aussagen in diesem Beitrag lässt sich von 'Physik' auf 'Naturwissenschaften', z.T. auch Mathematik verallgemeinern.
- 2 Die Bedeutung von Emilie du Châtelet (Newton/du Châtelet, 1759) geht weit über die einer blossen Übersetzerin von Newtons «Principia» (Newton, 1686) hinaus. Von ihren anderen Arbeiten ganz abgesehen, leistet sie auch in Bezug auf die Newtonsche Physik eine echte Mitschöpfung, indem sie die (aus taktischen Überlegungen) (Simonyi, 1900, s. 261) stark geometrische und für die damalige Zeit konventionelle mathematische Argumentation der Originalausgabe der Principia durch die Methode der Infinitesimalrechnung ersetzt, die sich inzwischen weithin durchgesetzt hatte.
- 3 Damit ist gemeint, dass die Gesetze der Mechanik im Bereich des Lebendigen Gültigkeit behalten (es gibt keine besondere «Lebenskraft», die Energieerhaltung gilt usw.), und nicht etwa, dass sie ausreichen würden, das Leben (im Sinne der Evolution und des Einzelorganismus) annähernd hinreichend zu erklären; dazu braucht es viel mehr, und ganz andere Wissenschaft.
- 4 fächer-übergreifend, -überschreitend, -verbindend (verknüpfend), -koordinierend, -ergänzend; ausserfachlich („Schlüsselqualifikationen“); integriert
- 5 Anders in Ländern wie der Schweiz, in der aus einer längeren Tradition „Integrierter Naturwissenschaften« zielgerichtet und durchdacht entsprechend ausgerichtete Lehramtsstudiengänge entwickelt wurden (Brovell, 2014).
- 6 Berechnung von d auf der Basis der in Brasell (1987) angegebenen Originaldaten

Bibliographie

- Bachelard, G. (1939). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris: Vrin/Librairie philosophique.
- Beichner, R. (1990). The Effect of Simultaneous Motion Presentation and Graph Generation in a Kinematics Lab. *Journal of Research in Science Teaching*, 27(8), 803-815.
- Benner, D. (20057). Pädagogik, systematische. In D. Lenzen (Hrsg.), *Pädagogische Grundbegriffe* (S.1231-1246). Bd 2. Reinbek: Rowohlt.
- Bergson, H. (1896/2012). *Matière et mémoire. Essai sur la relation du corps à l'esprit*. Paris: Felix Alcan/PUF.
- Bingelli, H. (2006). Fächerübergreifender Unterricht zwischen Lust und Last. Die Reaktionen eines Schulleiters auf die Forderung nach Interdisziplinarität. In Bingelli et al (Hrsg.), *Fächerübergreifender Unterricht in der Berufsbildung* (SIBP Schriftenreihe Nr. 28). Zollikofen: Schweizerisches Institut für Berufspädagogik.
- Boltzmann, L. (1893). *Vorlesungen zu Maxwells Theorie der Elektrizität und des Lichts* (Bd. II). Leipzig: Metzger und Wittig.
- Brasell, H. (1987). The effect of real-time laboratory graphing on learning graphic representations of distance and velocity. *Journal of Research in Science Teaching*, 24, 385-95.
- Brovelli, D. (2014). Integrierte naturwissenschaftliche Lehrerbildung–Entwicklung professioneller Kompetenz bei Lehramtsstudierenden. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 20(1), 21-32.

- Bruner, J. (1964). The course of cognitive growth. *American Psychologist*, 19, 1-15.
- Clark, C. & Jorde, D. (2004). Helping students revise disruptive experimentally supported ideas about thermodynamics and tactile models. *Journal of Research in Science Teaching*, 41, 1-23.
- Dai, D. & Sternberg, R. (2004). *Motivation, emotion, and cognition: integrative perspectives on intellectual development and functioning*. Mahwah/New Jersey: Lawrence Erlbaum.
- Docktor, J.L. & Mestre, J.P. (2014). Synthesis of discipline-based education research in physics. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 10(2), 020119-1-58 .
- Druyan, S. (1997). Effect of the Kinesthetic Conflict on Promoting Scientific Reasoning. *Journal of Research in Science Teaching*, 34, 1083-1099.
- Ducret, J.-J. (2015). *Henri Bergson*. Genève: Fondation Jean Piaget. Zugriff am 15.1.2015 unter http://www.fondationjeanpiaget.ch/fjp/site/presentation/index_auteur.php?auteurID=11
- Duit, R., Häußler, P. & Lauterbach, R. (1992). Combining issues of «girl-suited» science teaching, STS and constructivism in a physics textbook. *Research in science education*, 22, 106-113.
- ESA/European Space Agency (2014). *Kometenmission Rosetta - Auf der Suche nach der Urmaterie*. Zugriff am 15.1.2015 unter http://www.esa.int/get/ESA_in_your_country/Germany/Kometenmission_Rosetta_Auf_der_Suche_nach_der_Urmaterie_Special
- Euler, M. (2009). Schülerlabore. In E. Kircher, R. Girwidz, & P. Häußler, P. (Hrsg.). *Physikdidaktik: Theorie und Praxis* (799-818). Berlin: Springer.
- Fullan, M. & Scott, G. (2009). *Turnaround Leadership for Higher Education*. San Francisco: Jossey-Bass.
- Goldin-Meadow, S., Cook, S. & Mitchell, Z. (2009). Gesturing gives children new ideas about math. *Psychological Science*, 20(3), 267-272.
- Golling, G. (2015). *The Physics of Dance*. Zugriff am 15.2.2015 unter http://www.hep.uiuc.edu/home/g-gollin/dance/dance_physics.html
- Hamedani, H.M. (2008). The Universality of Science- Examples from History. In National Academies of Science (Ed.), *Science as a Gateway to Understanding*. Washington: National Academies Press.
- Häußler, P. et al. (1998). *Die IPN-Interessenstudie Physik*. Kiel: IPN.
- Heisenberg, W. (1968a,b). Das Naturbild Goethes und die technisch-naturwissenschaftliche Welt. *Physikalische Blätter*, 24, 193-200 und 241-247.
- Huhn, B. (1997). *Optische Wahrnehmung: Ein lehrplanorientierter Unterrichtsvorschlag zum fächerverbindenden Unterricht in den Fächern Biologie und Physik*. Kronshagen: IPTS.
- ICSU/International Council of Science (2014). *Freedom, Responsibility and Universality of Science* (Paris: ICSU). Zugriff am 28.12.2014 unter <http://www.icsu.org/publications/cfrs/freedom-responsibility-and-universality-of-science-booklet-2014/CFRS-brochure-2014.pdf>
- Johnson, M. (1987). *The Body in the Mind*. Chicago: University of Chicago Press.
- Jones, G., Minogue, J., Tretter, T., Negishi, A. & Taylor, R. (2006). Haptic augmentation of science instruction: Does touch matter? *Science Education*, 90, 111-123.
- Kant, I. (1755/2009). *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels*. Frankfurt a.M.: Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften.
- Kircher, E., Girwidz, R. & Häußler, P. (2009²). *Physikdidaktik: Theorie und Praxis*. Berlin: Springer.
- Kuhn, J., Müller, A. Müller, W. & Vogt, P. (2010). Kontextorientierter Physikunterricht. Konzeptionen, Theorien und Forschungsergebnisse zu Motivation und Lernen. *PdN-PhiS*, 59(5), 13-25.
- Kunina-Habenicht, O., Lohse-Bossenz, H., Kunter, M., Dicke, T., Forster, D., Gossling, J., Schulze-Stocker, F., Schmeck, A., Baumert, J., Leutner, D. & Terhart, E. (2012). Welche

- Bildungswissenschaftlichen Inhalte sind wichtig in der Lehrerbildung. Ergebnisse einer Delphi-Studie. *Z. Erziehungswis.*, 15, 649-682.
- Labudde, P. (2009). Fachunterricht und fächerübergreifender Unterricht, Grundlagen. In K.-H. Arnold, J. Wiechmann, & J. Sandfuchs (Hrsg.), *Handbuch Unterricht* (S. 331–336). Bad Heilbrunn: Klinkhardt.
- Labudde, P. (2006) Forschungsagenda Fächerübergreifender Unterricht: ein Ausblick. In Bingelli et al. (Hrsg.), *Fächerübergreifender Unterricht in der Berufsbildung* (SIBP Schriftenreihe Nr. 28). Zollikofen: Schweizerisches Institut für Berufspädagogik.
- Laws, K. (2002). *Physics and the Art of Dance: Understanding Movement*. Oxford: Oxford University Press.
- Martin, M. (1979): *Die Kontroverse um die Farbenlehre*. Schaffhausen: Novalis.
- Marzano, R., Pickering, D. & Pollock, J. (2001). *Classroom Instruction That Works: Research-Based Strategies for Increasing Student Achievement*. Alexandria, VA: Association for Supervision and Curriculum Development.
- Mathelisch, L. (2014). Sports and Physics. In L. Dvořák and V. Koudelková (Éd.), *Active learning – in a changing world of new technologies iCPE – EPEC 2013 Conference Proceedings* (pp. 28-46). Prague: MATFYZPRESS publisher. Zugriff am 19.11.2014 unter http://iupap-icpe.org/publications/proceedings/ICPE-EPEC_2013_proceedings.pdf
- Mayer, R. E. (2001). *Multimedia learning*. New York: Cambridge University Press.
- Meschede, D. (2001). *Gerthsen Physik*. Heidelberg: Springer.
- Mokros, J. & Tinker, R. (1987). The impact of microcomputer-based labs on children's ability to interpret graphs. *Journal of Research in Science Teaching*, 24, 369-383.
- Müller, A. (2009). *Fächerübergreifender Unterricht in den Naturwissenschaften*. In K.-H. Arnold, J. Wiechmann, & J. Sandfuchs (Hrsg.), *Handbuch Unterricht* (S. 331-336). Bad Heilbrunn: Klinkhardt.
- Newton, I. (1759). *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* [traduit et commenté par E. du Châtelet]. Paris: Desaint & Saillant, 1759.
- Niebert, K., Marsch, S. & Treagust, D. (2012). Understanding Needs Embodiment: A Theory-Guided Reanalysis of the Role of Metaphors and Analogies in Understanding Science. *Science Education*, 96(5), 849-877.
- Ölkers, J. & Tenorth, H.E. (1995). Kritik der didaktischen Moden. *Zeitschrift für Pädagogik, n vol.*, S.xxx-xx.
- Overton, W., Müller, U. & Newman, J. (Éd.) (2009). *Developmental perspectives on embodiment and consciousness*. New York: Taylor & Francis.
- Piaget, J. (1967/1971). *Biologie et connaissance*. Gallimard: Paris.
- Piaget, J. (1969). *Psychologie et pédagogie*. Paris: Denoël-Gonthier.
- Piaget, J. (1977). The role of action in the development of thinking. In W. F. Overton & J. M. Gallagher (Éd.), *Knowledge and development, 1*, 17-42. New York: Plenum.
- Popper, K. (1959). *The logic of scientific discovery*. New York: Harper & Row.
- Richards, A. & Etkina, E. (2013). Kinaesthetic learning activities and learning about solar cells. *Physics Education*, 48, 578-585.
- Robinson, H. (2012). Dualism. In E. N. Zalta (Éd.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Zugriff am 15.1.2015 unter <http://plato.stanford.edu/archives/win2012/entries/dualism/>
- Simonyi, K. (1990). *Kulturgeschichte der Physik*. Frankfurt: Harri Deutsch.
- Stukeley, W. (1752). *Memoirs of Sir Isaac Newton*. Newton Project of Imperial College, London. Zugriff am 15.1.2015 unter <http://www.newtonproject.sussex.ac.uk/view/texts/normalized/OTHE00001>
- Tytler, R. Prain, V., Hubber, P. & Waldrup, B. (Éd.) (2013). *Constructing Representations to Learn in Science*. Rotterdam: Sense.
- Wiesner, H. & Colicchia, G. (2010). Improving students interest – medical and biological contexts in physics education. In C. P. Constantinou (Hrsg.), *Physics Curriculum Design, Development and Validation* (GIREP Conference 2008) Nicosia: Learning in Science Group, University of Cyprus. Zugriff am 9.2.2016 unter <http://lsg.ucy.ac.cy/girep2008/>
- Wilson, M. (2002). Six views of embodied cognition. *Psychon. Bull. Rev.* 9, 625.

Schlagworte: Entkörperlichung, Entsinnlichung, Kontextorientierung, Selbstbezug, «Schème Moteur», operationale Intelligenz, kinästhetisches Feedback

Physique et Physis – des interactions didactiques

Résumé

Sur le plan conceptuel et épistémologique, une double tension entre physique et *physis* (biologique, corporelle) se lève et amène à des questions proprement didactiques: d'une part, la tension de nature cognitive produite par le *disembodiment*, la forte abstraction en physique, d'autre par la perte des sensations immédiates qui accompagne l'abandon de la corporéité en physique, ce qui amène à de grands problèmes de motivation.

Fondées sur plusieurs axes de recherche en didactique des sciences et en psycho-pédagogie, deux idées directrices permettent d'aborder ces questions: «Le corps comme thème d'apprentissage en physique: établir des liens avec la vie et avec soi-même» pour les aspects motivationnels, et «Le corps comme médium de l'apprentissage en physique: schème moteur, intelligence opératoire, feedback kinesthétique» pour les aspect cognitifs. À partir de là, plusieurs perspectives pour la recherche et l'enseignement sont développées dans le présent article.

Mots-clés: *Disembodiment*, contextualisation, schème moteur, intelligence opératoire, feedback kinesthétique

Fisica e Physis – interazioni didattiche

Riassunto

Sul piano concettuale e epistemologico, esiste una doppia tensione tra fisica e *physis* (biologica, corporea); essa conduce a questioni veramente didattiche:

Da un lato la tensione di natura cognitiva dovuta al *disembodiment*, la forte astrazione in fisica. Dall'altro lato la perdita di sensazioni immediate che accompagnano l'abbandono della corporeità in fisica, quel che porta a forti problemi di motivazione.

Tali questioni vengono sollevate nell'ambito di diverse linee di ricerche nelle didattiche delle scienze e in pedagogia, guidate da due idee direttrici: «Il corpo come tema di apprendimento in fisica: stabilire il legame con la vita e con se stesso» per gli aspetti motivazionali e «Il corpo come strumento di apprendimento in fisica: «schème moteur», intelligenza operativa, feedback cinestetico» per gli aspetti cognitivi. Le prospettive per la ricerca e l'insegnamento si sono sviluppati su questa base.

Parole chiave: *Disembodiment*, contestualizzazione, «schème moteur», intelligenza operativa, feedback cinestetico

Physic and physis: Didactic specific interactions

Abstract

A double tension between physics and (biological, corporal) physis is derived on a conceptual and epistemological level, leading to genuine didactical questions. On the one hand, a cognitive tension, generated by the «disembodiment», the strong abstraction within physics. On the other hand, the loss of direct sensations, yielded by the abandonment of corporeality physis, and which leads to large motivation problems.

Referring to various lines of research in science education and educational science, these questions are discussed following two guiding ideas: «The body as context in physics education: Connecting to the lifeworld and the self of learners» for the motivational aspects, and «The body as medium of physics education: schème moteur, operational intelligence, kinesthetic feedback» for the cognitive aspects. On this basis, perspectives for research and education are addressed.

Keywords: Disembodiment, context orientation, «schème moteur», operational intelligence, kinesthetic feedback