

# **Modellbildung und Simulation dynamischer Systeme und ihre gesellschaftliche und didaktische Relevanz**

Bernard Winkelmann, Universität Bielefeld, IDM

(Vortrag am 12. November 1989 auf der Tagung „Neue Technologien und Zukunftsperspektiven des Lernens“ am Landesinstitut für Schule und Weiterbildung in Soest. Publiziert im Tagungsband: Landesinstitut für Schule und Weiterbildung (Hrsg.): Beratungsstelle für neue Technologien: Neue Technologien und Zukunftsperspektiven des Lernens. Neue Medien im Unterricht. Soester Verlagskontor, Soest 1990. ISBN 3-8165-1738-2. S. 208 - 223.)

## **1. Vernetzung und vernetztes Denken**

Unsere Welt ist ein vernetztes System (Vester 83). Sie war es immer schon, aber jetzt sind die Auswirkungen menschlicher Tätigkeiten massiver, die globalen Waren-, Geld- und Informationsströme umfassender und unsere Beobachtungsmittel weltumspannender geworden, so daß wir die globale, praktisch alle Lebensbereiche betreffende Vernetzung jetzt deutlicher spüren und wahrnehmen können als frühere Generationen und Zeiten.

Einige Beispiele:

Unsere Art, privat und öffentlich Waren- und Personentransport zu organisieren, hat nicht nur Auswirkungen auf den Straßenbau, das Aussehen unserer Land- und Ortschaften (was relativ unmittelbar verständlich ist), sondern auch auf unsere Wälder als ganzes und über den Treibhauseffekt auf das Weltklima für die kommenden Generationen - natürlich nur als eine Ursachenkette von vielen.

Wenn wir unseren Fleischkonsum auf Rekordhöhen treiben, so hat das nicht nur Auswirkungen auf unseren Körper und unser Wohlbefinden, sondern beeinflusst auch über die Massentierhaltung mit ihrem Gülleaufkommen und ihren Futtermittelimporten die Strukturen der Landwirtschaft, die Verseuchung des Grundwassers auf Jahrzehnte hinaus und die Fähigkeit zur Selbstversorgung in vielen der ärmsten Länder der Dritten Welt.

Für vernetzte Systeme ist charakteristisch, daß die meisten Aktionen in Bedingungsgeflechten stehen und mehr als eine Wirkung haben, die über die Wirkungsnetze des Systems letztendlich wieder auf die Bedingungen der Aktion selbst zurückwirken, z.T. mit erheblichen Zeitverzögerungen. Neben der beabsichtigten Wirkung gibt es i.a. viele Nebenwirkungen, deren Weiterwirkungen unter Umständen langfristig den kurzfristig erreichten Erfolg der Aktion aufheben können.

Um in vernetzten Systemen sinnvoll agieren zu können, ist vernetztes Denken notwendig, das über lineares Ursache-Wirkungs-Denken hinaus den System- und Netzcharakter ausdrücklich einbezieht.

Man kann wohl ohne Übertreibung sagen, daß alle großen derzeitigen Krisen mit darauf

beruhen, daß von fast allen Beteiligten der Systemcharakter des jeweiligen Handlungsumfeldes nicht erkannt oder nicht genügend beachtet wurde. Das gilt für Wettrüsten, die vielfältigen Ökologie-Krisen gleichermaßen wie für den Nord-Süd-Konflikt und den Terrorismus.

(Genaue Ausführungen und viele grundlegende Beispiele aus einer großen Zahl von Bereichen finden sich in Vester 80).

Zu dieser Problematik heißt es im Klappentext zu Capra 83:

„Weiterleben kann die Menschheit nur, wenn sie von Grund auf anders lebt. Das erfordert zuerst ein anderes Denken, eine andere „Wahrnehmung“ der Welt. Nämlich: komplex statt linear, in Netzen und Bögen statt in Zielgeraden und den Kurven der Statistik. Qualitatives Werten muß an die Stelle von quantitativem Messen treten. Denn die Welt ist mehr als die Summe ihrer Teile.“

Wenn dann weiter von „komplexem, kontemplativem, ja meditativem Denken, Begreifen und Erfassen“ die Rede ist – Capras „Wendezeit“ gilt ja nicht umsonst als wichtige Anstoß-Literatur zur New-Age-Bewegung –, so werden wir uns bei der Betrachtung der Modellbildung und Simulation von dynamischen Systemen hier nur auf komplexes Denken einlassen; inwieweit Schule darüber hinaus noch der richtige Ort für Kontemplation und Meditation sein kann, will ich gar nicht erst diskutieren; jedenfalls aber kann die Schule vorbereitende Denkanstöße dazu geben.

## **2. Probleme des vernetzten Denkens**

In ihrer vielbeachteten Arbeit „Über das Problemlösen in sehr komplexen Realitätsbereichen“ (Dörner/Reither 78) haben die Psychologen Dörner und Reither die Ergebnisse eines psychologischen Experiments beschrieben, bei dem 12 Personen, Akademiker bzw. Studenten unterschiedlicher Fachrichtungen, jeweils die Aufgabe hatten, für ein fiktives afrikanisches Gebiet Tanaland (das im Computer simuliert wurde) Entwicklungsdirektor zu spielen. Dabei wurden durchweg nach kurzfristigen Verbesserungen katastrophale Ergebnisse erzielt; das vorher zwar arme, aber stabile Gebiet wurde zugrunde gerichtet. (Ähnlichkeiten mit Effekten von „Wirtschaftshilfen“ in den Ländern der sogenannten Vierten Welt sind frappant, obwohl ein grundsätzlicher Unterschied wohl darin besteht, daß bei Tanaland die Helfer keinerlei ideologische oder materielle Bereicherungsabsichten hegten im Gegensatz zur üblichen Entwicklungshilfe der Industriestaaten.)

Mithilfe des Experiments konnten häufige Strategiefehler im Umgang mit komplexen Systemen bestimmt werden. Die sechs wichtigsten sind:

„Erster Fehler: Mangelhafte Zielerkennung. Das System wird abgetastet, bis ein Mißstand gefunden wird. Dieser wird beseitigt, dann der nächste Mißstand gesucht (Reparaturdienstverhalten). Wie bei einem Anfänger im Schachspiel geschieht die Planung ohne große Linie.

Zweiter Fehler: Man beschränkt sich auf Ausschnitte der Gesamtsituation. Große Datenmengen werden gesammelt, die zwar enorme Listen ergeben, jedoch kaum Beziehungen aufzeigen. Dadurch sind sie in keine Ordnung zu bringen, und die Dynamik des Systems bleibt unerkannt.

Dritter Fehler: Einseitige Schwerpunktbildung. Man versteift sich auf einen Schwerpunkt, der richtig erkannt wurde. Hierdurch bleiben jedoch gravierenden Konsequenzen in anderen Bereichen unbeachtet.

Vierter Fehler: Unbeachtete Nebenwirkungen. In eindimensionalem Denken befangen, geht man bei der Suche nach geeigneten Maßnahmen zur Systemverbesserung sehr „zielstrebig“, d.h. geradlinig und ohne Verzweigungen vor. Nebenwirkungen werden nicht analysiert.

Fünfter Fehler: Tendenz zur Übersteuerung. Häufig wird zunächst sehr zögernd vorgegangen. Wenn sich dann im System nichts tut, greift man kräftig ein, um bei der ersten unbeabsichtigten Rückwirkung wieder komplett zu bremsen.

Sechster Fehler: Tendenz zu autoritärem Verhalten. Die Macht, das System verändern zu dürfen, und der Glaube, es durchschaut zu haben, führt zum Diktatorverhalten, das jedoch für komplexe Systeme völlig ungeeignet ist. Für diese ist ein „anschniegsames Verhalten“, welches mit dem Strom schwimmend verändert, am wirkungsvollsten.“  
(Vester 80, 25)

In einem späteren Experiment haben Dörner und Mitarbeiter über 40 Personen eine fiktive simulierte westdeutsche Kleinstadt „Lohhausen“ als „Bürgermeister mit quasi diktatorischen Vollmachten“ steuern lassen (Dörner et al. 83), diesmal mit weniger katastrophalen Ergebnissen.

Die Autoren führen das selbst z.T. darauf zurück, daß das simulierte Lohhausen ziemlich rückkopplungsarm war (112ff).

„Da aufgrund der geringen positiven Rückkopplung des Systems die Wirkungen von Fehlentscheidungen sich nicht sehr verstärkten, konnten Fehlentscheidungen leicht rückgängig gemacht werden ... Die geringe Anzahl negativer Rückkopplungen im Lohhausen-System ermöglichte, daß Eingriffe schnell und stark wirkten. Auch dies begünstigt wieder ein experimentierfreudiges Verhalten. Wenn in einem System mehr negative Rückkopplungen vorhanden sind als in dem Lohhausen-System, sind die Bedingungen anders. Negative Rückkopplungen implizieren ein homöostatisches Gleichgewicht des Systems. Ein solches System „wehrt sich“ gegen Eingriffe von außen und versucht, diese zu „reparieren“. Dies kann sehr markante Folgen für das Verhalten von Akteuren haben. Sie werden dazu verleitet, immer stärker und stärker einzugreifen, um doch noch befriedigende Effekte zu erzielen. Dies aber kann schließlich die Vernichtung einzelner Glieder des Rückkopplungsnetzes zur Folge haben, was meist zu einem Totalkollaps des Systems führt. Systeme mit negativer Rückkopplung bleiben also lange Zeit stabil und resistent gegen Eingriffe, verleiten dadurch den Akteur zu immer massiveren Maßnahmen, die schließlich zur Vernichtung einzelner Systemteile führen. Da in einem Rückkopplungssystem meist jedes Systemteil von Bedeutung für das Funktionieren des Gesamtsystems ist, führt die Eliminierung von einzelnen Teilen zum Kollaps.“

Dieses Merkmal eines stark negativ rückgekoppelten Systems, lange auf Eingriffe wenig oder gar nicht zu reagieren, dann aber sehr stark, fehlte beim Lohhausen-

System. Diese Tatsache war wohl zugleich mit der oben genannten „Experimentierfreundlichkeit“ des Systems aufgrund fehlender positiver Rückkopplungen verantwortlich dafür, daß viele unserer Vpn recht gut mit dem Lohhausen-System zurecht kamen (siehe Kapitel 3). In einem anderen Experiment mit einem sehr komplexen System, dem „Tanaland-Experiment“ (Dörner & Reither 1978) sah das anders aus. Hier bewirkten fast alle Vpn durch ihre Maßnahmen Katastrophen. Das Tanaland-System war aber auch, als ein wesentlich biologisch akzentuiertes System, welches aus bestimmten Tier- und Pflanzenarten zusammengesetzt war, ein System mit vielen starken negativen Rückkopplungen, hatte also die oben beschriebenen Eigenschaften.“ (Dörner et al. 83, 5. 113 - 114)

Man beachte bei diesem Zitat, wie die Verwendung von systemtheoretischer, kybernetischer Begrifflichkeit gegenüber dem System es ermöglicht, gewissermaßen einen Meta-Standpunkt einzunehmen, von dem aus bereits a priori bestimmte Handlungsmuster benannt und in ihren generellen Auswirkungen beschrieben werden können. Wer über solche Begriffe verfügt und sie anwenden kann, hat offensichtlich bessere Chancen, in komplexen Bereichen sinnvoll zu agieren.

Warum aber nun fiel den Versuchspersonen der Dörner'schen Experimente, warum fällt uns allen das vernetzte Denken so schwer? Daß wir in Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen denken, ist uns angeboren, ist nach Kant ein a priori menschlichen Erkennens, das nach den Erkenntnissen der evolutionären Erkenntnistheorie den Menschen bzw. seinen tierischen Vorfahren durch die Notwendigkeit des Überlebens im Lauf der Evolution anerzogen wurde. Die sogenannten „angeborenen Lehrmeister“, die unbewußt ablaufenden Prozesse unseres rationalen Verrechnungsapparates, präsentieren uns - ob wir das wollen oder nicht - stets zunächst unwiderstehliche Vermutungen über einige, einfache Ursachen und lineare Ursachenketten. Der Evolutionsbiologe Rupert Riedl schreibt dazu in seinem Buch „Biologie der Erkenntnis“ unter der Überschrift „Der Unsinn der Vermutungen“:

„Der Unsinn in der Anleitung durch unsere angeborenen Lehrmeister wurzelt dabei nochmals darin, daß die Evolution des reflektierenden Menschen die Grenzen dessen, was unsere noch vorbewußt handelnden Vorfahren erkennen und lösen mußten, längst hinter sich gelassen hat. Hier sind das jene Grenzen, innerhalb derer Kausalität noch ungestraft als ein exekutiver Ketten-Zusammenhang und die einfachste Erklärung noch als die beste angenommen werden konnte.

Wir wissen aber heute längst, daß in dem ungleich weiteren Bereich, in welchem wir Menschen handeln und unsere Handlungen verantworten sollten, die Kausalzusammenhänge ein Netzwerk bilden; und daß in diesem Netz nur die allernächsten Verknüpfungen, gewissermaßen die Fadenstücke je einer Masche, eine gerichtete, lineare Kette von Ursachen und Wirkungen enthalten können. Wir konnten auch feststellen, daß das Erkennen dieser Fadenstücke für die Problemlösung unserer tierischen Vorfahren völlig zureichte. Was aber noch festzustellen bleibt, das sind die Mängel, die harmlosen und bösen Täuschungen, die eine nunmehr unzutreffend enge und rational nur schwer belehrbare Kausalvorstellung für uns Menschen bereit hat.

Der Hang zur einfachen Lösung

Schon die Rückwirkung der Wirkung auf ihre Ursache scheint in unserer vorbewußten Erwartung nicht zur Verrechnung vorgesehen.“

(Riedl 78, 186f)

### 3. Chancen vernetzten Denkens

Trotz dieser negativen Ausgangslage sehen die genannten Autoren durchaus Chancen, durch Lernen und Üben vernetztes Denken zu befördern. So schreiben Dörner/Reither am Ende der Kurzfassung ihres Tanaland-Artikels:

„Andererseits lassen Teilergebnisse der Untersuchung, so die steigende Einbeziehung der Eigendynamik des Systems in die Entscheidungen der Vpn und die zunehmende Berücksichtigung interner Zusammenhänge, den für die Praxis bedeutsamen Schluß zu, daß die hier geforderten Fähigkeiten im Umgang mit sehr komplexen Systemen erlernt und trainiert werden können.“ (Dörner/Reither 78, 528)

Dieser Trainierbarkeit des Verhaltens in bestimmten in sich strukturkonstanten Zusammenhängen ist natürlich weiter nicht überraschend; in begrenzten Bereichen, in denen wir uns gut auskennen, entwickeln wir auch heuristische, intuitive Strategien, die auch Rückkopplungen und wichtige Nebeneffekte mit einbeziehen. Das weiß auch jeder, der sich mit Simulationen oder entsprechenden Computerspielen auskennt. Dreyfus/Dreyfus 87 sehen gerade in dieser Fähigkeit des Menschen, zum Experten werden zu können, der auch über formulierbare bewußte Regeln hinaus souverän und intuitiv sicher richtige Entscheidungen fällen kann, den Hauptgrund für die nach wir vor bestehenden Klassenunterschiede zwischen wirklichen Experten und den sogenannten „Expertensystemen“ aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz (KI). Experten verfügen also für die von ihnen beherrschten Bereiche über auch intuitives vernetztes Denken, und es erscheint einleuchtend, daß ich nach längerer Beschäftigung mit einem begrenzten simulierten Bereich auch gewisse Expertenfähigkeiten erwerbe. Die Versuchspersonen von Tanaland hätten in einem zweiten Durchgang von den alten Ausgangsbedingungen aus sicherlich manche Fehlentwicklung vermeiden können.

Mit den Erfahrungen heutiger Problembereiche schon vor 30 Jahren wären wir sicherlich nicht in viele verfahrenere Bereiche wie Waldsterben, Tschernobyl, diverse Kostenexplosionen etc. hineingeschlittert - aber so funktioniert Geschichte nun mal nicht.

Wesentlicher erscheint allerdings, daß auch Experten - und in irgendeinem Bereich ist jeder von uns Experte - in Bereichen außerhalb ihres Expertentums wieder zu Rückfällen in lineares Denken mit einfachen Lösungen neigen. Und für viele unserer drängenden Globalprobleme, die ihrer ganzen Natur nach interdisziplinär sind, gibt es eben noch gar keine Experten, höchstens Experten für Teilbereiche, die gerade nicht die fachübergreifenden Querverbindungen wahrnehmen können. Und wenn es denn echte Experten gibt, werden die Menschen auf sie hören, werden sie nicht vielmehr denen glauben wollen, die die Komplexität möglichst auf einen Punkt bringen wollen um einfache Lösungen zu propagieren?

Dies ist die eine Seite. Die andere besteht darin, daß man sehr wohl rational begreifen kann, daß komplexe Probleme auch komplexe, vielschichtige, aufeinander abgestimmte und vernetzte Lösungsschritte erfordern, auch wenn man nach wie vor intuitiv zur Linearisierung und Vereinfachung neigt.

Dies hat auch der bereits zitierte Riedl im Auge, wenn er 1981 in einem Vortrag „Die Utopien des Überlebens“ (Riedl 82 319-329) im letzten Teil unter der Überschrift „Meine

Realutopie" sagt:

„Nun wissen wir, daß sich unser Extremorgan Gehirn selbst wahrzunehmen vermag. Wir kommen sogar in die Lage, die Herkunft und damit auch die Anpassungsmängel unserer Vernunft zu durchschauen. Die menschliche Erkenntnis vermag, wie Einstein und Lorenz zeigen, sogar die Fehler der angeborenen Lehrmeister ihres Erkenntnisapparates zu überwinden. Wir können unsere Vernunft durchleuchten. Darin liegt eine Überlebenschance. Dies ist der reale Teil meiner Realutopie.

Das Utopische meiner Realutopie ist dagegen keine Frage unserer Erkenntnismöglichkeit; es ist eine Frage an unsere Gesellschaft: Wird sie in der Lage sein, sich zu erkennen bevor es zu spät ist? Ja, wird sie sich überhaupt erkennen wollen? Sind die künstlichen Wirklichkeiten dieser konkurrierenden Gesellschaften nicht schon wieder im Zugzwang, ihre Irrtümer durch selbsterfüllende Prophezeiungen nur noch weiter zu zementieren?

Selbst die Erforschung eines tieferen Menschenbildes, ließe man sie zu, genügte allein noch nicht. Erkenntnis wirkt ja erst über ihre Verbreitung, durch Bildung; Bildung einer Bevölkerung und deren Wirkung auf ihr Weltbild und damit auf ihren Staat, welcher nun im Netz der Wechselbezüge die Bildung seiner Bürger bilden müßte..." (Riedl 82, 327f)

Wenn wir den in dieser Realutopie liegenden pädagogischen Anstoß aufnehmen, so ergibt sich zur Förderung vernetzten Denkens durch und in der Schule ein zumindest dreifach differenziertes Programm:

- Vorstellung, Erkundung und Diskussion möglichst vieler relevanter vernetzter Systeme in möglichst vielen disziplinären und interdisziplinären Bereichen;
- allgemeines Benennen und Beschreiben von Verhaltensmustern komplexer Systeme und ihrer Voraussetzungen und Bedingungen, entsprechend etwa dem kybernetischen Vergleich von Tanaland und Lohhausen, wie er oben angedeutet wurde;
- Selbstreflexion auf das eigene Denken und Erkennen, seine Bedingungen, Fehlerquellen und Chancen.

Ein Beitrag zu einem solchen Programm kann durch Modellbildung und Simulation mit dynamischen Systemen geleistet werden.

#### **4. Dynamische Systeme und ihr Verhalten**

Dynamische Systeme sind solche Systeme, deren Zustand sich in gesetzmäßiger Weise verändert. „In gesetzmäßiger Weise" heißt dabei, daß der jeweilige augenblickliche Zustand die jeweilige augenblickliche Veränderung festlegt und dadurch die jeweils nachfolgenden Zustände bestimmt.

Beispiele:

- Exponentielles Wachstum einer Population: eine Tier- oder Bakterienpopulation

wächst in einer Umgebung, die vorläufig unbegrenzte Ressourcen für sie bereithält, etwa Schädlinge in einer Monokultur oder Bakterien in einer Nährlösung. Der Zustand des Systems wird beschrieben durch die zur Population gehörige Biomasse, das Änderungsgesetz besagt, daß die prozentuale Nettozuwachsrate konstant ist und einen bestimmten Wert hat.

- Himmelsmechanik des Sonnensystems: Der Zustand des Systems ist bestimmt durch die als unveränderlich angenommenen Massen der Sonne, der Planeten, Kometen, Monde etc. und durch deren jeweiligen Orte und Geschwindigkeiten. Durch das Newton'sche Gravitationsgesetz sind nun die aufeinander wirkenden Kräfte in diesem System bestimmt, die Kräfte bestimmen über „Kraft = Masse mal Beschleunigung“ die Beschleunigungen, also die Änderungen der Geschwindigkeiten, während die Geschwindigkeiten die Änderungen der Orte ausdrücken. Sind also die Anfangswerte und die notwendigen Größen alle bekannt, so sind die zukünftigen Zustände unseres Sonnensystems „im Prinzip“ berechenbar. Das „im Prinzip“ hat es allerdings in sich, denn schon Ende des letzten Jahrhunderts hat Poincaré gezeigt, daß dieses System chaotische Züge hat, vgl. Ekeland 89, 48f.

Diese beiden ersten Beispiele sollten auch deutlich gemacht haben, daß dynamische Systeme so in der Wirklichkeit nicht vorkommen; sie sind stets Ausdruck einer bestimmten Sicht auf die Wirklichkeit, die festlegt, welche Aspekte und Einflüsse überhaupt berücksichtigt werden, wo die Grenzen des Systems gezogen werden, etc. Dynamische Systeme sind immer **Modelle** von Wirklichkeit.

Für das exponentielle Wachstum ist z.B. klar, daß es nur in gewissen Anfangsphasen stattfinden kann, wie uns allen spätestens seit den Diskussionen der sechziger Jahre um die Grenzen des Wachstums bewußt ist. Dementsprechend kann man verbesserte Modelle biologischen Wachstums konstruieren: logistisches Wachstum, Räuber-Beute-Systeme, Nahrungsketten-Modelle. etc., die sich auch wieder in recht natürlicher Weise als dynamische Systeme beschreiben lassen.

Für die Himmelsmechanik liegt der Modellcharakter z.B. in den Annahmen der Massenkonstanz oder auch in der Punktförmigkeit der Objekte, durch die mögliche Kollisionsprozesse nicht mehr beschreibbar sind.

Weitere Beispiele:

- Chemische Reaktionen: wenn zwei homogen verteilte Stoffe in konstanter physikalischer Umgebung miteinander reagieren, so kann der Zustand etwa durch die Konzentrationen der Ausgangs- und Ergebnisstoffe beschrieben werden. Bei bekanntem Druck und Temperatur ergeben sich daraus die Reaktionsgeschwindigkeiten und somit die weiteren Zustände. Modellerweiterungen könnten auch Temperatur und Druck als veränderbar einbeziehen und so ein komplexeres und realistischeres dynamisches System beschreiben.

- Ausbreitung von Infektionen: Zustandsgrößen sind die Anzahlen von Kranken, Infizierten, Anfälligen und Immunen. Die Dynamik des Systems wird durch verschiedene Übergangsraten (die für jede Krankheit spezifisch sind) festgelegt, wie Ansteckungsrate, Gesundungsrate (bei einer durchschnittlich 10 Tage dauernden Krankheit werden 10 Prozent der Kranken pro Tag gesund) etc. Offensichtliche

Modellverbesserungen bestehen in weiteren Differenzierungen der verschiedenen Gruppen, gesonderter Betrachtung von Risikogruppen, Inkubationszeiten usw.

Dynamische Systeme sind **mathematische Modelle**. Um ein Stück Realität als dynamisches System zu beschreiben, muß man eine Reihe von (quantifizierten, d.h. in Zahlen gemessenen) Variablen finden, die den Zustand des Systems festlegen. Sodann muß man die Änderungen dieser Zustandsvariablen bestimmen (unter Umständen unter Zuhilfenahme weiterer Hilfsgrößen, die sich mehr oder minder direkt aus den Zustandsvariablen berechnen lassen, wie die Gravitationskräfte im Sonnensystem). Mathematisch werden die Änderungsgesetze durch Differential- oder Differenzgleichungen beschrieben, je nachdem, ob die Veränderungen kontinuierlich oder in festen Zeittakten erfolgen.

Dynamische Systeme zeigen einige **typische Verhaltensmuster**. In Gleichgewichtslagen treten keine Änderungen auf. Das heißt i.a. nicht Friedhofsruhe, sondern Fließgleichgewicht, vor allem in Biologie, den Sozial- und Wirtschaftswissenschaften. Gleichgewichte können verschiedene Stabilität haben. Labile Gleichgewichte - in der Dynamik spricht man von einem abstoßenden Fixpunkt oder Repellor - werden i.a. nicht beobachtet, da das System sie nicht von selber aufsucht, sondern nur stabile, die (Punkt-) Attraktor heißen.

**Attraktoren** hängen i.a. mit negativen Rückkopplungen zusammen. Verringert man nun die Stabilität des Attraktors, etwa indem man größere Zeitverzögerungen in die das Gleichgewicht bedingende negative Rückkopplungsschleife einbaut, oder indem man die Rückkopplung unelastischer macht, so beobachtet man eine Veränderung des Verhaltens bei kleinen Ablenkungen aus der Gleichgewichtslage: es kommt zu Oszillationen, Schwingungen, die bei schwächer werdender Stabilität immer langsamer abklingen. Ab einem bestimmten Punkt haben wir dann eine sich aufschaukelnde Schwingung, die erst durch andere Regelkreise des Systems am zerstörerischen Wachstum gehindert werden können. Der ursprüngliche Punktattraktor ist zu einem Repellor geworden, statt dessen gibt es um den ehemaligen Gleichgewichtspunkt einen stabilen Grenzzyklus, einen sogenannten periodischen Attraktor.

Bei komplexen dynamischen Systemen beobachtet man auch häufig sog. **chaotische Attraktoren**, bei denen u.a. keine genauen längerfristigen Voraussagen möglich sind. Obwohl dynamische Systeme gewissermaßen die Prototypen deterministischer Systeme sind - exakt gleiche Anfangsbedingungen reproduzieren exakt das gleiche Verhalten - gilt doch das starke Kausalitätsgesetz - ähnliche Ursachen haben ähnliche Wirkungen - in ihnen nicht. Systeme mit chaotischen Attraktoren sind erst in den letzten zwei Jahrzehnten bekannt geworden; heute nimmt man an, daß die meisten hochkomplexen Systeme in der Ökologie oder den Sozialwissenschaften von diesem Typ sind. Die Welt ist eben doch kein Uhrwerk, die Geschichte ist offen.

Dynamische Systeme haben häufig auch **mehrere Attraktoren**. So hat z.B. ein Pendel einer aufgezogenen Uhr zwei Attraktoren, einen Punkt-Attraktor (die Uhr steht) und einen periodischen (die Uhr geht gleichmäßig). Wenn man durch mehr oder weniger starkes Anstoßen des Pendels einen bestimmten Ausgangszustand herstellt, so tritt sehr rasch eine dieser beiden Bewegungsarten ein.

## 5. Simulation und Modellbildung

Wie beobachtet man nun aber ein dynamisches System, wie stellt man Verhaltensformen solcher Systeme fest?

Einerseits beobachtet man natürliche reale Systeme, in denen man dynamische Systeme sieht. Da aber das dynamische System nur ein Modell des realen ist, kann man sich nicht sicher sein, ob das beobachtete Verhalten das des gedachten dynamischen Systems ist oder ob es auf noch unbekanntem Eigenschaften des realen Systems beruht. Aussichtsreicher dagegen erscheinen gezielte Experimente mit künstlichen (aber realen) Systemen, bei denen man die möglichen Einflußgrößen weitgehend unter Kontrolle hat (z.B. Analogcomputer) oder auch die geschlossene mathematische Beschreibung einfacher hauptsächlich linearer Spezialfälle. Das war der Stand bis vor ca. 30 Jahren.

Heute ist eine Standardmethode der erschließenden Untersuchung komplexer dynamischer Systeme die Simulation auf einem Digital-Computer. Unter Simulation eines mathematischen Systems verstehen wir seine Durchrechnung mit approximierenden algorithmischen numerischen Verfahren. In unserem Fall bedeutet das die numerische Lösung der dem dynamischen System entsprechenden Anfangswertaufgabe für das entsprechende System von Differential- bzw. Differenzgleichungen. Dabei werden im Prinzip auch Differentialgleichungen durch Differenzgleichungen mit kleiner Schrittweite ersetzt.

Software, die jeweils bestimmte dynamische Systeme simuliert, ist weit verbreitet. Häufig stellt sie keine abgeschlossenen Systeme dar, sondern solche, die von externen Größen abhängen, die vom Benutzer während der Laufzeit des Programms interaktiv verändert werden können, etwa über die Tastatur oder andere Eingabegeräte wie Maus oder Joystick. Hierzu gehören Flugsimulatoren, viele Computerspiele, aber auch didaktische Simulationsprogramme zu Sachverhalten, bei denen direkte Erfahrungen - etwa durch Feldbeobachtungen oder Experimente - nur schwer oder gar nicht zu gewinnen sind, weil die Experimente zu gefährlich, zu teuer, zu aufwendig oder zu langwierig sind (Beispiel: Simulation eines Kernkraftwerks), oder wie in den Sozialwissenschaften aus ethischen (und natürlich auch praktischen) Gründen nicht durchgeführt werden sollten. Auch die Simulation von Tanaland und Lohhausen ordnen sich hier ein. Charakteristisch für solche Software, die ganz bestimmte dynamische Systeme simuliert, ist, daß sie dem Benutzer nur relativ geringe Einwirkungsmöglichkeiten gibt, insbesondere ist die Struktur der simulierten dynamischen Systeme dem Zugriff des Benutzers weitgehend entzogen.

Auf der anderen Seite des Spektrums von Software zur Simulation dynamischer Systeme stehen solche Programme, die dem Benutzer nur eine Umgebung bereitstellen, in der er weitgehend kontextunabhängig beliebige dynamische Systeme formulieren, darstellen und simulieren kann. Solche Software soll insbesondere den Prozeß der Modellbildung unterstützen, da sie dem Benutzer etwa das Hinzufügen neuer Zustandsgrößen oder neuer Rückkopplungsschleifen erlaubt. So können einerseits die Strukturen und Gesetzmäßigkeiten bestimmter Gegenstandsbereiche quasi experimentell nachvollzogen und nachmodelliert werden, andererseits bei der Modellierung konkreter Gegebenheiten und Probleme neue Erkenntnisse etwa über bisher nicht berücksichtigte Zusammenhänge eingebaut und die Modelle somit einem erweiterten Modellzweck angepaßt werden.

Schematisierend und vergrößernd kann man vielleicht sagen, daß kontextgebundene Simulationsprogramme eher der Einübung von Verhalten in eben diesen Kontexten dienen, während Modellbildungssysteme eher Anlaß zu theoretischen Überlegungen über strukturelle Gegebenheiten geben.

In diesem Zusammenhang besteht ein wichtiger Unterschied darin, daß bei Modellbildungssystemen der Modellcharakter des simulierten dynamischen Systems gegenüber der zu modellierenden Realität durch die Möglichkeiten zu Strukturveränderung eigentlich immer präsent ist, während bei kontextgebundenen Simulationen die Gefahr der Vermischung von Modell und Wirklichkeit besteht, die natürlich um so größer ist, je besser das Programm die Wirklichkeit simuliert. Die Wirklichkeit aber ist immer anders und komplexer als jedes Modell, und was in Lohhausen funktioniert, kann in realen Kleinstädten durchaus schiefgehen.

Typisch für alle Simulationen ist, daß sie jeweils sehr konkrete Spezialfälle durchrechnen. Alle vorhandenen Konstanten, Systemparameter und Anfangswerte der Zustandsvariablen müssen ganz konkrete numerische Werte haben, damit die Simulation beginnen kann. Allgemeine strukturelle Aussage des Typs „Wenn der Parameter xy nicht zu groß ist, strebt das System gegen ein stabiles Gleichgewicht“ lassen sich daher durch gezielte Beobachtung nur vermuten, sie müssen durch strukturelle Überlegungen ergänzt werden.

Simulationen dynamischer Systeme liefern im Kern zunächst nur große Mengen von Daten, die erst noch verarbeitet werden müssen, um vom Benutzer verstanden werden zu können. Für ein Computerprogramm, das zur Simulation eines ganz bestimmten dynamischen Systems geschrieben wurde, gibt es natürliche Möglichkeiten, die jeweils erreichten Systemzustände darzustellen. Ein Flugsimulator kann beispielsweise die Instrumententafel des Cockpits auf dem Bildschirm abbilden oder die Aussicht nachahmen.

Solche Möglichkeiten können Modellbildungssysteme, die dem Benutzer die Eingabe fast beliebiger dynamischer Systeme aus verschiedenen Kontexten zu Simulationszwecken erlauben, natürlich nicht bieten: sie bieten als Simulationsergebnisse Tabellen, graphische Darstellungen als Zeit- oder Phasendiagramme und vielleicht auch noch gewisse animierte Darstellungen in Form von standardisierten Meßinstrumenten. Schon allein von der Ergebnisinterpretation stellen sie daher nicht zu unterschätzende Anforderungen an die Abstraktionsfähigkeiten der Benutzer und sind daher didaktisch erst ab ungefähr Klasse 8 überhaupt einsetzbar, wenn die Interpretation z.B. von Funktionsgraphen gelernt worden ist.

## **6. Dynamische Modellbildung in den Unterrichtsfächern**

Geht man von dem am Ende von Abschnitt 4 angesprochenen dreifach differenzierten pädagogischen Programm zur Förderung vernetzten Denkens aus:

- Erkunden konkreter Systeme
- Beschreiben von Verhaltensmustern
- Selbstreflektion,

so liegt eine schwerpunktmäßige Aufgabenverteilung der folgenden Art nahe:

- konkrete Systeme werden in den jeweiligen Unterrichtsfächern behandelt
- Verhaltensmuster und ihre Voraussetzungen und Bedingungen könnten schwerpunktmäßig im Fach Mathematik, z.T. vielleicht auch in der Informatik behandelt werden

- Selbstreflektion auf die Bedingungen und Anfälligkeiten des eigenen Denkens wäre als methodisches Prinzip der Modellkritik in alle Fächer zu integrieren, explizit zu thematisieren vielleicht in den anthropologischen Themen von Fächern wie Biologie, Sozialkunde, Philosophie.

Die ersten beiden Punkten setzen dabei die Verfügbarkeit von Modellbildungssystemen, z.T. auch von spezialisierten Simulationssystemen, voraus, der dritte erscheint realistisch vor allem auf der Grundlage des ersten.

Im folgenden möchte ich die ersten beiden Punkte noch ein wenig, wenn auch sehr skizzenhaft, konkretisieren.

In der **Physik**, die ja die meisten ihrer Modelle schon immer (zumindest auf Hochschulniveau) als Differentialgleichungen beschrieben hat, sind dynamische Systeme praktisch allgegenwärtig: mechanische Systeme verschiedenster Art, elektrische Schwingkreise, Wärmeleitungsprobleme etc. lassen sich mit dynamischen Modellbildungssystemen behandeln. Eine Schwierigkeit besteht u.U. darin, daß der Modellcharakter der dynamischen Systeme leicht etwas unklar wird, da das dynamische System sehr oft das gemeinte physikalische System ohne Abstriche beschreibt; der Modellcharakter liegt dabei natürlich schon im Verhältnis des physikalischen Systems zur Wirklichkeit. Eine besondere Möglichkeit dynamischer Modellbildung im Rahmen der Physik besteht in der Untersuchung hypothetischer Wirklichkeiten, etwa: „Wie sähe eine Planetenumlaufbahn aus, wenn die Massenanziehungskraft nicht im Quadrat der Entfernung, sondern nach einem anderen Gesetz abnähme?“ Solche Fragestellungen könnten den Sinn für physikalische Gesetze vertiefen.

In der **Chemie** gibt es neben den bereits erwähnten Reaktionsmodellen, die auch katalytische und thermodynamische Gegebenheiten mit einbeziehen könnten, auch dynamische Modelle, die Stoffkreisläufe in natürlichen oder künstlichen Systemen beschreiben, etwa den Kohlenstoffkreislauf im System Erde und seine Beziehungen zum Treibhauseffekt etc.

In der **Biologie** lassen sich Modelle aus der Populationsdynamik und der Populationsgenetik und aus der Physiologie behandeln; etwa bestehen zur Simulation von Kompartimentmodellen - z.B. Drogenabbau im menschlichen Körper - umfangreiche didaktische Erfahrungen.

Dynamische Modelle in der **Geographie** finden sich z.B. in den Bereichen Klima, Bevölkerungsbewegungen oder den geologischen Bewegungen der Erdkruste.

In der **Wirtschaftskunde** wären etwa Kreisläufe von Produktionsfaktoren, Konjunkturmodelle oder Lagerhaltungsprobleme zu nennen.

In den **Sozialwissenschaften** ließen sich die Auswirkungen von Kampagnen, etwa Werbung, aber auch Drogenraffien, modellieren, aber auch Einkommensverteilungen und Steuerpolitik, oder auch die Ausbreitung und Bekämpfung von Krankheiten wie Aids.

Im **Geschichtsunterricht** können historische Situationen dynamisch nachmodelliert und -gespielt werden, etwa Teuerungen der Wirtschaftsgeschichte, die zu Aufständen und Revolutionen führten, oder das Wettrüsten vor dem Ersten Weltkrieg. Mit aller Vorsicht ließen sich dann auch hypothetische Fragen: „Was wäre möglicherweise passiert, wenn die

Verantwortlichen an dieser Stelle anders gehandelt hätten?" zumindest präzisieren.

Im **Mathematikunterricht** dagegen ständen - wie oben bereits erwähnt - typische Modellansätze und zugehörige Verhaltensmuster zur Debatte, etwa positive Rückkopplung und exponentielles Wachstum, begrenztes (logistisches) Wachstum, explizit und implizit zielsuchende Prozesse, verschiedene Zeitverzögerungen und auf- und abklingende Schwingungen, nicht-lineare Ansätze und chaotisches Verhalten, die jeweils an verschiedenen, auch unterschiedlichen Disziplinen entnommenen konkreten Beispielen studiert, analysiert und erklärt werden. Dies wäre ein neuartiger Ansatz von den eigenen Anforderungen dynamischer Systeme her. Geht man eher von den traditionellen Stoffgebieten aus, so ergeben sich Anknüpfungspunkte etwa von der Funktionenlehre her: exponentielle, logarithmische und trigonometrische Funktionen und ihre Verknüpfungen als Modelle, um bestimmte typische Verhaltensmuster dynamischer Systeme zu beschreiben. Die ganze Analysis ließe sich von den dynamischen Systemen her anwendungsnäher unterrichten.

## 7. Ausblick

An anderer Stelle (Winkelmann 1987) habe ich in bezug auf Computereinsatz im Unterricht die Unterscheidung eingeführt zwischen Anwendungen in der Theorie, in der Praxis, und in der Realität. Anwendungen in der Theorie sind solche, die entweder nur als Möglichkeiten entworfen oder auch prinzipiell erprobt wurden, allerdings z.T. mit Hard- und Software, die in der Schule normalerweise nicht zur Verfügung stehen, oder unter besonderen Laborbedingungen. Anwendungen in der~ Praxis werden mit schulzugänglicher Hard- und Software im normalen Klassenverband durchgeführt, allerdings i.a. von nur wenigen, besonders motivierten und eingearbeiteten Lehrern. Anwendungen in der Realität beziehen sich dagegen auf die üblichen Schulen, normale Lehrer und die gewöhnlichen Randbedingungen in bezug auf Lehrpläne, Rechnerausstattungen und Prüfungserfordernisse. Diese Unterscheidung ist i.a. ein wirksames Mittel, die oft zu findende pädagogische Euphorie in bezug auf die Möglichkeiten von Computern im Unterricht auf den Boden der Wirklichkeit zurück zu stellen und damit auch innovationsstrategisch vernünftig diskutieren zu können.

Wendet man diese Begriffe auf die zu Ende dieses Vortrags angedeuteten Möglichkeiten und Chancen für dynamische Systeme und die Förderung vernetzten Denkens im Unterricht an, so muß man konstatieren, daß es sich z.Zt. noch im wesentlichen um Anwendungen in der Theorie handelt. Es besteht aber eine Arbeitsgruppe am LSW, die intensiv dabei ist, diesen Ideen den Weg in die Praxis zu ebnen, und zwar einerseits durch die Entwicklung eines geeigneten Modellbildungssystems für schulübliche Rechner zu schulgemäßen Preisen, andererseits durch die Entwicklung von konkreten Unterrichtsmaterialien für die Fächer Physik, Chemie, Biologie, Sozialwissenschaften, Mathematik, die 1990 Jahr erprobt werden sollen. Verläuft dies erfolgreich, so wäre der Schritt in die Praxis zumindest in einigen Bereichen und Beispielen geschafft. Für eine Umsetzung in die Realität sind wesentlich weiter greifende Zeitspannen erforderlich, etwa bis zum Ende des Jahrtausends; u.a. müßten die Lehrpläne der verschiedenen Fächer entsprechende Themen vorsehen und beschreiben. Ich denke, daß eine solche Unternehmung auf einer Tagung, die die Zukunftsperspektiven des Lernens ins Auge faßt, mit Recht vorgestellt werden sollte.

## Literatur

Capra 83

Fritjof Capra: Wendezeit. Bausteine für ein neues Weltbild. Scherz Verlag, Bern, München, Wien. 2. Auflage 1983.

Dörner/Reither 78

Dietrich Dörner und Franz Reither: „Über das Problemlösen in sehr komplexen Realitätsbereichen.“ Zeitschrift für experimentelle und angewandte Psychologie 25 (1978) Heft 4, 527-551.

Dörner et al. 83

Dietrich Dörner, Heinz W. Krausig, Franz Reither und Thea Stäudel (Hrsg.): Lohhausen. Vom Umgang mit Unbestimmtheit und Komplexität. Verlag Hans Huber, Bern, Stuttgart Wien 1983. ISBN 3456-81216-7.

Dreyfus/Dreyfus 87

Hubert L. Dreyfus und Stuart E. Dreyfus: Künstliche Intelligenz. Von den Grenzen der Denkmaschine und dem Wert der Intuition. Rowohlt Taschenbuchverlag, Reinbek bei Hamburg 1987. ISBN 3499-18144-4. rororo Computer.

Ekeland 89

Ivor Ekeland: Das Vorhersehbare und das Unvorhersehbare. Die Bedeutung der Zeit von der Himmelsmechanik bis zur Katastrophentheorie. Ullstein, Frankfurt/M., Berlin 1989. ISBN 3-548-34557-3. Ullstein Sachbuch.

Riedl 79

Rupert Riedl: Biologie der Erkenntnis. Die stammesgeschichtlichen Grundlagen der Vernunft. Verlag Paul Parey, Berlin, Hamburg 1979. ISBN 3-489-61034-2.

Riedl 82

Rupert Riedl: Evolution und Erkenntnis. Antworten auf Fragen aus unserer Zeit. Pieper, München 1982. ISBN 3-492-00678-7. Serie Piper.

Vester 80

Frederic Vester: Neuland des Denkens. Vom technokratischen zum kybernetischen Zeitalter. Deutsche Verlagsanstalt, Stuttgart 1980. ISBN 3-421-02703-X.

Vester 83

Frederic Vester: Unsere Welt - ein vernetztes System. dtv München 1983. ISBN 3-423-10118-0. dtv-Sachbuch.

Winkelmann 87

Bernard Winkelmann: „Information Technology Across the Curriculum.“ In: David C. Johnson and Frank Lovis (Eds.): Informatics and the Teaching of Mathematics. Proceedings of the IFIP TC3/WG3.1 Working Conference, Sofia, Bulgarien, 16-18 May, 1987. North-Holland, Amsterdam, New York, Oxford, Tokyo 1987. ISBN 0444-70325 X, 89 - 94.