

PHYSIK ALS SYSTEMWISSENSCHAFT

Hans U. Fuchs
Abteilung Physik und Mathematik
Zürcher Hochschule Winterthur
CH-8401 Winterthur
e-mail: hans.fuchs@zhwin.ch

August 2004

Abstract: In diesem Aufsatz möchte ich zeigen, wie Physik als Systemwissenschaft (PaSW) aufgebaut werden kann. Als Systemwissenschaft hat die Physik mindestens die folgenden drei Dimensionen: (1) eine inhaltliche und thematische, (2) eine methodische und (3) eine strukturelle. Inhaltlich unterscheidet sich PaSW von einem traditionellen Physikunterricht durch die Betonung der physikalischen Funktionsweise von mehr oder weniger komplexen Systemen. Um mit diesem Aspekt klar zu kommen, braucht es eine Methodik der dynamischen Systeme mit entsprechenden Werkzeugen. Schliesslich behaupte ich, dass eine PaSW nicht dadurch erreicht wird, indem man der traditionellen Struktur der Physik die ersten beiden Aspekte hinzufügt, sondern indem man die Struktur der physikalischen Theorie auf ursprünglichen Schemata und Metaphern aufbaut. Der Aufsatz diskutiert bei allen drei Dimensionen konkrete Umsetzungsmöglichkeiten. PaSW hat viel mit den Natur- und den Ingenieurwissenschaften gemein und beleuchtet die Grundlagen der Ökologie und der Ökonomie. Sie kann als Beispiel für einen interdisziplinären Zugang zu Wissenschaft und Technik dienen.

1 EINFÜHRUNG

Will man die Physik nahe an die Anwendungen in Umwelt und Technik heranbringen, so bietet sich die Systemwissenschaft¹ als Ausrichtung an. In ihrem klassischen Aufbau läuft die Physik

Gefahr, sich in vielen einzelnen—sicher wichtigen—Phänomenen und Prinzipien zu verlieren.² Zudem haben die Ingenieurwissenschaften die Teile der Physik in sich integriert, die ihnen jeweils am nächsten liegen. Die Reaktion von Ingenieuren, dass “wir das selber machen, und besser” folgt dann auf dem Fuss. Es drängt sich also auf, die Struktur des Physikunterrichts für Ingenieure zu hinterfragen.

In den Ingenieur- und Umweltwissenschaften hat natürlich auch eine Umorientierung hin zu Systemen und Systemwissenschaften stattgefunden. Die Grundlagenwissenschaften (Biologie, Chemie, Physik) haben einen Grad der Reife erreicht, der es erlaubt, sie auf immer komplexerer Systeme anzuwenden. Man erkennt die Bedeutung übergreifender Prinzipien und Themen für die Ausbildung von Ingenieuren. Ein Beispiel dafür ist das Projekt der Foundation Coalition, in der sich mehrere US Universitäten zusammengeschlossen haben.³ Neu an der Ausbildung ist ein integriertes Ingenieur-Curriculum, das auf der Physik der Systeme aufbaut.⁴ Studierende der verschiedensten Richtungen erhalten eine integrierte und gemeinsame Ausbildung in den grundlegenden Ingenieurfächern. Diese werden durch die Ideen der Bilanzierung und Modellierung und die Systemwissenschaft zusammengehalten (Richards, 2001).

Das Modell des Physikunterrichts für Ingenieure, das heute fast ausschliesslich zur Anwendung kommt, basiert auf einer anderen Metapher als der einer Systemwissenschaft.⁵ Deshalb muss man zeigen, was eine Physik als Systemwissenschaft überhaupt sein könnte. Das möchte ich hier in drei Schritten tun. PaSW hat mindestens eine thematische, eine methodische und eine strukturelle Dimension. Die ersten beiden sind relativ leicht zu begründen und zu konkretisieren. Bei der dritten wird die Begründung etwas aufwendiger werden.

2 THEMATICHE DIMENSION DER PASW

Diese Dimension ist in einem Physikunterricht relativ einfach zu realisieren. Wir wählen ein paar Objekte, deren Systemcharakter deutlich hervortritt, aus und verwenden sie als Anwendungsbeispiele für die Physik, die wir unterrichten möchten. In Tabelle 1 ist eine Liste von Fallbeispielen aufgeführt, die ich in meinem Unterricht als Leitthemen der verschiedenen Kapitel der Physik verwende. Ein Fallbeispiel dient dazu, die zu lernende Physik zu definieren und wird am Schluss als grössere Anwendung bearbeitet.⁶

Allerdings ist die Sache weniger harmlos, als wir auf den ersten Blick vielleicht annehmen würden. Nimmt man Fallbeispiele als Ausgang für einen Unterricht, so ergeben sich fast automatisch Konsequenzen für die Form des Unterrichts und den Umfang der Themen, die behandelt werden (Stoffproblem).

Natürlich könnten Dozierende versuchen, in einem durch Vorlesungen strukturierten Unterricht einen Fallstudienaspekt hineinzubringen. Ich würde aber behaupten, dass man damit eine

sehr künstliche Umgebung schafft. Eine natürliche Lernumgebung für einen fallstudienorientierten Unterricht sieht wahrscheinlich anders aus (Fuchs, 2001). Der Studiounterricht (Wilson, 1994), den ich umgesetzt habe (Ernst and Fuchs, 2001; Fuchs et al. 2001), ist ein Beispiel, wie man eine Synthese von Fallstudien und einem strukturierten “enzyklopädischen” Physikunterricht⁶ erreichen kann (Fuchs, Ecoffey, Schütz, 2001-2004).

Tabelle 1: Themen und Fallstudien aus Physics as a Systems Science^a

	Subject	Case Study
1	Storage and flow of fluids	The systemic blood flow of mammals
2	Electric processes	Supporting batteries by superconductors
3	Energy in physical processes	Solar energy: Charging supercapacitors with PV
4	The dynamics of heat	Heat from the Earth: Heating of buildings
5	The transport of substances	Osmosis in potatos
6	Chemical reactions	Dynamics of batteries and fuel cells
7	Oscillations in fluids and electricity	Chaotic hearts
8	Rotational systems	Keeping time: Mechanical clocks
9	Balance of momentum	Bungee jumping
10	Thermodynamics of fluids	Propagation of sound
11	Chemical processes and heat	Latent heat storage
12	Radiative transfer	The greenhouse effect
13	Thermoelectric processes	Peltier coolers
14	Motion in 2D and 3D	Parking spacecraft at L4
15	Rotation and translation	The inverted pendulum and chaos
16	Mechanical flow systems	Rocket motion

- a. Fuchs, Ecoffey, Schütz (2001-2004): Materials for Physics as a Systems Science. Die Materialien (Filme zu Versuche, Daten, Modelle, Anleitungen, etc.) sind in einer Browser-Umgebung geordnet. Von den hier aufgeführten Themen können in zwei Semestern bei 4 Credits pro Semester 8 bearbeitet werden (normalerweise sind dies 1-4, 7-9 und 14); das ganze Programm braucht gegen 16 Credits, besonders, wenn man noch Feldtheorie einbaut. Die Tatsache, dass Mechanik nicht wie üblich am Anfang steht, hat mit der Struktur von PaSW zu tun (siehe Abschnitt 4).

Es bleibt die Frage der Stoffauswahl. In einem aktivitätsorientierten, durch Fallstudien strukturierten Physikunterricht werden die Dozierenden wesentlich weniger zur ganzen Klasse sprechen, also weniger Stoff vermitteln. Untersuchungen zeigen zwar, dass kaum etwas von dem,

was Dozierende erzählen, auch in den Köpfen der Zuhörer langfristig hängen bleibt, aber das hält uns nicht davon ab, zu fordern, dass wichtige Themen in einem möglichst grossen Umfang vermittelt werden—und dazu verwenden wir den Vortrag vor der Klasse. Wenn wir nun die Idee einer Physik als Systemwissenschaft mit der thematischen Dimension umsetzen möchten, so werden wir uns auf bestimmte inhaltliche Kompromisse einstellen müssen.⁷

3 METHODEN UND WERKZEUGE

Die methodischen Aspekte der Systemtheorie lassen sich heute mit Hilfe moderner Rechenwerkzeuge elegant in den Unterricht einbauen. Wir haben Werkzeuge für Datenerfassung mit dem eigenen Laptop, Programme zur Datenanalyse und Systeme für die Modellierung dynamischer Systeme.⁸ Zusammen erlauben diese Werkzeuge, die Physik viel “lebensnaher” zu gestalten. Insbesondere können wir die Fähigkeit der Studierenden entwickeln, experimentelle Arbeit mit Modellbildung zu verbinden—und so eine verallgemeinerte wissenschaftliche und technische Problemlösungsmethodik zu üben (Fuchs, 2001, 2004a).

Ein wichtiges Element in diesem Unterricht ist die systemdynamische Modellierungsmethodik (Fuchs, 2002). Die Programme, die heute für die Modellierung dynamischer Systeme zur Verfügung stehen, sind auch durch Anfänger leicht einzusetzen. Den didaktischen Anforderungen der Systemtheorie wird durch die Werkzeuge Rechnung getragen. Studierende können relativ schnell konkrete Probleme lösen und werden dadurch auf die Anwendung fortgeschrittener Methoden der Systemtechnik vorbereitet.⁹

Für die Art des Unterrichts und den auszuwählenden Inhalt gelten ähnliche Bemerkungen wie in Abschnitt 2. Die methodische Praxis der Systemtheorie wird kaum in einer Vorlesung Platz finden. Man kann den Studierenden nur beschränkt etwas “vormodellieren” und “vormessen”. Das Studio ist eine mögliche Umgebung, in der die methodische Seite der Systemtheorie in der Physik praktisch eingebracht werden kann. Schliesslich müssen wir auch hier festhalten, dass die Studierenden Zeit brauchen, ihre methodischen Fähigkeiten zu entwickeln. Diese Zeit steht nicht zur Verfügung, wenn man möglichst viel Stoff vortragen will.

4 WURZELN UND STRUKTUR DER PASW

Hat Physik als Systemwissenschaft eine eigene Struktur? Genügt es nicht, die klassische Struktur zu nehmen, ein paar dynamische Modelle zu erstellen und im übrigen einfach dem Ganzen die Theorie der Systemtechnik überzustülpen? Im einfachsten Fall wenden wir die klassische Darstellung der Physik auf ein paar naturwissenschaftliche und technische Systeme an, und

voilà, da haben wir eine Physik als Systemwissenschaft.

Natürlich können wir die Argumente des inneren Zusammenhalts und der Ökonomie anführen und zeigen, dass das so entstehende Gebäude unästhetisch und aufwendig (im Aufbau und im Unterhalt) wird. Wir können auch zeigen, dass die Grundannahme der klassischen Darstellung der Physik zu keiner Systemwissenschaft führt.¹⁰ Diese Argumente haben es aber schwer gegen das Prinzip der Trägheit. Wir sind eher geneigt, etwas Neues durch ein Aneinanderfügen von alten und neuen Komponenten entstehen zu lassen. Also muss man zeigen, dass nur eine andere Struktur—basierend auf einer anderen Metapher—auf natürliche Art zu einer Systemwissenschaft führt.

Die Linguistik, die Kognitionsforschung und die Philosophie der letzten zwanzig Jahre haben deutlich gemacht, dass menschliches Verstehen auf bildhaften Schemata (Kant, 1781, 1790) und ihrer metaphorischen Ausarbeitung gründet (Lakoff and Johnson, 1980). Die Schemata und die darauf aufbauenden Metaphern basieren stark auf unserer Körperlichkeit (Johnson, 1987; Lakoff and Johnson, 1997). Die Wurzeln unseres Verstehens können also weit in die Geschichte der Menschheit und ihrer Kultur zurückzuverfolgt werden (Egan, 1988, 1990; Donald, 1991). Interessanterweise lässt sich ein altes Naturverständnis zu einer modernen Naturwissenschaft ausbauen (Fuchs, 2004a-c).

Zusammengefasst geht das etwa folgendermassen. (1) Das vielleicht älteste und ursprünglichste bildhafte Schema hat seinen Ursprung in der Wahrnehmung von Unterschieden wie hell und dunkel, hoch und tief, hart und weich, kalt und heiss, etc. Unter diesen nimmt “hoch–tief” eine besondere Stellung ein: das Schema der Vertikalität hat direkt etwas mit der körperlichen Erfahrung des aufrechten Gangs zu tun. Dieses Schema wird in vielen verschiedenen Metaphern auf andere Erfahrungsbereiche übertragen (Lakoff and Johnson, 1980). In der Sprache der mythischen (oralen) Kulturen handelt es sich bei diesen Unterschieden um ein Beispiel von Polaritäten.¹¹ Die Natur hat die Tendenz, zwischen den Polen zu vermitteln, d.h. Spannungen abzubauen und die Niveaus einander anzugleichen. Die Welt läuft allerdings nur weiter, wenn die Spannungen aufrechterhalten oder ständig wieder erzeugt werden (zu diesem Zweck stützt die ägyptische Göttin Shu die Göttin Nut, die sich als Himmel über die Erde (Geb) spannt; solange der Himmel nicht einstürzt, haben wir eine Urspannung, die die Welt laufen lässt).

(2) Das zweite ursprüngliche Schema, das ich benütze, ist das der Stofflichkeit. Die Welt ist von Objekten und Substanzen bevölkert. Verbinden wir das erste mit dem zweiten Schema, so können wir die Natur folgendermassen verstehen. Die Vorgänge bestehen darin, dass Substanzen, durch Spannungen angetrieben, so lange fliessen, bis sich die Niveaus angeglichen haben. Wasser und Höhenunterschiede bieten sich als erste direkte Erfahrung für dieses kombinierte Schema an. Diese Grundvorstellung kann man metaphorisch auf andere Gebiete projizieren und erhält so direkt eine Physik der dissipativen Prozesse (hydraulische, elektrische, thermische, mechanische; Fuchs, 2004b). Das ist sicher etwas Anderes als eine Physik, deren Grundvorstel-

lung die der reibungsfreien Bewegung eines Schwarms von Teilchen ist.¹²

(3) Das Energieprinzip lässt sich auf das Schema der direkten Verursachung zurückführen. Im Alltag hat dieses Schema eine Gestalt mit folgenden Elementen (Lakoff and Johnson, 1980). Ein Agent wirkt auf einen Patienten ein; der Agent hat die Änderung eines Zustandes im Patienten im Sinn; die Änderung des Zustandes ist physisch; der Agent hat einen Plan, um sein Ziel zu erreichen; der Agent ist eine Energiequelle, der Patient ist das Ziel dieser Energie (d.h. die Änderung im Patienten ist das Resultat einer äusseren Energiequelle). Wir können uns also vorstellen, dass ein Prozess (Agent) einen anderen (Patient) antreibt, indem er ihm Energie übergibt: Energie wird abgeladen und dem Patienten aufgeladen.

Alle so beschriebenen Phänomene werden durch die selben bildhaften Schemata und ihre metaphorische Projektion strukturiert und dem Verständnis zugeführt. Analogien sind ein vollkommen natürliches Element unserer Darstellung. Es gibt keine bevorzugten Vorgänge (z.B. mechanische), auf die alles Andere zurückzuführen sein soll. Wir sind damit einer systemischen Struktur der Wissenschaft zumindest einen grossen Schritt näher gekommen.

Die Untersuchungen zu Schemata, Metaphern und Verstehen sind relativ neu (ein Anfang stammt von Lakoff and Johnson, 1980), und ihre Anwendung auf die Physik hat gerade erst begonnen (Fuchs, 2004b). Ich will nicht behaupten, dass damit schon ein wasserdichtes Konstrukt erstellt wurde. Aber die Hinweise, dass wir erfolgreich eine in unserem Grundverstehen fundierte Physik als Systemwissenschaft konstruieren können, mehren sich.

Eine Physik, die die hier skizzierten metaphorischen Struktur nahe kommt, gibt es schon seit einiger Zeit. Die umfassendste Darstellung finden wir in der seit etwa 1950 erneuerten und erweiterten Kontinuumsphysik (Truesdell and Toupin, 1960; Truesdell and Noll, 1965; Eringen, 1971-1976; Müller, 1985; Jou et al., 1996). Die Übertragung auf eine einfachere Darstellung, die sich auch für den einführenden Unterricht eignet, wurde in den letzten 20 Jahren durch Maurer (1990, 1996, 1996) und Fuchs (1987a-b, 1996, 1997a-b, 1998) geleistet. Ein erstes Lehrbuch für die Sekundarstufe II wendet diese Struktur konsequent an (Borer et al., 2000). Die in der Einleitung besprochene Grundlage einer integrierten Ingenieurwissenschaft der Foundation Coalition setzt wesentliche dieser Elemente ein (Richards, 2001).

5 ZUSAMMENFASSUNG

Man kann Physik als Systemwissenschaft strukturieren und konkretisieren. Man erreicht das z.B., indem man komplexe Systeme mit den Werkzeugen der Systemtheorie bearbeitet, d.h., indem man komplexe dynamische Systeme als Fallbeispiele für die Erkundung der Physik heranzieht. Darüber hinaus sollte die Theorie selber eine systemische Form haben. Eine Vorstellung von Vorgängen als dem Ergebnis der reibungsfreien Bewegung vieler Teilchen ist

dazu ungeeignet. Die uns Menschen eigenen ursprünglichen Vorstellungen, die in bildlichen Schemata und ihren metaphorischen Projektionen sichtbar werden, vermitteln demgegenüber einen sehr direkten Zugang zu einer systemischen Struktur der Physik. Analogien und analogisches Denken sind ein natürlicher Teil einer solchen Struktur einer Theorie.

Eine Physik als Systemwissenschaft steht den Ingenieur- und den Umweltwissenschaften sehr nahe. Sie benutzt die selben systemischen Grundideen, die in Technik und Ökologie in den letzten Jahren Einzug gehalten haben. Die wissenschaftliche Methodik, die Experimentieren mit Modellieren verbindet, und im besonderen die Technik der Modellierung dynamischer Systeme, stellen wertvolle Elemente der Grundausbildung in Technik und Naturwissenschaften dar. Als Systemwissenschaft eröffnet die Physik das Tor zu interdisziplinärem Arbeiten auf einfache und natürliche Art.

ANMERKUNGEN

- 1 Das, was man heute Systemwissenschaft nennt, entstand im früheren 20. Jahrhundert durch Anregungen aus Biologie und Physik. Sie hat dann durch die Entwicklungen der Technik (Regeln und Steuern) in den 40-er Jahren einen grossen Aufschwung erfahren und von den mathematischen Formalismen wichtige Impulse erhalten. Natürlich geht Systemwissenschaft weit über die Anwendungen in der Technik hinaus. Sie wäre gar keine Systemwissenschaft ohne ihre Interdisziplinarität, die sie zu einer bedeutenden Methodik von Sozial- bis Naturwissenschaften macht. Kurz gesagt geht es bei ihr um die Behandlung von Fragen, die in Systemen auftreten. Ein System wird am einfachsten als ein Objekt beschrieben, das aus mehreren Komponenten besteht, die miteinander in Wechselwirkung (Kooperation) stehen und zu dynamischem Verhalten des Systems führen. Schon die Wechselwirkung zwischen ein paar wenigen relativ einfachen Komponenten kann zu komplexem Verhalten führen. (International Society for the Systems Sciences, <http://www.iss.org>; definition of cybernetics and systems science: <http://pespmc1.vub.ac.be/CYBSWHAT.html>.)
- 2 Die Aussage, dass sich die Physik in einzelnen Phänomenen und Gesetzen "verlieren" kann, bezieht sich auf den Unterricht, nicht auf ihre Anwendung in einem konkreten Fall in einem industriellen oder naturwissenschaftlichen Projekt. In einem umfassenden Projekt spielen Physiker oft und berechtigterweise die Rolle von Spezialisten, die spezielles Wissen oder spezielle Fähigkeiten gezielt zum Einsatz bringen. Wir reden hier aber nicht von Physikern in industriellen Projekten, sondern von der Ausbildung von zukünftigen Ingenieuren und der Rolle, die die Physik dabei als mögliches Grundlagenfach haben kann.
- 3 Foundation Coalition (www.foundationcoalition.org). Siehe auch D. E. Richards (www.rose-hulman.edu/~richards/textbooks.htm). Froyd, Jeffrey, and Karen Frair, "Theoretical Foundations for the Foundation Coalition Core Competencies," Proceedings, 2000 ASEE National Conference, St. Louis, MO, 18–21 June 2000.
- 4 D. Richards führt in einem Vortrag die Ursprünge seiner Vorlesung "Basic Engineering Science" (Richards, 2001) auf Fluidmechanik und Physik als Systemwissenschaft (Fuchs, 1996) zurück (www.foundationcoalition.org/home/sophomore/SEC_abstract.html; www.rose-hulman.edu/~richards/sec/sec_information.htm).
- 5 Die Standardstruktur des Physikunterrichts ist seit mindestens 50 Jahren die selbe. Er beginnt mit Bewegung (Mechanik des Massenpunktes), geht zu Rotation und der Bewegung des starren Körpers über, behandelt et-

was Fluide und Wellen, lässt Wärmelehre (heute) meistens aus, führt elektrische und magnetische Felder ein und endet mit Optik und etwas Quantenphysik (Halliday, Resnick, Walker, 1997). Hinter allem steht die Vorstellung, dass Bewegung, d.h. die Mechanik, allen anderen Vorgängen zugrunde liegt. Auch wenn man weiss, dass man die Vorgänge in der Welt kaum auf praktische Weise als Resultat der reibungsfreien Bewegung vieler Teilchen erklären kann, so hängt die Physik doch an dieser Vorstellung. Soweit die klassische Darstellung der Physik überhaupt auf einer Metapher basiert, so ist diese sicher in der "natürlichen" Bewegung, d.h. in der reibungsfreien Trägheitsbewegung zu finden.

- 6 Das Fallbeispiel, das einem Kapitel vorsteht, wird auf die vorkommenden Prozesse untersucht. Für jeden wichtigen Vorgang werden dann kleinere Untersuchungen definiert. Eine Untersuchung besteht meistens aus einem oder einigen wenigen Versuchen. Filme und Daten der Experimente werden den Studierenden zur Verfügung gestellt, oder die Lernenden haben im Studio Zugang zu Versuchen. Aufgaben dienen als Leitfaden für die einzelnen Untersuchungen, so dass die Studierenden die physikalischen Inhalte in kleinen Teams selber bearbeiten können (die Studierenden geben ihre Lösungen der Aufgaben ab). Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass die Problemstellungen und Fragen, die ich früher im Frontalunterricht präsentiert habe, in Studio im Laufe der praktischen Arbeiten so gut wie alle auftreten und von den Studierenden diskutiert und bearbeitet werden. Am Ende der Periode, die für ein Kapitel zur Verfügung steht, kann dann die Fallstudie gelöst werden. Pro Semester wählen die Teams zwei Fallstudien als kleine Projekte aus, deren Ergebnisse sie entweder präsentieren oder über die sie einen Bericht schreiben.
- 7 Im Jahr 2004 hatten Studierende der Maschinenbauklassen noch exakt 50% der Unterrichtszeit in Physik verglichen mit der Ausbildung vor etwa 10 oder 12 Jahren. Bezogen auf den ganzen Studienumfang hat sich der Anteil der Physik von 10% auf 6.7% verringert. Würde man absolut nichts am Physikunterricht ändern, so könnten also schon heute nur noch 50% der Themen, die früher behandelt wurden, bearbeitet werden.

Die Zeit für eine ausführliche Darstellung von "Stoff" existiert nicht mehr. Das heisst natürlich nicht, dass man sich nicht die Frage nach der Verwendung der verbliebenen Zeit stellen soll. Man kann sich auf den Standpunkt stellen, dass heute jede Stunde, in der ein Physikozyent den Studierenden die Physik durch Frontalunterricht "näher bringen" kann, noch viel wichtiger ist als früher. Durch Systembetrachtungen und praktische Anwendungen von den wichtigen Inhalten der Physik abzulenken, kann durchaus als "Frevel" angesehen werden. Leider hilft uns das nicht dabei, eine Rolle für die Zukunft des Physikunterrichts in der Ingenieurausbildung zu finden.

Ein Weg, den berechtigten Anliegen der Inhalte der Physik etwas mehr Achtung zu verschaffen, müsste z.B. darin bestehen, die Studierenden massiv zu Lesen guter Bücher und Unterlagen zu bringen. Information sollte hauptsächlich durch gesteigerte Eigenleistung beim Lesen aufgenommen werden (mehr Lesen statt Vorlesen!). Das löst das Problem aber immer noch nicht. Wir werden meiner Meinung nach nicht darum herum kommen, sehr sorgfältig die zukünftige Bedeutung von Information, Wissen, Methoden, Können etc. abzuwägen und die relativen Gewichte gegenüber früher zu verschieben. Es liegt dann am Departement, dem Physikunterricht den nötigen (Frei)Raum zu verschaffen.

- 8 Werkzeuge, die eine praktische Umsetzung der Systemtheorie erlauben, sind heute leicht zugänglich. Für die Datenerfassung im Labor mit dem eigenen Laptop stehen z.B. die Systeme von Vernier oder Pasco zur Verfügung. Diese Systeme besitzen auch Module für die Datenanalyse. Dafür können wir aber auch allgemeine Werkzeuge wie Tabellenkalkulation einsetzen. Für die Einführung in die Modellierung dynamischer Systeme bieten sich Berkeley Madonna (berkeleymadonna.com), Stella ([iseesystems](http://iseesystems.com)), Vensim (Ventana Systems) und andere an.
- 9 In der Systemtechnik und Regelungstechnik hat sich z.B. Simulink bewährt. Die Erfahrung im Studiengang DP zeigt, dass der Einsatz von Simulink nach der Einführung in systemdynamisches Modellieren kaum auf Schwierigkeiten stösst.

- 10 Die klassische Metapher der Physik (siehe Anmerkung 4) führt nicht zu einer Systemwissenschaft. Man kommt auf keinem direkten Weg von der reibungsfreien Bewegung kleiner Teilchen zu den für eine Systembetrachtung nötigen Elementen wie Rückkopplung, Kooperation verschiedener Teile eines komplexen Systems, Unterscheidung von Bilanzgesetzen und konstitutiven Gesetzen, Analogien, etc.
- 11 Für die Anwendung in der Physik können wir das Konzept dieser Polaritäten als Niveaus oder Potentiale interpretieren. Ein Niveauunterschied ist eine Spannung.
- 12 Natürlich liefert eine Physik der dissipativen Prozesse in den Gebieten, die auch von der traditionellen Darstellung bearbeitet werden, die gleichen Resultate. Sie geht aber wesentlich über deren Ergebnisse hinaus, speziell in der Thermodynamik (Fuchs, 1996).

LITERATUR UND QUELLEN

- Berkeley Madonna: <http://www.berkeleymadonna.com>.
- Borer T., P. Frommenwiler, H.U. Fuchs, H. Knoll, G. Kopacsy, W. Maurer, E. Schütz, K. Studer, U. Walker (2000): *Physik: Ein systemdynamischer Zugang für die Sekundarstufe II*. Sauerländer, Aarau.
- Donald M. (1991): *Origins of the Modern Mind. Three Stages in the Development of Culture and Cognition*. Harvard University Press, Cambridge.
- Egan K. (1988): *Primary Understanding. Education in Early Childhood*. Routledge, New York.
- Egan K. (1990): *Romantic Understanding. The Development of Rationality and Imagination, Ages 8-15*. Routledge, New York.
- Eringen A. C. (1971-1976): *Continuum Physics*, Vol.I-IV. Academic Press, New York.
- Ernst R. and P. Fuchs (2001): Report on the ISLE Trial Run at the Zurich University of Applied Sciences at Winterthur (ZHAW) in May and June 2000. In Fuchs et al. (2001).
- Fuchs H. U. (1987a): Entropy in the teaching of introductory thermodynamics, *Am. J. Phys.* **55**,215-219 (1987)
- Fuchs H. U. (1987b): Do we feel forces? In J.D. Novak ed., *Proceedings of the Second International Seminar on Misconceptions in Science and Mathematics* (Cornell University, Ithaca, New York, 1987), Vol.III, p. 152-159.
- Fuchs H. U. (1996): *The Dynamics of Heat*. Springer-Verlag, New York, and *Solutions Manual for The Dynamics of Heat*. Springer-Verlag, New York.
- Fuchs H.U. (1997a): The Continuum Physics Paradigm in Physics Instruction. I: Images and Models of Continuous Change. Zurich University of Applied Sciences, Winterthur.
- Fuchs H.U. (1997b): The Continuum Physics Paradigm in Physics Instruction. II: System Dynamics Modeling of Physical Processes. Zurich University of Applied Sciences, Winterthur.
- Fuchs H.U. (1998): The Continuum Physics Paradigm in Physics Instruction. III: Using the Second Law. Zurich University of Applied Sciences, Winterthur.
- Fuchs H. U. (2001): *Learning, Learning Cycles, and Learning Environments*. Zurich University of Applied Sciences, Winterthur.
- Fuchs H. U. (2002): *Modeling of Uniform Dynamical Systems*. Orell Füssli Verlag, Zürich, 2002.
- Fuchs H. U. (2004a): *Metaphern, Vorstellungskraft und Symbole: Fundamente des formalen Denkens*. Zürcher Hochschule Winterthur.

- Fuchs H. U. (2004b): Mythos und Romantik in der Physik. Zürcher Hochschule Winterthur.
- Fuchs H. U. (2004c): Mehr als Sie je über Entropie wissen wollten. Zürcher Hochschule Winterthur.
- Fuchs H. U., G. Ecoffey, and E. Schütz (2001): Reading materials and CD for the Dynamics of Heat. In Fuchs et al. (2001).
- Fuchs H.U., R. Ernst, P. Fuchs, M. Ilg, G. Ecoffey, E. Schütz (2001): Integrated System-dynamics Learning Environments (ISLEs): Project Report 2000. Zurich University of Applied Sciences, Winterthur.
- Fuchs H. U., G. Ecoffey, and E. Schütz (2001-2004): Physics as a Systems Science. Materials for an introductory physics course for engineering students. SES, Fribourg.
- Halliday D., Resnick R., Walker J. (1997): *Fundamentals of Physics*. Extended 5th edition. Wiley, New York.
- Johnson M. (1987): *The Body in the Mind*. The University of Chicago Press, Chicago, 1987.
- Jou D., J. Casas-Vazquez, G. Lebon, *Extended Irreversible Thermodynamics* (Springer-Verlag, Berlin, 1996), 2nd ed.
- Kant I. (1782): *Kritik der reinen Vernunft*. Hg. v. W. Weischedel, 2. Aufl., Suhrkamp, Frankfurt/M. 1996
- Kant I. (1782): *Kritik der Urteilskraft*. Hg. v. W. Weischedel, 2. Aufl., Suhrkamp, Frankfurt/M. 1996
- Lakoff G. and Johnson M (1980): *Metaphors We Live By*. University of Chicago Press, Chicago (with a new Afterword, 2003).
- Lakoff G. and Johnson M. (1999): *Philosophy in the Flesh: The Embodied Mind and Its Challenge to Western Thought*. Basic Books.
- Maurer W. (1990): Ingenieurphysik auf neuen Wegen. *Technische Rundschau* **82** (29/30), 12–16.
- Maurer W. (1996): Der Impuls im Flüssigkeitsbild, PdN:Physik, Aulis Köln.
- Maurer W. (1998): Elementare Kontinuumsmechanik, PdN:Physik, Aulis Köln.
- Müller I. (1985): *Thermodynamics*. Pitman, Boston.
- Pasco, Roseville, CA (<http://www.pasco.com>).
- Richards D.E. (2001): Basic Engineering Science: A Systems, Accounting, and Modeling Approach; <http://www.rose-hulman.edu/~richards/textbooks.htm>
- Stella: ise Systems Inc., Lebanon, NH. (<http://www.iseesystems.com>)
- Truesdell C. A. and R. A. Toupin, “The Classical Field Theories,” in *Encyclopedia of Physics*, v. III/1, S.Flügge ed. (Springer-Verlag, Berlin, 1960).
- Truesdell C. A. and W. Noll, “The Non-Linear Field Theories of Mechanics,” in *Encyclopedia of Physics*, v. III/3, S.Flügge ed. (Springer-Verlag, Berlin, 1965).
- Vensim: Ventana Systems, Harvard MA (<http://www.vensim.com>).
- Vernier Software & Technology, Beaverton (<http://www.vernier.com>).
- Wilson J.M. (1994): The CUPLE physics studio. *The Physics Teacher* **32**, 518-523.