

FISCHLIN, A. 1992. Modellierung und Computersimulationen in den Umweltnaturwissenschaften. In: SCHAUFELBERGER, W. *et al.* (eds.), Computer im Unterricht an der ETH Zürich, Bericht über das Projekt IDA (Informatik Dient Allen) 1986-1991, 197pp., Verlag der Fachvereine: 165-178.

Modellierung und Computersimulationen in den Umweltnaturwissenschaften

Andreas Fischlin
Systemökologie ETHZ, Institut für Terrestrische Ökologie,
Departement Umweltnaturwissenschaften

Einleitung

*Ich höre und ich vergesse
Ich sehe und ich erinnere mich
Ich handle und ich verstehe
Confuzius*

Obwohl Computer schon seit längerer Zeit in den meisten Naturwissenschaften eingesetzt werden und für viele Naturwissenschaftler zum vertrauten Alltagswerkzeug gehören, erschliesst der Einsatz moderner Arbeitsplatzrechner vom Typ des Personal Computers im naturwissenschaftlichen Unterricht völlig neue Möglichkeiten. Das gilt insbesondere auch für die Umweltnaturwissenschaften, welche an der ETHZ in den letzten Jahren sowohl als Studiengang¹ wie auch als Departement² eingeführt wurden. Warum das ausgerechnet für die Umweltnaturwissenschaften zutreffen soll, mag vielleicht die eine oder andere Leserin erstaunen. Es soll deshalb im folgenden Text auf die Frage wozu Computer ganz allgemein und im speziellen im Zusammenhang mit Umweltfragen für Unterrichtszwecke eingesetzt werden können, eingegangen werden. Es stellt sich natürlich auch die didaktische Frage, ob die Eigenschaften der eingesetzten Computer der Qualität der Ausbildung der Naturwissenschaftlerinnen, welche sich speziell mit Umweltfragen und deren Lösungsmöglichkeiten befassen, insgesamt überhaupt förderlich sind. Schliesslich soll über die Erfahrungen, welche mit zwei neuen, primär für die Studierenden der Umweltnaturwissenschaften eingerichteten Computerübungsräumen, welche an der ETH Zürich dank dem Projekt IDA haben eingerichtet werden können, kurz berichtet werden.

1. Gestützt auf den Beschluss der Schweizerischen Schulrates vom 20. Mai 1987 wurde auf das WS 1987/88 die neue Studienrichtung Umweltnaturwissenschaften eingeführt. Dieser Studiengang wird heute an der ebenfalls neuen Abteilung XB für Umweltnaturwissenschaften angeboten und ermöglicht zurzeit die Erlangung eines Diplomes als Naturwissenschaftler in den Richtungen Chemie, Chemie-Mikrobiologie, Physik, und Biologie.

2. Seit dem 1. Januar 1990 gibt es an der ETH Zürich ebenfalls das Departement für Umweltnaturwissenschaften, welches aus den verschiedensten Instituten, Laboratorien und Professuren besteht. Für weitere Einzelheiten sei die interessierte Leserin auf die Sondernummer des Bulletins der ETHZ vom Oktober 1990, p. 36-37, verwiesen.

2 Das Unterrichtsmedium Computer und die Umweltnaturwissenschaften

Heutige Arbeitsplatzrechner ermöglichen den sogenannten Dialog- oder interaktiven Betrieb. Für den Unterricht bedeutet das, dass ein didaktisches Medium mit einzigartigen Eigenschaften, nämlich mit einer äusserst flexiblen Zweiwegkommunikation zum Zuge kommt. Sehr viele didaktische Medien wie Lehrbücher, Lehrfilme, Dias, Tonbänder usw. sind demgegenüber vergleichsweise starre Einwegmedien, bei denen die Lernenden bloss Informationsempfänger sein können. Hingegen besteht beim Dialogbetrieb mit einem Computer für die Studierenden die Möglichkeit, selbst Informationen aktiv zu erzeugen und sie dem Computer einzugeben um so das Unterrichtsgeschehen entscheidend mitzugestalten (Abb. 1a).

Um Missverständnissen gleich zum vornherein vorzubeugen muss allerdings hier auch gleich auf die Beschränktheit dieser Möglichkeiten hingewiesen werden. Im Vergleich zu einem menschlichen Kommunikationspartner sind die Dialogfähigkeiten eines Computers lächerlich klein. Beispielsweise sind heutige Unterrichtscomputer nicht in der Lage die menschliche Sprache oder die inhaltliche Aussage zu erkennen, geschweige zu antworten. Dies gilt natürlich auch für all die anderen Elemente einer echten, menschlichen Kommunikation, wie z.B. die Gestik, der Gesichtsausdruck usw., in noch viel stärkerem Masse.

Diese Beschränktheit ist allerdings auch nicht weiter störend, denn in vielen Unterrichts-anwendungen ist es keineswegs erwünscht, dass der Computer die Rolle eines echten Diskussionspartners übernimmt. Vielmehr fällt ihm meist die Aufgabe eines hilfsbereiten "Diener" zu. Er hat in erster Linie Unterrichtsstoff darzustellen, einfache Fragen zu beantworten, Berechnungen durchzuführen, Daten graphisch darzustellen, Fakten abzurufen oder Zusammenhänge bzw. Gegenüberstellungen rasch sichtbar zu machen. Bei all diesen Tätigkeiten soll der Computer als ein stets bereit Arbeitsgerät zu einer neuen Tätigkeit aufgerufen oder als ein williger Zuhörer bei einer allfällig gerade ablaufenden Tätigkeit jederzeit unterbrochen werden können.

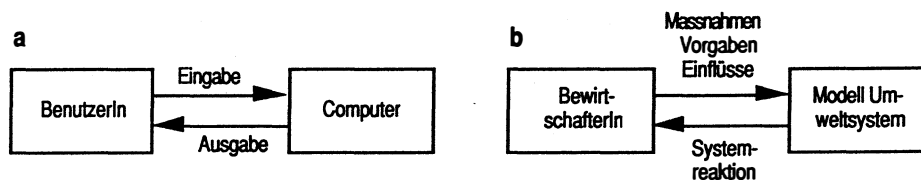


Abb. 1: a) Bildung eines Regelkreises bei der Benutzung eines Computers im Dialogbetrieb.
b) Lösung eines Regelungs- oder Steuerungsproblems bei der Bewirtschaftung eines Umweltsystems, welches hier als Modell auf dem Computer nachgebildet wird. Ein BenutzerIn versetzt sich in die Rolle eines oder einer BewirtschafterIn des zu betreuenden Umweltsystems.

Aus all dem Gesagten ergeben sich für den naturwissenschaftlichen Unterricht wichtige Konsequenzen.

Erstens kann der Computer als Werkzeug eingesetzt werden, z.B. für aufwendige Berechnungen etwelcher Art.

Zweitens kann der Computer als neues **didaktisches Medium** bei derjenigen Stoffvermittlung eingesetzt werden, wo Zweiwegkommunikation wichtig, wenn nicht gar für ein grundlegendes Verständnis des Stoffes entscheidend ist, z.B. bei der explorativen Untersuchung komplexer Zusammenhänge.

Drittens kann der Computer als **Simulationsmaschine** eingesetzt werden, wobei im Dialogbetrieb ein weiterer, wichtiger Umstand dazukommt: Zwischen Computer und Benutzer besteht ja ein Regelkreis (Ventura & Schaufelberger, 1988; Fig. 1a), welcher sich ideal eignet, um Regelungs- bzw. Steuerungsprobleme zu bearbeiten (Fig. 1b).

Inwiefern spielen nun obgeschilderte Sachverhalte speziell bei den Umweltnaturwissenschaften eine Rolle? In weiten Bereichen der Umweltnaturwissenschaften geht es u.a. um das Aufspüren nicht offensichtlicher, jedoch nichtsdestotrotz wichtiger, ursächlicher Zusammenhänge zwischen Prozessen und Komponenten in unserer Umwelt. Insbesondere geht es dabei auch um das ganzheitliche Verständnis des Zusammenspiels vieler innerer Systemkomponenten und der Ausseneinflüsse auf ein sog. Umweltsystem, wie beispielsweise der Atmosphäre oder einem naturnahen Ökosystem, z.B. ein See oder ein Wald, bis hin zur Anthroposphäre, z.B. einer städtischen Agglomeration oder eines industriellen Wirtschaftszweiges.

Bei all diesen Aufgaben werden Computer zur **Simulation**, d.h. rechnerischen Nachbildung eines realen Vorbildes aus der Umwelt herangezogen. Allerdings ist der Einsatz des Computers als **Rechenmaschine** zur Erledigung aufwendiger Berechnungen nicht der einzige Grund für dessen Verwendung. Komplizierte Zusammenhänge gleichzeitig zu erfassen, oder gar noch deren Nettoeffekt aus den quantitativen Ausprägungen abzuschätzen, bereitet den menschlichen Denkfähigkeiten meist grosse Mühe. Ein Beispiel ist die Beurteilung der VOC³, welche sowohl als Vorläufersubstanz mit zur Entstehung des Sommersmogs, welcher das unerwünschte Ozon enthält, beitragen, andererseits aber auch wieder beim Abbau des Ozons mithelfen. Welches ist jetzt der Gesamteffekt der VOC? Sind sie insgesamt als schädlich oder gar als nützlich anzusehen? Wie sind deren Grenzwerte in der Luftreinhaltung festzulegen? Zur Beantwortung solcher oder ähnlicher Fragen lässt sich der Computer mühelos beiziehen, denn er verfügt über die Fähigkeit, rasch, grosse Mengen quantitativer Beziehungen und funktionale Abhängigkeiten auszuwerten und deren Gesamteffekt zu integrieren. Die numerische Integration eines gekoppelten Differentialgleichungssystems stellt in diesem Zusammenhang dann lediglich einen zwar häufigen, nichtsdestotrotz speziellen Fall dar.

Komplexe Zusammenhänge sind meist nicht auf den ersten Blick zu durchschauen und bieten insbesondere Anfängern grosse Schwierigkeiten. Beispielsweise bereitet häufig die Tatsache, dass eine bestimmte Ursache sich nicht sofort, sondern erst nach einer gewissen Zeitverzögerung bemerkbar macht, Kopfzerbrechen. Dies ist besonders dann der Fall, wenn zu diesem späteren Zeitpunkt je nach Systemzustand weitere Komponenten einmal den Effekt bis zur Unkenntlichkeit kompensieren, ein andermal denselben Effekt sogar noch verstärken. Manche Studierende verblüfft diese Erfahrung oft derart, dass sie entweder den Berechnungen des Computers jede Korrektheit absprechen oder an ihrem eigenen Verstand zu zweifeln beginnen. Kann nun dank dem **didaktischen Zweiwegmedium Computer** der Unterrichtsablauf den Bedürfnissen des Studierenden angepasst werden, so lassen sich derartige Schwierigkeiten auflösen. Beispielsweise kann der Computer dazu veranlasst werden, gewisse Abläufe mit grösserer Auflösung darzustellen («Blick mit dem Mikroskop in das Systeminnere»), oder es können einzelne überlagerte

3. Akronym für Volatile Organic Carbon.

Effekte zeitweilig aus- und dann wieder eingeschaltet werden, um so deren Wirkung besser erkennen zu können (Forrester, 1968).

Indem die **Simulationsmaschine** komplexe Sachverhalte in und um ein Umweltsystem möglichst einfach nachbildet, erlaubt sie, interessante, das Verständnis fördernde Einblicke in das Geschehen zu gewinnen und den Blick für das Wesentlichste zu schärfen. Hinzu kommen aber noch weitere, wichtige Eigenschaften: Es können nämlich mittels Simulationen Projektionen in die Zukunft gemacht und so zur Auswahl stehende Varianten, z.B. im Rahmen einer UVP, besser abgeschätzt, geprüft und beurteilt werden. Es können aber auch riskante Experimente lediglich durchgespielt oder auch vergangene Epochen rekonstruiert werden, was z.B. im Zusammenhang mit der Klimaforschung, die sich auf Modellberechnungen⁴ abstützt und für die Mitte des nächsten Jahrhunderts eine globale Klimaänderung («Treibhauseffekt») voraussagt, von grossem Interesse ist.

Schliesslich geht es sehr oft darum, die Reaktion eines Systems auf neue Umweltsbedingungen zu untersuchen. Beispielsweise sollen stützende Massnahmen genügend gefördert, beziehungsweise Störgrössen wie z.B. Schadstoffe ausreichend vermindert werden, dass die Wirksamkeit der getroffenen Vorkehrungen auf den interessierenden Ausschnitt aus der Umwelt auch quantitativ beurteilt werden kann. Infolge der oben geschilderten Eigenschaften des Menschen und Computers fällt hierbei dem menschlichen Benutzer die Rolle des Reglers zu, der Maschine diejenige der zu regelnden Regelstrecke. Dies entspricht genau der Situation einer Person, welche als steuernde oder regelnde BewirtschafterIn einem Umweltsystem gegenübersteht. Dies ist aber wiederum genau die Situation, welche beim Einsatz des Computers als interaktive Simulationsmaschine entsteht (Fig. 1b). Die Benutzer einer Simulationsmaschine können dann die in Frage kommenden, alternativen Strategien und Massnahmen untersuchen, können Entscheidungen fällen, und deren Wirksamkeit vorerst in der Simulation kennenlernen. Hierbei ist es selbstverständlich notwendig, die entsprechenden Fachkenntnisse aus den jeweiligen Gebieten einzubringen. Nur so erzielen die Studierenden einen optimalen Lernerfolg, welcher dank der Kombination von explorativem Lernen (Neber, 1973) mit sachkundiger Anleitung zustandekommt. Zurzeit wird u.a. im Studiengang Umweltnaturwissenschaften in allgemeiner Systemanalyse und der mathematischen Modellierung von Umweltsystemen, der Gewässerphysik, der Bodenphysik, dem Bodenschutz, Klimatologie und Systemökologie der Computer in der geschilderten Art und Weise eingesetzt.

Schliesslich sei noch darauf hingewiesen, dass der Computer an der Abteilung XB nicht einzig in der eben beschriebenen Art eingesetzt wird. Ähnlich wie das an anderen Abteilungen der ETHZ auch üblich ist, werden Computer ebenfalls für den Anfängerunterricht beispielsweise in Informatik, als Schreib- und Auswertungswerkzeug in verschiedensten Praktika wie terrestrische Ökologie, Fallstudien, Lineare Algebra und numerische Mathematik, Studienarbeiten usw. eingesetzt. Hierbei handelt es sich allerdings um eher herkömmliche, d.h. im allgemeinen gut bekannte Einsatzbereiche (Zehnder, 1985; Guggenbühl, 1985; Adler, 1986; Anonymus, 1986; Ventura et al., 1988), welche sich von denjenigen anderer Disziplinen kaum unterscheiden. Auf deren detaillierte Darstellung wurde deshalb hier verzichtet.

4. Zurzeit werden hierzu meist die sogenannten AGCM (Atmospheric General Circulation Models) eingesetzt.

3 Heutige Infrastruktur an der Abteilung XB

Das Projekt IDA hat es der Abteilung XB für Umweltnaturwissenschaften ermöglicht ab WS 1990/91 zwei leistungsfähige, studentische Übungsräume im Hauptgebäude und auf dem Hönggerberg der ETH Zürich⁵ einzurichten. Sie verfügen über 40 respektive 20 in ihrer Basisausrüstung identische Arbeitsstationen vom Typ Apple® Macintosh® IIx mit Farbbildschirmen (13 Zoll), 8 MB Arbeitsspeicher (RAM), 210 MB eingebauter Festplatte, 1 eingebautem 3 1/2 Zoll Diskettenlaufwerk (Superdrive mit den Kapazitäten 400, 800KB resp. 1.4MB, Format MS-DOS und Mac), erweiterter Tastatur (US, Saratoga) und einem 45 MB Wechselplattenlaufwerk (Abb. 2).

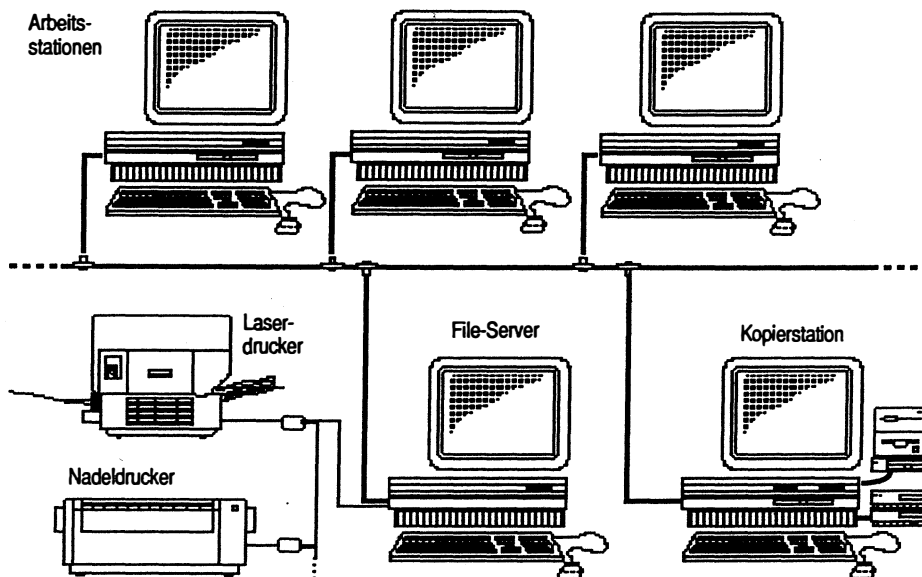


Abb. 2: Schematische Darstellung zur Topologie der Arbeitsstationen, des Fileservers, der Drucker und der Kopierstation in den Computer-Übungsräumen der Abteilung XB für Umweltnaturwissenschaften. Zur lokalen Vernetzung wird wegen den Spitzenbelastungen zu Beginn von Übungsstunden (gleichzeitiger Zugriff auf Fileserver) hauptsächlich ETHERNET, als Druckernetz das langsamere PhoneNet eingesetzt. Als Kommunikationssoftware wird zurzeit auf allen Netzen AppleTalk eingesetzt. Legende: — ETHERNET (EtherTalk) / - - - PhoneNet.

Alle Rechner sind miteinander über ETHERNET Coaxkabel vernetzt (EtherTalk) und können so auf einen zentralen Fileserver und einen Druckerspooler zugreifen (Fig. 2). Der Fileserver kann mit einer magnetoptischen Wechselplatte (600 MB) beladen werden und verfügt über eine eingebaute Festplatte mit der Kapazität von 600 MB. Als Drucker stehen je ein Laserdrucker (II NTX) und vier resp. ein Nadeldrucker (ImageWriter II) zur Verfügung. Sie sind über spezielle Kabel (PhoneNet) am Fileserver und via spezielle Verbindungssoftware (Internet Router) am Netz (AppleTalk) des jeweiligen Übungsraumes angeschlossen. Neben all diesen Einrichtungen steht noch allen Benutzern eine Kopierstation zur Verfügung. Sie ist mit vielerlei Peripheriegeräten, wie einem zweiten Wechselplattenlaufwerk (45 MB), einem zweiten 3 1/2 Zoll Diskettenlaufwerk (Superdrive), ei-

nem MS-DOS 5^{1/4}" Diskettenlaufwerk, einem CD-ROM Abspielgerät und einer Magnetbandstation (40MB) für Archivierungszwecke ausgerüstet.

Von zentraler Bedeutung für den Betrieb sind die Wechselplatten. Die eigentlichen datenspeichernden Platten sind nicht etwa in den aufgestellten Arbeitsstationen eingebaut, sondern im persönlichen Besitz der Studierenden. Nur diese Platten enthalten die für den Betrieb der Geräte erforderliche Systemsoftware (Finder/Multifinder, AppleTalk, MacJanet). Dadurch kann eine Studierende ihre persönliche Wechselplatte, welche in einer Mappe bloss etwa den Platz eines Taschenbuches mittlerer Dicke beansprucht, bequem mit sich herumtragen. Die Studierenden wechseln ihren Arbeitsort häufig und müssen zwischen dem ETH-Zentrum, der ETH-Hönggerberg, und der EAWAG in Dübendorf hin und her pendeln. Zusätzlich bestehen als Ausweichmöglichkeiten noch weitere an der ETH eigens zu diesem Zweck kompatibel ausgerüstete Arbeitsstationen in Gebäuden der Informatik und der Elektrotechnik. Trotz der vielen erforderlichen Ortswechsel, entstehen jedoch für die Studierenden, zumindest was die Computerinfrastruktur anbetrifft, keine wesentlichen Nachteile. Weder müssen sie sich nämlich überall in das dort jeweils im Betrieb befindliche System einarbeiten, noch brauchen sie sich nach jedem Arbeitsplatzwechsel neu einzurichten. Die Tatsache, dass Studierende die ganze Systemsoftware samt Dateienorganisation bei sich haben, ermöglicht ein effizientes Wiederaufnehmen der Arbeit am neuen Ort: Gerät abschalten und Wechselplatte entfernen, am neuen Ort die andere Arbeitsstation wiedereinschalten, Platte reinschieben und es kann weitergearbeitet werden.

Die Verantwortung für Sicherheitskopien, Archivierung, Dateienorganisation usw. obliegt dadurch dem oder der einzelnen Benutzerin. Damit eine optimale Einheitlichkeit trotzdem gewährleistet ist, werden auf dem Fileserver immer eine sog. Musterplatte mit auf neuestem Stand befindlicher Software angeboten. Diese umfasst sämtliche Systemsoftware, eine empfohlene Dateienorganisation, die verwendeten Unterrichtsprogramme sowie die im Unterricht direkt eingesetzten oder sonstwie nützlichen Werkzeuge. Mit Hilfe einer einfachen Diskette kann sich jede Studierende jederzeit eine Kopie dieser Software auf der persönlichen Wechselplatte anfertigen. Dass sich darunter auch z.T. lizenzierte, kommerzielle Software befindet, verletzt jedoch keine Lizenzverträge. Die letzteren Applikationen sind nur in den Übungsräumen an der ETH und in der Zahl der gekauften Lizenzen lauffähig. Hierzu wird eine Netzbetriebssoftware (MacJanet) eingesetzt, welche den Betrieb einer lizenzierten Software nur dann zulässt, wenn am vernetzten System, für das die Lizenzen auch erworben wurden, gearbeitet wird. Sollte eine Studierende derartige Software zuhause betreiben wollen, so gelingt dies nur mit einer persönlichen, zusätzlich erworbenen, den Lizenzbedingungen genügenden Software, jedoch nicht mit der Kopie, welche von der ETH stammt.

Die Arbeitsstationen wurden möglichst platzsparend aufgestellt, so dass das Arbeiten einzeln oder in Zweiergruppen möglich ist. Es wurde ebenfalls darauf geachtet, dass die zur Verfügung stehende Tischfläche genügend Raum für gleichzeitiges Arbeiten mit Papier und Bleistift sowie dem Lesen von Unterlagen bietet.

4 Neue Unterrichtsformen - Das Beispiel «Grenzen des Wachstums»

Diese Infrastruktur wird auf eine sehr vielfältige Weise genutzt und eingesetzt. Hierbei kommen erstens eine Vielzahl von speziellen, für eine bestimmte Lektion vorgesehene Unterrichtsprogramme zum Einsatz (Fischlin & Schaufelberger, 1987, 1988; Fischlin & Ul-

rich, 1990a, 1990b; Fischlin et al., 1987, 1990a, 1990b). Zweitens kommen allgemein verwendbare Werkzeuge, wie Programmierumgebungen (Wirth et al., 1988; Fischlin, 1986a, 1986b), Modellierungs- und Simulationsumgebungen (Ulrich, 1987; Fischlin, 1990; Fischlin & Schaufelberger 1988; Fischlin & Ulrich, 1988; Fischlin et al., 1987, 1990c; Robinson, 1986; Vancso et al., 1987, 1988), mathematische Werkzeuge zur linearen Algebra (numerisch) oder auch symbolisch (Fischlin & Schaufelberger 1987) zum Einsatz.

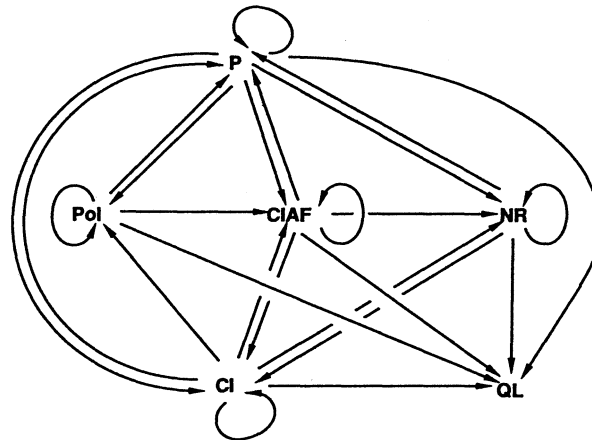


Abb. 3: Relationengraph des «Weltmodelles 2» nach Forrester (1971, 1972). P - Population (menschliche Weltbevölkerung), Pol - Pollution (Umweltverschmutzung), CIAF - Capital Investment in Agriculture Fraction (Kapitalinvestitionsanteil in Landwirtschaft), NR - Natural Resources (nicht erneuerbare Rohstoffe), CI - Capital Investment (Kapitalinvestition), QL - Quality of Life (Lebensqualität)

An einem speziell ausgewählten Beispiel, soll die Benutzung dieser Infrastruktur kurz etwas näher erläutert werden. Studierende der Umweltwissenschaften müssen sich im Rahmen ihrer mathematischen Grundausbildung im Rahmen der Lehrveranstaltungen «Systemanalyse I und II» im zweiten Studienjahr speziell mit der Methodik der Modellierung und der systemorientierten Denkweise auseinandersetzen. Gleich zu Beginn dieser Lehrveranstaltung werden die Studierenden mit dem sogenannten «Weltmodell 2» (Forrester, 1971; Cellier & Fischlin, 1982) kurz vertraut gemacht. Dieses Modell hat der weltweit berühmt gewordenen Studie «Grenzen des Wachstums» (Meadows et al., 1972) zugrundegelegen.

In einer Vorlesungsbeilage (Fischlin et al., 1990) wird das «Weltmodell 2» mit allen wichtigen Vorannahmen, Gleichungen, Parametern, Quellenangaben (Abb. 3) beschrieben und in Form eines einfach zu bedienenden⁶ Simulationsprogrammes (via Fileserver oder Musterplatte) zur Verfügung gestellt. Dieses Simulationsprogramm arbeitet im Dialogbetrieb und ermöglicht eine sehr flexible, trotzdem verhältnismässig einfach zu bedienende Steuerungsmöglichkeiten des modellierten Weltgeschehens (Abb. 4). Es können beispielsweise Bevölkerungskontrollen, Umweltverschmutzungsszenarien, Investitionsraten im industriellen oder landwirtschaftlichen Sektor eingeführt, in der Simulation

6. Selbst Mittelschüler ohne jegliche Vorkenntnisse in Informatik haben dies bislang wiederholt an einem Maturandenbesuchstag an der ETH Zürich auf Anhieb zustande gebracht.

durchgespielt und mit den durch die Studierenden erwarteten Systemreaktionen verglichen werden (s. Mitte oben Fenster «Model Parameter» Abb. 4).

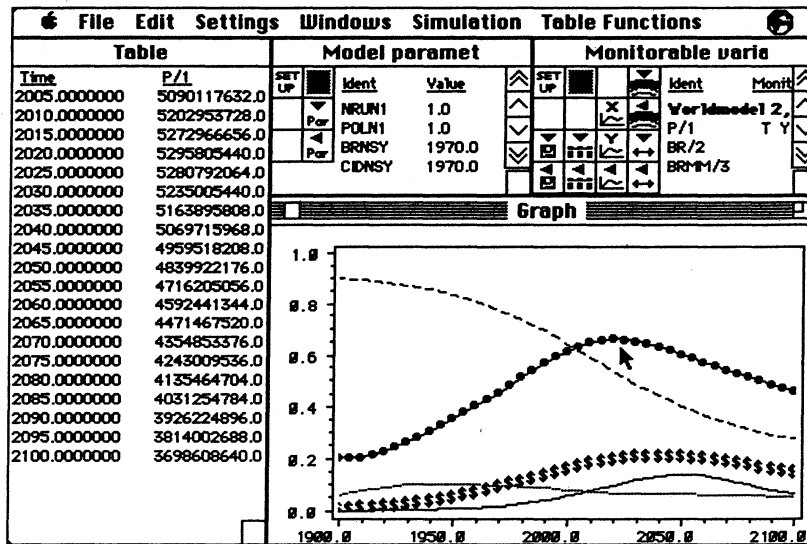


Abb. 4: Bildschirmsicht des Simulationsprogrammes «Weltmodell 2»: Standardlauf mit den sog. Normalwerten, d.h. «Business as usual» Szenario. Legende: — Bevölkerung [$0.1 \cdot 10^{10}$] / — Rohstoffe [$0 \dots 10^{12}$] / \$Kapitalinvestitio [$0 \dots 4 \cdot 10^{10}$] / — Verschmutzung [$0 \dots 40$] / Lebensqualität [$0 \dots 10$].

Eine grosse Zahl von Grössen (Zustandsvariablen, Hilfsvariablen, Raten wie die Bevölkerungsdichte, Geburten-, Sterberate, Wachstumsraten der Wirtschaft, Umweltverschmutzung, Emissionsraten, Umweltschutzmassnahmen, Abbau und Vorhandensein natürlicher, nicht erneuerbarer Ressourcen usw.) können in Funktion der Zeit oder auch im Verhältnis zueinander ganz nach Wunsch der Benutzer dargestellt und beobachtet werden. Dadurch entsteht ein genauer Einblick in das innere Geschehen des Systems, ähnlich wie das oben erläutert worden ist.

Insgesamt verfolgt die Übung am «Weltmodell 2» die folgenden Ziele:

Erstens sollen die Studierenden mit den oft überraschenden Reaktionen eines nichtlinearen, aus vielen Komponenten, komplex gekoppelten Differentialgleichungssystems "hautnah" bekannt gemacht werden. Beispielsweise erwartet kaum jemand, dass bei erniedrigter Ressourcenabbaurate («Ressourcenschonung, effizienterer Nutzung, Recycling») der Bevölkerungszusammenbruch in der Mitte des 21. Jahrhunderts sogar noch viel drastischer ausfällt (vgl. Abb. 4 mit 5). Erst genaueres Studieren der Zusammenhänge verrät, dass dieses Systemverhalten, so sehr dies auch ersten Erwartungen zuwider laufen mag, bei den getroffenen Modellannahmen, z.B. bezüglich jeglicher, fehlender Geburtenkontrolle und des indirekt, übermässig angekurbelten Wirtschaftswachstums, zwingend ist. Gehen die Studierenden den Gründen für die Abweichungen zwischen erwartetem und tatsächlich festgestelltem Systemverhalten nach (Fig. 5), so ergeben sich daraus meist Einsichten über Eigenheiten dynamischer System, welche kaum auf eine andere Weise gewonnen werden könnten.

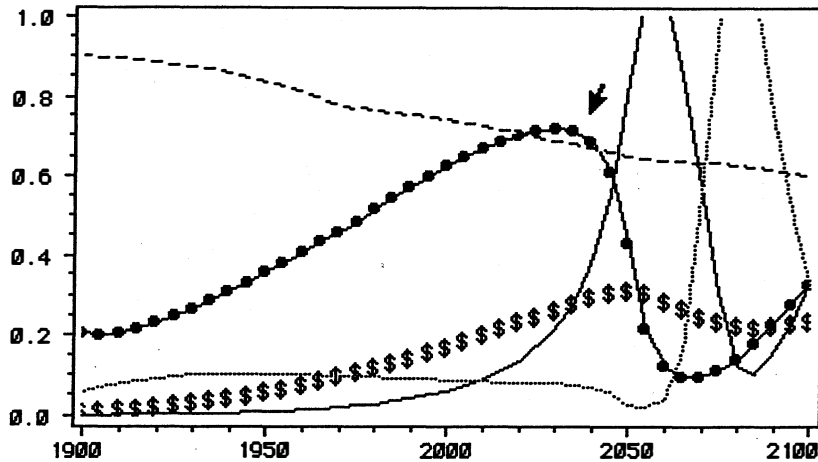


Abb. 5: Simulationen mit dem «Weltmodell 2». Der für Überraschung sorgende Simulationslauf mit Ressourcenschonung, d.h. ab Gegenwart um 75% reduzierte Ressourcenabbaurate (vgl. Abb. 4). Legende: — Bevölkerung [0... $1.1 \cdot 10^{10}$] / — Rohstoffe [0... 10^{12}] / \$ Kapitalinvestitionen [0... $4 \cdot 10^{10}$] / — Verschmutzung [0... 40] / Lebensqualität [0... 10].

Zweitens werden die Schwierigkeiten, ein derartiges System in eine gewünschte Richtung, d.h. die Vermeidung des katastrophalen Weltbevölkerungszusammenbruches, zu steuern eindrücklich vor Augen geführt. Es ist in diesem Zusammenhang bemerkenswert, dass der Grossteil der Studierenden durchaus in der Lage ist, innert weniger Übungsstunden interessante und aufschlussreiche Lösungen für das gestellte Steuerungsproblem zu finden.

Nachdem die Studierenden sich mit dem Steuerungsproblem des Weltmodells befasst haben, besteht ihre nächste Aufgabe darin, in einer Art Fallstudie selbst ein Modell zu erstellen. Diesmal soll es jedoch für die Schweiz gelten. Insbesondere die Entwicklung der Bevölkerung soll für das nächste Jahrhundert projiziert und es sollen mögliche Reaktionen des Systems auf verschiedenste Massnahmenpakete und Einflussgrössen studiert und abgeschätzt werden. Die Studierenden haben selbständig die Fragestellung einzulegen, ein Modell zu entwerfen, die mathematischen Gleichungen herzuleiten, benötigte Daten und Parameter abzuschätzen, das Modell zu implementieren um schliesslich dessen Verhalten auf denkbare Eingriffe auch wirklich untersuchen und beurteilen zu können. Hierzu wird ein grösseres Softwarepaket (RAMSES⁷), das auch anspruchsvollsten Forschungsanforderungen zu genügen vermag (Fischlin, 1990) eingesetzt. Mit letzterem können sogenannte Modelldefinitionsprogramme (Fischlin et al., 1990) direkt in der mächtigen Programmiersprache Modula-2 (Wirth, 1985) geschrieben und zur Ausführung gebracht werden. Die Studierenden können einzeln oder, wie empfohlen, in Gruppen arbeiten. Im Verlaufe der Vorlesung werden zugehörige Theorie und zusätzlich benötigte Techniken vorgestellt und erläutert. Die begleitenden kleineren Unterrichtsprogramme oder die Modellierungsarbeiten an der Fallstudie wenden das theoretische Wissen praktisch an und erlauben so, sich aktiv, intensiv und schöpferisch mit dem zu ler-

7. Akronym für Research Aids for Modeling and Simulation of Environmental Systems

nenden Stoff auseinanderzusetzen. Gegen Ende der Vorlesung werden einige der Arbeiten dem ganzen Semester präsentiert.

5 Grenzen und Möglichkeiten - Versuch eines Ausblickes

Vergleiche mit früheren Lehrveranstaltungen ähnlicher Zielsetzung zeigen, dass insbesondere da, wo z.B. dynamische Modelle eine wesentliche Rolle spielen, dank der neueren Infrastruktur vertiefte Einblicke in den Stoff vermittelt werden können. Obwohl derartige Aussagen sich nur schwerlich objektivieren lassen⁸ (Bork, 1980), deuten die bislang gemachten Erfahrungen, inklusive der Prüfungsergebnisse, eindeutig daraufhin, dass durch das Arbeiten am Computer insgesamt bessere Lernerfolge erzielt werden. Sogar im rein quantitativen Sinn konnten einige Fortschritte erzielt werden. In stark computerabhängigen Lehrveranstaltungen, beispielsweise wenn die Simulation von zentraler Bedeutung ist, war die frühere Arbeitstechnik, z.B. mit Lochkarten, derart umständlich, dass im Verlaufe eines ganzen Semesters jeweils höchstens einige wenige Simulationen durchgeführt werden konnten. Im Vergleich zu heute entsprach dies lediglich einem Bruchteil, denn jetzt vermögen Studierende im Verlaufe einer einzigen Übungsstunde Dutzende von Läufen zu erzeugen und auszuwerten. So gewinnen die Studierenden neue Einblicke in komplexe Systemgeschehen und in mathematische Zusammenhänge, welche ansonsten schon aus rein zeitlichen Gründen nicht möglich wären. Insbesondere ist es jetzt möglich, die Studierende in einer äusserst anschaulichen Art und Weise in die Materie einzuführen, sie zu einem explorativen Lernstil anzuregen, und sie sogar selbständig ein Modell erarbeiten zu lassen. Zudem lernen sie den Computer und seine Einsatzmöglichkeiten praktisch kennen und erzielen auch handwerkliche Fortschritte bei der Bedienung. Mit diesen Erfahrungen stehen wir an der Abteilung XB für Umweltwissenschaften nicht allein da. An anderen Unterrichtsstätten und an anderen Abteilungen der ETHZ konnten vergleichbare Erfahrungen gemacht werden (Kaufmann, 1986; Mansour & Schaufelberger, 1989; Nievergelt et al., 1986; Schaufelberger, 1987; Schaufelberger et al., 1986; Ventura & Goorhuis, 1987).

Um die Anschaulichkeit eines systemtheoretischen Stoffes wesentlich zu steigern, ist es zwar dem Dozenten oder der Dozentin auch möglich, den Computer als Simulationsmaschine während dem Vortragen einzusetzen. Allerdings sprechen pädagogische und praktische Gründe dagegen, den Computereinsatz lediglich auf solche Demonstrationen mittels Bildschirmprojektion zu beschränken. Die Didaktik zusammen mit gewissen, inzwischen zur Volksweisheiten gewordenen Erfahrungen, lehrt uns ja, dass weder blosses Zuhören, noch das Zuschauen allein genügen um effektiv zu lernen. Vielmehr bedarf es des aktiven Tuns durch die Lernenden, damit ein Stoff wirklich "begriffen" und verstanden wird. Als positiver pädagogischer Nebeneffekt, ist zudem die Förderung des selbständigen Arbeitens zu beurteilen. Schliesslich ist der grösste Teil des Vorbereitungsaufwandes (s.u.) bei Demonstrationsprogrammen schon geleistet, und diese können häufig ohne wesentlichen Mehraufwand auch für studentische Übungszwecke umgeschrieben werden. Aus all den genannten Gründen ist es deshalb wünschenswert, die Studierenden ebenfalls direkt am Computer arbeiten zu lassen.

8. Bei einer eigentlichen Untersuchung entsteht i.a. der sogenannte "Keep smiling effect". Dadurch, dass vor Studierenden die ablaufende Untersuchung kaum verborgen werden kann, verändert sich deren Verhalten und deren Einschätzungen bezüglich der zu vergleichenden Unterrichtsformen.

Schlussendlich soll nicht verschwiegen werden, dass bei den geschilderten Unterrichtsformen auch eine stattliche Zahl von teilweise grösseren Schwierigkeiten zu lösen sind. Beispielsweise ist schon alleine die Betreuung der Hardware eines Computerübungsraumes, welcher von morgens früh (7h00) bis spät abends (22h00) grundsätzlich allen interessierten Studierenden zur Verfügung steht, recht aufwendig. Gemäss der Organisationsstruktur der ETH obliegt eine derartige Verantwortung einem bestimmten Institut, das neben seinen Forschungs- und übrigen Unterrichtsverpflichtungen zusätzliche Aufgaben übernehmen muss. Es fallen immer wieder Geräte aus, was rechtzeitig entdeckt und dem Computer Service der ETH gemeldet werden muss. Die vielen Netzverbindungen scheinen dem studentisch-jugendlichen Bewegungsdrang auch nicht immer gewachsen zu sein und führen deshalb öfters zu Unterbrüchen des lokalen Netzes.

Weit stärker ins Gewicht fällt allerdings die Tatsache, dass weltweit viel zuwenig käufliche oder sonstwie verfügbare Unterrichtssoftware erhältlich ist. Das wenige was es gibt, vermag entweder bezüglich Lernniveau oder Robustheit im studentischen Einsatz, hohen Qualitätsanforderungen nicht zu genügen oder passt inhaltlich nur unbefriedigend in die spezifische Lehrveranstaltung. Deshalb stellte sich schon früh, d.h. zu Beginn des IDA Projektes, heraus, dass zufriedenstellende Unterrichtssoftware, insbesondere auch im Bereich der Simulation, nur durch Neuentwicklungen bereitgestellt werden konnten.

Um die erforderliche Software möglichst rationell bereitstellen zu können, wurden spezielle, effiziente Techniken angewendet. Beispielsweise besteht ein Grundprinzip darin, möglichst viele allgemein einsetzbare Softwarebauteile von den jeweils unterrichtsspezifischen Inhalten klar abzuspalten. Dadurch ergeben sich eine grössere Zahl von Vorteilen, welche sich nicht nur günstig für die Entwicklung auswirken, sondern gleichzeitig mit-helfen, die Benutzung der entstehenden Unterrichtssoftware wesentlich zu erleichtern. Dadurch, dass gemeinsame Bestandteile mehrmals wiederverwendet werden können, wird Entwicklungszeit eingespart (Fischlin, 1986a, 1986b; Keller, 1989), ja es kann ein Autor durch geeignete Hilfsmittel, sogenannte Autorensysteme, bei der Entwicklung der Unterrichtsprogramme unterstützt werden. Schliesslich besteht die Möglichkeit, wesentliche Teile eines Programmes gar automatisch zu generieren (Knijnenburg & Oeztürk, 1987; Ventura, 1985; Vancso, 1986; Vancso & Fischlin, 1988). Beinhalten diese Bestandteile die verallgemeinbaren Bestandteile eines Mensch-Maschine Dialogs, z.B. die universellen Befehle (Nievergelt & Weydert, 1980; Stelovsky, 1984), so ergibt sich letztlich daraus, dass der BenutzerIn ein einheitliches Benutzermodell zur Verfügung steht (Ventura & Schaufelberger, 1988). Dadurch ergibt sich der Vorteil, dass die einmal erlernte Bedienungstechnik in ähnlicher Art bei anderen Unterrichtsprogrammen immer wieder erfolgreich angewendet werden kann (Nievergelt & Ventura, 1984; Nievergelt et al., 1986). Die zeitaufwendige Einarbeitung in die Tücken und Eigenheiten der neuen Bedienung (Nievergelt & Weydert, 1980), ganz abgesehen davon, dass derartige Anstrengungen lediglich vom eigentlichen Unterrichtsgegenstand abzulenken drohen, entfällt.

Dank dem Pilotprojekt Celtia (Fischlin & Schaufelberger, 1988), welches sich im Rahmen des Projektes IDA mit der Modellierung und Simulation dynamischer Systeme befasste, konnten wesentliche Grundlagen für die benötigten Softwareumgebung bereitgestellt werden. Heute stehen an der Abteilung für Umweltnaturwissenschaften deshalb eine reiche und im wesentlichen befriedigende Infrastruktur nicht nur in Bezug auf die Hard-, sondern auch auf die Software zur Verfügung. Sie erlaubt es, sowohl den computerabhängigen wie den computerunterstützten Unterricht erfolgreich durchzuführen. Es ist allerdings auch abzusehen, dass der jetzige Qualitätsstand nur beibehalten werden kann, falls die momentanen Wartungs- und Betreuungsarbeiten zumindest im minimalen Rah-

men fortgesetzt werden können. Sei dies bloss, um die Systeme in einer sich jagenden, technischen Entwicklung, wie dies heute für den Informatiksektor zutrifft, überhaupt in Betrieb zu behalten. Inwiefern dies jedoch in Anbetracht des sich zu Ende neigenden Projektes IDA überhaupt möglich sein wird, muss erst noch die Zukunft weisen.

6 Literatur

- Adler, K.J., 1986. The Computerization of Higher Education: The Experience of Pioneers in the Field. Interner Bericht No. 86-07, Institut für Automatik und Industrielle Elektronik, ETH, Zürich.
- Anonymus 1986. Nomenklatur - Bericht der Arbeitsgruppe der Schweizerischen Konferenz der kantonalen Erziehungsdirektoren EDK (CDIP) "Informatikmittel im Unterricht", 11pp.
- Bork, A., 1980. Educational technology center at the University of California. In: Lewis & Tagg (eds.), Computer assisted learning. North-Holland Publishing Comp.: 37-53
- Cellier, F.E. & Fischlin, A., 1982. Computer-assisted modelling of ill-defined systems. In: Trapp, R., Klir, G.J., Pichler & F.R. (eds.), Progress in cybernetics and systems research. Vol. VIII, General systems methodology, mathematical systems theory, fuzzy sets. Proc. of the 5th European Meeting on Cybernetics and Systems Research, University of Vienna, Austria, April 8-11, 1980, 417-429, McGraw-Hill Intern. Book Comp., Washington, New York, 1982, 544pp.
- Fischlin, A., 1986a. Simplifying the usage and the programming of modern workstations with Modula-2: The 'Dialog Machine'. Internal report, Systems Ecology, Swiss Federal Institute of Technology Zürich (ETHZ), Zürich, Switzerland, 13pp.
- Fischlin, A., 1986b. The "Dialog Machine" for the Macintosh. Internal report, Project-Centre IDA, Swiss Federal Institute of Technology Zürich (ETHZ), Switzerland.
- Fischlin, A., 1990. Interactive modeling and simulation of environmental systems on workstations. In: Möller, D.P.F. (ed.), Proc. of the 4th Ebernburger Working Conference on the Analysis of Dynamic Systems in Medicine, Biology, and Ecology, April 5-7, 1990, Ebernburg, Bad Münster am Stein-Ebernburg, BRD, Informatik-Fachberichte, Berlin a.o.: Springer, 16pp.
- Fischlin, A. & Schaufelberger, W., 1987. Arbeitsplatzrechner im technisch-naturwissenschaftlichen Hochschulunterricht. Bulletin SEV/VSE, 78 (Januar): 15-21.
- Fischlin, A. & Schaufelberger, W., 1988. Modellierung und Simulation dynamischer Systeme. Interner Bericht Nr.3 (März), Projekt-Zentrum IDA, Swiss Federal Institute of Technology Zürich (ETHZ), Switzerland, 11-22pp.
- Fischlin, A. & Ulrich, M., 1988. Interaktive Simulation schlecht-definierter Systeme auf modernen Arbeitsplatzrechnern: die Modula-2 Simulationssoftware ModelWorks. Interner Bericht Nr.4, Teil 1, Projekt-Zentrum IDA, Swiss Federal Institute of Technology Zürich (ETHZ), Switzerland, 1-19pp.
- Fischlin, A. & Ulrich, M., 1990a. Unterrichtsprogramm «Drosophila». Interner Bericht No. 3, Fachgruppe Systemökologie, ETHZ.
- Fischlin, A. & Ulrich, M., 1990b. Unterrichtsprogramm «Stabilität». Interner Bericht No. 2, Fachgruppe Systemökologie, ETHZ.

- Fischlin, A., Mansour, M.A., Rimvall, M. & Schaufelberger, W., 1987. Simulation and computer aided control system design in engineering education. In: Troch (ed.), *Simulation of Control Systems (Engineering Education)*, Proceedings of IFAC/IMACS International Symposium on Simulation of Control Systems, Sep. 22-26, 1986, Vienna, Austria, p.61-73.
- Fischlin, A., Blanke, T., Gyalistras, D., Baltensweiler, M. & Ulrich, M., 1990a. Unterrichtsprogramm «Weltmodell 2». Interner Bericht No. 1, Fachgruppe Systemökologie, ETHZ.
- Fischlin, A., Roth, O., Blanke, T., Bugmann, H., Gyalistras, D. & Thommen, F., 1990b. Fallstudie interdisziplinäre Modellierung eines terrestrischen Ökosystems unter Einfluss des Treibhauseffektes. Interner Bericht No. 5, Fachgruppe Systemökologie, ETHZ
- Fischlin, A., Roth, O., Gyalistras, D., Ulrich, M. & Nemecek, T., 1990c. ModelWorks - An interactive simulation environment for personal computers and workstations. Systems Ecology Group, Internal Report 8, Swiss Federal Institute of Technology Zürich, Switzerland, 174pp.
- Forrester, J.W., 1968. *Principles of systems*. Cambridge, Massachusetts: Wright-Allen Press.
- Forrester, J.W., 1971. *World dynamics*. Cambridge, Massachusetts: Wright-Allen Press.
- Guggenbühl, R. 1985. Informatikwerkzeuge für alle im Unterricht der ETHZ, Bulletin der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Nr. 193 (Mai/Juni), 1985: 18.
- Kaufmann, S., 1986. *Mechanics Exercises with Computer Assistance*, Department of Mechanics, Swiss Federal Institute of Technology Zürich (ETHZ), Internal report
- Keller, D., 1989. *Introduction to the Dialog Machine*. Interner Bericht Nr. 5 (Nov.), Projekt-Zentrum IDA, Swiss Federal Institute of Technology Zürich (ETHZ), Switzerland, 37pp.
- Knijenburg, R. & Oeztürk, X., 1987. GAG - Ein Graphen-Editor und Programm-Generator. Diplomarbeit an der Abteilung IIC für Informatik, ETHZ, 80pp.
- Mansour, M. & Schaufelberger, W., 1989. Software and laboratory experiments using computers in control education. *IEEE Control Systems Magazine*, 272 (April): 19-24.
- Meadows, D., Meadows, D., Zahn, E. & Milling, P., 1972. *Die Grenzen des Wachstums: Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit*. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt, 180pp.
- Neber, H. (ed.) 1973. *Entdeckendes Lernen*. Beltz, Weinheim und Basel, 300pp.
- Nievergelt, J. & Weydert, J., 1980. Sites, modes and trails: Telling the user of an interactive system where he is, what he can do, and how to get to places, In: R. A. GUEDJ et al. (eds.), *Methodology of Interaction*, pp. 327-338, North-Holland, Amsterdam
- Nievergelt, J. & Ventura, A., 1984. *Die Gestaltung interaktiver Programme*, B. G. Teubner Stuttgart
- Nievergelt, J., Ventura, A. & Hinterberger, H., 1986. *Interactive Computer Programs for Education*, Addison-Wesley Publishing Company, 190pp.
- Robinson, S.B., 1986. STELLA - Modeling and simulation software for use with the Macintosh, *Byte*: 277-278

- Schaufelberger, W., 1987. Teachware for Control. 10th IFAC World Congress, München, Juli 1987, Vol. V: 267-272.
- Schaufelberger, W., Good, H. & Itten A., 1986. Einsatz von Personalcomputern in der Aus- und Weiterbildung von Automatisierungstechnikern. In: Margulies, F. & Hillebrand, G. (eds.). Neue Automatisierungstechniken, Chancen für Klein- und Mittelbetriebe. ATÖ-Informationstagung 1986. New York, Springer, p. 310-315.
- Stelovsky, J., 1984. XS-2: the user interface of an interactive system. Diss. ETH Zürich, Nr. 7425, 111pp.
- Ulrich, M. 1987. ModelWorks. An interactive Modula-2 simulation environment. Post-graduate thesis, Project-Centre IDA, Swiss Federal Institute of Technology Zürich (ETHZ), Switzerland, 53pp.
- Vancso, K., 1986. A portable frame program generator in Modula-2 for automatic construction of interactive learning programs based on the 'series-parallel-repetition' user model - User's Guide. Internal report, Project-Centre IDA, Swiss Federal Institute of Technology Zürich (ETHZ), Switzerland.
- Vancso, K. & Fischlin, A., 1988. Automated construction of interactive learning programs in Modula-2. *Comput. Educ.*, 12: 507-512.
- Vancso, K., Fischlin, A. & Schaufelberger, W. 1987. Die Entwicklung interaktiver Modellierungs- und Simulationssoftware mit Modula-2. In: Halin, J. (ed.), *Simulationstechnik, Informatik-Fachberichte 150*, Springer, Berlin: 239-249
- Vancso-Polacsek, K., Fischlin, A. & Schaufelberger, W., 1988. SAM - Simulation and modelling software for working stations based on modelling theory. In: Vichnevetsky, R., Borne, P. & Vignes, J. (eds.). *Pro. of the 12th IMACS World Congress on Scientific Computation, July 18-22 1988, Paris, France, 5 Vols.*, 2: 761-763.
- Ventura, A., 1985. Einsatz und Programmierung des Computers als Werkzeug für d Unterricht. Diss. ETH Zürich, Nr. 7752, 131pp.
- Ventura, A., Schaufelberger, W., 1988. Die Notwendigkeit von Benutzermodellen beim Entwurf von Programmen und Geräten. Internal report Nr. 1 of the Project-Centre IDA, Swiss Federal Institute of Technology Zürich (ETHZ), Switzerland, 40pp.
- Ventura, A., Schaufelberger, W. & Fischlin, A., 1988. The use of Apple Macintosh computers in teaching at ETH Zürich. *Wheels for the Mind*, Lund University, 2: 19-26.
- Ventura, A., Goorhuis, H., 1987. Unterrichtsprogramme für die Informatik-Ausbildung, Internal report Nr. 77 of the Institut für Informatik, ETH, Zürich, 40pp.
- Wirth, N. 1985: *Programming in Modula-2, Third, Corrected Edition*, Springer-Verlag, 1985.
- Wirth, N., Gutknecht, J., Heiz, W., Schär, H., Seiler, H. & Vetterli, C., 1988. MacMETH. A fast Modula-2 language system for the Apple Macintosh. User Manual. 2nd ed. Institut für Informatik ETH Zürich, Switzerland, 100pp.
- Zehnder, C.A. 1985. *Informatikwerkzeuge für alle im Unterricht an der ETHZ. Interner Bericht der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.*