



**Battelle**

Advanced Studies Center, Geneva, Switzerland.

GRENZEN DES WACHSTUMS: METHODOLOGISCHE  
BETRACHTUNGEN ZU FORRESTERS WELTMODELL

von

Edgar ASCHER

Vortrag gehalten am 17. September 1973  
in der Herbstschule für Hochenergiephysik  
Maria Laach, BRD

## 1. Einleitung

Über die Grenzen des Wachstums wird seit der Veröffentlichung des Buches "The Limits to Growth" viel geschrieben und geredet [1]. Es handelt sich um einen Bericht den D.L. Meadows und seine Kollegen für den "Club of Rome" verfasst haben. "Es ist nicht Zweck dieses Buches", so sagen die Autoren ([1], p. 23), "eine vollständige, wissenschaftliche Beschreibung aller Angaben und mathematischen Gleichungen zu geben, die im Weltmodell inbegriffen sind." Gerade diese Gleichungen aber brauchen wir. Der Zweck dieser Arbeit ist es nicht einen Eintopf der bisner zu diesem Thema vorgebrachten Meinungen aufzutischen. Auch soll nicht darüber die Rede sein, ob die Schlussfolgerungen optimistisch oder pessimistisch, konservativ oder revolutionär sind. Wir wollen in erster Linie verstehen wie man zu diesen Schlussfolgerungen gelangt, was dabei getan und, vor allem, was dabei unterlassen wird. Es soll eine immanante Kritik versucht, das Modell ernst genommen werden. Seine expliziten und impliziten Ansätze wollen wir unter die Lupe nehmen. Nur so können wir aus ihm lernen.

Dazu aber brauchen wir die mathematischen Gleichungen des Modells. Diese waren bis jetzt weder durch den Buchhandel, noch über Mitglieder des Exekutivkommittees des Club of Rome zugänglich. Es muss daher auf das Modell zurückgegriffen werden, dessen Weiterentwicklung Meadows' Modell eigentlich ist, nämlich auf J.W. Forresters Weltmodell [2]. Das zentrale, vierte Kapitel dieses Buches heisst übrigens auch "Limits to Growth".

Noch eines soll eingangs betont werden: Unsere Betrachtungen dienen nicht dazu, die Probleme zu deren Lösung Forrester beitragen will, wegzureden. Diese Probleme sind reel und vielleicht noch ernster als es Forrester meint. Eben deswegen darf man nicht blindlings dem ersten Versuch zum Verständnis und zur Lösung folgen.

## 2. Vorgeschichte

Zunächst aber wollen wir einen Blick auf die Entstehungsgeschichte dieser beiden Modelle werfen und auch etwas über den Club of Rome erfahren. Lassen wir den Gründer A. Peccei zu Worte kommen ( [3], p. 13-15).

" Es begann mit einigen Gesprächen 1967 in Paris, die zum Entschluss führten im April des darauffolgenden Jahres eine Gruppe westeuropäischer Intellektueller und Wissenschaftler zur Diskussion der Weltproblematik in der 'Academia dei Lincei' in Rom zusammenzurufen. Das Meeting wurde durch finanzielle Unterstützung der Stiftung Agnelli ermöglicht. Am Ende des Meetings beschlossen einige der Teilnehmer die Diskussionen in einem erweiterten Kreise fortzusetzen; sie nannten ihre Gruppe "Club of Rome", nach dem Orte an dem alles begonnen hatte."

"Gegenwärtig hat der Club ungefähr achtzig Mitglieder, darunter Wissenschaftler, Humanisten, Oekonomen, Erzieher, Staatsbeamte und Industrielle. Obwohl die Zahl der Mitglieder auf hundert beschränkt ist, wird die Auswahl so getroffen, dass Vertreter der verschiedensten Kulturen und Wertsysteme darunter vorkommen. Und obwohl keines der Mitglieder in gegenwärtigen politischen Entscheidungen beteiligt ist und der Club als solcher weder ideologisch noch politisch oder national gebunden ist, haben doch alle zusammen Zugang zu jenen, die Entscheidungen treffen und können auf einen grossen Informations- und Wissensschatz zurückgreifen. Diese Individuen, verschiedensten Ursprungs und mit den unterschiedlichsten Erfahrungen, haben eine Ueberzeugung gemeinsam, nämlich dass die Probleme denen die Menschheit jetzt gegenübersteht so komplex sind und so sehr zusammenhängen, dass traditionelle Politik und Institutionen nicht länger damit fertig werden können."

"Die Ziele des Clubs umfassen Forschung und Aktion und sind in einem weitgefassten Projekt vereinigt, das - der Lage entsprechend die gemeistert werden soll - 'The Predicament of Mankind' (die missliche Lage der Menschheit) heisst. Durch dieses Projekt

- soll ein tieferes Verständnis des kritischen Zustandes der menschlichen Angelegenheiten und der immer enger werdenden und ungewissen Zukunftsaussichten erworben und verbreitet werden,
- soll ein Klima für Aktion, mit ansprechbarer Weltöffentlichkeit und aufgeschlosseneren Entscheidungsträgern, geschaffen werden,
- sollen neue Verfahrensrichtlinien und Organisationstypen erkannt und vorgeschlagen werden, die es ermöglichen die Angelegenheiten der Menschheit in Zukunft intelligenter zu gestalten."

"Die Natur und Grösse des Clubs bringen es mit sich, dass seine Aktion nur katalytisch sein kann. Die 'limts'-Forschung ist seine erste grössere Manifestation."

"Nach seiner Gründung, 1968, bemühte sich der Club in den ersten zwei Jahren mit massgebenden wissenschaftlichen, industriellen und politischen Kreisen - von Moskau bis Washington, von Tokio bis Ottawa und Rio, und in Europa - herzustellen. Seine Überzeugung, dass die Probleme der modernen Gesellschaft zunehmen und immer schwerer zu behandeln sind, wurde weitgehend geteilt. Im allgemeinen aber waren diese hochgestellten Persönlichkeiten entweder nicht in der Lage oder nicht gewillt etwas zu unternehmen."... "Die Wirkungslosigkeit dieser ermahnenden Methode lag auf der Hand." ... "Andere, mächtigere und verständlichere Mitteilungs- und Ueberzeugungsmittel als die bisher gebrauchten waren nötig um die Weltöffentlichkeit und die Entscheidungsträger in Bewegung zu bringen."

Ende 1969 und Anfang 1970 fanden in Battelle-Genf, unter Leitung von H. Thiemann und unter Mitwirkung von H. Ozbekhan, intensive Diskussionen über die Formulierung eines Forschungsprogrammes statt, dessen Ziel war, die wichtigsten Weltprobleme aufzuzeigen und die zwischen ihnen bestehenden Zusammenhänge so genau wie möglich aufzudecken. Daraus sollte sich ein vernünftiger Zeitplan für die schrittweise globale Lösung dieser Probleme ergeben. Gleichzeitig sollte die Methodologie für so ein Forschungsvorhaben entwickelt und getestet werden.

Dieses Programm wurde am 29. Juni 1970, an einer Zusammenkunft des Club, in Bern, besprochen. "Professor Jay W. Forrester vom MIT, der an dem Meeting in Bern teilnahm, dachte er könne so eine Methode schaffen, durch Verbesserung der Technik seiner 'Systemdynamik'" ([3], p. 15-16).

Forrester sagt hinzu folgendes ([2], p. 13-14, xiii): "Diese Methode war in 'Industrial Dynamics' [4] beschrieben worden. 'Principles of Systems' [5] stellt die Strukturtheorie dynamischer Systeme dar und 'Urban Dynamics' [6] ist eine Anwendung auf Wachsen und Verfall einer Stadt. Durch mehrere Jahre hindurch war die modellmässige Darstellung gesellschaftlicher Systeme durch Rückkopplungskreise unter dem Namen 'Industriedynamik' bekannt. Dieser Name ist, jetzt wo Anwendungen ausserhalb von Industrieunternehmungen wichtig werden, eine Fehlbezeichnung. Da die Methode sich auf komplexe Systeme anwenden lässt, wo immer sie vorkommen, ist 'Systemdynamik' ein besserer Name. Anwendungen wurden gemacht auf: Unternehmenspolitik, auf die Dynamik der Zuckerkrankheit als medizinisches System, auf die sozialen Kräfte, die die Drogensüchtigkeit in einer Gemeinschaft beeinflussen, auf die Dynamik von Warenmärkten und auf das Verhalten von Forschungs- und Entwicklungsorganisationen ([7], [8], [9], und [10]). Auf dieser Grundlage wurde das Exekutivkommittee

des Club of Rome für zwei Wochen an das MIT eingeladen um das Systemdynamikprogramm zu prüfen und dessen Anwendbarkeit auf das Projekt des Club, betreffend die Weltentwicklung, zu beurteilen. Die Einladung wurde angenommen und die Konferenz begann am 20. Juli 1970. (Das Symposium wurde von der Stiftung Volkswagenwerk finanziert.)" Forresters "dynamisches Modell der Weltwechselwirkungen" das in [2] beschrieben wird und das wir kurz Modell W2 nennen werden, "wurde Anfangs Juli entworfen um als Diskussionsgrundlage für die Konferenz zu dienen. ... Als Resultat des Julumeetings beschloss das Exekutivkommittee des Club of Rome am MIT ein einjähriges Forschungsprogramm in Gang zu setzen." Ein "internationales Team unter der Leitung von Professor Dennis L. Meadows" sollte "über das Modell W2 hinausgehen und sowohl die zugrunde liegenden Annahmen, als auch die Subsysteme die die Sektoren des totalen Weltsystems bilden tiefer untersuchen." (Auch dieses Projekt wurde von der Stiftung Volkswagenwerk unterstützt.)

Das Modell W2 wurde im März 1971 veröffentlicht [2]. Meadow's Modell, das wir Modell W3 nennen wollen, erschien am 6. März 1972 [1]. Die ausführliche Darstellung von W3 ist unter dem Titel "Dynamics of Growth in a Finite World" [11] angekündigt worden, ist aber noch nicht erhältlich.

### 3. Beschreibung des Modells W2

Das Modell W2 enthält bei Forrester 43 Bestandteile. Davon beschreiben fünf den Zustand des Modells. Es sind dies die Zustandsgrößen von W2.

P (t)	1	PIAF	Bevölkerung
N (t)	8	NR	Bodenschätze
C (t)	24	CI	Kapitalinvestition
L (t)	30	POL	Verschmutzung
A (t)	35	CIAF	Bruchteil von C der in die Landwirtschaft investiert wird.

In der zweiten und dritten Kolonne stehen Forresters Nummer und Bezeichnung der Variablen, in der ersten Kolonne befinden sich die Symbole, die für unsere Zwecke brauchbarer sind: Die ersten vier dieser Zustandsgrößen, X, sind extensiv (d.h. additiv) und für sie müssen Einheiten, [X], eingeführt werden. Dies geschieht folgendermaßen:

[P]	Person
[N]	1970 pro Person verbrauchte Naturschätze
[C]	Kapital, das 1970 pro Person zur Verfügung stand
[L]	Polution pro Person in 1970

Die fünfte Zustandsgröße, A, ist nicht extensiv, aber das in die Landwirtschaft investierte Kapital, AK, wäre es. Die Zeiteinheit [t] ist 1 Jahr.

Jede Zustandsgrösse X (wobei X hier P, N, C, L oder A ersetzt) folgt einer Bewegungsgleichung vom Typ

$$(o) \quad X(t+\Delta t) = X(t) + \Delta t \cdot \phi [P(t), N(t), C(t), L(t), A(t)],$$

die es gestattet, den Wert zur Zeit  $t + \Delta t$  aus: (i) dem Wert zur Zeit  $t$  und (ii) dem Wert der Funktion  $\phi$  zur Zeit  $t$  auszurechnen. Es ist zu beachten, dass  $\phi$  von  $t$  nicht explizit, sondern nur durch den Wert der Zustandsgrössen zur Zeit  $t$  abhängt.

Die Form (o) der Bewegungsgleichungen eignet sich für die schrittweise Errechnung von Lösungen, bei Forrester ([2], p 3-5) Simulation genannt. Wir wollen nun kurz beschreiben wie das vor sich geht. Dabei werden wir sehen, welche Arten von Grössen in  $W_2$  vorkommen und wie die 5 Bewegungsgleichungen aussehen. Ausserdem führen wir noch  $X(1970)$ , das wir  $X_1$  schreiben wollen, als Normalzustand ein (siehe Tabelle 1) und bezeichnen die reduzierten Grössen  $X/X_1$  mit  $x$ . Als Schrittgrösse  $\Delta t$  wird 1 Jahr genommen. Hier also die Schritte:

(i) Bekannt die Werte zur Zeit  $t$ :  $P, N, K, L, A$  und zur Zeit 1970:  $P_1, N_1, C_1, L_1, A_1$ .

(ii) Berechne die Hilfsgrössen:  $p, n, \ell, C/P = I, aC/P = I_a$

(iii) Suche auf die entsprechenden Werte der Funktionen

$$n(n), f_a(I_a), \Pi_I(I), f_p(p), \beta_p(p), \delta_p(p), f_\ell(\ell), \beta_\ell(\ell), \delta_\ell(\ell), \alpha_\ell(\ell), \text{ und eventuell } q_p(p), q_\ell(\ell).$$

(iv) Berechne die Hilfsgrössen:  $I_n(1-A)/(1-A_1) = m,$   
 $f_a f_p f_\ell = f.$



(v) Suche auf die entsprechenden Werte der Funktionen  
 $\beta_m(m), \delta_m(m), v_m(m), \gamma_m(m), q_m(m), \beta_f(f), \delta_f(f), \lambda_f(f)$   
 $q_f(f)$

(vi) Berechne die Hilfsgrößen  $q_m/q_f$  und eventuell  
 $Q = Q_l q_p q_\ell q_m q_f$

(vii) Suche auf den Wert der Funktion  $\mu(q_m/q_f)$

(viii) Berechne die Hilfsgrößen

$$\beta = \beta^* \beta_p \beta_\ell \beta_m \beta_f \quad P \quad \text{Geburtsrate}$$

$$\delta = \delta^* \delta_p \delta_\ell \delta_m \delta_f \quad P \quad \text{Todesrate}$$

$$v = v^* v_m \quad P \quad \text{Verbrauchsrate für Naturschätze}$$

$$\gamma = \gamma^* \gamma_m \quad P \quad \text{Kapitalerzeugungsrate}$$

$$\epsilon = \epsilon^* C \quad \text{Kapitalverschleissrate}$$

$$\pi = \pi^* \pi_I \quad P \quad \text{Verschmutzungsrate}$$

$$\alpha = L/\alpha_\ell \quad \text{Verschmutzungsabsorptionsrate}$$

$$\tilde{A} = \lambda \mu \quad \text{Sollwert der Kapitalsinvestition in die Landwirtschaft}$$

(ix) Berechne den Wert der Zustandsgrößen zur Zeit

$t+1$  durch Ausrechnen der Bewegungsgleichungen

$$(1) P(t+1) = P(t) + \beta - \delta$$

$$(2) N(t+1) = N(t) - v$$

$$(3) C(t+1) = C(t) + \gamma - \epsilon$$

$$(4) L(t+1) = L(t) + \pi - \alpha$$

$$(5) A(t+1) = A(t) + \frac{1}{\tau} (\tilde{A} - A)$$

In dieser Beschreibung des Modells W2 kommen, neben den 5 Zustandsgrößen, noch 22 Funktionen und 17 Hilfsgrößen vor. Die Funktionen sind so gewählt, dass sie alle (ausser  $\lambda$ ) 1 ergeben, wenn das Argument den Wert von 1970 annimmt. Unter den Hilfsgrößen befinden sich 7 Raten ( $\beta, \delta, \nu, \gamma, \pi, \alpha$ ). Ausserdem kommen noch 8 Koeffizienten vor, die es erlauben das Modell W2 abzuändern. Es sind dies die Standardwerte  $\beta^*, \delta^*, \nu^*, \gamma^*, \epsilon^*, \pi^*$  für 6 Raten, die Anpassungszeit  $\tau$  der Kapitalinvestition in die Landwirtschaft in Gleichung (5), und ein Nahrungsmittelkoeffizient  $\phi$  in der Definition der Hilfsgrösse  $f$  (siehe auch Gleichung(6) unten).

Forrester beginnt seine Rechnung mit den Werten der Zustandsgrößen  $X$ , für das Jahr 1900, den Anfangswerten  $X_0$ , (siehe Tabelle 1) und wählt dann die Koeffizienten so, dass die Werte,  $X_1$ , für 1970 richtig herauskommen ([12], p 18). Die Bewegungsgleichungen zusammen mit diesen Standardwerten der Koeffizienten machen das Standardweltmodell W2, kurz W2-0 aus (siehe Tabelle 2). Die in [2] besprochenen achtzehn Modifikationen von W2 werden alle - mit einer Ausnahme - durch einmalige Abänderung von Koeffizienten im Jahre 1970 erzielt (siehe Tabelle 3).

Wichtig ist zu bemerken, dass weder aus den graphischen Darstellungen, noch aus dem Text zu entnehmen ist, wie gut das Standardmodell W2-0 den tatsächlichen Verlauf der Größen, nicht nur der Zustandsgrößen, zwischen 1900 und 1970 wiedergibt. Es besteht Grund zur Vermutung, dass diese Übereinstimmung nicht ganz befriedigend ist (siehe z.B. [13], p 112). Dazu kommt noch, dass es sehr wahrscheinlich mehrere verschiedene Koeffizientenkombinationen gibt, die es gestatten bei gegebenen Anfangswerten, die Werte der Zustandsgrößen für 1970 zu reproduzieren und auch die Entwicklung zwischen 1900 und 1970 befriedigend anzunähern. Eine numerische Annäherung der fünf Zustandsgrößen an ihre tatsächlichen Werte von 1970 garantiert keineswegs die Angemessenheit des Modells. Bei einigen der Größen,

N und L zum Beispiel, ist es auch gar nicht klar, wie man sie messen könnte. Dazu folgendes Geschichtchen des Mathematikers M. Kac: "Mit fünf Parametern kann man einen Hund beschreiben. Gebt mir einen sechsten und ich lasse ihn mit dem Schwanz wedeln." "Und ich kann die Parameter auf mehrere verschiedene Arten wählen", würden wir hinzufügen.

Der zeitliche Verlauf einiger Grössen des Modells W2-0 ist in Abb.1 und Abb.2 dargestellt. Zahlenwerte sind auch in Tab. 4 wiedergegeben. Ausser den Annahmen, die schon in Tab. 1 enthalten waren, handelt es sich dabei um aus den Kurven in [2] (p 70-71) geschätzte Werte. Die Kapitalinvestition C steigt von  $0.4 \times 10^9$  im Jahre 1900 auf 8.0 im Jahre 2040 und fällt dann 2100 auf 5.6. Für die Bodenschätze 1900 wurde der Wert  $9 \times 10^4$  gewählt, was der Annahme entspricht, dass die 1900 vorhandenen Bodenschätze  $N_0$ , bei einem konstanten jährlichen Verbrauch von  $3.6 \times 10^9$  Einheiten, (das ist definitionsgemäss der Verbrauch in 1970) in 250 Jahren (also 2150) vollständig aufgebraucht sein würden (Abb. 3,a). In W2-0 (b) fallen sie auf  $7.7 \times 10^4$  im Jahre 1970 und schliesslich auf  $2.8 \times 10^4$  im Jahre 2100. Die Extrapolationen c und d in Abb.3 ergeben als Erschöpfungsjahr 2140 und 2175, entsprechen also im wesentlichen eben der ursprünglichen Annahme. Die Extrapolation der jährlichen Abnahme im Jahre 2100 (e) ergäbe ein Verschwinden im Jahre 2380. Wir haben diese Kurve so ausführlich besprochen, weil in W2-0 dem Wachstum eben durch die Erschöpfung der Bodenschätze eine Grenze gesetzt wird. Auch ist die Annahme eines endlichen, nicht ersetzbaren Vorrates an Bodenschätzen, die einzige in W2, die die Endlichkeit der Erde direkt widerspiegelt. (Die endliche Landoberfläche wird zwar eingeführt, fällt aber bei den Rechnungen sofort wieder heraus.)

Die Weltbevölkerung erreicht um 2020 ein Maximum von rund  $5.3 \times 10^9$  Menschen und fällt dann ab. Um 2100 beträgt sie  $3.6 \times 10^9$ , etwa so viel wie heute. Zu diesem Zeitpunkt ist die Tendenz weiterhin fallend. ([2], p 70). Im Standardweltmodell W3-0 ist der Verlauf ähnlich, nur noch ausgeprägter. Die Bevölkerung, zum Beispiel, erreicht ein Maximum von  $11.6 \times 10^9$  im Jahre 2055. Schon 45 Jahre später ist sie auf  $6.3 \times 10^9$  gefallen - eine Abnahme von rund 120 Millionen pro Jahr ([14] p 23). Die Zahlen sollen hier nur zu einer besseren Erfassung des Kurvenverlaufs verhelfen und nicht zu einem Vergleich mit demographischen und anderen Voraussagen verleiten.

Der Mechanismus der diesen Zusammenbruch auslöst ist etwa der folgende. Die Kapitalinvestition wächst bis zu einer Höhe die enorme Bodenschätze beansprucht. Dadurch werden deren Vorräte immer mehr verbraucht. Und das löst die Krise aus. Denn für die Gewinnung des Restes wird immer mehr Kapital verwendet. Bald ist nicht genügend Kapital vorhanden und die Industrie bricht zusammen. Daher schrumpft die Landwirtschaft und kann die Bevölkerung nicht mehr ernähren.

Unter den Hilfsgrößen befinden sich zwei, für die zusätzlich Einheiten eingeführt werden müssen, nämlich:

$$(6) F(t) = F_1 \cdot \phi \cdot f_a(I_a[t]) \cdot f_p(p[t]) \cdot f_\ell(\ell[t]) = F_1 f(t)$$

die im Jahre  $t$  pro Kopf zur Verfügung stehenden Nahrungsmittel und

$$(7) Q(t) = Q_1 \cdot q_m(m[t]) \cdot q_p(p[t]) \cdot q_f(f[t]) \cdot q_\ell(\ell[t]),$$

die Lebensqualität im Jahre  $t$ . Die Einheit,  $[F]$ , für  $F$  sind die Nahrungsmittel die 1970 pro Person zur Verfügung standen; die Einheit  $[Q]$ , von  $Q$  ist die Lebensqualität im Jahre 1970. Sowohl  $F$  als auch  $Q$  könnten Zustandsgrößen eines Weltmodells sein. Im Modell

W2 sind sie das nicht: ihr Wert zur Zeit  $t$ , wird - ähnlich wie bei den Raten - durch den Wert der Zustandsgrößen zur selben Zeit bestimmt; das zeigen die beiden "Multiplikatorgleichungen" (6) und (7). Im Gegensatz hierzu werden Zustandsgrößen durch Bewegungsgleichungen gesteuert. Es ist ihr Wert zur Zeit  $t+1$ , der durch den Wert der Zustandsgrößen zur Zeit  $t$  bestimmt wird. Im übrigen hängt nichts in W2 von der Grösse  $Q$  ab (was man auch aus Abb. 4 entnehmen kann). Bloss das Verhältnis  $q_m/q_f$  geht (durch  $\mu$ ) in die Bewegungsgleichung (5) ein. Die Lebensqualität  $Q$  kann als globaler Indikator für das Wohlbefinden der Welt angesehen werden. Wir werden unten sehen wovon dieser Indikator im W2-0 im wesentlichen abhängt. In W3 ist er einfach weggelassen worden.

Die 22 Funktionen sind im Buche [2] graphisch dargestellt (siehe z.B. die Abb. 7 und 10); im Computer werden sie als Tabellen gespeichert und es wird linear zwischen den (5 bis 11) Werten der Tabelle interpoliert. Es ist dies eine bequeme Art Nichtlinearitäten in das Modell einzuführen. Es sei jedoch betont, dass die wesentlichen Nichtlinearitäten des Modells nicht daher rühren, dass die Funktionen nicht linear sind, sondern daher, dass die Argumente nicht linear in den Zustandsgrößen sind und dass in die Bewegungsgleichungen Produkte der Funktionen eingehen. Wir werden später von dieser Bemerkung in der Diskussion der fünf Funktionen  $\phi$ , die ja sämtliche Annahmen über das Modell enthalten und daher seine Struktur wiedergeben, Gebrauch machen. Schon jetzt lässt sich aus der obigen Beschreibung der Simulation entnehmen, von welchen Zustandsgrößen die Funktionen  $\phi$  jeweils abhängen. Das ergibt die folgenden Bewegungsgleichungen. Für  $X(t+\Delta t) - X(t)$  haben wir dabei  $\Delta X$  gesetzt:

$$(1') \quad \Delta P = \Delta t \cdot \phi_P (P, N, C, L, A)$$

$$(2') \quad \Delta N = \Delta t \cdot \phi_N (P, N, C, -, a)$$

$$(3') \quad \Delta C = \Delta t \cdot \phi_C (P, N, C, -, A)$$

$$(4') \quad \Delta L = \Delta t \cdot \phi_L (P, -, C, L, -)$$

$$(5') \quad \Delta A = \Delta t \cdot \phi_A (P, N, C, L, A)$$

Die Betrachtung dieser Gleichung legt es nahe

$$(8) \dot{X} = \phi_x, \quad [\dot{x} = \Delta x / \Delta t]$$

zu setzen. Die fünf Bewegungsgleichungen (1) bis (5) erscheinen dann als numerische Approximationen von fünf "wahren" Bewegungsgleichungen der Form (8). Und zwar ist die numerische Annäherung die hier auftritt, die Euler-Caychysche Polygonalapproximation, die gröbste unter vielen möglichen Annäherungen.

Es ergeben sich drei mathematische Fragestellungen die für das Verständnis des Modells W2, und aller anderen Modelle dieser Art, von grosser Bedeutung sein könnten: (i) wie gut ist die Annäherung der Differentialgleichungen durch die fünf Differenzgleichungen und wie liesse sich die Annäherung verbessern? (ii) wie lässt sich die Struktur der Annahmen die dem Modell zugrunde liegen am besten darstellen? (iii) wie lässt sich die Struktur der Lösungen mit den modernen Mittel der Theorie der Differentialgleichungen untersuchen?

Auf die erste Frage wollen wir hier nicht näher eingehen. Zur zweiten Frage sollen im nächsten Abschnitt einige vorbereitende Bemerkungen gemacht werden. Auf die dritte Frage werden wir weiter unten zurückkommen.

Vorher aber wollen wir noch kurz die Schlüsse besprechen zu denen Forrester gelangt.

Er zeigt, dass in W2-0 die Erschöpfung der Bodenschätze dem Wachstum die Grenze setzt. Wenn (W2-1) deren Verbrauch drastisch herabgesetzt wird, steigt die Verschmutzung katastrophal an (siehe Tab. 3 und Tab. 5). Wenn auch die Polutionserzeugung radikal gedrosselt wird (W2-2) wächst die Bevölkerung so sehr, dass das Wachs-

tum unterbunden wird. Schaltet man jetzt den stabilisierenden Einfluss einer grossen Bevölkerungsdichte auf die Bevölkerung aus (W2-3), so wird es noch schlimmer: die Bevölkerung wächst noch weiter und der Nahrungsmittelmangel setzt dem Wachstum ein Ende. In allen diesen Beispielen wird das Wachstum durch Überwiegen der wachstumshemmenden Einflüsse begrenzt. Andere "intuitive" doch falsche Massnahmen werden in den Modellen W2-4 bis W2-14 durchgespielt. Man kann aber auch durch selbstaufgelegte Beschränkung die wachstumfördernden Einflüsse desaktivieren. Solche Möglichkeiten untersucht Forrester in den Modellen W2-15 bis W2-18. In W2-18 erreicht die Welt einen stabilen Zustand, den Forrester als erträglich bezeichnet. Das wird durch fünf gleichzeitige Massnahmen erreicht. Der Verbrauch von Bodenschätzen wird (im Vergleich zu W2-0) ab 1970 auf 25% herabgesetzt, die Verschmutzungserzeugung beträgt nur noch die Hälfte und die Kapitalinvestition nur 60%. Die Nahrungsmittelerzeugung erreicht nur noch 80% und die Geburtsrate nur noch 60%.

Welche Bedeutung kann man diesen Resultaten beimessen, was kann man aus ihnen lernen? Stellt W2-18 überhaupt eine mögliche Funktionsweise unserer Welt dar? Wenn ja, wie kann man den Übergang von W2-0 zu W2-18 bewerkstelligen? Kann Systemdynamik etwas darüber aussagen?

#### 4. Die Struktur der Annahmen

Forrester stellt seine Modelle durch Diagramme dar, die einen Teil der Annahmen graphisch veranschaulichen. In Abb 4 ist das Diagramm des Modells W2 (nach [12], p 16-17) reproduziert. (Das entsprechende Modell in [2] oder [2a] enthält einen Fehler.) Die fünf Zustandsgrößen werden durch Rechtecke dargestellt. Betrachten wir beispielsweise den Verschmutzungssektor am rechten Rand. Die Verschmutzung ( $POL = L$ ) nimmt zu durch Erzeugung (Erzeugungsrate  $POLG = \pi$ ) und nimmt ab durch Absorption (Absorptionsrate  $POLA = \alpha$ ). Raten werden durch flaschenartige Konturen dargestellt, die Ventile symbolisieren. Ventile regeln materielle Flüsse, die aus Wölkchen kommen oder in solche verschwinden und durch ausgezogene Pfeile angezeigt werden. Soweit lässt sich aus dem Diagramm eindeutig eine Gleichung ablesen.

Das bisher gesagte entspricht dem Ansatz (3):

$$(9) \quad \Delta L = \pi - \alpha .$$

Nun gibt es im Diagramm noch zahlreiche, gestrichelte Pfeile die Informationsflüsse (Einflüsse, Abhängigkeiten) darstellen. So sehen wir z.B., dass die Verschmutzungserzeugungsrate  $\pi$  abhängt:

(i) von der Bevölkerung  $P$ , (ii) von einer Funktion  $POLCM = \pi_I (I)$ , die ihrerseits vom Kapital pro Kopf  $I$  abhängt und (iii) vom Koeffizienten  $\pi^*$ . Dieser Abhängigkeit entspricht die Gleichung

$$(10) \quad \pi = \pi^* \cdot \pi_I \cdot P .$$

Die Absorptionsrate  $\alpha$  hängt ab: (i) von der Verschmutzung selbst und (ii) von einer Funktion  $POLAT = \pi_\ell (\ell)$  die von der reduzierten Verschmutzung  $\ell$  abhängt. Diese Abhängigkeit wird aber in W2 nicht



in Analogie zu (10) durch  $\alpha = \alpha_{\ell}(\ell) L$  dargestellt. Die richtige Beziehung ist vielmehr

$$(ii) \quad \alpha = \frac{1}{\alpha_{\ell}(\ell)} L .$$

Die genauen Abhängigkeiten lassen sich im allgemeinen also nicht aus dem Diagramm entnehmen, die Gleichungen des Modells enthalten mehr Information als das Diagramm.

Im Vergleich zu W2 erscheint das Modell W3 viel komplizierter. Es beruht zwar auf den gleichen fünf Zustandsgrössen, enthält aber in der Version, die dem abgebildeten Diagramm - Abb. 5 (aus [1a]) - entspricht 99 Grössen. In anderen Darstellungen, die ich gesehen habe, kommen 121 Grössen vor. Ein weiterer Unterschied ist, dass in W2 numerische Daten und Abhängigkeit auf Grund von Plausibilitätsbetrachtungen abgeschätzt werden, in W3 aber grösstenteils auf empirische Daten beruhen. Bemerkenswert ist, dass die Lösungen die die beiden Modelle liefern, im wesentlichen dieselben sind. Es scheint, dass trotz verschiedener Oberflächenstruktur, wie sie in den Diagrammen zum Ausdruck kommt, beiden Modellen eine ähnliche Tiefenstruktur zugrundeliegt. Mit anderen Worten: obwohl der Aufbau der Modelle aus den einzelnen Annahmen (Elementarannahmen) verschieden ist, scheint es, dass die globale Struktur ganz ähnlich ist. Methoden zu finden, die es gestatten, die Globalstruktur aufzuspüren und darzustellen, die sich hinter zahlreichen komplex zusammenhängenden Einzelannahme verbirgt, ist eine der wichtigen Aufgaben der Systemtheorie. Unter diesem Gesichtspunkt sollen hier einige der Differentialgleichungen von W2-0 besprochen werden.

Betrachten wir jetzt den Sektor der Bodenschätze (Abb.6). Er wird bei Forrester durch die folgenden Gleichungen beschrieben . Die Nummerierung ist dieselbe wie in [2] und verweist auch auf die Diagramme Abb. 4 und Abb. 6.

```
4   MSL.K = ECIR.K/(ECIRN)
4.1 ECIRN = 1
5   ECIR.K= (CIR.K)(1-CIAF.K)(NREM.K)/(1-CIAFN)
6   NREM.K= TABLE (NREMT,NRFR.K,0,1,.25)
6.1 NREMT = 0/.15/.5/.85/1
7   NRFR.K= NR.K/NRI
8   NR.K = NR.J + (DT)(-NRUR.JK)
8.1 NR = NRI
8.2 NRI = 900E9
9   NRUR KL = (P.K) (CLIP (NRUN, NRUNI, SNT 2, TIME.K)) (NRMM.K)
9.1 NRUN = 1
9.2 NRUN1 = 1
9.3 SWT2 = 1970
23  CIR.K = C1.K/P.K
42  NRMM.K = TABHL (NRMMT, MSL.K,0,10,1)
42.1 NRMMT = 0/1/1.8/2.4/2.9/3.3/3.6/3.8/3.9/3.95/4
```

Diese Gleichungen sind in der Dynamoprogrammiersprache geschrieben; jede entspricht einer Elementarannahme. "Der menschliche Geist ist vorzüglich in Erfassen der elementaren Kräfte und Wirkungen, die ein System ausmachen. ... Wenn aber einmal die Teilstücke des Systems zusammengetragen sind, ist der Geist fast nutzlos um das implizierte dynamische Verhalten des Systems vorauszusehen. Hier ist der Computer unübertreffbar ([2], p 15)." Deswegen verzichtet Forrester, voreilig wie wir glauben, auf jede weitere Untersuchung seiner Annahmen, wir jedoch wollen versuchen, wenn auch nur ganz primitiv, die sechzehn Gleichungen im Sektor der Bodenschätze etwas synthetischer darzustellen.

Zunächst passen wir die Gleichungen der gewöhnlichen mathematischen Schreibweise an:

$$4 \quad m(t) = \frac{M(t)}{M_1}$$

$$4.1 \quad m_1 = 1$$

$$5 \quad M(t) = I(t) \frac{1-A(t)}{1-A_1} n(t)$$

$$7 \quad n(t) = \frac{N(t)}{N_1}$$

$$8 \quad \Delta N(t) = -v(t)$$

$$8.1-2 \quad N_1 = 9 \times 10^{11}$$

$$9 \quad v(t) = v^* \cdot v_m(t) \cdot P(t)$$

$$9.1-2-3 \quad v^* = 1$$

$$23 \quad I(t) = \frac{C(t)}{P(t)}$$

Die Nummern 6 und 24 beziehen sich auf Tabellen. Die entsprechenden graphischen Darstellungen sind in Abb. 7 zu sehen. Wir wollen  $\eta(t)$  durch  $n(t)$  approximieren. Im W2-0 liegt  $m$  zwischen den Werten 0.3 (1900) und 1.1 (1990) (Tabelle 4). Daher können wir  $v_m(t)$  gleich  $m(t)$  setzen. Wenn dies geschieht, können die sechzehn Gleichungen des N-Sektors durch die eine Gleichung

$$(12) \quad \Delta N = - \frac{1}{1-A_1} \frac{1}{N_1} C (1-A) N$$

ersetzt werden. In den reduzierten Variablen schreibt sich das

$$(12') \quad \Delta n = - \frac{P_1}{N_1} \frac{1}{1-A_1} c(1-0.3a)n,$$

wobei der numerische Wert des Koeffizienten vor der immer wieder auftretenden Kombination  $c(1-0.3a)n$  ungefähr  $5.7 \times 10^{-3}$  beträgt. Zu beachten ist, dass, trotz drastischer Linearisierung der Funktion

$\eta$  und  $v_m$ , die Bewegungsgleichung nicht linear in den Zustandsgrössen ist.

Man sieht hier schon im Ansatz die unheilvolle Wirkung der Kapitalinvestition: je mehr Geld,  $C(1-A)$ , in die Industrie (d.h. nicht in die Landwirtschaft) gesteckt wird, desto schneller werden die Bodenschätze verbraucht. Ausserdem zeigt Gleichung (12), dass Naturschätze nur abnehmen und nie zunehmen können. Dieser Ansatz wird jedem vernünftig erscheinen, der  $N$  als eine physikalisch gegebene Grösse betrachtet (Massenhaltungsgesetz, Lavoision 1785). Bodenschätze müssen aber hier als technisch-ökonomischer Begriff angesehen werden und es kann daher nicht ein für allemal gesagt werden, was ein Naturschatz ist. Im Jahre 1900 war es Uranium nicht, im Jahre 1800 war es Erdöl nicht. Auch hängt die Quantität der Naturschätze davon ab, welcher Teil der erkannten Naturschätze zu einem gegebenen Zeitpunkt auch technisch und ökonomisch zugänglich ist. Dazu kommt noch, dass auch Abfälle wieder verwendet werden können. Der Satz, dass die Abfälle des Einen, die Bodenschätze des Anderen sind, liesse sich schon heute durch zahlreiche Beispiele belegen. Aus all diesen Gründen erscheint ein Ansatz der auch eine Erzeugung von Naturschätzen einschliesst durchaus gerechtfertigt.

Um zu sehen wie, im Prinzip, so eine Annahme angesetzt werden kann, wollen wir von der Feststellung ausgehen, dass es in  $W_2$  nur zwei Verwendungen von Kapital gibt: in die Landwirtschaft geht  $CA$ , der Rest  $C(1-A)$  wird zur Vergrösserung der industriellen Produktion verwendet. Das dies eine Annahme von  $W_2$  ist, zeigt auch die Gleichung (12). Man könnte aber statt dessen mindestens drei Verwendungsarten einführen

$$C = AC + SC + (1-A-S) C$$

wobei SC den Bruchteil des in Technologie investierten Kapitals bedeutet, der nicht unmittelbar zur Erhöhung der Produktion dient. Die Bewegungsgleichung für N wäre dann (statt  $\Delta N = -v$ ) etwa

$$(13) \quad \Delta N = \rho - v$$

wobei man  $\rho = \rho^* \rho_S(S)$  ansetzen könnte, mit einer nicht abnehmenden Funktion  $\rho_S$ .

Nun lässt sich das Modell weniger primitiv als oben, aber doch recht einfach und auch auf verschiedene Arten, in diesem Sinne abändern. Oerleman, Tellings und de Vries [15], unter anderen, haben das getan, (siehe auch [16]). Sie haben zwar den Anfangswert von N im Jahre 1900 drastisch auf ein Zwanzigstel des in W2 angenommenen Betrages herabgesetzt, gestatten jedoch eine Erzeugung von Rohstoffen. Die Rohstoffkrise von W2-0 ist jetzt vermeidbar (Abb. 8a).

Kapital stiftet auch in anderen Sektoren von W2 Unheil an. Betrachten wir wieder den Verschmutzungssektor (Abb. 9). Die fünfzehn Gleichungen dieses Sektors lassen sich in einer Bewegungsgleichung zusammenfassen:

$$(14) \quad \Delta L = \pi_I(I) P - \frac{L}{\alpha_\ell(\ell)},$$

wobei  $I = C/P$  und  $\ell = L/L$  ist und die Funktionen  $\pi_I$  und  $\alpha_\ell$  in Abb. 9 wiedergegeben sind. In W2-0 variiert I zwischen 0.25 und 1.55 und  $\ell$  zwischen 0.4 und 5.5 (Tab. 4). Daher lassen sich, in diesen Falle,  $\pi_I$  durch I und  $\alpha_\ell$  durch  $\ell/3$  annähern. Alles in allem resultiert daher in W2-0 folgende Bewegungsgleichung für die Verschmutzung:

$$(15) \quad \Delta L = C - 3L_1,$$

in reduzierten Variablen

$$(15') \quad \Delta \ell = c - 3.$$

Diese Gleichung resumiert sämtliche Annahmen über den Verschmutzungssektor. Alle Elementarannahmen zusammen ergeben also im wesentlichen die Annahme, dass vermehrte Kapitalinvestitionen zu beschleunigter Verschmutzungszunahme führt. Die Simulation kann nicht umhin, diese Annahme als Resultat wiederzugeben, wie ein Blick auf Abb.1 bestätigt. Im Modell W2-4 (Tab.3) hat Forrester die Folgen erhöhter Kapitalinvestition untersucht, indem er im Jahre 1970 den Standardwert  $\gamma^*$  (CIGN) des Koeffizienten der Kapitalerzeugungsrate um 20% erhöht hat. Von da an ist also die Kapitalinvestition immer um 20% grösser als im W2-0. Die Folge ist wie nicht anders zu erwarten, eine katastrophale Erhöhung der Verschmutzung (Abb. 11, nach [2], p 96). In der Tat lässt sich die Bewegungsgleichung der Verschmutzung ganz ähnlich wie in W2-0, durch

$$(16) \quad \Delta L = \frac{8}{5}C - 3L,$$

annähern. Forrester sagt: "Dieses Resultat ist wichtig, nicht nur wegen der Aussage, die es enthält, sondern weil es zeigt, wie eine scheinbar wünschenswerte Änderung in einem sozialen System unerwartet, ja katastrophale Folgen haben kann" ([12], p 21). Abb. 11 "sollte uns vorsichtig machen gegen überstürzte Programme, die aus -- nur das Nächste berücksichtigenden -- humanitären Impulsen entstanden sind. Intuition, Einsicht, Erörterung sind keine zuverlässigen Führer in der Beurteilung der Konsequenzen eines Eingriffes in ein komplexes System" ([2], p 97). Ganz allgemein betont Forrester immer wieder das konterintuitive Verhalten sozialer Systeme ([12], p 3). "Die dynamischen Charakteristiken komplexer sozialer Systeme führen den Menschen oft irre" ([2], p 93). "Intuitive selbstverständliche Lösungen sozialer Probleme geraten leicht in eine der Fallen die der Charakter eines komplexen Systems stellt" ([2], p 94).

Bleiben wir nüchtern. Was ist hier eigentlich konterintuitiv? Doch wohl der Ansatz, wenn man ihn auf seine wesentliche Form (15) gebracht hat. Wenn man von Bekämpfung der Pollution spricht, hört man gewöhnlich, dies oder jenes liesse sich wohl im Prinzip tun, es wäre aber zu teuer. In W2 aber wird es desto schlimmer, je mehr man tut. (Dies war schon in Urban Dynamics [4] der Fall.) Doch "wenn hohe Kapitalinvestitionen dazu führen, dass mehr Kapital zur Kontrolle der Verschmutzung verwertet wird, könnte es sein, dass vermehrte Kapitalinvestition nicht zu steigender Verschmutzung führt," sagt Forrester selbst ([2], p 56).

Forresters Modell kann wieder leicht abgeändert werden um dieser Kritik zu begnen. Das allereinfachste wäre, statt (14) etwa

$$(17) \quad \Delta L = \pi_1 ((1-A-S) C) \cdot \pi_2 (SC) - \frac{L}{\alpha_k(l)}$$

anzusetzen. Wie vorhin ist SC der Bruchteil des in Technologie investierten Kapitals, der nicht unmittelbar zur Erhöhung der Produktion dient. Die Funktion  $\pi_1$  mag, wie  $\pi_I$ , eine monoton steigende Funktion ihres Argumentes sein,  $\pi_2$  jedoch nimmt monoton ab (eventuell mit einer Sättigung). Oerlemen et al. [15] haben in ihrem oben erwähnten Modell, wie Forrester, die Kapitalinvestition ab 1970 um 20% erhöht. Es kommt nicht zur Pollutionskatastrophe, (Abb. 8b).

Auch die übrigen drei Sektoren von W2, lassen sich ähnlich behandeln. Der Einfachheit halber beschränken wir uns auf W2-0. Es ergeben sich dann folgende Gleichungen:

$$(1-o) \quad 10^2 \Delta p = -5.1 \ c(1-0.3a)n + 0.32p^2 + 0.10lp$$

$$(2-o) \quad 10^3 \Delta n = -5.7 \ c(1-0.3a)n$$

$$(3-o) \quad 10^2 \Delta c = 7.1 \ c(1-0.3a)n - 2.5 \ c$$

$$(4-o) \quad \Delta l = c - 3$$

$$(5-o) \quad 10^2 \Delta a = 4 + 3.7 \frac{1}{p} \ c \ (1-0.3a)n - 7.3a$$

In der Gleichung für p und c wurde hiebei das Nahrungsmittelverhältnis f gleich t gesetzt

$$(6-o) \quad f = 1$$

Ein Einblick auf Abb. 2 oder Tab. 4 zeigt, dass f sich in W2-0 im Laufe der Jahre wenig ändert; es variiert nur zwischen 0.97 und 1,07. Unter diesen Annahmen findet man für den Indikator Lebensqualität folgenden Ausdruck

$$(7-o) \quad Q = 1.4 \ (1.6 - 0.6p) \ (1.1 - 0.02l)$$

Über den Bevölkerungssektor von W2 wollen wir nur eine Bemerkung machen. Auch hier gilt die Regel, je besser desto schlechter. Forrester nimmt explizit an, dass die Bevölkerung immer dem bei gegebenen Nahrungsmitteln erreichbaren Maximum zustrebt ([2], Legende zu Figur 2-6). "Malthus These war zu allen Zeiten richtig und wirksam. Je grösser die, durch erhöhte Nahrungsmittelproduktion hervorgerufene, Bevölkerung ist, desto grösser ist die Zahl der Menschen, die in Gefahr steht zu verhungern, ([2], p 27-28)." In dem Computer wird also gesteckt, dass eine Bevölkerungsbeschränkung nur durch Hunger erreicht werden kann. Deswegen findet man auch in W2-0, dass trotz der zahlreichen vorausgesagten Katastrophen die Bevölkerung im Durchschnitt genausoviel zu Essen haben wird wie heute.



In allen diesen Annahmen wirkt sich die Maxime aus, nur Not bringe den Menschen zum Verstand.

Wir können jetzt den Verlauf der Zustandsgrößen in den verschiedenen Varianten des Modells W2 besser verstehen. In der ein annehmbares globales Gleichgewicht darstellenden Variante W2-18 erstaunen uns die beiden für Forrester wesentlichen Forderungen: Um besser zu leben und besser zu essen muss man die Industrialisierung um 40% herabsetzen und die Nahrungsmittelerzeugung um 20%. Wir haben aber gesehen, dass in das Modell W2 die Annahmen hineingesteckt werden, vermehrte Kapitalinvestition könne nur zu vermehrter Pollution und beschleunigter Abnahme der Bodenschätze führen, und vermehrte Nahrungsmittelerzeugung ziehe - wie schon bei Malthus - unweigerlich eine grössere Bevölkerung und niemals eine bessere Ernährung nach sich. Das sind Annahmen. Sie mögen richtig oder falsch sein, das Modell W2 kann diese Frage nicht klären. Verschiedene Forscher haben, wie wir schon angedeutet haben, andere Annahmen gemacht, z.B. dass durch Einsatz von Kapital in Technologie die Bodenschätze viel langsamer abnehmen, ja vorübergehend sogar zunehmen können, dass die Bevölkerungszahl auch durch soziale Einflüsse bestimmt wird. Das sind wieder Annahmen. Und sie sind gar nicht willkürlich; man kann sie historisch belegen. Man kann auch das Forrester-Modell in diesem Sinne modifizieren. Eine erträgliche, stabile Lösung wird dann ohne die von Forrester geforderten drastischen, teilweise paradoxen Massnahmen erreicht.

Es soll hier beileibe nicht gesagt werden, dass diese modifizierten Modelle richtig sind und W2 oder W3 falsch. Beide beruhen auf Annahmen, die sich in Gleichungen und Zahlen ausdrücken lassen. Die Folgen dieser Annahmen lassen sich durch Forresters Systemdynamik oder anderswie herausarbeiten. Und wie gut die Annahmen sind, lässt sich weder aus Forresters noch aus Meadows Arbeiten entnehmen. Die Übersetzung in Dynamoprogrammierungssprache kann uns da nicht helfen.

## 5. Der Eisberg

Darüber was mit den Modellen W2 und W3 beabsichtigt wurde und auch darüber was tatsächlich erreicht wurde, gibt es bei den Initianten, den Autoren und bei ihren Anhängern ein ganzes Spektrum von Äusserungen, von den bescheidensten zu den anspruchsvollsten. Der, unserer Meinung nach, legetime Stolz über die Leistungsfähigkeit der Modelle, schlägt oft um in eine Überschätzung der Tragfähigkeit der Schlüsse. Hier soll Forrester gegen sich selbst und seine Anhänger verteidigt werden. Die Überschätzung wird gefördert durch eine naive Auffassung des Modellbegriffes und vor allem der Beziehungen zwischen "Gedankenmodell" und "Computermodell". Wir wollen uns daher zunächst darauf besinnen, was ein Modell eigentlich ist.

In einem Modell stellen Agenten A eine bestimmte Erfahrung oder Situation S dar, zum Zwecke einer auf S gerichteten Aktion durch Agenten B. In der Darstellung soll und kann die Ausgangserfahrung nicht genau, Element für Element, reproduziert werden, denn dann wäre das Modell überflüssig. Beim Übergang vom Dargestellten zur Darstellung müssen wir (i) weglassen und (ii) auf Unterscheidungen verzichten. Mathematisch entsprechen dem die Operationen "Unter" und "Quotient" (z.B. Untermenge und Quotientmenge). Erkennen bedeutet immer auswählen und gleichsetzen. Diese beiden Tätigkeiten sind wesentliche Bestandteile dessen was man gewöhnlich Abstraktion nennt. In dieser Hinsicht ist ein Modell eine abstrakte Erfahrung. Nach welchen Kriterien aber vollziehen wir Auswahl und Gleichsetzung. Das geschieht doch wohl im Hinblick auf eine antizipierte Aktion. Sie bestimmt das spezifische Interesse, das wir der Ausgangserfahrung entgegenbringen und von diesem hängt der Abstraktionsvorgang ab, der zur Konstitution der Darstellung führt. Und wie man, in der modernen Physik, dazu gekommen ist, den Begriff von komplementären Grössen einzuführen (man kann sie nicht gleichzeitig mit beliebiger Genauigkeit messen) so müssen wir die Existenz von komplementären Interessen

anerkennen, die man nicht gleichzeitig vollständig befriedigen kann. Man wird, wenn es darauf ankommt, zu komplementären Modellen greifen müssen, unter Verzicht auf die Hoffnung ein Supermodell zu bauen, das alle komplementären Modelle mit ihren spezifischen Einzelheiten in sich einschliesst. Auch aus diesem Grunde gibt es "das Weltmodell" nicht. Doch gibt es auch noch weitere Gründe, auf die wir hier nicht eingehen können.

Bei der Beurteilung eines Modells handelt es sich also einerseits darum festzustellen, ob die gewählte Darstellung einer Erfahrung dem deklarierten oder impliziten Interesse angemessen ist. Andererseits muss man auch die Angemessenheit des Interesses anhand der durch Modelle aufgedeckten Mittel zu seiner Erfüllung überprüfen. Wie sagt soch das Sprichwort so schön: "Die Mittel entheiligen den Zweck."

Auch die Frage wer das Modell macht und wer es gebrauchen soll ist wichtig und zwar in erster Linie aus praktischen und nicht ideologischen Gründen; sie soll jedoch hier ausgeklammert werden.

Gehen wir nun mit diesen Grundvorstellungen an das Weltmodell W2 heran. Die Ausgangserfahrung ist das Weltsystem. "Unter Weltsystem verstehen wir den Menschen, sein Gesellschaftssystem, seine Technologie und die natürliche Umwelt" ([2], p 1). Für dieses Weltsystem soll ein Modell konstruiert werden. "Nur die allgemeinden Züge des Weltsystems werden hier diskutiert ([2], p ix)." Welches spezifische Interesse leitet die Auswahl der in das Modell eingehenden Züge? Die oben angeführten Elemente des Weltsystems stehen in Wechselwirkung. "Die Wechselwirkung dieser Elemente erzeugt Wachstum, Änderung und Spannung. Die Spannung im Weltsystem tritt als Bevölkerungsüberschuss, übermässige Verschmutzung und Ungleichheit der Lebensstandards in Erscheinung ([2], 1). "Der Zweck des Projektes ist zu verstehen

welche Massnahmen der Menschheit zur Verfügung stehen uns den Übergang vom Wachstum zum Gleichgewicht so gut wie möglich zu bewerkstelligen ([2], viii)." Das ist zwar Forresters Formulierung des Club of Rome Projektes "Die missliche Lage der Menschheit", aber das Modell W2 wurde ja gebaut um zu zeigen, dass Systemdynamik die geeignete Methode ist, um die obigen Zwecke zu erfüllen. Und zwar so: "Dieses Buch führt ein dynamisches Modell von Weltausmass vor, das Bevölkerung, Kapitalinvestition, geographischen Raum, natürliche Ressourcen, Verschmutzung und Nahrungsmittelerzeugung miteinander in Beziehung setzt. Von diesen Hauptsektoren scheint die Dynamik der Änderung im Weltsystem zu stammen ([2], 1-2)."

Die Abstraktion führt zur Darstellung des Weltsystems durch fünf Zustandsgrössen (P, N, C, L, A) und durch eine Reihe von Annahmen über die Beziehungen zwischen ihnen. (Diese Annahmen enthalten ausser den fünf Zustandsgrössen nur noch Koeffizienten.) Der Computer gestaltet, nach Vorgabe von Anfangswerten für die Zustandsgrössen, deren zeitlichen Verlauf zu berechnen (zu simulieren). Das Modell W2 des Weltsystems besteht nun aber nicht nur aus den dreundvierzig Gleichungen, die man in [2] findet (oder deren Zusammenfassung in fünf Bewegungsgleichungen); die Annahmen, die die in den Gleichungen vorkommenden Grössen in Beziehung zur Ausgangserfahrung "Weltsystem" bringen sind ein wesentlicher Bestandteil des Modells. Nicht nur das Resultat der Abstraktion, sondern auch der Prozess der Abstraktion machen das Modell aus. Die mathematischen Formeln sind nur der sichtbare Teil des Eisberges.

Wenn die Ausgangserfahrung keine mathematische ist, dann beginnt der Abstraktionsprozess unvermeidlich im Gedanklichen, Verbalen. Ein mathematisches Modell setzt dann immer ein Gedankenmodell voraus es bezieht sich nicht unmittelbar auf eine Erfahrung, sondern auf dieses Gedankenmodell. Ein karges, unzweckmässiges, verbales Modell kann zwar zu unzweideutigen, nachprüfbaren, mathematischen Formeln führen,

aber die Unzweideutigkeit der Formeln verbürgt keineswegs die Angemessenheit oder gar Richtigkeit des Modells. Umgekehrt kann das beste verbale Modell durch eine inadäquate Mathematisierung ruiniert werden. (Sieh zu diesem Abschnitt auch [17]).

"Das Modell ist nur so gut wie die Theorie die dahinter liegt. Ein gutes Computermodell unterscheidet sich von einem schlechten dadurch, dass es mehr vom wesentlichen eines sozialen Systems erfasst, das es beansprucht wiederzugeben. Wenn wir ein Computermodell machen, sind wir gezwungen ausdrücklich die Annahmen anzugeben, auf denen unser Gedankenmodell beruht ([2], 15)." Die ungefähre Übereinstimmung mit dem oben gesagten ist nur oberflächlich. Bei Forrester beschränkt sich die ausdrückliche Angabe der Annahmen auf das was in den Formeln enthalten ist. Die wesentlichen Annahmen aber stecken in der Reduktion des Weltsystems auf fünf Zustandsgrößen. Aber: "Sind wachsende Bevölkerung, steigende Verschmutzung und wirtschaftliche Ungleichheiten Ursachen oder Symptome (|1|, 1)?" Ein Teil der Kritik an den Modellen W2 und W3 betrifft gerade diese Reduktion. Wir wollen hier nicht entscheiden, ob sie gerechtfertigt ist, oder nicht, sondern nur feststellen, dass die Annahmen, die zu dieser Abstraktion führen, weder in [2] noch [3] explizit angegeben und noch weniger erörtert werden. Es wird nur festgestellt: "Viele wichtige Größen sind weggelassen. Die Aggregation geht soweit, dass der Unterschied zwischen entwickelten und unterentwickelten Ländern nicht explizit auftritt. Die meisten Begriffe im Weltmodell widerspiegeln die Haltungen und Motivationen der jüngsten Vergangenheit und der Gegenwart. Deswegen wurden die möglichen Änderungen in den Aspirationen und Werten der Menschen, die aus der Erkenntnis der die Menschheit bedrohenden misslichen Lage erwachsen könnten, in dieses Buch nicht aufgenommen ([2], ix)."

Gehen wir jetzt davon aus, dass W2 nichts anderes soll als "Bevölkerung  $P$ , Kapitalinvestition  $C$ , natürliche Ressourcen  $N$ , Verschmutzung  $L$  und Nahrungsmittel [beziehungsweise Kapitalin-

vestition in die Landwirtschaft, A] in Beziehung setzen ([27], 1)." Kann man dann noch sagen: "... ich habe grösseres Vertrauen in dieses Modell des Weltsystems als in andere, die mir jetzt zur Verfügung stehen. Deswegen ist dieses das Modell, das ich benützen würde, um Massnahmen zu empfehlen ([1], ix)." "Viele greifen das Modell heftig an, weil es sich anmasst, eine Grundlage für eine veränderte Verfahrensweise zu bieten. ... Das ist wahr; das MIT Modell [W3] kann in seinem gegenwärtigen vorläufigen Zustand keine sichere Grundlage für eine Änderung der Politik bieten ([18], 5)."

Verzichten wir also darauf, Massnahmen zu empfehlen und beschränken uns auf die Betrachtung "der Wirkung und der Wechselwirkungen einiger wichtigerer und quantifizierbarer Grössen des Weltsystems ([18], 5)", nämlich auf die Zustansgrössen P, N, C, L und A. Da ist zunächst zu bemerken, dass nicht recht klar ist, wie man die Grössen N und vor allem L praktisch messen und quantifizieren soll. Dann soll noch unterstrichen werden, dass hier nicht nur angenommen wird die fünf gewählten Grössen seien die wichtigeren quantifizierbaren Grössen, sondern auch, dass sie von nichts anderem als von Kombinationen ihrer selbst abhängen können, mathematisch also letzten Endes durch fünf autonome Differenzgleichungen beschrieben werden. Das System, das durch die fünf Grössen beschrieben wird, wird als geschlossenes System betrachtet. "Wir interessieren uns für Systeme als Ursachen dynamischen Verhaltens. In den Brennpunkt werden die Wechselwirkungen innerhalb des Systems gerückt. ... Jedes bestimmte Verhalten muss durch eine Kombination wechselwirkender Komponenten hervorgerufen werden..Diese Komponenten liegen innerhalb einer Grenze, die das System definiert und einschliesst ([15], 4-1)."

Akzeptieren wir all dies. Jetzt erst ist der Weg frei für die Diskussion dessen was Forrester das Modell W2 nennt, nämlich der dreiundvierzig präzis hingeschriebenen Gleichungen. Vieles jedoch

muss vorausgesetzt und postuliert werden bevor man zu den Gleichungen gelangt. Und davon ist das wenigste präzise niedergeschrieben. Wie weit kann man sich auf die Gleichungen verlassen? Was erwartet man jetzt noch von ihnen?

## 6. Was leistet W2

Welche Minimalposition kann man in Bezug auf W2 einnehmen? Man kann sagen, es handle sich darum, unter Annahme des Anhaltens der heute vorherrschenden Wirkungszusammenhänge, die allgemeinen Verhaltensarten des Systems aufzuzeigen. Es handelt sich also nicht um "genaue Voraussagen der Werte, die die Variablen in irgendeinem besonderen Jahr der Zukunft annehmen ([1], 93)". "Die MIT-Untersuchung sollte sich nicht auf Voraussagen einlassen, nicht selbst ein Stück Futurologie sein und auch kein Versuch, wahrscheinliche Szenarios für die Welt oder irgendeinen ihrer Teile zu irgendeiner Zeit in der Zukunft zu schildern ([3], 17)." "Wir sind hier an allgemeinen Verhaltensweisen interessiert. Die graphischen outputs sind nur Hinweise auf die Verhaltenstendenzen des Systems ([1], 93)." "Der verfolgte Zweck war im wesentlichen, auf umfassende und begreifliche Art zu zeigen, was für Zukünfte aus dem Heute entspringen könnten, im Einklang mit den gegenwärtigen Verhaltensweisen, den zugehörigen Zeitkonstanten, der Auffassung der Probleme und den 'klassischen' Heilmitteln ([3], 17)." "Sowohl das Arbeitsteam als auch der Club haben deutlich gesagt, dass ... [die Studie] ... als Analyse und Projektion der gegenwärtigen Tendenzen und ihrer Wechselwirkungen betrachtet werden soll, um die Konsequenzen einer Fortsetzung der gegenwärtigen Einstellungen und Massnahmen anzuzeigen ([18], 5)." "In anderen Worten, wenn eine Reihe von heutigen Entwicklungen unverändert in der Zukunft fort dauern und wenn wir annehmen, dass die Beziehungen zwischen ihnen die [im Modell] gegeben sind, dann wird die Zukunft so oder so aussehen ([19], 8)." "Die Studie ... will durch ihre Berechnungen nur sichtbar machen, was eintreten könnte, wenn man die herrschenden Wachstumstrends in die Zukunft hinein extrapoliert ... " ([20], 212). Die angeführten Äußerungen beziehen sich zwar alle auf W3, sie sind aber sicherlich, a fortiori, für W2 gültig.



Der Wortgebrauch auf diesem Gebiet wechselt von Land zu Land und von Zunft zu Zunft. Im allgemeinen jedoch versteht man unter Voraussage eine Aussage der Form "Wenn die Annahme A zutrifft, wird die Folge F eintreten". Der Übergang von A zu F wird durch Gesetze oder Gesetzmässigkeiten vermittelt.

Demnach liefern die Modelle W2 und W3 Voraussagen. Es sind keine Voraussagen, des genauen zeitlichen Verlaufs der fünf Zustandsgrössen und es sind, natürlich, Voraussagen, die von gewissen Annahmen abhängen, aber es sind Voraussagen! Nach der Art der Annahmen kann man allerdings verschiedene Arten von Voraussagen unterscheiden. Wenn man zum Beispiel der Meinung ist, dass die Annahmen mit grösster Wahrscheinlichkeit oder sicherlich zutreffen, spricht man von Prognosen oder Prophezeiung oder Szenario. Man lässt dann oft die Annahmen weg. Die Modelle W2 und W3 führen sicherlich nicht zu Voraussagen dieser Art. Wenn die Annahmen in die Form "wenn alles so weitergeht" gebracht werden können, kann man von Projektion oder Extrapolation sprechen. Offenbar gehören die Voraussagen von W2 und W3 in diese Kategorie.

Das heikle bei Projektionen ist genauer zu bestimmen was das Wort 'so' in 'alles so weitergeht' bedeutet. Mit anderen Worten, es kommt bei einer Projektion darauf an, eine geeignete Projektionsbasis zu finden. Man kann auf verschiedene Arten vorgehen um "gegenwärtigen Tendenzen und Wechselwirkungen" herauszubringen. Erinnern wir uns wie das in W2 gemacht wird. Es werden dreiundvierzig Elementarannahmen über die Wechselwirkungen zwischen den fünf Zustandsgrössen gemacht. Das gestattet es, durch schrittweises Rechnen den zeitlichen Verlauf dieser Grössen zu bestimmen. Die in die Elementarannahmen eingebauten Koeffizienten werden so gewählt, dass ausgehend vom Wert der fünf Grössen für das Jahr 1900, ihr tatsächlicher Wert im Jahre 1970 erreicht wird. Das ist das Standardmodell W2-0. Es soll die "gegenwärtigen Tendenzen und Wechselwirkungen" darstellen.

Ein Blick auf Tabelle 1 zeigt, dass es sich aber nur bei einer Grösse, nämlich der Bevölkerung  $P$ , um eine Anpassung an empirische Daten handelt. Aber selbst fünf Kurven, die durch je zwei empirische Punkte (1900 und 1970) gehen, ja sogar solche, die den ganzen Verlauf zwischen diesen zwei Jahren gut wiedergeben, können nicht verbürgen, dass die gegenwärtigen Tendenzen und Wechselwirkungen richtig erfasst worden sind. Diese Kurven könnten durch Wechselwirkungen erzeugt werden, die wenig mit den tatsächlich vorhandenen gemeinsam haben. Es wäre schon besser, wenn man auch wüsste, wie gut der Verlauf anderer messbarer Modellgrössen wiedergegeben wird. Es scheint aber, dass dies sogar im Bevölkerungssektor nicht der Fall ist. Die Todesrate ändert sich zu Anfang des Jahrhunderts nicht im Einklang mit den bekannten Tatsachen ([12], 18). Es ist auch nicht angegeben ob und wie die Güte der Übereinstimmung gemessen wurde.

Dazu kommt noch folgendes: Änderungen im Verhalten der Welt (Änderungen der Politik) können in  $W2$  nur durch exogenes Ändern von Konstanten erreicht werden. Solche Änderungen können also nicht auf Wechselwirkungen zwischen den Teilen des Systems zurückgeführt werden, können also nicht durch  $W2$  dargestellt werden. Wohl kann  $W2$  (in den Varianten  $W2-0$  bis  $W2-18$ , etc.) je eine unter verschiedenen, wenn auch nicht grundverschiedenen Verhaltensweisen der Welt wiedergeben, nicht aber den Wechsel zwischen solchen Verhaltensweisen.

Wenn also der Zweck der Weltmodelle  $W2$  und  $W3$  war, die Entwicklung 1900-1970 in die Zukunft zu projizieren, so wird angenommen und in die Zukunft projiziert, dass die Bewegungsgleichungen der Welt sich in diesem Zeitraum nicht geändert haben. Und doch gab es beispielsweise die Oktoberrevolution, die Keynes'sche Wende, die beginnende Emanzipation der dritten Welt. Der Einwand, dass all diese Änderungen nicht wesentlich und daher vernachlässigbar seien, weil sie sich durch keine nennenswerten Änderungen im Verlauf der Kurven der Zustandsgrössen bemerkbar machen ist erstens nicht einmal belegt und wäre

zweitens, wenn belegt, gar nicht stichhaltig. Denn es wäre damit vielleicht nur gezeigt, dass die gewählten Zustandsgrößen nicht hinreichen um eine vernünftige Extrapolation zu gewährleisten.

Wir müssen daher schliessen, dass gar nicht fest steht, ob das Modell W2-0 den heutigen Tendenzen und Wechselwirkungen entspricht. Die Minimalposition, nach der W2 eine Projektion der heute vorhandenen Wirkungszusammenhänge darstellt, muss aufgegeben werden. Man muss von W2 noch weniger erwarten.

Was bleibt jetzt übrig? Dreierlei. Erstens die grosse Wirkung, die vom Modell W2 und seiner erweiterten Form ausging. In der Tat ist, den Erwartungen des Clubs of Rom entsprechend, ein Klima für Aktion, mit ansprechbarer Weltöffentlichkeit und aufgeschlossenen Entscheidungsträgern geschaffen worden. Durch die Kritik von Forrester's Modell hat unser Denken, über manche Fragen die unsere Zukunft betreffen, bereits Fortschritte gemacht. Viele wichtige Forschungen sind im Gange und wir dürfen in nächster Zeit mit interessanten neuen Resultaten rechnen. Forrester's Ansatz ist wenigstens so weit explizit, dass er Kritik und Weiterdenken fördern kann. Andere, vorangegangene, Untersuchungen, deren empirischer und gedanklicher Gehalt sicherlich nicht kleiner war als der von W2 (im deutschen Sprachgebiet z.B. 'Mut zur Utopie' [21]) haben nicht so eine spektakuläre Wirkung gehabt. Das ist wohl dem Prestige des Computers zu verdanken. Es mag zwar beunruhigend sein, dass vieles von vielen ungeprüft hingenommen und für wahr gehalten wird, wenn es nur aus dem Computer kommt, man darf aber nicht übersehen, dass der Effekt dieser Modelle nicht nur auf dem Glorienschein des Computers beruht sondern auch tangible Ursachen hat. Denn - zweitens-- haben Forrester und Meadows mit W2 und W3 ein ausserordentlich nützliches flexibles und einfaches Instrument zur experimentellen Untersuchung vielfach zusammenhängender nicht-linearer Prozesse vorgeführt. Ein Instrument

dass es gestattet, die Folgen einer grossen Anzahl postulierter und eng zusammenhängender Elementarbeziehungen anzugeben. Man kann vom Instrument nicht verlangen, dass es zwischen vernünftigen und unvernünftigen malthusianischen und nicht-malthusianischen, optimistischen und pessimistischen Annahmen unterscheidet. Wir haben gesehen, dass das Instrument die Annahmen Forresters genau so gut verarbeitet wie die seiner Kritiker und dann den Annahmen entsprechend, die unterschiedlichsten Voraussagen liefert. Meistens ist wahrscheinlich zwischen dem Instrument und dem Gebrauch, den Forrester und Meadows davon machen, nicht unterschieden worden. In der Wirkung dieser Arbeiten spielt das Gefühl für die Wichtigkeit des neuen Werkzeuges 'Systemdynamik' sicherlich eine Rolle.

Schliesslich - und drittens - hat Forrester den Mut gehabt, ein mathematisches Modell auszustellen, das versucht, globale Zusammenhänge zu erfassen, ohne erst abzuwarten, dass die Gesetze, die die zugrundeliegenden Phänomene beschreiben, verlässlich erkannt wurden. Aus plausiblen Annahmen für das System versucht er zu Schlüssen für die Teile zu gelangen. Mathematische Gleichungen sollen bei ihm nicht Messwerte reproduzieren, sondern globale Hypothesen über die Wechselwirkungen im System darstellen. Die Geschichte der Wissenschaften, insbesondere auch der Physik, hat gezeigt, dass man die Wissenschaft zum Stillstand bringen kann, wenn man sich damit begnügt, Werte möglicher Messungen vorauszusagen. Ptolomeis und auch Tycho Braches Modell des Sonnensystems gestattete es die Planetenbahnen mit - für die damaligen Zwecke - genügender Genauigkeit vorauszusagen. Aus ihnen hätte man aber nicht die Newtonischen Gesetze ableiten können. Durch seinen Mut hat Forrester die schärfsten Kritiken der messenden Ökonomen und Soziologen auf sich gezogen. Ich möchte diesen Mut begrüßen auch wenn ich mich von ihm nicht blenden lassen möchte.

Die drei Errungenschaften Forresters sind wie man leicht sieht, mit Gefahren verbunden, nämlich (1) die Anerkennung durch Entscheidungsträger als Kriterium der Nützlichkeit, ja Richtigkeit, der Modelle zu betrachten und (2) die Leichtigkeit mit der Gleichungen hingeschrieben und geprüft werden können zu einer, von jedem Wissen unbeschwerten Leichtfertigkeit ausarten zu lassen (siehe z.B. [22]).

## 7. Qualitative Dynamik

Wir haben, Schritt für Schritt, die Ansprüche Forresters und seiner Anhänger bezüglich der Resultate seiner Arbeit abgebaut. Zuletzt ist ganz wenig übriggeblieben. Aber dieses Wenige ist noch immer sehr viel: Forresters Arbeit könnte sich als bahnbrechend erweisen. Natürlich kommen bahnbrechende Arbeiten nicht wie ein Blitz aus heiterem Himmel. Das Bewusstsein für die grossen Zukunftsaufgaben der Menschheit war schon vorher mancherorts vorhanden und auch die Erkenntnis, dass die meisten Aufgaben dieses zu bewältigen gilt, eng miteinander verwoben sind. Der Mut zur Utopie [21], insbesondere der vierte Abschnitt 'Welternährung, Geburtenkontrolle und Bevölkerungslenkung' mag hier als Beispiel dienen. Forrester selbst hat seine Systemdynamik seit 1956 entwickelt.

Der Systemgedanke aber ist, in der modernen Naturwissenschaft schon 1928 von L.V. Bertalanffy in "Kritische Theorie der Formbildung" formuliert worden [23]. Ein wichtiges Werkzeug in der Weiterentwicklung der Systemtheorie wird sicherlich die qualitative Dynamik spielen. Sie ist kürzlich vom Mathematiker R. Thom in dem, wahrscheinlich epochemachendem Buch "Strukturelle Stabilität und Morphogenesis" [24] behandelt worden. Das qualitative Denken fehlt, seltsamerweise, in Forresters Systemdynamik. Damit ist auch verbunden, dass sein aufklärerischer Ansatz in das Gegenteil umzuschlagen droht.

Forresters Ausgangspunkt ist aufklärerisch. In seinem Computermodell sollen alle Annahmen explizit und daher überprüfbar sein. Wenigstens was die Elementengleichungen betrifft ist das ja notwendigerweise der Fall. Soweit kommt nach Forrester des Menschen Geist, von hier an aber übernimmt der Computer die Führung: die Annahmen und Beziehungen sind so zahlreich, dass ihre Konsequenzen nur von der Rechenmaschine bewältigt werden können. Deshalb werden die Annahmen und Beziehungen sofort in Computersprache formuliert. Deswegen auch sieht man manchmal

den Wald vor lauter Bäumen nicht. Viele Informationen bedeuten nicht unbedingt viel Information. Hier hat der menschliche Geist zu früh aufgegeben. Wir haben am Beispiel der Bewegungsgleichungen mit den allereinfachsten Mitteln zu zeigen versucht, dass es nicht unmöglich ist, sich Rechenschaft über die globale Struktur der Annahmen zu geben, dass man sich nicht mit einer Aufzählung von Elementarannahmen begnügen muss. Es stellt sich also die Aufgabe, komplexe Systeme (hier komplexe Systeme von Annahmen) übersichtlich darzustellen; auf diesem Gebiet kann die Systemtheorie noch grosse Fortschritte machen.

Aber auch in der Beurteilung der dynamischen Konsequenzen des Modells kann man weiter gehen als es Forrester tut. In "Principles of Systems" [5] will Forrester die Notwendigkeit der Benützung des Computers durch das Beispiel des klassischen 3-Körperproblems beleuchten. Sogar zu diesem verhältnismässig einfachen Problem könne man mit den Mitteln der heutigen Mathematik keine analytische Lösung finden. Mit sicherem Instinkt wird die Aufmerksamkeit auf einen wichtigen Punkt gelenkt. Aber es wird nicht gesehen, was daraus zu lernen ist. In der Tat ist 1887 und 1889 der Glaube an eine geschlossene Lösung schon des 3-Körperproblems zusammengebrochen. BRUNS hatte 1887 gezeigt, dass Reihenentwicklung die einzige quantitative Methode zur Lösung des n-Körperproblems sei, und POINCARÉ konnte 1889 beweisen, dass die Reihenentwicklungen divergierten. Zum Glück gab es damals keinen Computer. Schon 1880 hatte Poincaré begonnen neue Methoden zur Behandlung dynamischer Systeme zu entwickeln [25], eben die 'qualitative Dynamik'. Aus diesem Keim haben sich im Laufe der Jahre grosse Gebiete der Mathematik entwickelt. Eine der wichtigsten Beiträge zur Weiterentwicklung der qualitativen Dynamik trägt übrigens den aufschlussreichen Namen "Grobe Systeme" [26]. Einen vorläufigen Höhepunkt hat diese Theorie im oben erwähnten Buch Thoms gefunden.

In der qualitativen Dynamik ist man bereit, auf explizite Lösungen der Gleichungen des Modells zu verzichten. Statt dessen bemüht man sich, ein globales, meistens geometrisches, Bild der Gesamtheit der Lösungen zu bekommen. Man kann dann das Verhalten irgendeiner Lösung qualitativ beschreiben. Die Fragen die man sich stellt sind: Welche Art von Lösungen gibt es, wo liegen die Grenzen zwischen diesen Arten, wie stabil sind diese Lösungen gegen kleine Änderungen, usw. Forrester sucht aber immer noch nur nach dem Computerersatz analytischer Lösungen, nämlich nach der Schritt für Schritt errechneten Einzellösung. Um doch einen Überblick über das System zu bekommen, ist er gezwungen, unter veränderten Annahmen verschiedene Einzellösungen zu errechnen. Die Auswahl der Annahmen bleibt jedoch notwendigerweise ziemlich willkürlich. Und selbst wenn der Computer in kürzester Zeit und für wenig Geld Lösungen produziert, kann man so herumprobierend nur eine ungenügende Übersicht darüber, was in den Annahmen, d.h. im System, steckt, bekommen. Daher kommt im wesentlichen das sogenannte konterintuitive Verhalten. Der menschliche Geist hat zu früh kapituliert. Die Aufklärung hat in ihr Gegenteil umgeschlagen. Der Computer wird als Orakel missbraucht. Man weiss nicht recht, wie er zu seinen Aussagen kommt und auch nicht, wie man die Aussagen deuten soll.

"Das nächste grosse Erwachen des menschlichen Intellektes könnte eine Methode zum Verstehen des qualitativen Gehaltes von Gleichungen hervorbringen ([27], 41-12)".

So hat eine Fehlstelle in Forresters Arbeit die Aufmerksamkeit auf einen wichtigen Punkt gelenkt. Die Anwendungen der Methoden der modernen qualitativen Dynamik auf Modelle komplexer Gegebenheiten. Ich will hier keinesfalls den Eindruck erwecken, es sei dies kein sehr schwieriges Unternehmen; es ist sicher eine Aufgabe, die der Mitarbeit bester Mathematiker bedarf. Im übrigen können dem Computer in diesem Zusammenhang neue, nichttriviale Aufgaben überwiesen werden.



Solche qualitative Modelle brauchen wir. Sie konnten es uns ermöglichen gesellschaftliche Prozesse besser zu beschreiben und besser zu verstehen.

LITERATURHINWEISE

- [1] D.H. Meadows, D.L. Meadows, J. Randers, W.W. Behrens III:  
The Limits to Growth  
Universe Books, New York, 1972
- [2] J.W. Forrester. World Dynamics, Wright-Allen Press,  
Cambridge, Ma., 1971
- [2a] deutsch: Der teuflische Regelkreis, Deutsche Verlags-Anstalt  
Suttgart 1971. In dieser Ausgabe sind allerdings gerade die  
Gleichungen fortgelassen.
- [3] A. Peccei, M. Siebker: 'The Limits to Growth' in Perspective.  
A paper submitted at the request of The Economic Committee of  
The Parliamentary Assembly of The Council of Europe.  
Erhältlich vom Europarat oder vom Club of Rome
- [4] J.W. Forrester. Industrial Dynamics. The M.I.T. Press,  
Cambridge, Ma., 1961
- [5] J.W. Forrester. Principles of Systems (Second Preliminary  
Edition). Wright-Allen Press, Cambridge, Ma., 1968
- [6] J.W. Forrester. Urban Dynamics. The M.I.T. Press, Cambridge, Ma.,  
1969
- [7] J.W. Forrester. Market Growth as Influenced by Capital Invest-  
ment. Industrial Management Review 9 (1968) 83
- [8] R.O. Foster. The Dynamics of Blood Sugar Regulation, Dissertation  
Department of Electrical Engineering, M.I.T. Juli 1970

- [9] D.L. Meadows. Dynamics of Commodity Production Cycles, Wright-Allen Press, Cambridge, Ma., 1970
- [10] E.B. Roberts. The Dynamics of Research and Development, Harper & Row, New York, 1964
- [11] D.L. Meadows et al. The Dynamics of Growth in a Finite World. Wright-Allen Press, Cambridge, Ma., to appear
- [12] D.L. Meadows, D.H. Meadows (ed.). Towards global equilibrium Collected Papers. Wright-Allen Press, Cambridge, Ma., 1973
- [13] H.S.D. Cole, R.C. Curnow. An Evaluation of the World Models. Futures 5 (1973) 108
- [14] H.S.D. Cole. The Structure of the World Model. Futures (1973) 14
- [15] T.W. OERLEMANS, M.M.J. TELLINGS, H. DE VRIES. World Dynamics: Social Feedback may give Hope for the Future, Nature 238 (1972) 251
- [16] R. BOYD, World Dynamics: A Note, Science 177 (1972) 516
- [17] E. Ascher. Modèles mathématiques et problèmes contemporains Revue européenne des sciences sociales 11 (1973) 28
- [18] Executive Committee of the Club of Rome. The Club of Rome The New Threshold, Rome, February 1973

- [19] Working group of the "Stichting Maatschappij en Onderneming".  
Work for the Future, The Hague 1973
  
- [20] G. Picht. Die Bedingungen des Überlebens,  
Merkur 27(1973) 212
  
- [21] G. Picht. Mut zur Utopie. Piper, München 1969
  
- [22] M. Shubik. Rezension in: Science 174 (1971) 1014,  
Repliken und Duplik ibid. 176(1972) 109
  
- [23] L.v.Bertalauffy. Kritische Theorie der Formbildung.  
Borntraeger, Berlin, 1928
  
- [24] R. Thom. Stabilité structurelle et morphogénèse.  
Benjamin, Reading Ma., 1972
  
- [25] H. Poincaré. Sur les courbes définies par une equation  
différentielle, Comptes Rendus Academie des Sciences,  
22.3.1880
  
- [26] A.Andronov, P.Pontriagin. Systèmes grossiers,  
Dokl. Akad. Nauk, SSSR, 14 (1937) 247
  
- [27] R.P. Feynman, R.B. Leighbon and M. Sands: The Feynman  
Lectures on Physics, Vol. II, Addison-Wesley, Reading, Ma.,  
(1964)

Legenden zu den Abbildungen

Abb. 1: Standardmodell W2-0

Masstab: P (Bevölkerung): 1 =  $2 \cdot 10^{19}$ , N (Bodenschätze): 1 =  $2.5 \cdot 10^{11}$   
C (Investition): 1 =  $5 \cdot 10^9$ , L (Verschmutzung): 1 = 10, Q (Lebensqualität): 1 = 0.5

Abb. 2: Standardmodell W2-0

A (Kapitalbruchteil Landwirtschaft): 1 = 0.3,  
M (Materieller Lebensstandard): 1 = 0.5,  
F (Lebensmittelverhältnis): 1 = 0.5

Abb. 3: Bodenschätze

a = Annahme, b = Verlauf in W2-0 (wie Abb. 1), c-d-e Extrapolationen,  
b, c und d reproduzieren im wesentlichen a.

Abb. 4: Diagramm von W2

Abb. 5: Diagramm von W3

Abb. 6: Sektor der Bodenschätze (N) in W2.

Ausschnitt aus Abb. 4, bei dem man, von N ausgehend, aufhört sobald man zu einer anderen Zustandsgrösse gelangt.

Abb. 7: Die Funktionen  $v_m(m)$  und  $\eta(n)$ .

Annäherungen  $\eta=n$  und (für W2-0)  $v_m=m$ .

Abb. 8: Alternativannahmen für ein systemdynamisches Weltmodell nach [15]. Links: Bodenschätze können auch erzeugt werden.

Rechts: Vermehrte Investitionen müssen nicht zur Verschmutzungskatastrophe führen. Masstab: P: 1 =  $2.5 \cdot 10^9$ , N: 1 =  $2.5 \cdot 10^{11}$ ,  
C: 1 =  $5 \cdot 10^9$ , L: 1 = 10.

Abb. 9: Sektor der Verschmutzung (L) in W2-0.

Ausschnitt aus Abb.4, bei dem man, von L ausgehend, aufhört, sobald man zu einer anderen Zustandsgrösse gelangt.

Abb. 10: Die Funktionen  $\pi_I(I)$  und  $\alpha_\ell(\ell)$   
Annäherung (für W2-0)  $\pi_I = I$  und  $\alpha_\ell = \ell/3$ .

Abb. 11: Weltmodell W2-4

Erhöhte Kapitalinvestition führt zur Verschmutzungskatastrophe.

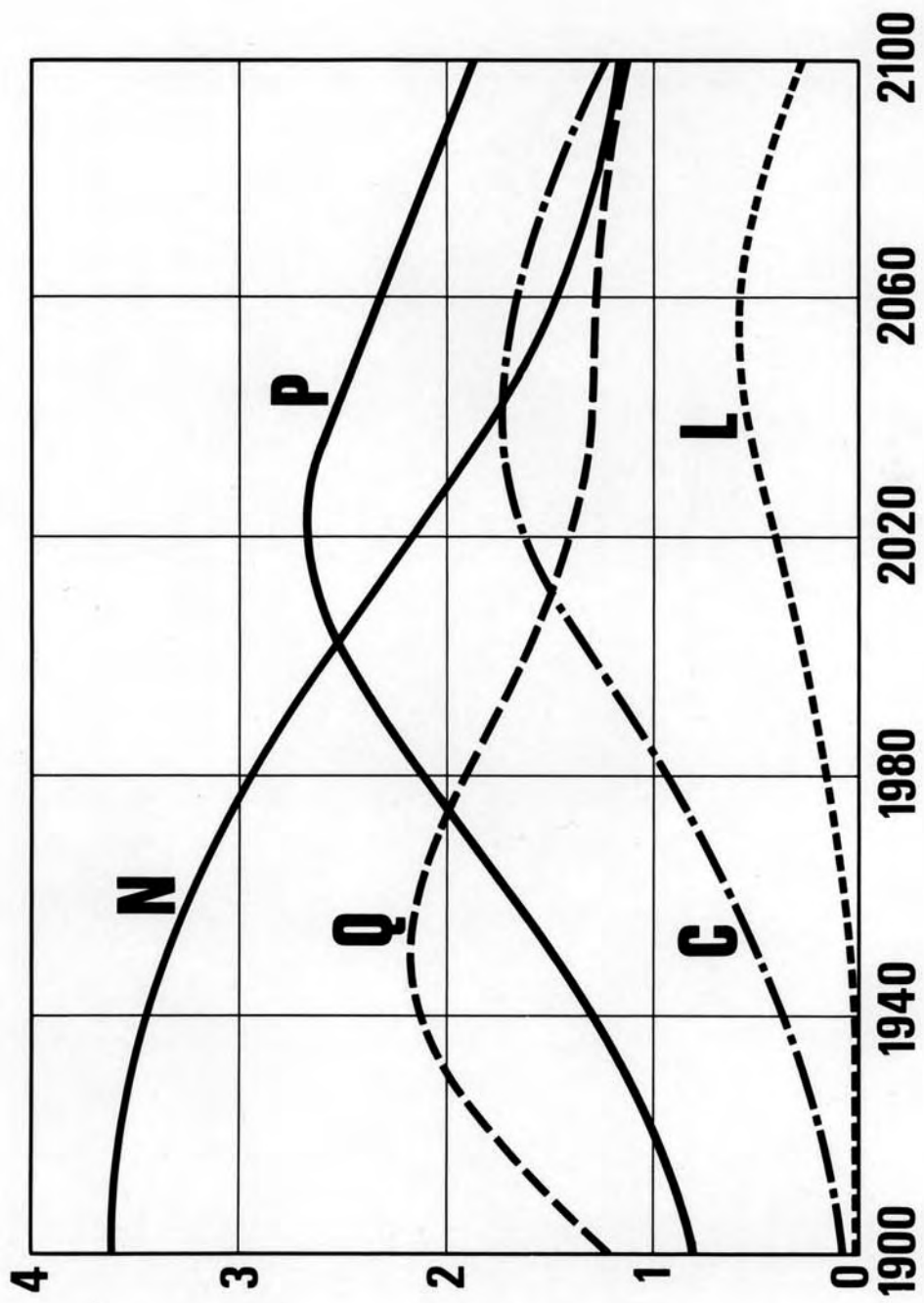


Abb. 1

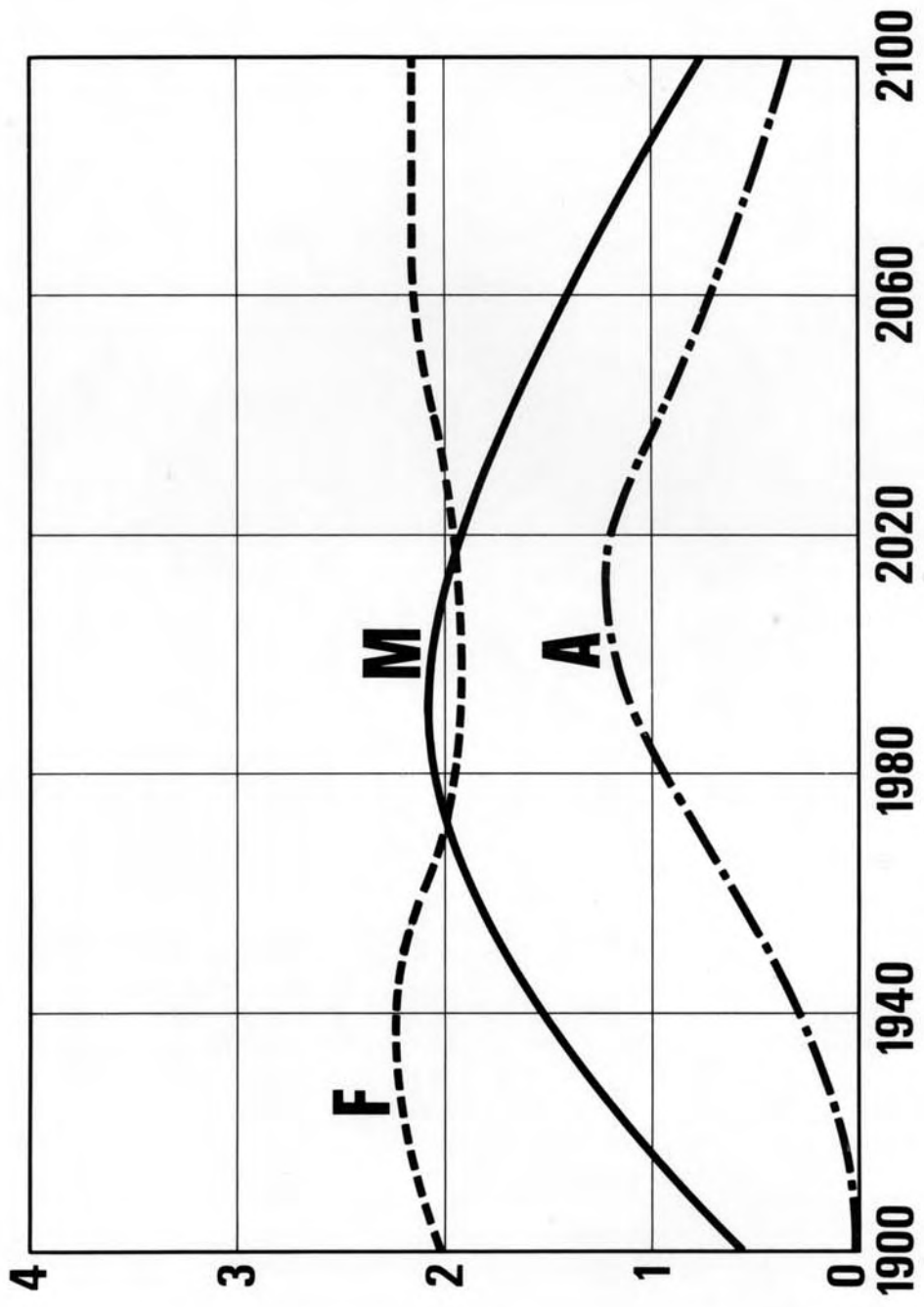


Abb. 2



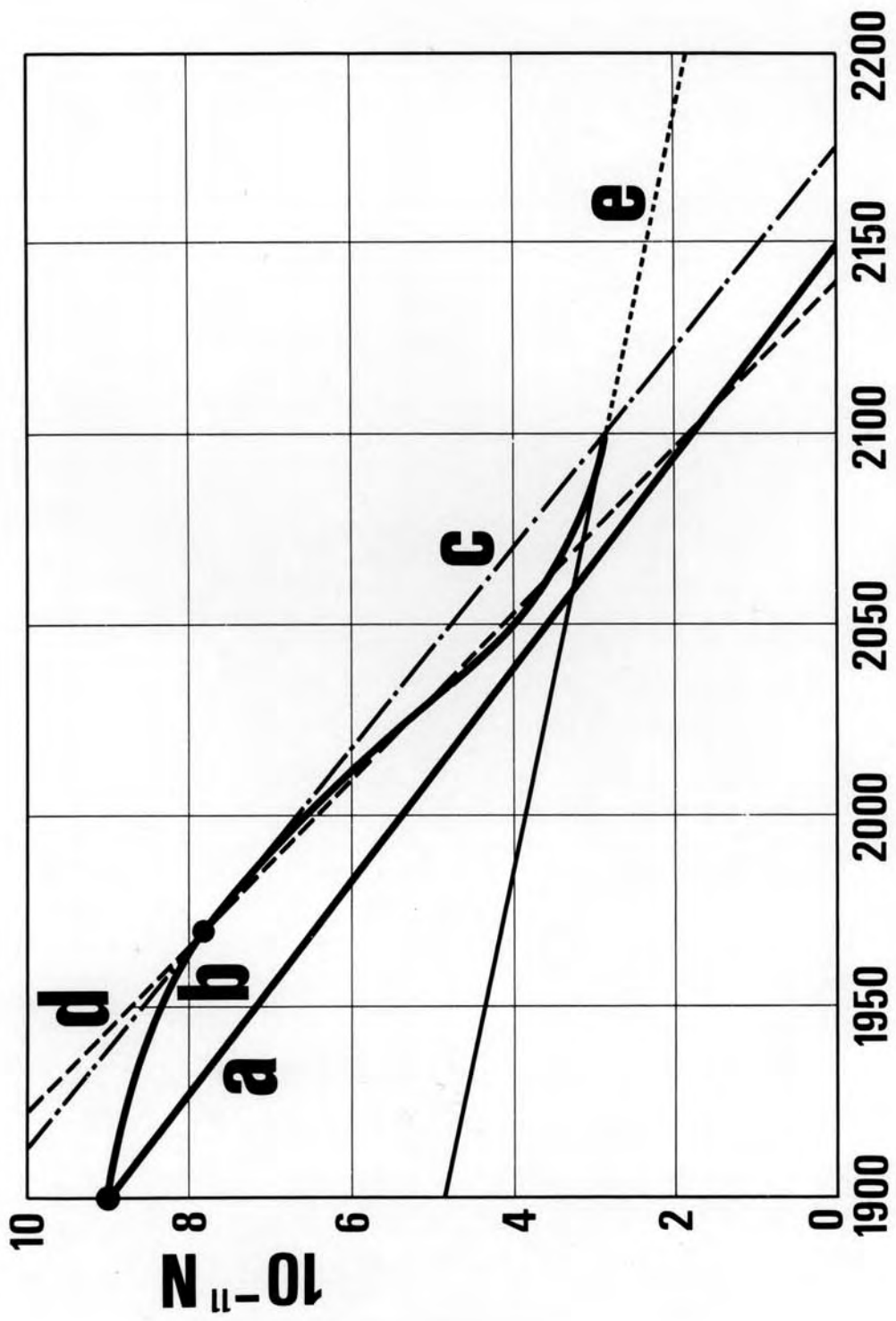


Abb. 3

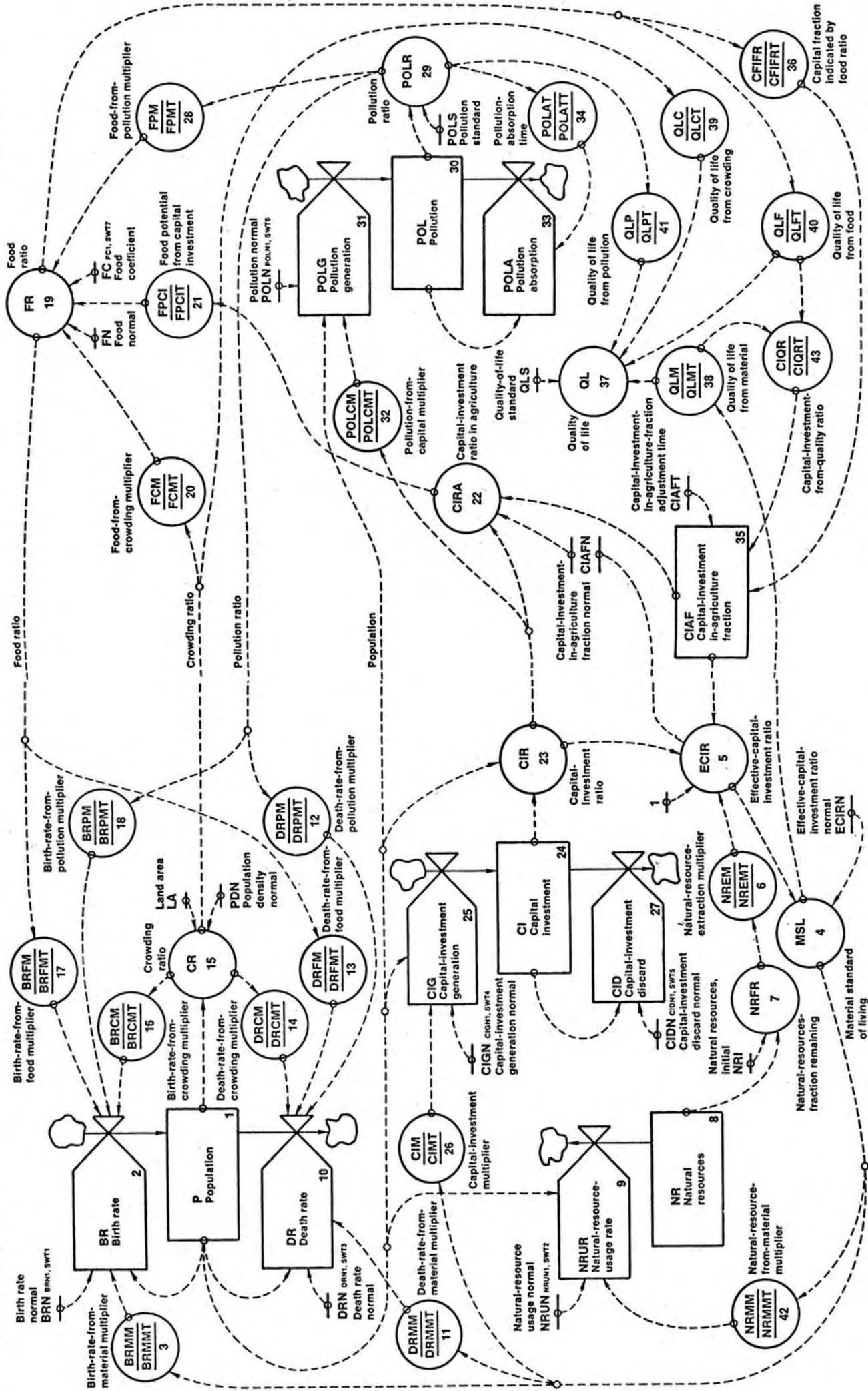


Figure 1-1 Upon this world model are based the author's analyses of the effects of changing population and economic growth factors in the next 50 years. It shows the inter-

relation of population, capital investment, natural resources, pollution, and the fraction of capital devoted to agriculture on which is based the following discussion.

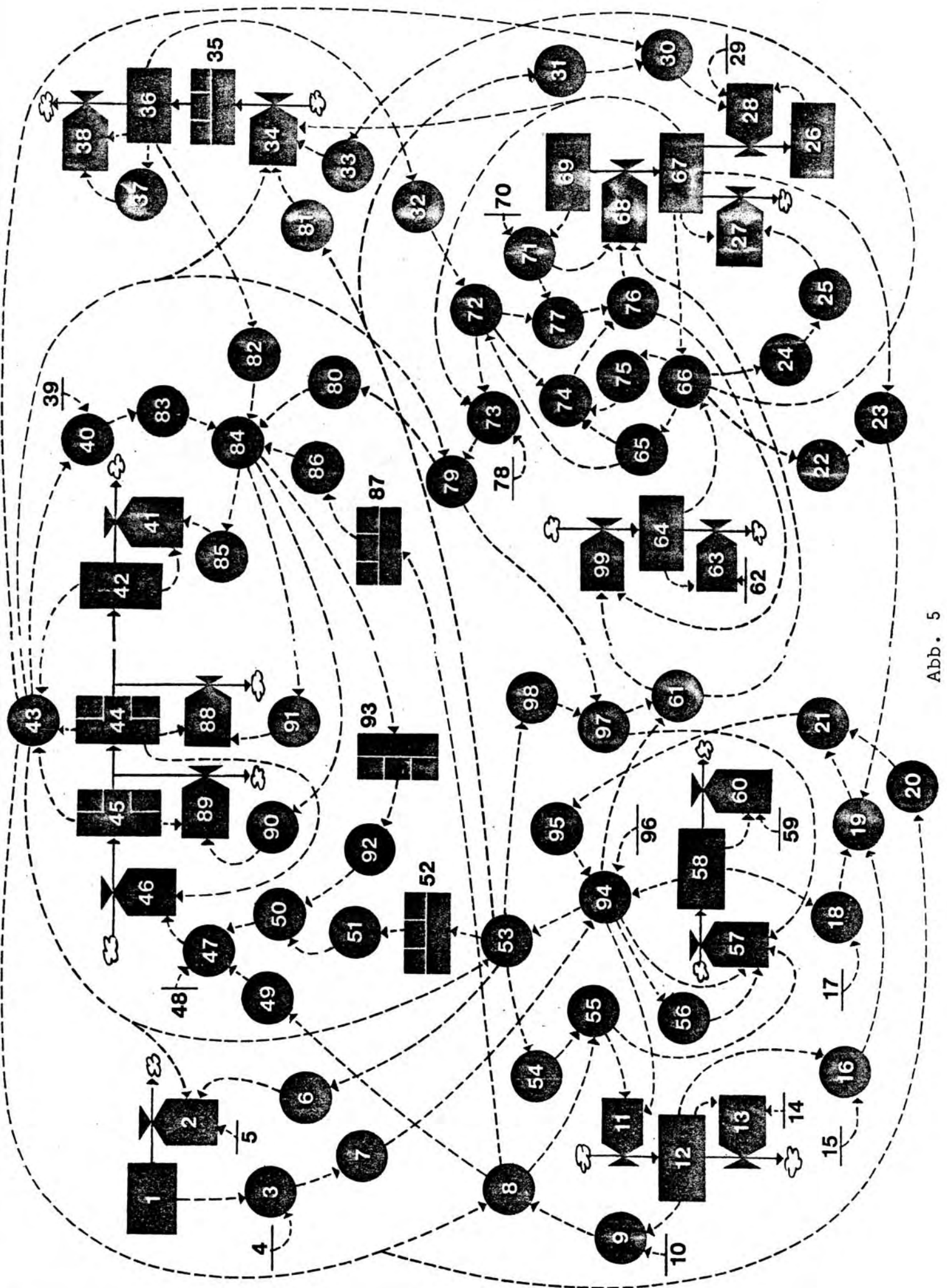


Abb. 5

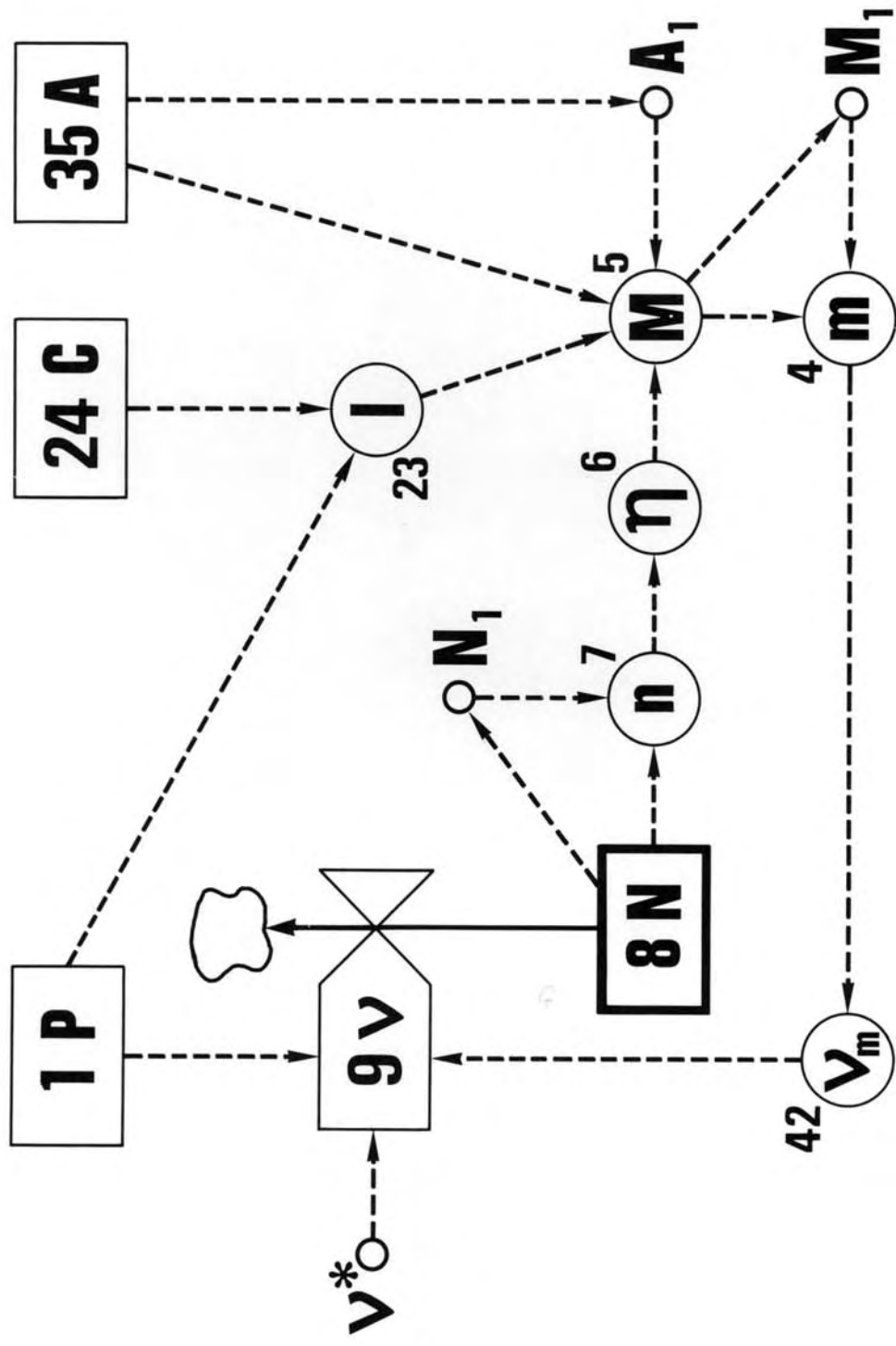


Abb. 6

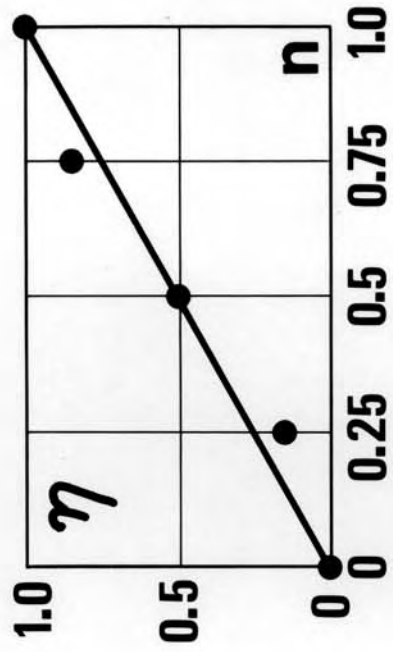
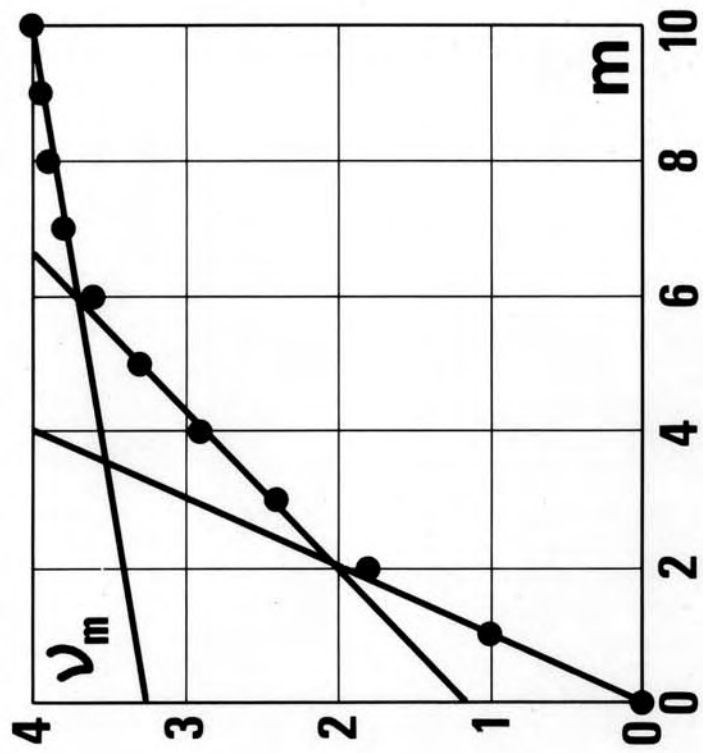


Abb. 7

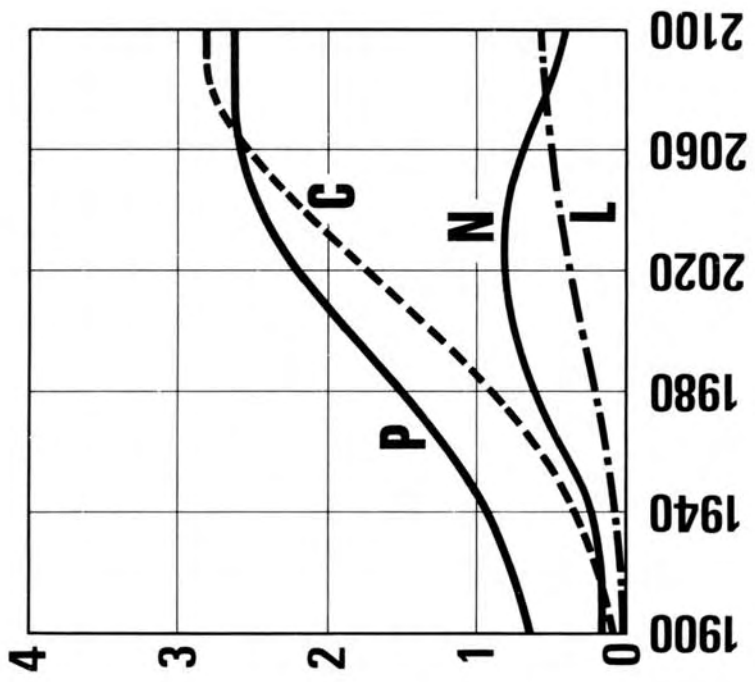
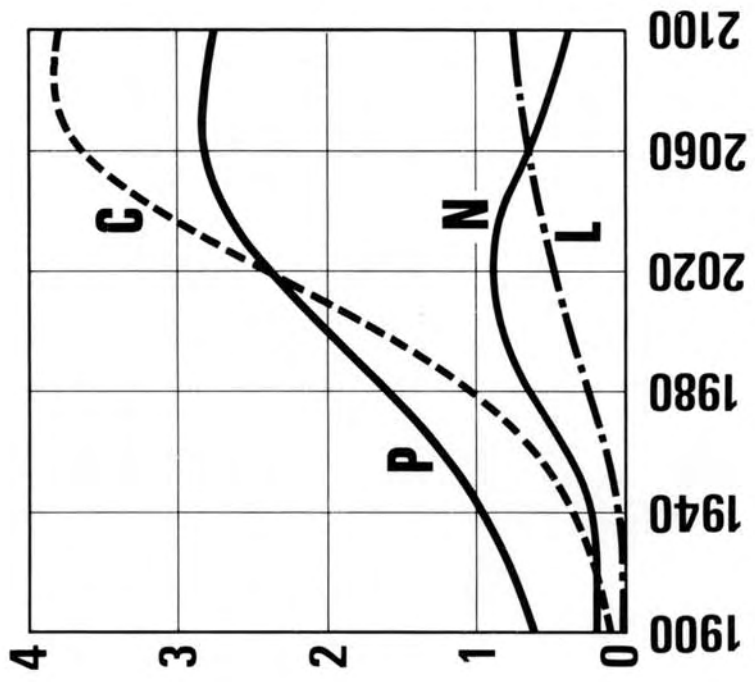


Abb. 8

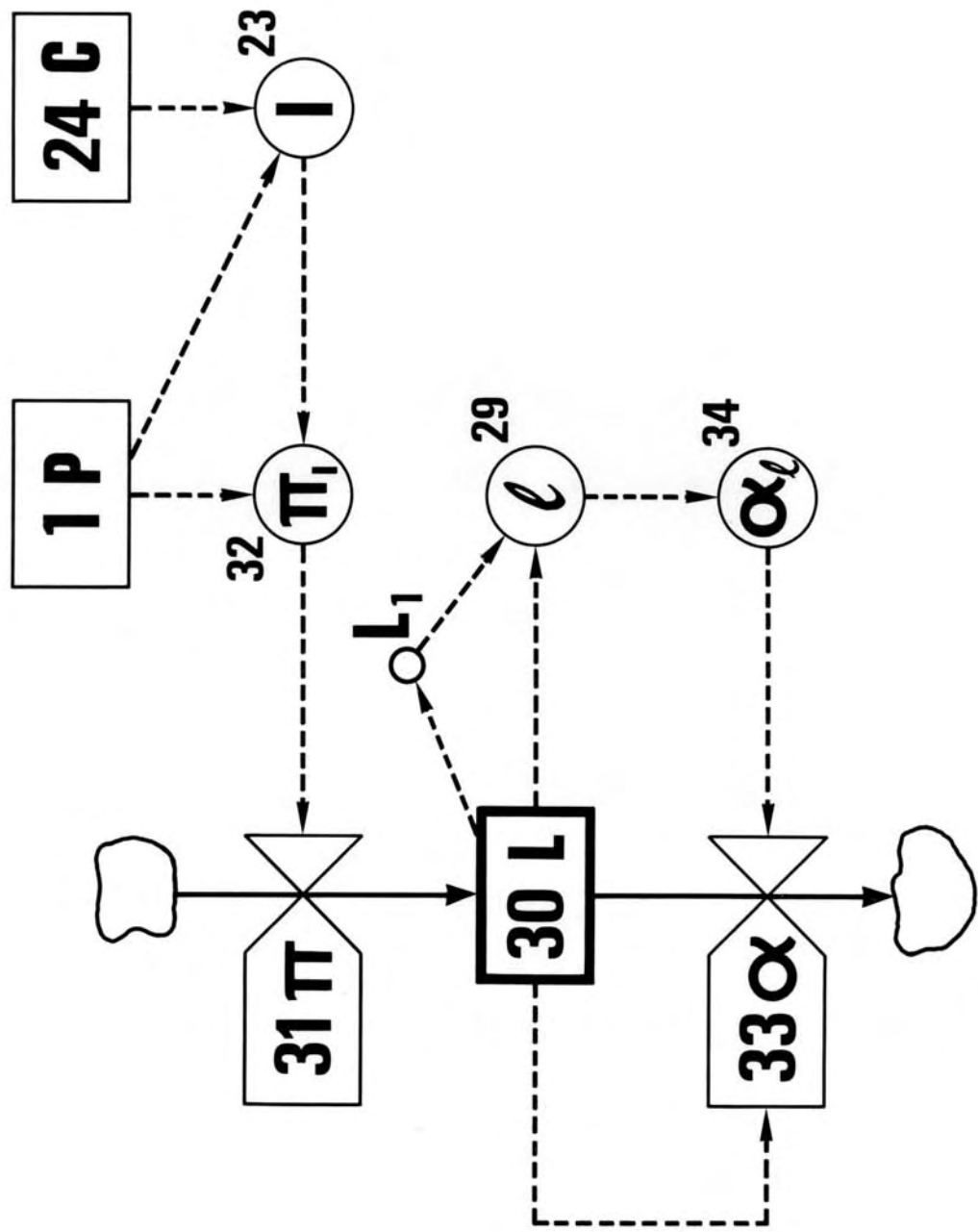


Abb. 9

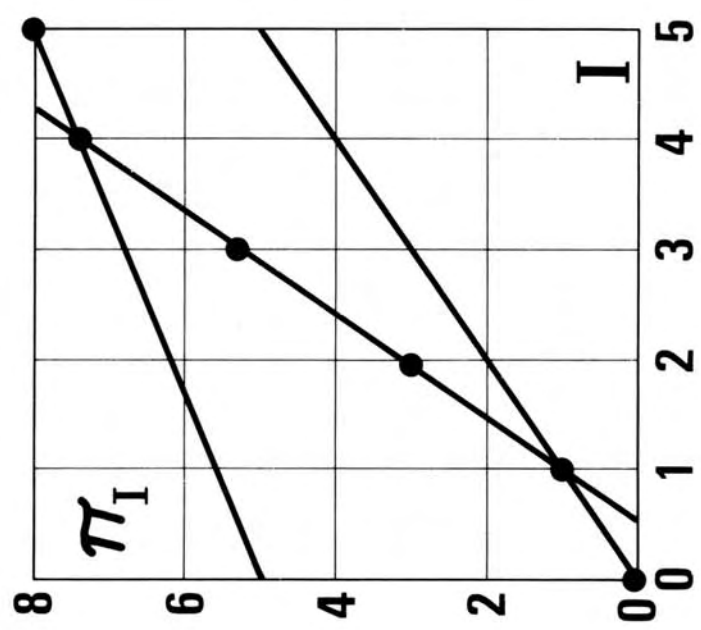
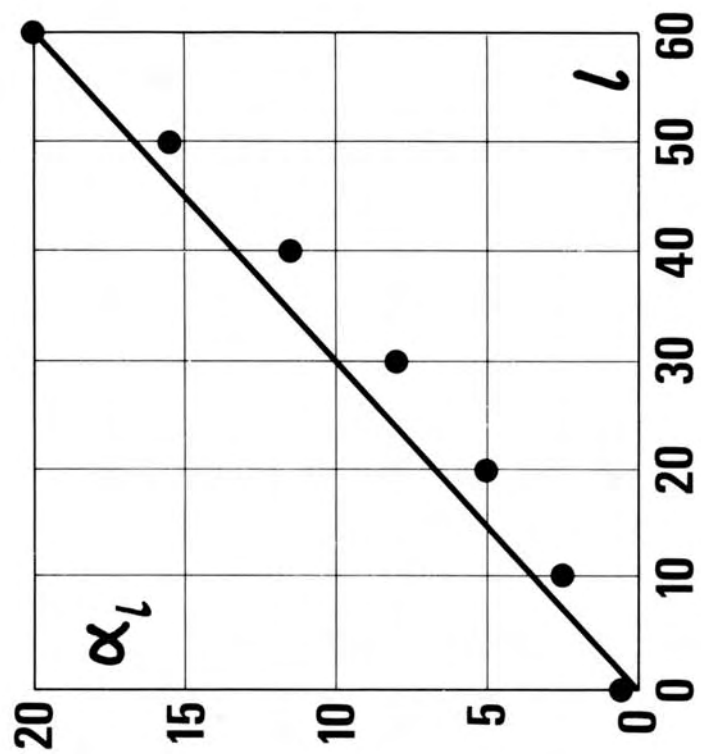


Abb. 10



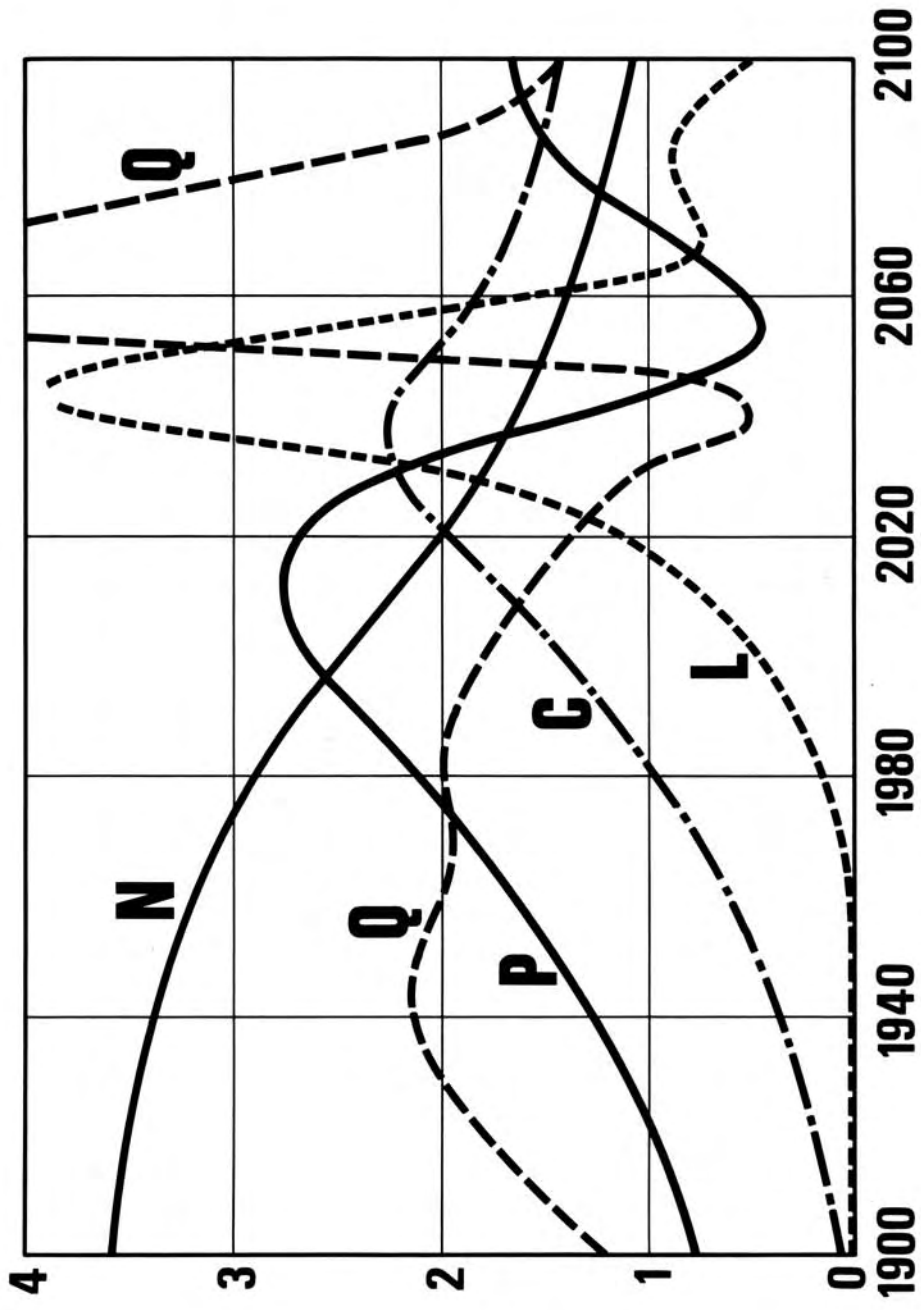


Abb. 11

TABELLE 1

Werte der Zustandsgrößen für die Jahre 1900 ( $X_0$ ) und 1970 ( $X_1$ )

$P_0 = 1.6 \times 10^9$	$P_1 = 3.6 \times 10^9$
$N_0 = 250 \quad P_1 = 9 \times 10^{11}$	$N_1 = 7.8 \times 10^{11} (*)$
$C_0 = 0.25 \quad P_0 = 0.4 \times 10^9$	$C_1 = 1 \quad P_1 = 3.6 \times 10^9$
$L_0 = 0.125 \quad P_0 = 0.2 \times 10^9$	$L_1 = 1 \quad P_1 = 3.6 \times 10^9$
$A_0 = 0.2$	$A_1 = 0.3$

(\*) Abschätzung aus Abb. 1

TABELLE 2

Standardwerte der Koeffizienten

$\beta^* = 0.040$	$P_1 = P_0 (1 + \beta^* - \delta^*)^{70}$
$\delta^* = 0.028$	$1/\delta^* = 36$ Mittlere Lebensdauer
$\nu^* = 1$	
$\gamma^* = 0.05$	
$\epsilon^* = 0.025$	$1/\epsilon^* = 40$ Mittlere Lebensdauer für Industriekapital
$\pi^* = 1$	
$\tau = 15$	Anpassungszeit der Kapitalinvestition in die Landwirtschaft, A, an den Sollwert $\tilde{A}$

TABELLE 3

Varianten von W2

W2	$\nu^*$	$\pi^*$	$\gamma^*$	$\beta^*$	$\phi$
0	1	1	0.05	0.040	1
1	0.25	1	0.05	0.040	1
2	0	0.1	0.05	0.040	1
3	0	0.1	0.05	0.040	1 (1)
4	1	1	0.06	0.040	1
5	1	1	0.05	0.028	1 (2)
6	0.25	1	0.05	0.028	1 (2)
7	0	0.1	0.05	0.028	1 (2)
8	0	0.1	0.05	0.020	1
9	0.25	0.7	0.05	0.040	1
10	1	1	0.05	0.040	1.25
11	0.25	0.7	0.05	0.040	1.25
12	0.25	0.7	0.06	0.040	1.25
13	0.25	0.4	0.06	0.040	1.25
14	0.25	0.7	0.06	0.028	1.25 (2)
15	0.25	0.5	0.05	0.040	1
16	0.25	0.5	0.03	0.040	1
17	0.25	0.5	0.03	0.040	0.8
18	0.25	0.5	0.03	0.028	0.8 (2)

(1) zusätzlich:  $\beta_p = \delta_p = \text{const} = 1$  ,      (2)  $\beta^* = \delta^*$

TABELLE 4

Zeitlicher Verlauf einiger Grössen von W2-0 <sup>\*)</sup>

	1900	1970	2020	2040	2100	
$10^{-9}$ P	1.6	3.6	5.3	4.9	3.6	
$10^{-11}$ N	9.0	7.8	5.5	4.5	2.8	
$10^{-9}$ C	0.4	3.6	7.6	8.0	5.6	
$10^{-9}$ L	0.2	3.6	13.3	19.8	9.4	
A	0.20	0.27	0.32	0.30	0.23	(1)
I	0.25	1.00	1.44	1.64	1.56	
m	0.28	1.00	1.00	0.85	0.40	(2)
$10^{-2}$ N/P	5.6	2.2	1.0	0.9	0.8	
p	0.225	1.0	1.5	1.4	1.0	
n	1.2	1.0	0.7	0.6	0.4	
c	0.1	1.0	2.1	2.2	1.6	
l	0.4	1.0	3.7	5.5	2.6	
a	0.7	1.0	1.2	1.1	0.8	(1)
f	1.0	0.97	0.98	1.0	1.07	(3)

(1) Maximum 0.32 in 2010, (2) Maximum 1.09 in 1990

(3) Im Widerspruch zum Text findet man  $f_0 = 1$ ,  $f_1 \neq 1$ .

<sup>\*)</sup> Schätzungen nach Fig. 4-1 und Fig. 4-2 in [2].

TABELLE 5

Falsche und richtige Massnahmen

	W2-0	W2-1	W2-2	W2-3	W2-18
$10^{-11}$ Nmin	2.2	6.0	7.9	7.9	6.7
lmax	5.5	>>40	2	1	1
$10^{-9}$ Pmax	5.3	5.8	9.7	10.8	4.3
$10^{-9}$ Pmin		0.8			
fmin	0.97	0.63	0.97	0.80	0.97