

Simulation und Vorhersage: Sind Simulationstechniker die Propheten der Neuzeit?

Prof. Dr. François E. Cellier
Dept. of Electr. & Comp. Engr.
University of Arizona
Tucson, AZ 85721-0104
U.S.A.

Dieser Beitrag erörtert die Rolle, die Simulationstechnikern im Rahmen von Vorhersagen von Ereignissen oder Zustandsänderungen in dynamisch veränderlichen Systemen zufällt. Offensichtlich spielt die Simulation eine zentrale Rolle z.B. bei der Vorhersage des Wetters. Dies bedarf keiner weiteren Erläuterung. Dieser Beitrag behandelt darum die Rolle der Simulationstechnik in esoterischeren Vorhersagen, wie z.B. Vorhersagen in der Volkswirtschaft. Kann die Simulationstechnik hier einen positiven Beitrag liefern? Wie kann die Qualität von Vorhersagen beurteilt werden? Wie kann Missbrauch verhindert werden?

Einführung

Der Wunsch, zukünftige Ereignisse vorhersagen zu können, ist so alt wie die Menschheit selbst. Wissen ist Macht, und Wissen um die Zukunft vermittelt Sicherheit. *Weisheit* im Sinne unserer Vorväter und der heiligen Schrift ist beinahe gleichzusetzen mit *Wissen um die Zukunft*. Es war die fürnehmliche Aufgabe der Propheten, die Menschheit zu warnen vor Ungemach, ihr Wege aufzuzeigen, wie Unheil verhindert werden konnte. Falsche Propheten waren diejenigen, deren Vorhersagen nicht eintrafen.

Spätestens seit der Renaissance sind die Propheten der Bibel aus der Mode gekommen. Der Mensch verläßt sich auf die Physik. Was nicht physikalisch meßbar ist, hat keine Gültigkeit, ist irrelevant. Somit müssen Vorhersagen, wenn sie glaubwürdig sein wollen, auf physikalischen Prinzipien beruhen, naturwissenschaftlich begründbar sein.

Vorhersagen, die auf Simulationsmodellen beruhen, erheben den Anspruch, diesen Anforderungen der Neuzeit gerecht zu werden. Sie sind nachvollziehbar und werden häufig mit 14 Stellen nach dem Komma ausgegeben, wovon keine einzige eine Null ist. Somit müssen sie ja wohl stimmen.

Dieser Beitrag hat eine kritische Beurteilung von Simulationsvorhersagen zum Ziel. Was darf von ihnen erwartet werden? Wann sind sie sinnvoll einzusetzen? Wie kann ihre Qualität und Glaubwürdigkeit verbessert werden? Wann muß von ihnen Abstand genommen werden? Der Artikel wurde von einem langjährigen und vehementen Verfechter der Simulationstechnik verfaßt und ist somit nicht gänzlich unparteiisch. Dennoch hat sich der Verfasser bemüht, den Gesetzen naturwissenschaftlicher Rigidität Genüge zu leisten und einen Standpunkt einzunehmen, der so neutral und unvoreingenommen wie möglich ist.

Der Artikel ist des Verfassers Beitrag zur Festschrift zum sechzigsten Geburtstag von Bernd Schmidt, mit dem ihn eine fünfundzwanzigjährige Freundschaft verbindet, die auf dem gemeinsamen Ziel beruht, die Simulationstechnik voranzutreiben und praktisch nutzbar zu machen. Herzliche Glückwünsche zum runden Geburtstag! Mögen noch viele erfolgreiche und freudesperrende Jahre folgen!

Die Weltmodelle des „Club of Rome“

Vor knapp dreißig Jahren veröffentlichte Jay Forrester sein berühmt-berüchtigtes erstes Weltmodell (Forrester, 1971). Zu diesem Zweck verwendete er die Methodik des „System Dynamics“, eine Modellierungsmethodik, die er selbst wenige Jahre zuvor entwickelt hatte. Die Methodik besticht durch ihre Einfachheit. Der Modellierer wählt eine Anzahl von „Levels“ (Zustandsvariablen), welche die wesentlichen Elemente der Systemdynamik beschreiben. Die Zustandsvariablen symbolisieren die Akkumulatoren des Systems. Für sein Weltmodell wählte Forrester fünf Zustandsvariablen:

- P - die Bevölkerung
- POL - die Verschmutzung
- NR - die fossilen Brennstoffe
- CI - das investierte Kapital
- CIAF - der Prozentsatz des investierten Kapitals in der Landwirtschaft

Dem Verfasser ist nicht gänzlich klar, wie ein Prozentsatz als Akkumulator aufgefaßt werden kann, aber Computermodelle sind ja bekanntlich mindestens so geduldig, wie das Papier, auf dem sie ausgedruckt werden.

System Dynamics definiert sodann eine Liste von sogenannten „Rates“, Variablen, die entweder Zu- oder Abflüsse der „Levels“ darstellen, d.h. welche die Zustandsableitungen definieren. Zum Beispiel ist der Zufluß der Bevölkerung die Geburtenrate (BR), während ihr Abfluß die Todesrate (DR) ist, wodurch die Differentialgleichung:

$$dP/dt = BR - DR$$

definiert ist. Sodann wird für jede der „Rate“ Variablen eine „Laundry List“ (Wäscheliste) aufgestellt, welche aufzeigt, von welchen anderen Variablen diese abhängig ist. So mag z.B. die Geburtenrate eine Funktion der Bevölkerung (P), des Lebensstandards (MSL), der Verfügbarkeit von Nahrungsmitteln (FR), der Bevölkerungsdichte (CR) sowie der Verschmutzung (POL) sein:

$$BR = f(P,MSL,FR,CR,POL)$$

Es ist sinnvoll, in erster Annäherung anzunehmen, daß die Geburtenrate proportional zur Bevölkerung ist. Außerdem kann Kleinsignalverhalten erreicht werden, indem die normale Geburtenrate (BRN) als Konstante herausgezogen wird:

$$BR = BRN \cdot P \cdot f(MSL,FR,CR,POL)$$

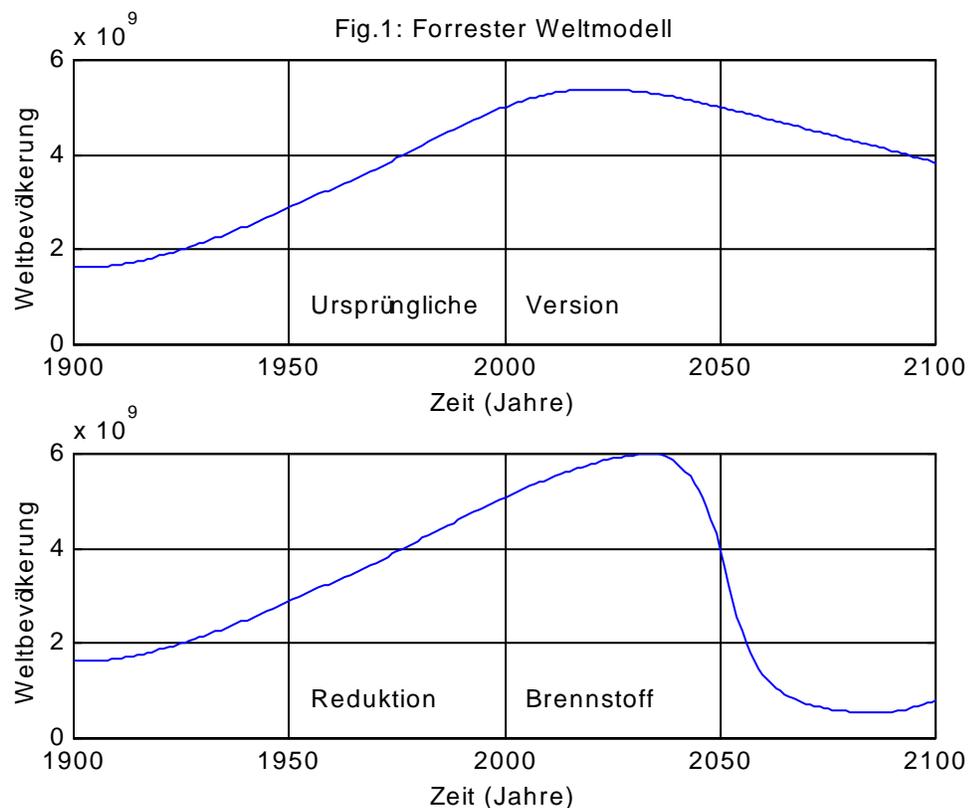
Es bleibt immer noch die schwierige Aufgabe, eine Funktion von vier Variablen zu ermitteln. System Dynamics löst dieses Problem großzügig, indem es annimmt, daß die Variablen voneinander unabhängig sind, und somit geschrieben werden darf:

$$BR = BRN \cdot P \cdot f_1(MSL) \cdot f_2(FR) \cdot f_3(CR) \cdot f_4(POL)$$

Für diese Annahme gibt es keine physikalische Begründung. Sie vereinfacht die Modellierung, da es wesentlich einfacher ist, vier Funktionen von je einer Variablen zu definieren als eine Funktion von vier Variablen. Zu diesem Zweck verwendete Forrester tabellarische Funktionen, deren Werte er aus statistischen Jahrbüchern und ähnlichen Quellen entnahm. Die Modellparameter wurden daraufhin angepaßt, um zu erreichen, daß die simulierte Weltbevölkerung bis zum Jahr 1970 in etwa den publizierten Werten entsprach, und fertig war das Modell.

Eine Simulation bis zum Jahr 2100 lieferte die Bevölkerungsentwicklung gemäß der oberen Graphik von Fig.1. Die Weltbevölkerung erreicht ein Maximum von ca. 5,4 Milliarden Menschen ums Jahr 2020 herum und fällt dann wieder ab. Eine Sensitivitätsanalyse des Modells ergab, daß der Bevölkerungsabfall auf eine Verknappung der fossilen Brennstoffe zurückzuführen ist. Forrester schlug daher vor, den Verbrauch ab dem Jahr 1970 auf 25 Prozent seines vorherigen Wertes zu reduzieren, damit die Brennstoffe länger erhalten bleiben sollen. Da im Modell ohnehin mit einer normalisierten Größe gerechnet wird, ist eine Reduktion des Verbrauchs praktisch gleichzusetzen mit einer größeren Menge noch verfügbarer Energieträger. Dies ist durchaus realistisch, da Verknappung zu einem Ansteigen der Preise führt, was wiederum die Verwertung zusätzlicher Brennstoffreserven ökonomisch macht, deren Abbau zuvor unrentabel war.

Eine Simulation des so abgeänderten Modells lieferte die Bevölkerungsentwicklung, wie sie in der unteren Graphik von Fig.1 dargestellt ist.

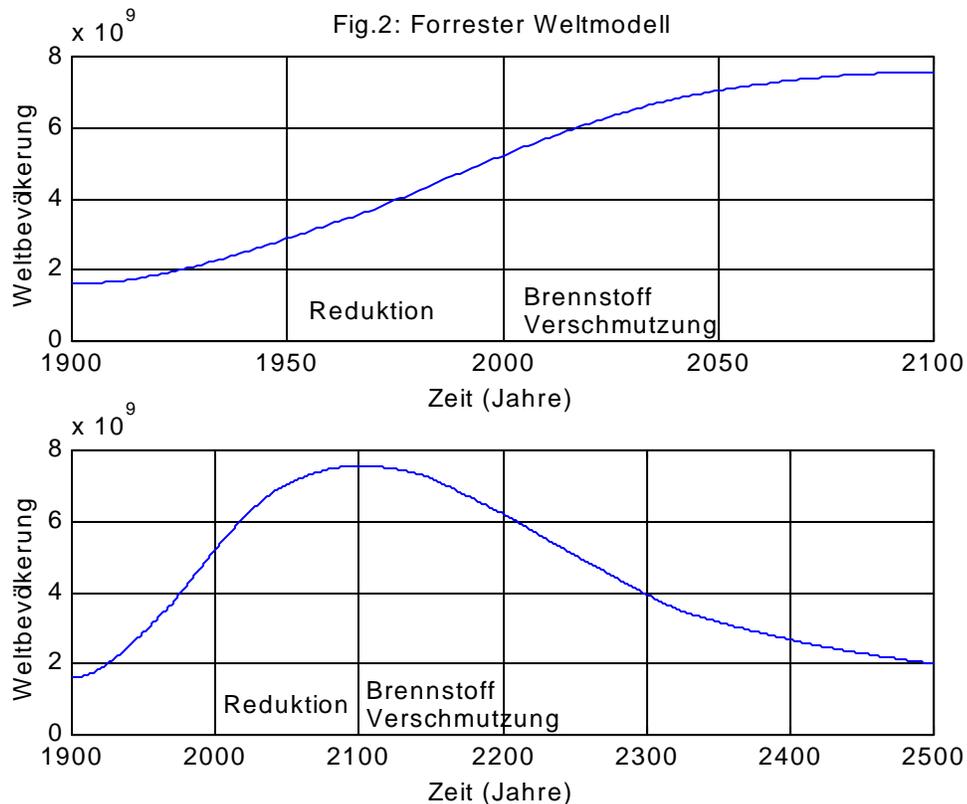


Diesmal wurde ein Maximum von ca. sechs Milliarden Menschen um das Jahr 2030 herum erreicht. Danach sinkt die Bevölkerung innert weniger Jahrzehnte von sechs Milliarden auf ca. 500 Millionen ab. Wahrlich keine erfreuliche Aussicht!

Eine erneute Sensitivitätsanalyse ergab, daß diesmal die Verschmutzung für den Rückgang der Bevölkerung verantwortlich gemacht werden muß. Ums Jahr 2030 herum kippt die Ökologie um, und die Menschen verhungern, da nicht mehr ausreichend Nahrungsmittel produziert werden können. Forrester schlug daraufhin vor, im Jahr 1970 auch die Verschmutzung um einen Faktor vier zu reduzieren. Dies ist wiederum eine realistische Maßnahme. Tatsächlich wurde in den vergangenen Jahrzehnten zumindest in den Industriestaaten im Umweltschutz viel geleistet. So sind die berühmten Londoner Nebel, die bereits von Sir Conan Doyle beschrieben wurden, beinahe gänzlich verschwunden. In den Schweizer Seen kann man wieder baden, und die „Smog Alarms“ in Los Angeles gehören weitgehend der Vergangenheit an.

Die obere Graphik von Fig.2 zeigt die hervorragenden Resultate der Simulation des so abgeänderten Modells. Die Bevölkerung wächst nun auf 7,5 Milliarden an und wird um das Jahr 2100 herum stationär. Dies sind tatsächlich

sehr gute Nachrichten, und die Resultate wurden darum von Forrester in seinem Buch auf einer Doppelseite präsentiert. Natürlich weiß jeder Simulationstechniker, daß der Endwert einer Simulation erst dann erreicht ist, wenn alle Zustandsableitungen klein geworden sind, nicht nur eine einzige. Dies ist aber im Modell von Forrester im Jahr 2100 noch keineswegs der Fall. Immer noch werden fossile Brennstoffe verheizt, die irgendwann eben doch ausgehen. Die untere Graphik von Fig.2 zeigt eine Simulation desselben Modells bis zum Jahr 2500.

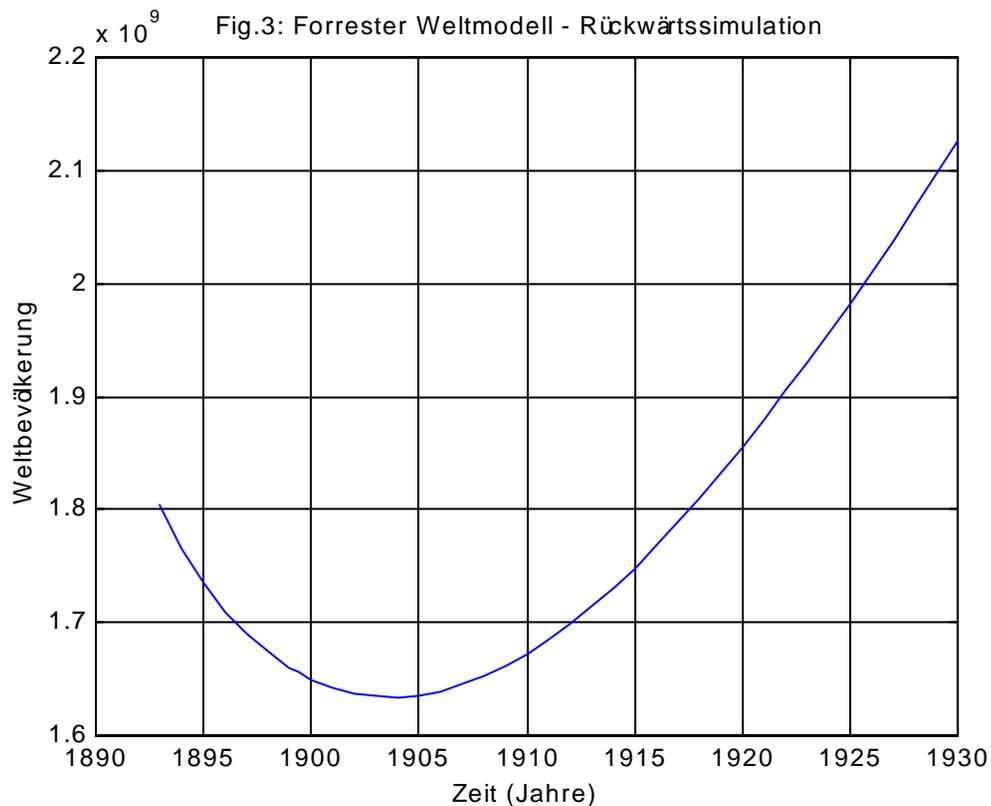


Es zeigt sich, daß der Bevölkerungsverlauf in diesem letzten Szenario eigentlich ganz ähnlich ist wie beim ersten, nur daß sich der Übergang vom Wachstum zur Stagnation ca. 70 Jahre später abspielt. Ums Jahr 2100 herum werden die fossilen Brennstoffe wiederum knapp, was zu einem Rückgang der Erdbevölkerung führt. Der Endwert der Bevölkerung liegt in allen drei Fällen bei ca. 2 Milliarden Menschen, dem Wert, den die Erde (gemäß Weltmodell) ohne fossile Brennstoffe stationär aufrechterhalten kann.

Wie weitgehend darf diesem Modell Glauben geschenkt werden? Schließlich basiert das Modell ja auf recht kühnen Annahmen, die kaum einer rigiden wissenschaftlichen Analyse standhalten. Außerdem wurden im Modell Verschmutzungswerte simuliert, die um ein Hundertfaches die schlimmsten je gemessenen Werte überschreiten. Wie kann jemand annehmen, daß solche

Simulationen zu sinnvollen Resultaten führen mögen? Unterliegen denn Weltmodelle nicht dem „GIGO Prinzip“ (Garbage-in/Garbage-out)?

Eine äußerst einfache Methode der Validierung besteht darin, das Modell rückwärts laufen zu lassen. Zu diesem Zweck, genügt es, vor jede Zustandsableitung im Modell ein Minuszeichen zu setzen. Leider ist das Modell numerisch instabil, wenn es rückwärts integriert wird. Die Gleichung, welche die Absorption der Verschmutzung berechnet, muß zunächst stabilisiert werden. Dies läßt sich aber einfach bewerkstelligen. Fig.3 zeigt die Simulation rückwärts in der Zeit von 1930 bis 1890.



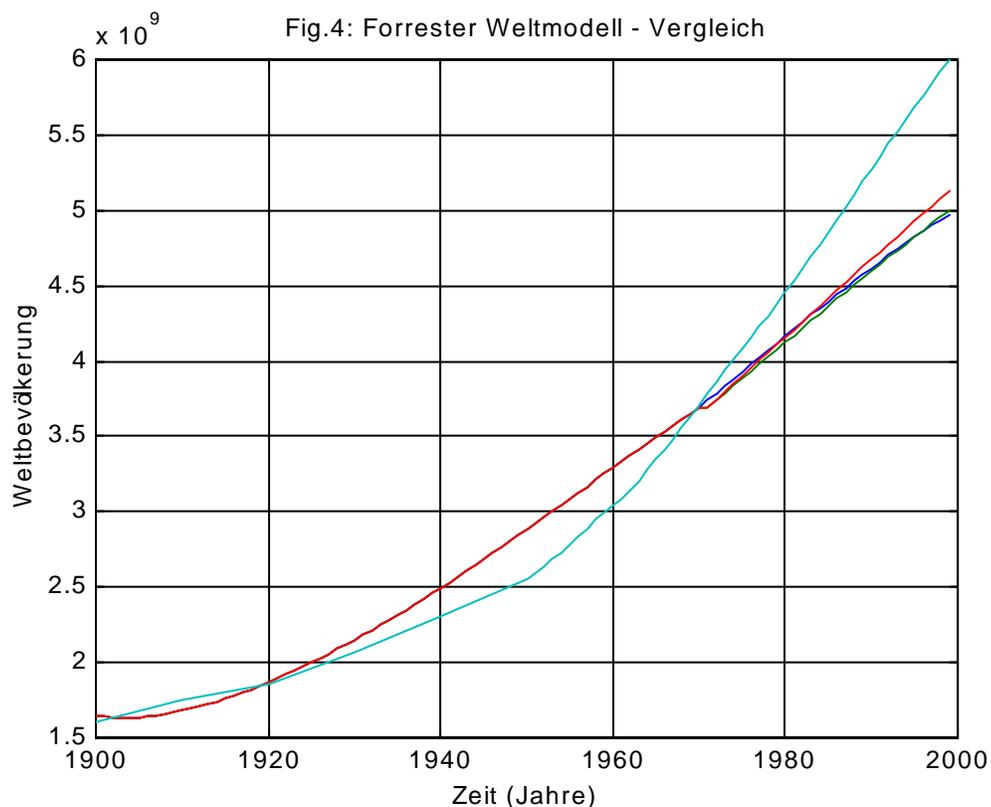
Der geneigte Leser sieht sogleich, daß hier etwas gründlich daneben gegangen ist, denn schließlich weiß man ja, daß kein Bevölkerungsrückgang zu Ende des letzten Jahrhunderts zu verzeichnen war. Wenn also das Modell bereits nach 10 Jahren Rückwärtssimulation völlig falsche Resultate liefert, wie kann da erwartet werden, daß die Resultate bei der Vorwärtssimulation während 130 Jahren korrekt bleiben?

Diese Frage beschäftigte den Verfasser bereits 1974. Er begegnete Jay Forrester an der Summer Computer Simulation Conference in Houston, zu der Jay als Luncheon Speaker eingeladen war. Nach dessen Vortrag erklärte er ihm

sein Simulationsexperiment und befragte ihn über die Validität des Modells. Er erinnert sich noch heute an Jay's Reaktion. Jay bekam einen roten Kopf und antwortete: „Junger Mann, mein Buch wurde unterdessen bereits in 27 Sprachen übersetzt, und es wurden 60 Millionen Exemplare davon verkauft. Das soll Ihnen Antwort genug sein.“ Forrester hatte völlig recht. Der Verfasser war damals wirklich noch ein sehr junger Mann.

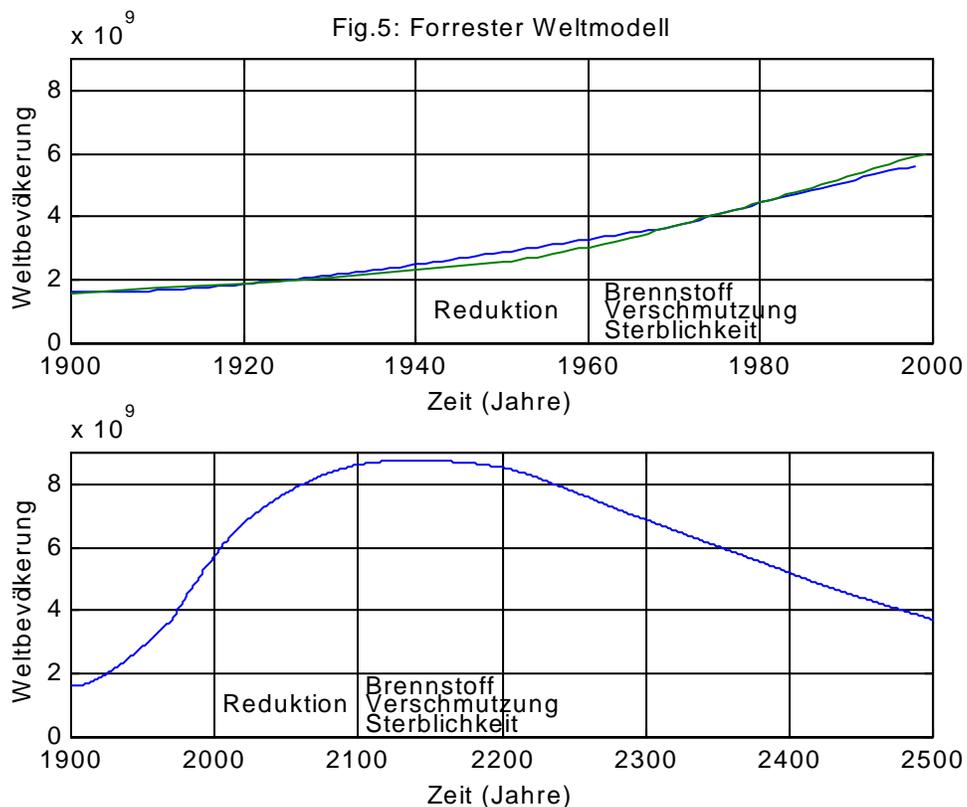
Eine bessere Antwort wäre vielleicht gewesen, daß es sich beim Weltmodell um einen echten Geniestreich handelt, und daß echte Genialität das GIGO Prinzip in der Tat durchbricht. Der „geniale“ Forscher kann geradezu dadurch definiert werden, daß er (oder sie) auch bei inkorrekten Ausgangsannahmen immer noch einen Weg zu den richtigen Schlußfolgerungen findet.

Unterdessen bieten sich natürlich bessere Validierungsmethoden an. Es sind ja inzwischen fast 30 Jahre verflissen. Somit lassen sich die gemachten Vorhersagen an der inzwischen eingetretenen Realität messen. Waren Forrester's Vorhersagen konservativ oder ungerechtfertigt alarmierend? Fig.4 vergleicht den tatsächlichen Bevölkerungsverlauf während der letzten 30 Jahre mit den Vorhersagen, die Forrester's Weltmodell 1971 lieferte.



Der Leser bemerkt, daß die Interventionen, die Forrester im Jahre 1970 durchführte, auf den Bevölkerungsverlauf der unmittelbar folgenden 30 Jahre

wenig Einfluß ausüben. Die Kurven bleiben beinahe unverändert. Alle hinken weit hinter der Realität her. Was Forrester nicht vorhersah, war die rasante Entwicklung der Medizin, die zu einer namhaften Verminderung vor allem der Säuglingssterblichkeit in den Drittweltländern führte. Auch diese Änderung läßt sich sehr leicht ins Weltmodell einbauen. Eine Reduktion des fossilen Brennstoffverbrauchs auf 15 Prozent im Jahr 1970 zusammen mit einer Verminderung der Schadstoffe auf 25% sowie einer Verminderung der Todesrate von 0.28 auf 0.2 führt zur Bevölkerungsentwicklung, wie sie in Fig.5 angegeben wurde. Die obere Graphik zeigt die gemessene Bevölkerungsentwicklung nebst der simulierten von 1900 bis 1999. Die untere Kurve zeigt die Simulation allein bis ins Jahr 2500.



Es ergibt sich tatsächlich eine recht gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten. Dennoch darf daraus nicht geschlossen werden, daß der weitere Verlauf ebenfalls der Wirklichkeit entspricht. Immerhin beruht das Modell weiterhin auf den gleichen unzulässigen Annahmen.

Was darf denn aus dem Weltmodell geschlossen werden? Es gibt eine ganze Reihe von Schlußfolgerungen, die man vermutlich ziehen darf:

1. Die Welt befindet sich heute entweder bereits in oder aber unmittelbar vor der Übergangsphase von der Periode konstanten Wachstums zur Periode des Gleichgewichts.
2. Der Endwert der Bevölkerung im Gleichgewichtszustand hängt nicht von der Übergangsphase ab, sondern ist einzig eine Funktion der Nahrungsmittel, die langfristig auch ohne Verwendung fossiler Brennstoffe erzeugt werden können. Das Forrester'sche Weltmodell kann allerdings den Endwert der Bevölkerung nicht zuverlässig ermitteln.
3. Die Verknappung der Energieträger übt eine gutartigere Wirkung auf die Übergangsphase aus als der Verschmutzungsschock. Es ist somit wünschenswert, daß die Übergangsphase entweder von selbst oder aber künstlich durch Energieverknappung eingeleitet wird, bevor die Ökologie umkippt.
4. Falls es sich erweisen sollte, daß die Weltbevölkerung bereits heute über ihrem Endwert liegt, wäre eine frühzeitige künstlich eingeleitete Energieträgerverknappung begrüßenswert, um den im Endeffekt unverhinderbaren Schock des Übergangs zu mildern.

Einer der Hauptvorteile des Forrester'schen Weltmodells liegt darin, daß Forrester sein gesamtes Modell veröffentlichte und damit anderen Forschern ermöglichte, seine Überlegungen nachzuvollziehen und selbst Simulationsexperimente mit dem Modell anzustellen. Eine in Dymola kodierte Version des Forrester'schen Weltmodells kann über die Webseite <http://www.ece.arizona.edu/~cellier/world.dym> abgerufen werden. Natürlich setzte sich Forrester damit heftiger Kritik aus. Seine Nachfolger waren darum vorsichtiger und zogen es vor, jeweils nur ihre Simulationsergebnisse, nicht aber die Modelle, die zu deren Erzeugung führten, zu publizieren.

Der Kettenbrief

Der Kettenbrief stellt eine (an den meisten Orten dieses Planeten illegale) Methode dar, um mit wenig Aufwand schnell zu Geld zu kommen. Eine Variante des Kettenbriefs ist hier beschrieben. Der Urheber, in diesem Fall eine Person in den Vereinigten Staaten, sendet gleichlautende Briefe mit dem Inhalt:

Dies ist ein Kettenbrief. Wenn Sie diesen Brief erhalten, senden Sie bitte einen Dollar an die oberste nicht durchgestrichene Adresse, dann streichen Sie die Adresse durch, setzen Sie Ihren eigenen Namen zuunterst auf die Liste, kopieren Sie den Brief zehnmal, und senden Sie je eine Kopie an zehn Ihrer Freunde.

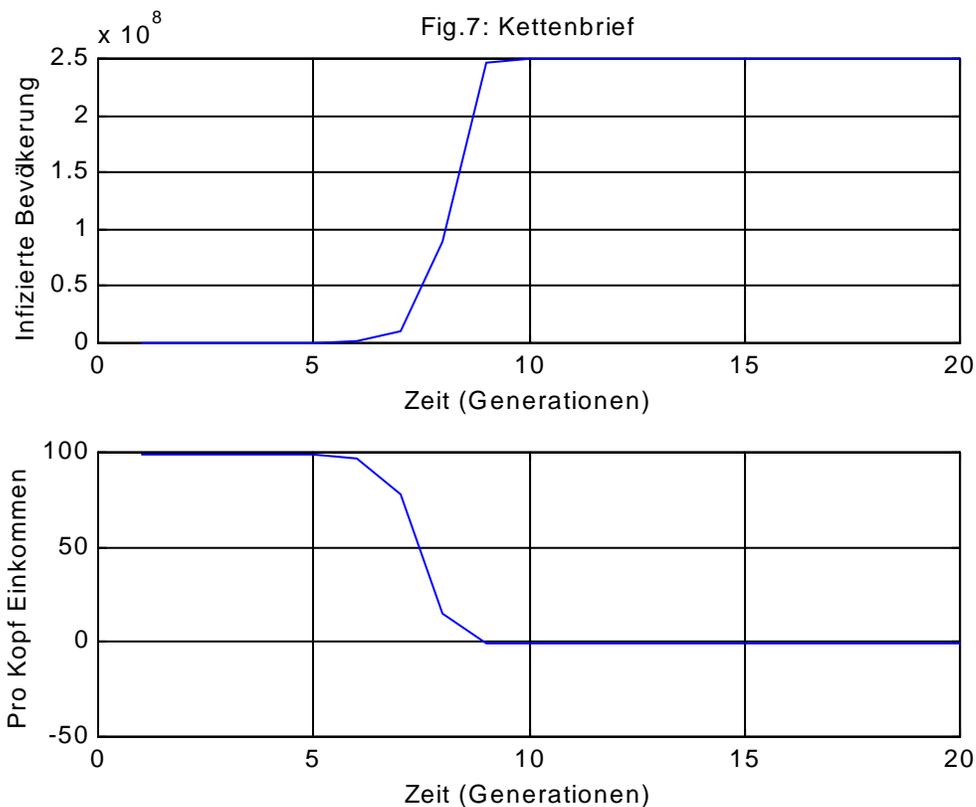
an zehn seiner engsten Freunde. Die erste Generation erhält einen Zusatzbrief mit Spezialanweisungen. Es sollen nämlich immer zwei nicht durchgestrichene

Adressen auf jedem Brief stehen. Somit bezahlen der Urheber und seine direkten „Kinder“ gar nichts. Alle „Enkel“ und „Urenkel“ bezahlen genau einen Dollar an ihren jeweiligen „Großvater“. Jeder erhält genau 100 Dollar, einen Dollar von jedem seiner 100 „Enkel“. So verwandelt jeder einen einzelnen investierten Dollar in 100 Dollar — eine bestechend einfache, elegante, zweckmäßige ... und gänzlich illegale Methode, um schnell zu Geld zu kommen.

Der Verfasser simulierte den Kettenbrief (die Simulation ist nicht illegal) mit den folgenden Zusatzspielregeln:

1. Der Kettenbrief wird nur in Amerika verschickt.
2. Der Kettenbrief wird wahllos an 10 andere Amerikaner verschickt.
3. Jeder Amerikaner macht genau einmal mit, d.h. wenn er (oder sie) den Brief zum ersten Male erhält, wird er (oder sie) die Anweisungen strikte befolgen. Beim zweiten und jedem weiteren Male, wirft der Empfänger den Brief in den Papierkorb.

Die Simulationsergebnisse wurden in Fig.7 zusammengefaßt.



Der Leser sieht gleich, daß nach ca. 10 Generationen das ganze Land vom Kettenbrieffieber angesteckt ist. Die Glücklichen, welche frühzeitig angesteckt wurden, verdienen 99 Dollar. Die Myriaden von Unglücklichen, die zu spät auf den Goldesel aufgesprungen sind, sind die Geprellten, welche die Zeche zu bezahlen haben. Sie verlieren je einen Dollar. Das in Matlab kodierte Kettenbriefsimulationsprogramm kann von der Webseite <http://www.ece.arizona.edu/~cellier/chainletter.m> heruntergeladen werden.

Die Energieerhaltungssätze sind nicht verletzt. Es wird nicht etwas aus nichts erschaffen. Die Wertschöpfung geht auf Kosten der Nachkommenschaft. Wir alle essen das Brot unserer Kinder. Solange die zweite Ableitung der Infektionskurve (oder des Bevölkerungswachstums) positiv ist, leihen wir Geld von unseren Kindern. Wenn die zweite Ableitung negativ wird, müssen wir unsere vorher gemachten Schulden zurückbezahlen.

Kettenbriefe sind zwar illegal ... aber eben nur, wenn sie vom Einzelnen initiiert werden. Ganze Regierungen, ja unsere ganze Volkswirtschaft, funktioniert auf dem Prinzip des Kettenbriefs. Der Verfasser bezahlte während seines aktiven Lebens einen Dollar in die Sozialfürsorge (Social Security Administration). Er erhoffte, daß ihm die Sozialfürsorge sein Alter mit drei Dollars versüßen wird, die seine vier Enkel (statistisch gesehen) in ihrem aktiven Lebensabschnitt in die Sozialfürsorge einbezahlen werden (der vierte Dollar wurde von der Regierung bereits vorsorglich entwendet, um daraus Waffen zu kaufen).

Die Geschichte mit der zweiten Ableitung ist somit durchaus real und spielt eine wesentliche Rolle in der Entwicklung der Volkswirtschaft.

Das Logistikmodell

Ein einfaches Modell, das den Übergang vom Wachstum zum Gleichgewicht gut beschreibt, ist das sogenannte Logistikmodell. Es wird durch die Differentialgleichung:

$$dx/dt = a \cdot x + b \cdot x^2$$

beschrieben, wobei $a > 0$ und $b < 0$.

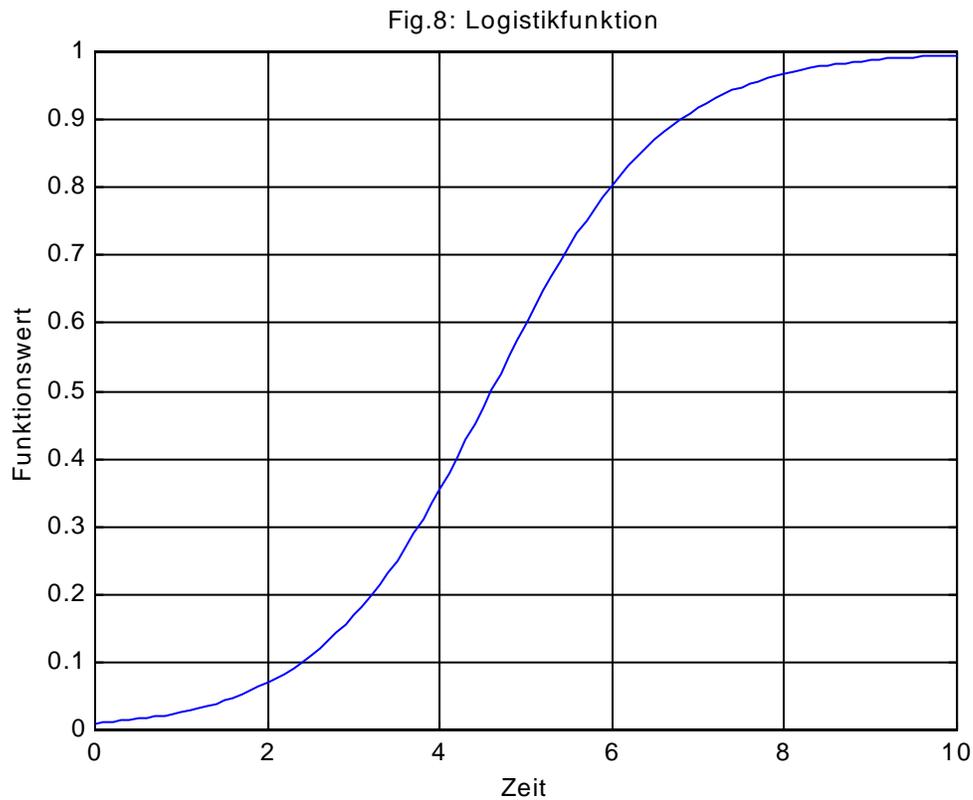
Beim Logistikmodell handelt es sich um eine einfache Form einer Riccatidifferentialgleichung. Es ist aber auch eine Bernoullidifferentialgleichung. Das Modell kann daher durch die Substitution:

$$y = 1/x$$

linearisiert und einer analytischen Lösung zugeführt werden. Die Lösung ist:

$$x(t) = 1 / ((1/x_0 + b/a) \cdot \exp(-a \cdot (t-t_0)) - b/a)$$

wobei t_0 die Anfangszeit und x_0 den Anfangswert bezeichnet. Fig.8 zeigt den Verlauf des Logistikmodells für $a = +1$ und $b = -1$.



Der Endwert der Logistikfunktion ist:

$$x(t \rightarrow \infty) = -a/b$$

Der Wert der Logistikfunktion zur Zeit des Wendepunkts ist:

$$x(t = t^*) = -a/(2 \cdot b)$$

Der Zeitpunkt der Wende, d.h. der Zeitpunkt, da die zweite Ableitung Null wird, ist:

$$t^* = (-1/a) \cdot \ln((-b \cdot x_0)/(b \cdot x_0 + a)) + t_0$$

Das Logistikmodell soll nun dazu verwendet werden, um festzustellen, wann bei den Bevölkerungsentwicklungen der Vereinigten Staaten sowie der Welt der Wendepunkt eintritt.

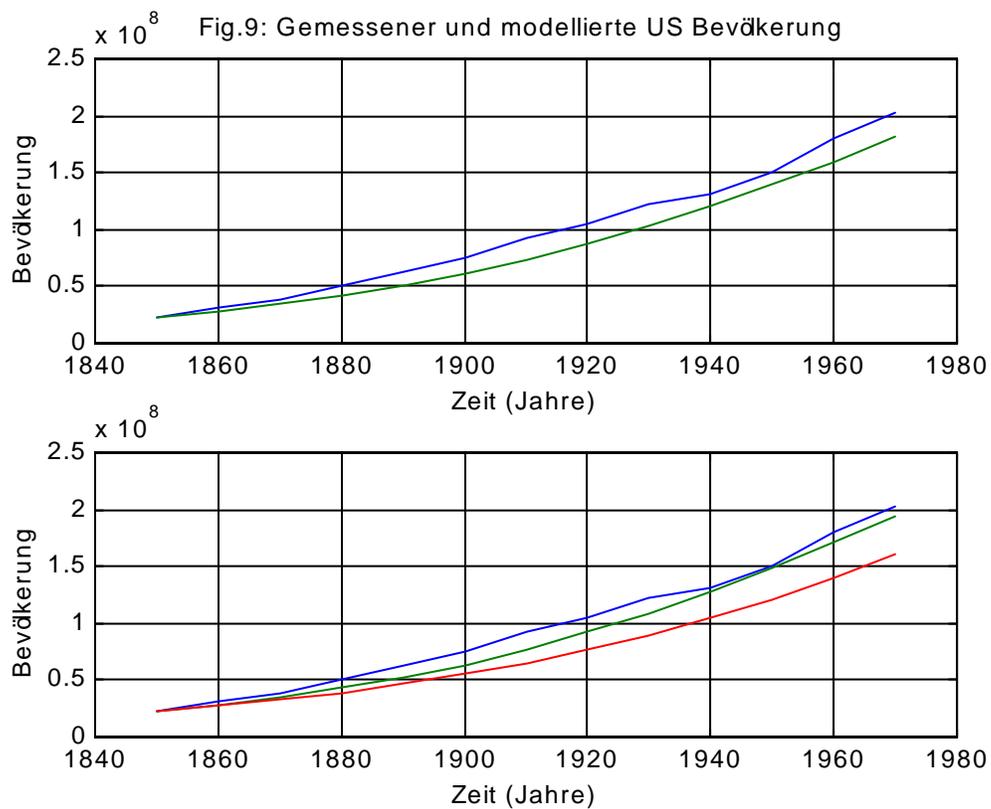
Diese Frage beschäftigte den Verfasser bereits in den 70er Jahren. Er nahm daher die veröffentlichte Bevölkerungsstatistik der Vereinigten Staaten und ermittelte die Parameter a und b des Logistikmodells mittels linearer Regression. Zu diesem Zweck wurde die Zustandsableitung durch eine realistische lineare erste Approximation angenähert, d.h.:

$$dP/dt(t) \cong (P(t+1) - P(t-1))/2$$

und somit:

$$(P(t+1) - P(t-1))/2 \cong a \cdot P(t) + b \cdot P^2(t)$$

Die obere Kurve von Fig.9 zeigt das Resultat dieser Regressionsanalyse.



Solange exponentielles Wachstum angenommen werden darf, wächst auch die Zustandsableitung noch exponentiell an. Somit kann eine Majorante der Annäherung unter Verwendung der Annäherungsformel:

$$dP/dt(t) \cong P(t+1) - P(t)$$

errechnet werden. Eine Minorante erhält man mittels der Formel:

$$dP/dt(t) \cong P(t) - P(t-1)$$

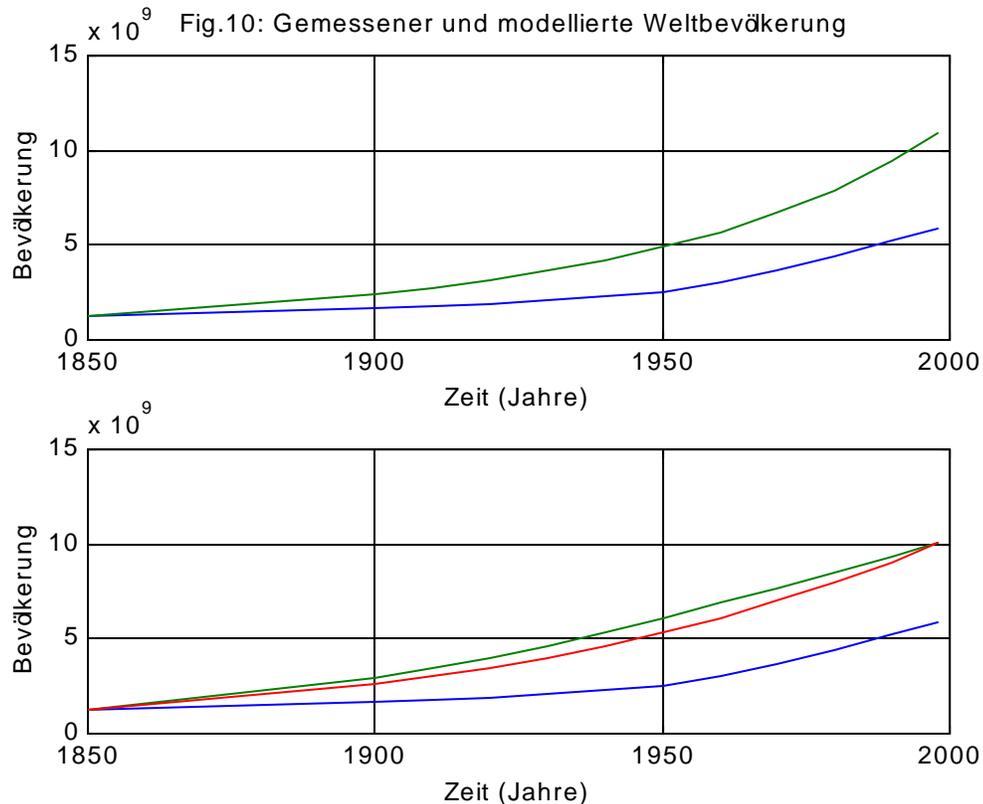
Die untere Kurve von Fig.9 zeigt die Resultate der Regressionsanalysen unter Verwendung dieser beiden Formeln. Sogar die Majorante hinkt leicht hinter der echt gemessenen Bevölkerungsentwicklung her. Die realistische Annäherung lieferte einen Wert für den Wendepunkt von 1983. Die Majorante und Minorante lieferten eine Klammer von $t^* \in [1978,2019]$ für den wahrscheinlichen Zeitpunkt der Wende. Der interessierte Leser kann das in Matlab kodierte Programm von der Webseite <http://www.ece.arizona.edu/~cellier/census.m> herunterladen.

Sobald die Bevölkerungszahlen für 1980 verfügbar waren, fügte der Verfasser den neuen Meßwert zu und errechnete einen neuen Bereich. Diesmal ergab sich eine Klammer von $t^* \in [1972,2006]$. Die neusten Simulationen beinhalten die Bevölkerungswerte bis zum Jahr 1998. Diese Simulationen lieferten eine Klammer von $t^* \in [1973,1997]$.

Die Vereinigten Staaten befinden sich somit bereits in der linearen Phase, d.h. der Phase, da die zweite Ableitung der Bevölkerungsvermehrungskurve ca. 0 ist. Wenn die zweite Ableitung negativ wird, ist mit einer systembedingten Rezession zu rechnen, da die zusätzliche Bevölkerung nicht mehr herangezogen werden kann, um für die Sünden der Vergangenheit aufzukommen.

Aus diesen Gründen kämpft momentan die Sozialfürsorge in den Vereinigten Staaten (und fast überall in den Industriestaaten) mit der Zahlungsunfähigkeit, und der Verfasser darf wohl zum Zeitpunkt seiner Pensionierung in ca. 13 Jahren kaum mit seinen drei Dollars Sozialunterstützung rechnen. Er gehört somit zur Generation derer, die zwar noch selbst für den Lebensabend ihrer Eltern aufgekomen sind, die aber nicht damit rechnen können, daß in ihren alten Tagen Gleiches mit Gleichem vergolten wird.

Es ist ein Leichtes, diese Analyse für die gesamte Weltbevölkerung zu wiederholen. Fig.10 zeigt die entsprechende Analyse für die Bevölkerung der Erde. Die echte Bevölkerungsentwicklung hinkt hier hinter allen Annäherungen her. Die Simulation ergibt eine Klammer von $t^* \in [1982,2098]$. Die Resultate sind aber weniger relevant, da das Modell eine homogene Verteilung der Geldmittel voraussetzt, was wohl für die Vereinigten Staaten nicht aber für die gesamte Erde zutrifft.



Fuzzy Inductive Reasoning

Vor einigen Jahren gelangte eine Abteilung des amerikanischen Verteidigungsministeriums an den Verfasser mit der Bitte, ihr bei der Vorhersage technologischer Entwicklungen in der Volkswirtschaft zu helfen. Dies war in der Tat eine interessante Aufgabe, deren Lösung sich der Verfasser sogleich mit Eifer widmete. Er erklärte den Auftraggebern, daß die Erstellung von Vorhersagen eine sehr einfache Sache sei ... so einfach, wie das Werfen einer Münze. Was wesentlich schwieriger ist, ist zu wissen, wie gut eine Vorhersage ist. Es ist darum nicht damit abgetan, ein Modell zu erstellen, das eine gewünschte Ausgangsgröße modelliert. Diese Modellierungsaufgabe muß vielmehr von einem zweiten parallelen Modellierungsansatz begleitet werden, welcher den Fehler des ersten Modells abschätzt.

Der Verfasser vertritt die Auffassung, daß Modelle der Volkswirtschaft, oder noch allgemeiner, Modelle schlecht definierter Systeme, ohne interne Fehlerabschätzung wertlos sind. Eine der ganz wesentlichen Mängel von Systems Dynamics als Methodik zur Modellierung schlecht definierter Systeme liegt darin, daß die Methodik keinerlei Abschätzung des Modellfehlers liefert. Somit hat der Anwender der Methodik keinerlei Handhabe, um abzuschätzen, wie vertrauenswürdig das Modell und seine Vorhersagen sind.

Es versteht sich von selbst, daß das Fehlermodell ein statistisches Modell sein muß. Wäre es nämlich möglich, den Fehler eines Modells deterministisch abzuschätzen, dann könnte man ja die Abschätzung des Fehlers von der Abschätzung der Modellgröße subtrahieren und damit eine verbesserte Abschätzung der Modellgröße selbst ermitteln. Ein solcher Ansatz kann nur dann Erfolg versprechen, wenn das ursprüngliche Modell der Ausgangsgröße nicht die gesamte zur Verfügung stehende Information über das zu modellierende System ausschöpft. Je besser das Modell der Ausgangsgröße, desto weniger Information steht zur Verfügung, um dessen Fehler abzuschätzen. Man kann diese Überlegung sogar dazu ausnützen, die Qualität einer Abschätzung zu beurteilen. Wenn nämlich die gesamte zur Verfügung stehende Information vom Modell der Ausgangsgröße ausgeschöpft ist, muß das Modell des Modellfehlers die Eigenschaften unkorrelierten weißen Rauschens annehmen.

Zur Lösung des gestellten Problems bediente sich der Verfasser einer Modellierungsmethodik namens *Fuzzy Inductive Reasoning (FIR)*, die er mit seinen Studenten während der letzten 15 Jahre entwickelte (Cellier, 1991; Nebot *et al.*, 1998). Der Verfasser zieht es vor, den englischen Namen auch in deutschsprachigen Artikeln beizubehalten, da „difuses induktives Schließen“ allzu merkwürdig klingt.

Die FIR Methodik arbeitet mit qualitativer Information. Zu diesem Zweck werden zunächst quantitative realwertige Signale in qualitative „fuzzy“ Signale umgewandelt. FIR modelliert das Verhalten zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen, indem es eine Regelbasis von „fuzzy“ Regeln aufstellt, welche die qualitativen Eingangssignale mit den qualitativen Ausgangssignalen verbinden. Somit werden in der Modellierungsphase beobachtete Eingangs-/Ausgangsverhalten dazu benutzt, Regeln zu synthetisieren. In der Simulationsphase werden dann neue Eingangssignale mit den in der Regelbasis gespeicherten Eingangssignalen verglichen, um diejenigen Regeln zu finden, die am ehesten den neuen Eingangssignalen entsprechen. Die zuvor synthetisierten Regeln werden dann dazu verwendet, um qualitative Vorhersagen der Ausgangsgrößen zu machen. Die „fuzzy“ Information wird dazu benützt, zwischen benachbarten qualitativen Intervallen zu interpolieren, d.h. aus den zunächst noch qualitativen Vorhersagen quantitative Signale zurückzugewinnen.

FIR mißt die Ähnlichkeit zwischen den in der Regelbasis gespeicherten Eingangsmustern und den neuen Testmustern, um eine Zuversichtsfunktion aufzustellen. Je größer die Ähnlichkeit zwischen den gespeicherten Mustern in der Regelbasis und dem Testmuster, desto größer ist FIR's Zuversicht, daß es eine gute Vorhersage machen kann. FIR mißt außerdem den Abstand zwischen den Ausgangssignalen, die mit den fünf ähnlichsten Eingangsmustern assoziiert sind, um die Unsicherheit in der Vorhersage abzuschätzen. Die beiden Zuversichtsfunktionen liefern Werte zwischen 0 und 1, wobei ein Wert nahe 1 eine hohe Zuversicht reflektiert. Die Gesamtzuversichtsfunktion ist schließlich

als das Produkt zwischen den Eingangs- und Ausgangszuversichtsfunktionen definiert. Diese wird als Abschätzung der Qualität der Vorhersage mit der Vorhersage selbst an den Benutzer weitergegeben (López, 1999).

FIR hat keine Schwierigkeiten mit multivariablen Systemen. FIR nützt die Korrelationen, die zwischen verschiedenen gekoppelten Signalen bestehen, aus, um seine Vorhersagen zu verbessern. Somit bieten sich für FIR keine Schwierigkeiten, wenn es darum geht, Funktionen mehrerer Variablen zu modellieren.

FIR ist eine rein induktive Modellierungsmethodik. Zuvor erworbenes Wissen um Zusammenhänge zwischen Signalen kann nicht ohne Weiteres ins Modell eingebracht werden. Dazu eignen sich deduktive Verfahren, wie die zuvor besprochene System Dynamics Methodik, besser. Die beiden Vorgehensweisen lassen sich aber leicht miteinander verbinden. System Dynamics kann dazu verwendet werden, die globale Modellstruktur festzulegen, wobei FIR dazu verwendet wird, die multivariablen Funktionen, welche die „Rate“ Variablen definieren, zu modellieren.

Dies ist die Vorgehensweise, die der Verfasser dem Verteidigungsministerium vorschlug, um das zuvor erwähnte Vorhersageproblem anzugehen. Dabei wird eine dreistufige Modellstruktur gewählt. Auf der untersten Stufe wird die Bevölkerungsdynamik modelliert, die sowohl die zur Produktion von Gütern benötigten Arbeitskräfte, wie auch die Abnehmer der produzierten Güter ins Modell einbringt. Die zweite Stufe befaßt sich mit der Volkswirtschaft selbst. Die dieser Stufe zugeordneten Zustandsvariablen sind erstens Arbeitsplätze und Geldmittel, und zweitens der Konsumentenpreisindex (CPI) sowie der Produzentenpreisindex (PPI), die zusammen den Pulsschlag der Volkswirtschaft ausmachen. Die dritte Stufe beschreibt sodann das Angebot der zu modellierenden Güter, sowie die Nachfrage nach denselben, welche deren Preisstruktur bestimmt (Moorthy *et al.*, 1998; Moorthy, 1999).

Die Modellstruktur ist in Fig.11 beschrieben. Die erste Stufe modelliert die Gesamtbevölkerung unter Berücksichtigung der Altersstrukturen sowie der Volkszugehörigkeiten. Auf der zweiten Stufe wird zunächst die Einkommensstruktur modelliert. Angefangen wird mit dem durchschnittlichen Einkommen, das sodann verfeinert wird, um eine Verteilung der Einkommen zu ermitteln. Diese, zusammen mit der Altersverteilung der Bevölkerung dient dazu, die Arbeitslosenrate zu bestimmen. Diese Größen dienen sodann zur Ermittlung des Konsumenten- und Produzentenpreisindex. Auf der dritten Stufe wird der Preis eines bestimmten Verkaufsartikels ermittelt. Er hängt von der verfügbaren Menge dieses Artikels, der Nachfrage nach Gütern in der selben Klasse, den Geldmitteln, die für Erwerb von Gütern dieser Klasse bereitgestellt sind, sowie den beiden Preisindizes ab.

Der geneigte Leser sei darauf hingewiesen, daß alle Größen implizit auch von ihrer eigenen Vergangenheit abhängen. Somit wäre es theoretisch möglich, jede dieser Variablen als univariante Zeitreihe aufzufassen und deren zukünftige Werte ohne weitere Eingangsvariablen nur auf Grund ihrer eigenen Vergangenheit abzuschätzen. Es zeigt sich aber, daß FIR bessere Vorhersagen liefert, wenn andere mit ihr korrelierte Variablen als zusätzliche Eingangsvariablen angeboten werden.

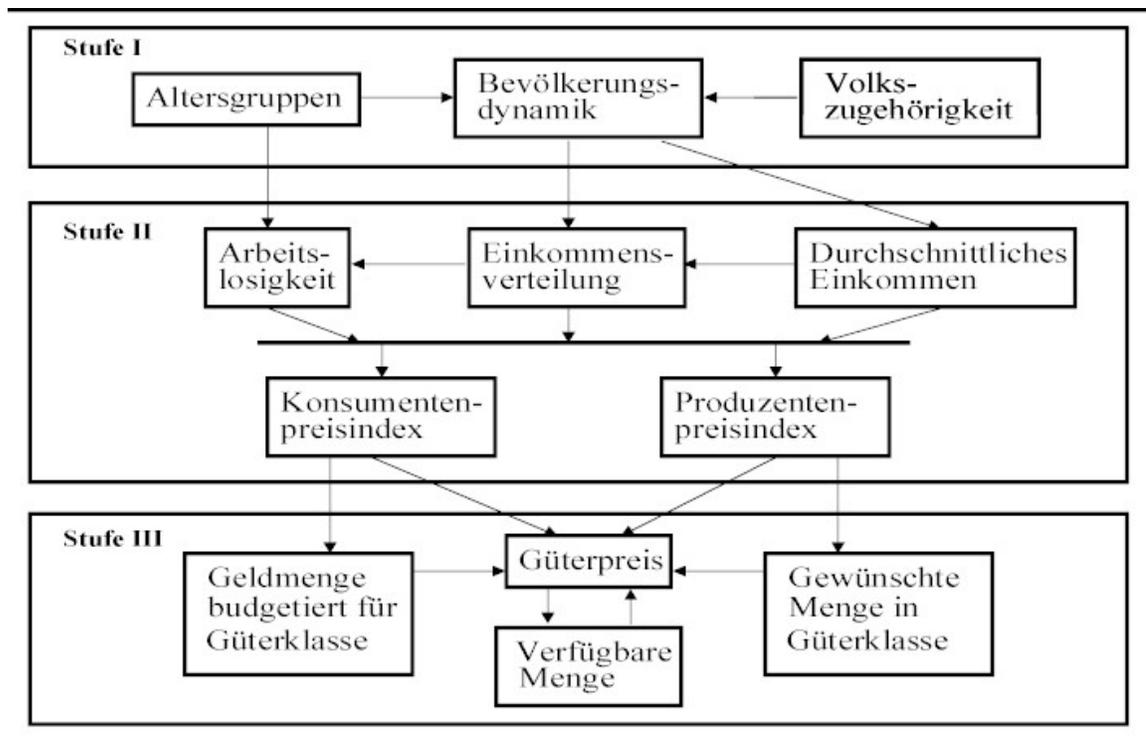


Fig.11: Dreistufenmodell der Volkswirtschaft

Das Bevölkerungsmodell wird einerseits auf Grund der einzelnen Altersgruppen und andererseits auf Grund der Volksgruppenzugehörigkeit aufgestellt. Die Modelle für die einzelnen Altersgruppen sind in Fig.12 aufgezeigt. Es standen Daten für jede dieser Bevölkerungsgruppen für die Jahre 1900 bis 1995 zur Verfügung. Jedes dieser Modelle wird auf Grund der gemessenen Zeitreihen der eigenen Vergangenheit aufgestellt, wobei die Zeitreihen der Eingangsvariablen, welche in Fig.12 durch Pfeile angegeben sind, als zusätzliche Daten zur Verfügung gestellt werden. Es stehen auch Daten über die Volksgruppenzugehörigkeit (Kaukasier, Lateinamerikaner, Afroamerikaner, Asiaten, Indianer und Insulaner) zur Verfügung. Für jede dieser Gruppen wird ein unabhängiges Modell aufgestellt.

Die Gesamtbevölkerung ist nun überbestimmt. Einerseits kann sie auf Grund ihrer eigenen Vergangenheit vorausgesagt werden. Andererseits ist die Gesamtbevölkerung die Summe der Bevölkerungen der einzelnen Altersgruppen sowie die Summe der Bevölkerungen der einzelnen Volksgruppen. Diese Zusatzinformation kann zur Stabilisierung beigezogen werden. Die vorhergesagte Gesamtbevölkerung ist ein Mittelwert der drei Einzelvorhersagen.

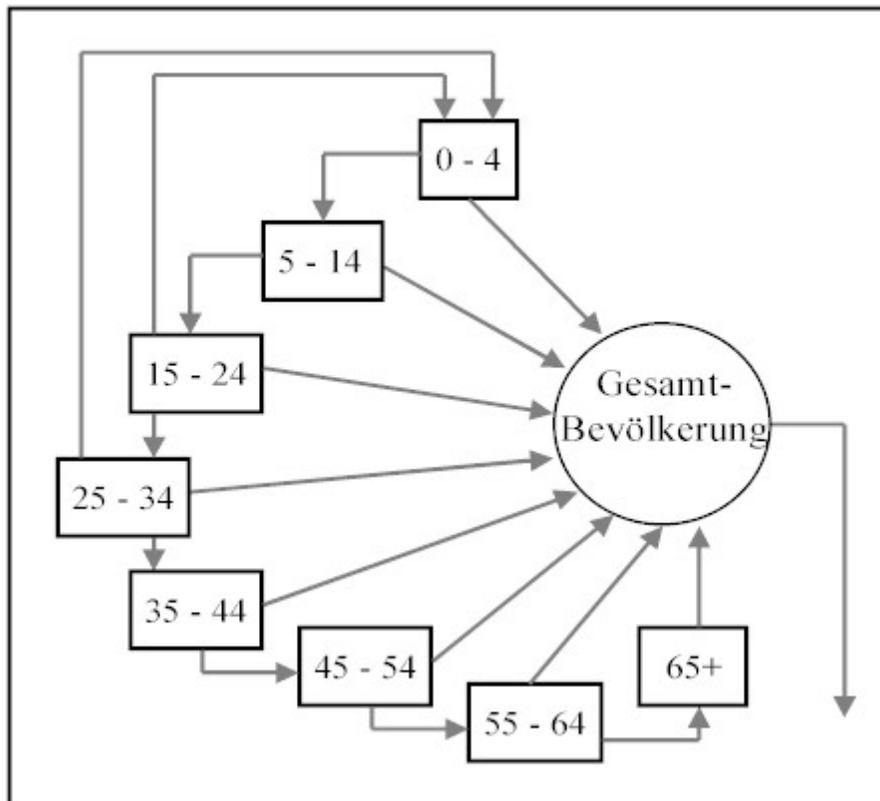
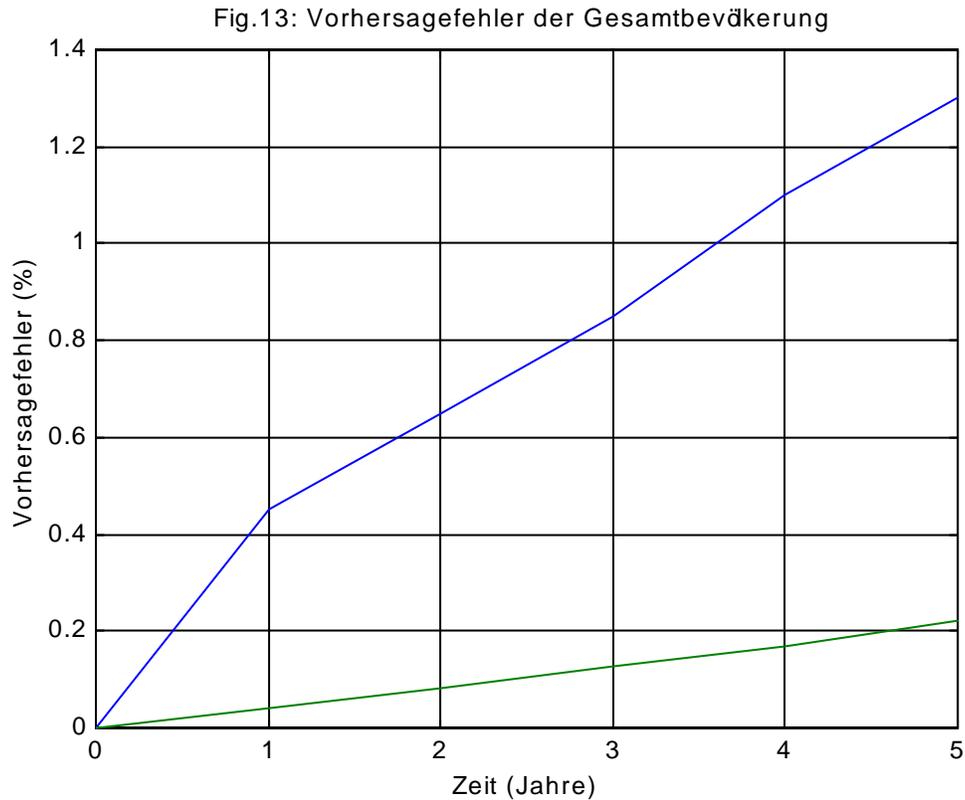


Fig.12: Bevölkerungsmodelle nach Altersgruppen

Der Zweck dieses Modells ist nicht, Vorhersagen über fünfhundert Jahre anzustellen. Der Auftraggeber ist zufrieden, wenn Vorhersagen über 1 bis 10 Jahre hinweg gemacht werden können.

Das Modell wurde aufgestellt mit den Daten der Jahre 1900 bis 1970. Die übrigen verfügbaren Daten wurden zur Modellvalidierung beigezogen. Es wurde jeweils eine Vorhersage über n Jahre gemacht, wobei n Werte von 1 bis 5 annimmt. Da die echten Meßdaten zur Verfügung standen, konnte der Vorhersagefehler ermittelt werden. Fig.13 zeigt den mittleren Vorhersagefehler bei Vorhersagen über 1 bis 5 Jahre. Die obere Kurve zeigt den Vorhersagefehler, der resultiert, wenn die Gesamtbevölkerung als univariate Zeitreihe aufgefaßt wird, deren Zukunft nur auf Grund ihrer eigenen

Vergangenheit bestimmt wird. Die untere Kurve zeigt den Fehler der stabilisierten Vorhersage, die auf den Vorhersagen nach Altersgruppen sowie Volkgruppen basiert. Es zeigt sich deutlich, daß die Zusatzinformation nützlich ist, um den Vorhersagefehler zu reduzieren.



Die zweite Stufe befaßt sich mit der Volkswirtschaft selbst. Das System Dynamics Modell, welches hierzu verwendet wurde, ist in Fig.14 abgebildet. Es beinhaltet vier Zustandsvariablen: Arbeit (Stellenmarkt), Geldmenge, CPI, und PPI. Zusätzliche algebraische Variablen sind die Arbeitslosenrate, die Inflationsrate, sowie die Hypothekarzinsrate der Nationalbank.

Auch die zweite Stufe kann noch völlig unabhängig von der Endanwendung modelliert werden. Es handelt sich bei diesem Modell um ein Modell des Allgemeinzustands der Volkswirtschaft. Die Pfeile von oben bezeichnen die Einflüsse der Bevölkerungsdynamik auf die Ökonomie. So ist die Arbeitslosenrate sicherlich eine Funktion des Stellenmarkts sowie der verfügbaren Arbeitnehmer. Die Hypothekarzinspolitik der Nationalbank (Alan Greenspan) basiert auf der Inflations- sowie der Arbeitslosenrate. Somit wäre es vielleicht sinnvoll gewesen, diese Variablen zuerst zu ermitteln und dann als Eingangsgrößen dem Modell der Hypothekarzinsstruktur zuzuführen. Dies wurde aber nicht getan. Es ergaben sich bessere Vorhersagen, wenn die

Hypothekenzinsen auf Grund ihrer eigenen Vergangenheit sowie der Bevölkerungsdynamik bestimmt wurden. Ein Grund dafür mag sein, daß die Vorhersagen der Arbeitslosigkeit und der Inflation selbst Vorhersagefehler aufweisen, welche die Vorhersage der Hypothekenzinsen übermäßig beeinträchtigen würden.

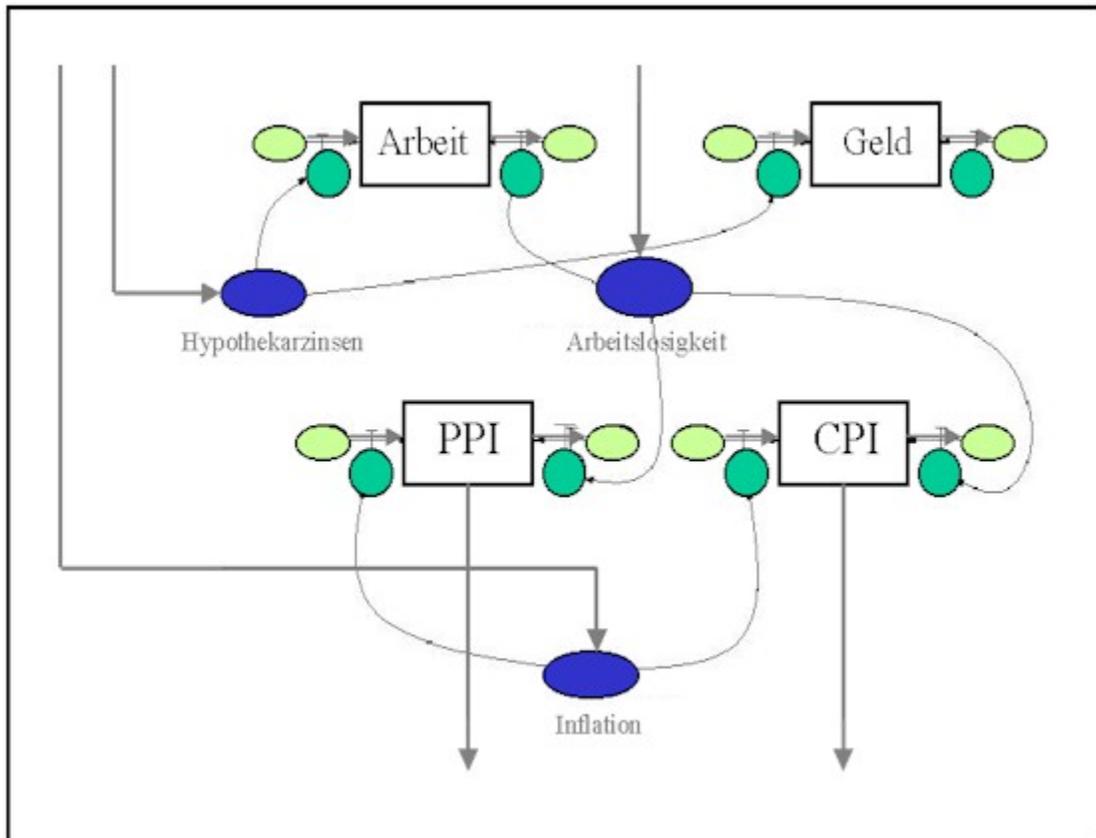
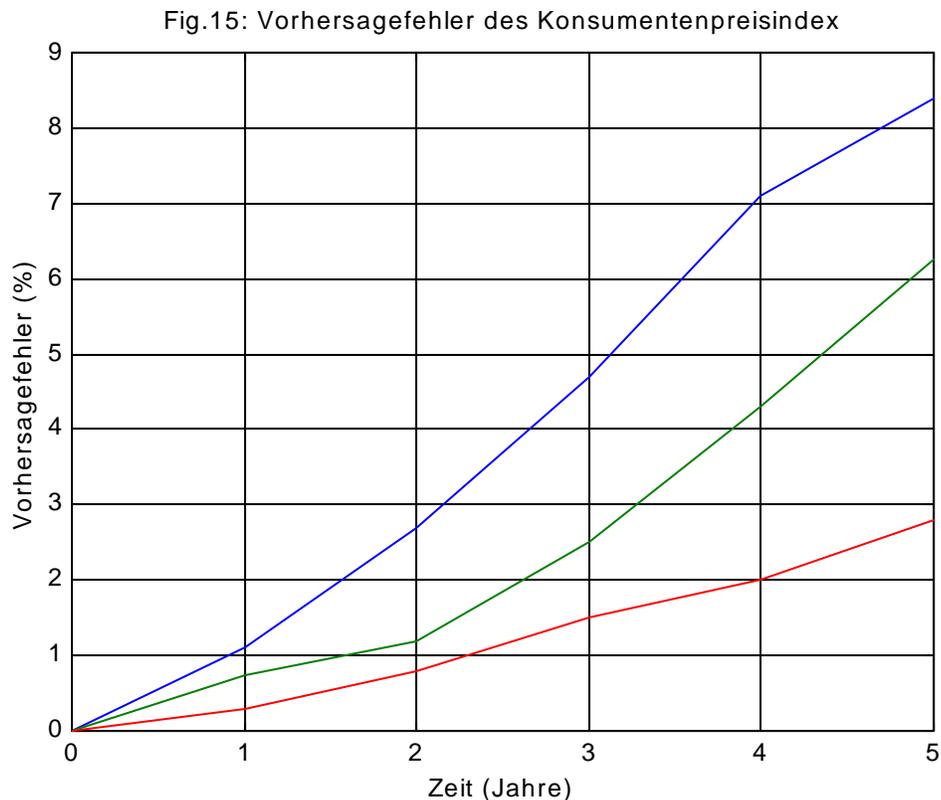


Fig.14: Modell der Volkswirtschaft

Die Pfeile nach unten bezeichnen die Information, die vom allgemeinen Volkswirtschaftsmodell ans Modell der Anwendung (Stufe III) weitergereicht werden.

Wiederum zeigt sich, daß die Vorhersagefehler des Volkswirtschaftsmodells namhaft reduziert werden können, wenn dem Modell Vorhersagen der Bevölkerungsdynamik als Zusatzinformation zur Verfügung gestellt werden. Fig.15 zeigt den Vorhersagefehler bei der Ermittlung des Konsumentenpreisindex. Die oberste Kurve zeigt den Vorhersagefehler, wenn der Konsumentenpreisindex als univariante Zeitreihe aufgefaßt wird. Die mittlere Kurve zeigt den Fehler, wenn das Durchschnittseinkommen als Zusatzinformation verwendet wird. Die unterste Kurve zeigt den Vorhersagefehler, wenn sowohl das Durchschnittseinkommen wie auch die

Arbeitslosenrate als Zusatzinformation verwendet werden. Diese Größen sind aber selbst wieder von der Bevölkerungsdynamik abhängig.



Warum interessiert sich die amerikanische Regierung für solche Vorhersagen? Wenn zum Beispiel abgeschätzt werden kann, wie viele Benutzer das Internet in 10 Jahren haben wird, kann daraus berechnet werden, welche Bandbreite zur Befriedigung dieses Bedürfnisses benötigt wird. Somit können bereits heute von der Regierung die nötigen Geldmittel zur Verfügung gestellt werden, damit die benötigte Bandbreite dann auch wirklich zur Verfügung stehen wird. Dies setzt Forschung in neuen Technologien voraus, welche mehrere Jahre Zeit in Anspruch nimmt.

Eine Anwendung der besprochenen Methodik betrifft die Vorhersage des Konsums verschiedener Arten von Lebensmitteln. Wie viel frische Milchprodukte konsumiert der Amerikaner? Wie viel Tomaten müssen angebaut werden, um den Bedarf zu decken? Solche Informationen sind wertvoll für die Bauern, die auf Grund solcher Information beschließen können, welche Produkte sie anbauen wollen.

Fig.16 zeigt das implementierte Modell der dritten Stufe für diesen Anwendungsfall. Die Preise steigen mit steigendem Durchschnittseinkommen

sowie mit steigender Inflation. Sie sinken mit steigender Arbeitslosigkeit, da arbeitslose Konsumenten nur noch Geld für Grundnahrungsmittel zur Verfügung haben. Die Produktion steigt in Funktion der Qualität des Klimas sowie der zu erzielenden Preise. Der Konsum steigt in Funktion der Anzahl Konsumenten, d.h. der Bevölkerung.

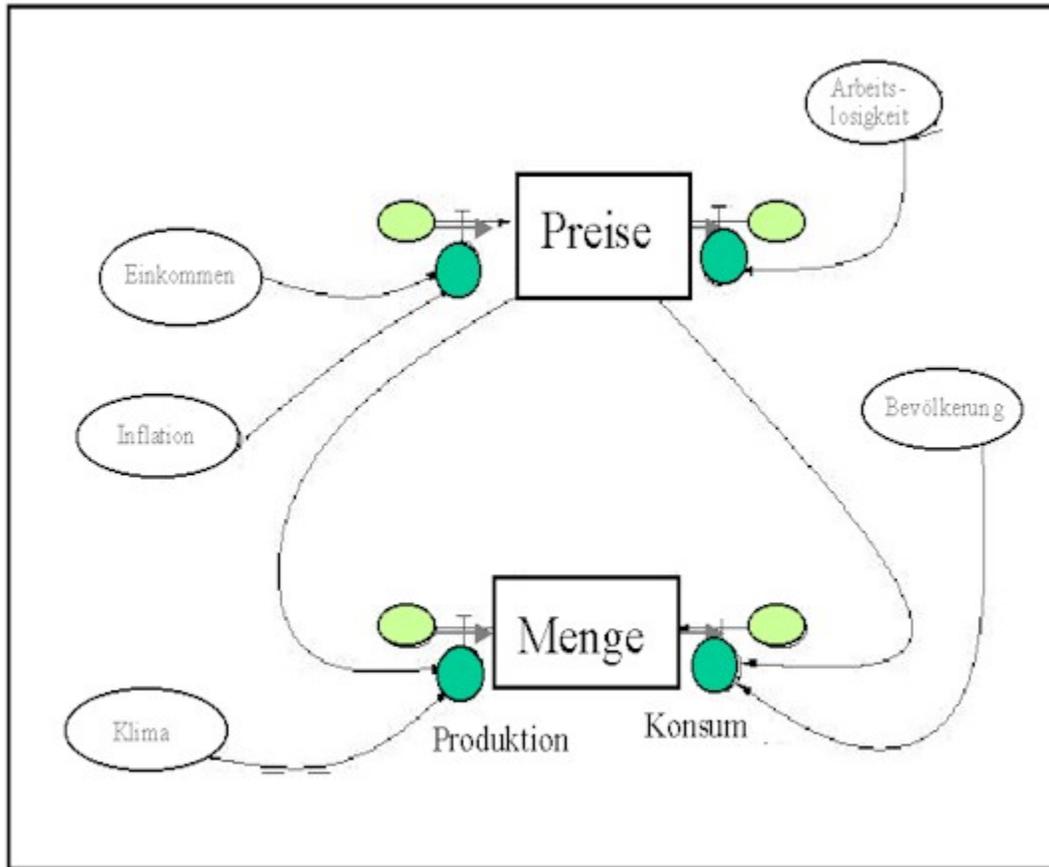


Fig.16: Produktion und Konsum von Lebensmitteln

Ein Vortrag, der diese Modellierungsmethodik beschreibt, kann vom Web unter der Adresse <http://www.ece.arizona.edu/~cellier/spie.html> abgerufen werden.

10 Tage bis „Y2K“

Der Verfasser hat aufgezeigt, daß es möglich ist, vernünftige Vorhersagen makro-ökonomischer Prozesse zumindest über kürzere Zeitspannen hinweg zu machen. Woran liegt es denn, daß wir heute, knapp 10 Tage vor „Y2K“, immer noch nicht voraussagen können, was beim Jahrhundertwechsel alles schief

gehen wird? Zwar ist es möglich, vorherzusagen, was möglicherweise schief gehen *könnte*, nicht aber, was wirklich schief gehen *wird*.

Woran liegt es, daß sich Y2K der Vorhersagbarkeit entzieht? Die Simulationstechnik kann keine Ereignisse vorhersagen. Es ist unmöglich, im Voraus zu wissen, wann der Präsident eines Landes von einem Attentäter ermordet wird, oder wann eine Ölbohrplattform durch eine Explosion unbrauchbar gemacht wird. Simulationen können einzig Trends extrapolieren, wobei die Unsicherheit der Extrapolation mit fortschreitender Zeit und mit sich verändernden Zuständen immer größer wird. Bei Y2K handelt es sich nicht um einen Trend, sondern um eine sehr große Anzahl miteinander korrelierter Ereignisse. Dies macht es unmöglich, mit Sicherheit vorherzusagen zu können, was geschehen wird, und jeder, der etwas Anderes behauptet, ist entweder ein Hochstapler, der die Wissenschaftsgläubigkeit seiner Mitmenschen ausnützt, oder aber ein Verrückter, dem sein Prophetentum in den Kopf gestiegen ist.

Heißt dies, daß die Simulationstechnik im Falle von Y2K resignieren muß? Dies ist keineswegs der Fall. Erstens kann die Simulationstechnik für die strategische Planung zugezogen werden. Die amerikanische Armee tut dies ausgiebigst. Es werden möglicherweise eintretende Szenarien simuliert, um im Voraus Strategien auszuarbeiten, wie in solchen oder ähnlichen Situationen zu verfahren sei. Zweitens können Echtzeitsimulationen dazu verwendet werden, unmittelbar eintreffende Information von aktuellen Ereignissen rund um den Erdball einem Krisenstab zur Verfügung zu stellen, damit dieser möglichst schnell und möglichst gezielt reagieren kann.

Solche Echtzeitsimulationen großen Ausmaßes wurden tatsächlich bereits entwickelt, und sind im Einsatz, um damit möglichen Y2K Problemen gezielt entgegenzutreten zu können. Der Leser sei auf einen Artikel verwiesen, der vor wenigen Tagen vom amerikanischen Verteidigungsministerium auf dem Web publiziert wurde. Er findet sich momentan auf der Webseite: http://www.defenselink.mil/news/Nov1999/n11011999_9911011.htm Da jedoch Webinformation häufig kurzlebig ist, hat der Verfasser eine Kopie dieses Artikels unter der Webseite http://www.ece.arizona.edu/~cellier/www.defenselink.mil-news-Nov1999-n11011999_9911011.htm abgelegt.

Abschließende Bemerkungen

Die Simulationstechnik kann in der Tat einen nützlichen Beitrag zur Vorhersage gewisser dynamischer Prozesse liefern. Sie muß allerdings mit großer Vorsicht angewandt werden, da es nur allzu leicht ist, Schlußfolgerungen aus Simulationsresultaten zu ziehen, die nicht stichhaltig sind. Die wissenschaftsgläubige Menschheit der Neuzeit ist nur allzu gerne bereit, solchen Überlegungen Glauben zu schenken, da sie auf scheinbar wissenschaftlichen Grundsätzen basieren. Es ist die Aufgabe der Simulationstechniker,

selbstkritisch zu sein und nicht der Versuchung zu erliegen, reißerische Schlußfolgerungen aus fehlinterpretierten Simulationsexperimenten zu veröffentlichen, die nicht wirklich fundiert sind. Dieser Versuchung ist leider Forrester bis zu einem gewissen Grade erlegen, obwohl sein Weltmodell im Endeffekt doch wohl mehr Gutes als Schlechtes bewirkt hat.

Referenzen

Cellier, F.E. (1991), *Continuous System Modeling*, Springer-Verlag, New York.

Forrester, J.W. (1971), *World Dynamics*, Wright-Allen Press, Cambridge, Mass.

López, J. (1999), *Time Series Prediction Using Inductive Reasoning Techniques*, Ph.D. Dissertation, Institut d'Organització i Control de Sistemes Industrials, Universitat Politècnica de Catalunya, Espanya. (http://www.ece.arizona.edu/~cellier/fina_phd.pdf).

Moorthy, M. (1999), *Mixed Structural and Behavioral Models for Predicting the Future Behavior of Some Aspects of the Macroeconomy*, MS Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Arizona, Tucson, Arizona, U.S.A. (<http://www.ece.arizona.edu/~cellier/moorthy.pdf>).

Moorthy, M., F.E. Cellier und J.T. LaFrance (1998), "Predicting U.S. Food Demand in the 20th Century: A New Look at System Dynamics," *Proc. SPIE Conference 3369: "Enabling Technology for Simulation Science II," AeroSense'98*, Orlando, Florida, pp.343-354. (http://www.ece.arizona.edu/~cellier/spie98_mcl.ps).

Nebot, A., F.E. Cellier und M. Vallverdú (1998), "Mixed Quantitative/Qualitative Modeling and Simulation of the Cardiovascular System," *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, **55**(2), pp.127-155.