

Institut für Gestaltungs- und Wirkungsforschung
Fakultät für Informatik ♦ TU Wien
Arbeitsgruppe Human-Computer-Interaction
Favoritenstrasse 9, Stiege 3, 2. Stock, A-1040 Wien
Telefon +43 (1) 58801-18703 ♦ FAX +43 (0) 1 58801-18793
secretariat@igw.tuwien.ac.at ♦ <http://igw.tuwien.ac.at/igw/>

Einführung in die Sozialkybernetik

Erster Teil der Unterlagen zum Seminar
Mathematische Modellbildung und Simulation
Sommersemester 2005

Peter Fleissner
März 2005

MODELL- UND SYSTEMTHEORIE: EINE EINFÜHRUNG

INHALTSVERZEICHNIS

2	Was ist Sozialkybernetik?
3	Zur Entstehungsgeschichte der Sozialkybernetik
6	Anwendungsprobleme sozialkybernetischer Modelle
6	Globale Modelle
7	Die Modelle von FORRESTER und MEADOWS
10	Exkurs in die Programmiersprache DYNAMO
11	Die Aussagen der ersten Weltmodelle
13	Die Nachfolger von FORRESTER und MEADOWS
13	Das PESTEL - MESAROVIC - Modell
14	Das BARILOCHE-Modell
17	Das Modell MOIRA
19	Das SARU-Modell
19	Weitere Modelle
21	Neuere Diskussionen zur langfristigen Entwicklung
24	Zur Methode
24	Formale Modelle und inhaltliche Analysen
24	Prinzipielle Probleme der formalen Modellierung
25	Modelle sind gleichzeitig Abbilder und Entwürfe
25	Formale Modelle und die Einmaligkeit historischer Prozesse
26	Formale Modelle und qualitative Veränderungen
27	Warum Systemdynamik anstelle ökonometrischer Modelle?
30	Grundkonzepte der Systemdynamik
30	Zentrale Begriffe und Vorgangsweisen
31	Causal Loop Diagramme
32	Rückkopplungsprozesse
32	Positive Rückkopplung
32	Negative Rückkopplung
33	Modellierung mit STELLA
33	STELLA-Diagramm einer positiven Rückkopplung
35	STELLA-Diagramm einer negativen Rückkopplung
37	Mathematische Darstellung von Systemen mit einer Bestandsgröße
37	Positive Rückkopplung (siehe auch Abschnitt 4.1.)
37	Differenzengleichung
37	Verdopplungszeit bei Differenzengleichung
37	Differentialgleichung
38	Verdopplungszeit bei Differentialgleichung
38	Negative Rückkopplung
38	Differenzengleichung
39	Halbwertszeit für Differenzengleichung
40	Differentialgleichung
40	Halbwertszeit für Differentialgleichung
41	Ein Beispiel für nichtlineare Rückkopplung
46	Die Modellierung von Verzögerungen
50	Systeme mit zwei Bestandsgrößen
50	Statische Darstellung
50	Dynamische Darstellung
52	Markt mit Lagerhaltung
56	Markt mit Auswirkungen der Lagerbestände auf die Lieferungen

1. WAS IST SOZIALKYBERNETIK?

Unter **Sozialkybernetik** soll die **Lehre von Strukturen und Prozessen in der menschlichen Gesellschaft** verstanden werden. Das Verständnis dieser Strukturen und Prozesse soll dabei - soweit möglich - auf drei Wegen gewonnen werden:

1. durch die verbale Darstellung qualitativer Theorien über den jeweiligen gesellschaftlichen Teilbereich
2. durch die Beschreibung der quantifizierbaren Elemente der Theorie in Form mathematischer Modelle
3. durch die Anpassung der Modellparameter mit Hilfe bestimmter Schätzverfahren an die empirisch vorliegende Wirklichkeit. Häufig bedient man sich dabei der Methoden der Ökonometrie.

Oft lässt es die große Zahl oder die nichtlineare Form der Gleichungen der mathematischen Modelle nicht mehr zu, Lösungen mit Papier und Bleistift oder mit Hilfe eines Taschenrechners zu erzielen. Auch die Fülle von Daten lässt sich in aller Regel nicht mehr händisch bewältigen. In diesen Fällen empfiehlt sich die Anwendung von PCs. Spezielle Computerprogramme (wie z. B. DYNAMO, POWERSIM, VENSIM, STELLA oder ANYLOGIC) erleichtern dabei die Modellkonstruktion.

Sozialkybernetik ist eine relativ junge Disziplin. Sie wurde mit dem ausdrücklichen Ziel entwickelt, die Hintergründe von krisenhaften Prozessen der Gesellschaft oder ihrer Teilbereiche aufzuklären und alternative Varianten sozusagen in der Retorte, billig, rasch und gefahrlos durchzuspielen.

Nimmt man diese Aufklärungstätigkeit ernst, so kann man sich nicht damit begnügen, durch oberflächliche Analyse und Selbsttäuschung aufgrund individueller Interessen vorhandene Gegensätze in der Gesellschaft zuzudecken, sondern man wird den gesamten zur Verfügung stehenden Apparat dazu benützen müssen, die wesentlichen Gesetzmäßigkeiten hinter dem äußeren "Schein" nach bestem Wissen und Gewissen aufzusuchen. In manchen Fällen kann dieser "Schein" einen ziemlich handfesten Charakter annehmen, etwa, wenn z.B. die gesamten verfügbaren Daten nach einer Theorie erhoben werden, die nur auf der Ebene der Phänomene angesiedelt ist, und für die dahinterliegende Realität blind ist.

Der hier vorgeschlagene Ansatz macht die kritische Reflexion des eigenen Erkenntnisinteresses (Karriere, Berufsperspektive) und das permanente Lernen aus eigenen und fremden Fehlern möglich und zur Notwendigkeit. Wir hoffen, im Laufe der Vorlesung vermitteln zu können, dass die Art, wie jemand ein Modell konstruiert, nicht nur Aussagen über die Wirklichkeit enthält, sondern auch den Standort des Modellkonstruktors wiedergibt ("An ihren Modellen sollt ihr sie erkennen!"). Diese Kritik sollte auch vor unseren eigenen Ansätzen nicht Halt machen, denn nur auf diesem Wege besteht die Hoffnung, die Güte und Adäquanz der Modelle zu verbessern.

1.1. ZUR ENTSTEHUNGSGESCHICHTE DER SOZIALKYBERNETIK

Mit der Trennung von Kopf- und Handarbeit, mit zunehmender Ausdifferenzierung der Arbeitsteilung, mit der Entwicklung und Einbindung von Naturwissenschaft in die Produktion und Reproduktion der Gesellschaft, mit der wachsenden Zahl der Menschen, die von den Ergebnissen ihrer Arbeit getrennt sind, wuchs die wahrgenommene Komplexität der gesellschaftlichen Umwelt¹. Als Antwort auf die zunehmenden Schwierigkeiten in kapitalistischen Systemen, die auch zu Problemen der Regierbarkeit und für die weitere Ausübung der Macht der Herrschenden führte (dazu: C. OFFE, Strukturprobleme des kapitalistischen Staates, Suhrkamp Verlag, Frankfurt am Main 1972), wurden Methoden notwendig, die es erlauben sollten, die Krisensituation zunächst auf theoretischer Ebene zu durchleuchten und Anweisungen für politisches Handeln abzuleiten. In Teilbereichen der Gesellschaft, in denen staatliche Maßnahmen relativ

¹ siehe N. LUHMANN, Moderne Systemtheorien als Form gesamtgesellschaftlicher Analyse, in: J. HABERMAS und N. LUHMANN (Hrsg.), Theorie der Gesellschaft oder Sozialtechnologie, Frankfurt am Main, 1971

leicht umsetzbar waren (wie etwa Bildungs- oder Gesundheitswesen), wurde verstärkt die Diskussion über die Gestaltung dieser Teilbereiche mit Hilfe sozialwissenschaftlicher Methoden geführt. Sozialkybernetische Modelle befriedigten in dieser Situation ein wachsendes Bedürfnis nach einer rationalen Analyse von Problemfeldern und Krisen mit der Aussicht, sie zu bewältigen:

Krisen treten dabei auf verschiedenen Ebenen in Erscheinung:²

1. Auf der ökonomischen Ebene, wo Arbeitslosigkeit, Inflation, Außenhandelsdefizit, Staatsverschuldung, Unsicherheiten der Wechselkurse, mangelnde Nachfrage usw. zunehmend Schwierigkeiten bereiten. Sozialwissenschaft wird häufig dort eingesetzt, wo Produktivitätssteigerungen zur Ausweitung der Gewinne und Marktanteile möglich sind, oder Konflikte zwischen den Lohnabhängigen und der Unternehmensleitung zu besänftigen sind.
2. Auf der sozialen Ebene, die insbesondere in Zeiten wirtschaftlicher Rezessionen in Finanzierungsprobleme gerät. In solchen Zeiten werden "Übersozialisierung", "Überforderung des Wohlfahrtsstaats" oder "Durchforstung der Sozialversicherung" zu beliebten Schlagworten. Die Altersversorgung, die Krankenversicherung, das Schulwesen werden zu Konfliktfeldern der Auseinandersetzung zwischen den Parteien und Interessensverbänden. Gleichzeitig werden vorhandene Mängel als Argument für den generellen Abbau öffentlicher Systeme der sozialen Sicherheit verwendet.
3. Auf der kulturellen Ebene tritt eine Motivationskrise gleichzeitig mit der Erosion bestandswichtiger Traditionen und der Überforderung durch hergebrachte Wertsysteme (siehe etwa die Forderungen nach dem Verzicht auf "unnatürliche Methoden" der Empfängnisverhütung und das Abtreibungsverbot, die von religiösen Organisationen zwar aufgestellt, von der Mehrheit der Gläubigen aber mißachtet werden). Insbesondere das Bildungssystem, das neben der Wissensvermittlung auch die Eingliederung der jungen Bürger in das Gesellschaftssystem bewerkstelligen soll, und damit Statuszuweisungen und hierarchische Differenzierung fördert, gerät in Schwierigkeiten.
4. Auf der politischen Ebene zeigen sich Probleme durch die verschiedenen Anforderungen einerseits der Interessen in- und ausländischer Großunternehmungen und andererseits den Forderungen der Gewerkschaften. Die staatliche Politik gerät in den Widerspruch, einerseits das System aufrechterhalten zu wollen, andererseits aber - bei Strafe des Verlustes der Loyalität der BürgerInnen - die damit verbundenen strukturellen Ungleichgewichte wieder kompensieren zu müssen.

² siehe etwa J. HABERMAS; Legitimationsprobleme im Spätkapitalismus, Suhrkamp Taschenbuch 623, Frankfurt am Main, 1973

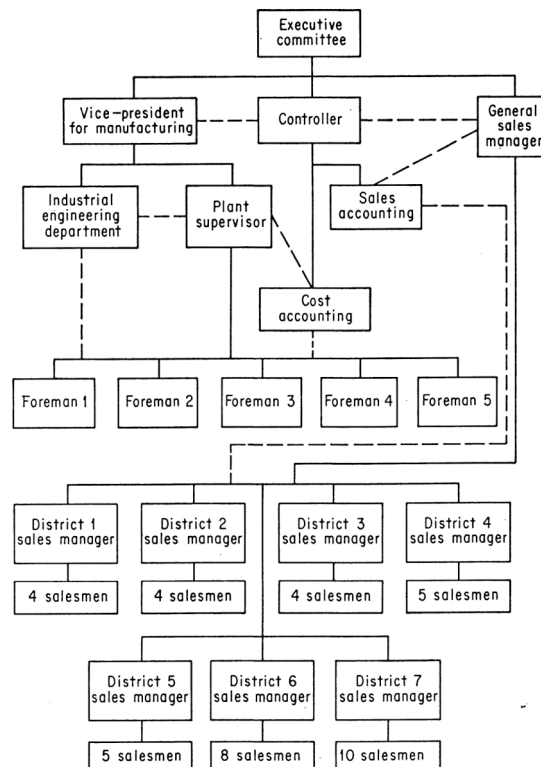


Fig. 3.1. Formal organization of the simulated firm

Abbildung 1: Die formale Organisation eines Unternehmens - Das Bonini-Modell (Bonini, C., Simulation of Information and Decision Systems in the Firm, Englewood Cliffs, New York 1963, p. 30)

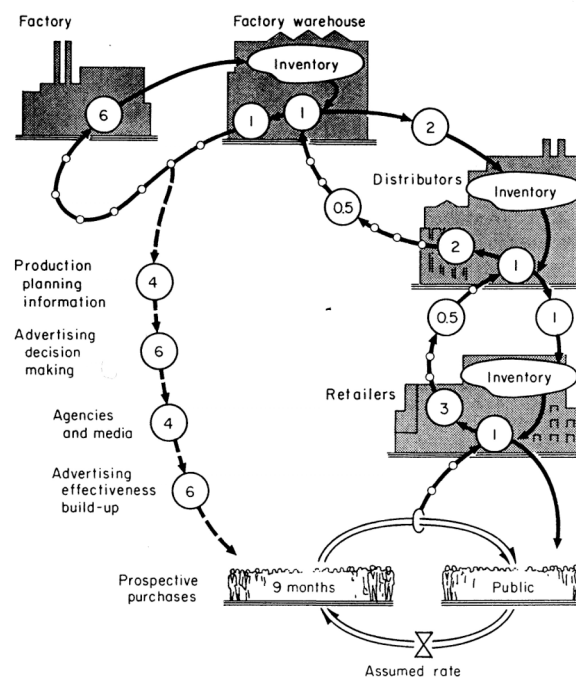


Figure 2-9 Advertising and consumer market.

Abbildung 2: Werbung und Konsumentenmarkt in Jay Forrester's Industrial Dynamics (Quelle: Forrester, J., Industrial Dynamics, Cambridge, Mass. 1961, p. 36)

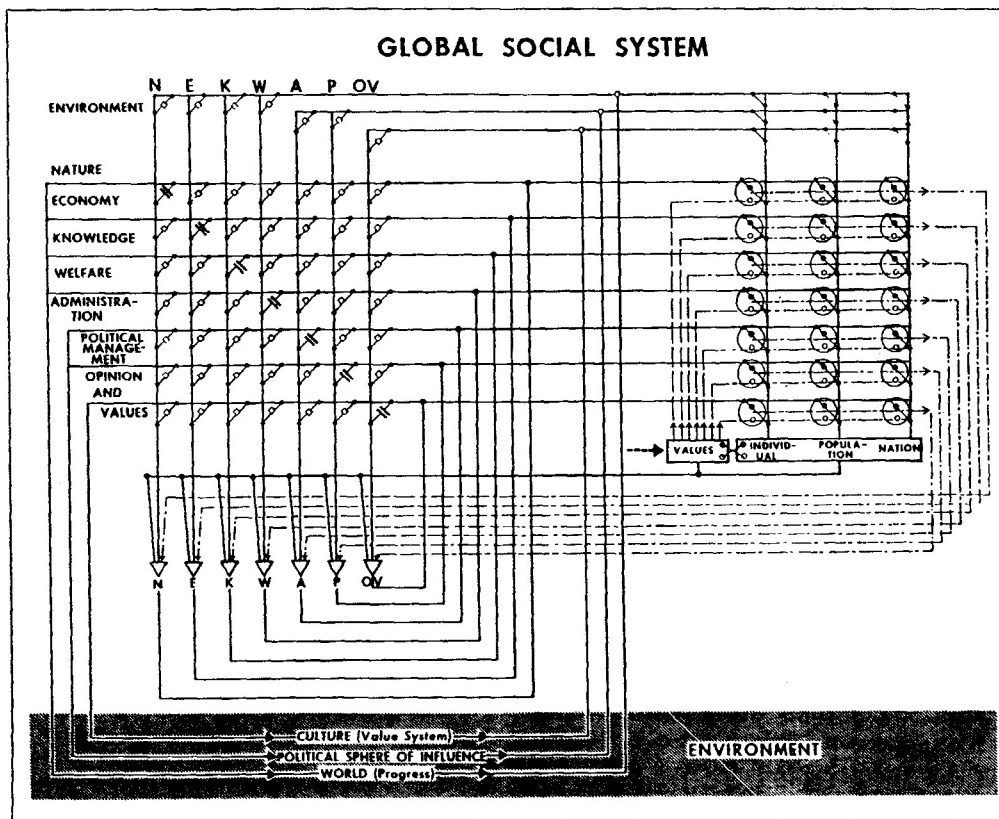


Fig. 7. Generalized input-output matrix for a social system. The representation is similar to the circuit diagrams used in technology. The heavy lines indicate current pathways; the dashed lines, information flows. The squares, analogous to electrical admittances, represent fixed coefficients for the current distribution; the empty circles, desired operating points; and the full circles, actual operating points. The lines between the empty and the full circles indicate the results of comparisons between actual and desired operating points that are fed back to the active elements shown as triangles. These active elements respond to the feedback information by decreasing the gap between actual and desired operating points.

Abbildung 3: Ein globales Gesellschaftssystem

(Quelle: Millendorfer, H., Input-Output Relations between Social Systems, in: Attinger, E. (ed.), Global System Dynamics, Basel, München, New York 1970, p. 165)

1.2. ANWENDUNGSPROBLEME SOZIALKYBERNETISCHER MODELLE

Eine häufige Schwierigkeit, die Reformversuchen entgegensteht, dürfte wohl jene sein, dass wohlmeinende planerische Ansätze im Interesse der Bevölkerungsmehrheit an die Grenzen der kapitalistischen Systemlogik stoßen. Anstelle gesamtgesellschaftlicher Rationalität treten dann oft suboptimale Teillösungen. So versucht die Gesundheitspolitik, die Spitäler durch bessere Kostenrechnung effizienter zu machen, während Präventivmaßnahmen (z.B. Verbesserung der Arbeits- und sonstigen Lebensbedingungen) nur zu einem geringen Teil möglich sind. Die Raumplanung versucht, die durch privatwirtschaftliche Logik entstandenen Entwicklungsgebiete auf einen höheren Standard zu bringen, ohne die dahinterliegenden Faktoren in den Griff bekommen zu können. Sozialkybernetische Modelle des Rechtswesens dienen vorwiegend zur Einsatzoptimierung von Richtern, Gerichtsprozessen, Gefängnissen und Polizei, während die Entstehungsursachen für Kriminalität außer Betracht bleiben.

Den Verkürzungen, denen die praktische Anwendung von Planungsansätzen ausgesetzt ist, entsprechen in den sozialkybernetischen Modellstrukturen häufig **Lücken**, die aus der Interessenslage der Modellbauer erklärt werden können. Beispiele liefern die Abbildungen 1 und 2. Das BONINI-Modell³ entwirft das Bild der innerbetrieblichen Produktion nur bis zum Vorarbeiter (Foreman) hinunter, die Arbeiter selbst kommen im Modell nicht vor. Sie stehen hier mit den Maschinen auf einer Stufe. Abbildung 2 zeigt Jay FORRESTER's Vorstellungen⁴. Er beschränkt sich auf die Beziehungen zwischen den einzelnen Unternehmungen bezüglich Produktion und Verteilung. Die Werbung für Produkte wird insbesondere erwähnt, der Arbeitsmarkt, die Arbeits- und Lebensbedingungen der Menschen bleiben völlig außer Betracht. Die Schaubilder sprechen in diesem Sinne für sich.

Auch die Art der Darstellung, die Auswahl der entsprechenden Variablen, die Vernetzungen geben Auskunft über die Sichtweise der Modellbauer. So sieht etwa H. MILLENDORFER⁵ die Werte (Values) buchstäblich vom Himmel fallen (Abbildung 3). Überdies wird hier die Auffassung von Gesellschaft als Analogon zu einem elektrischen Schaltkreis vertreten, die bereits in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts in den USA eine gewisse Rolle spielte (siehe dazu die Technokratenbewegung unter der ideologischen Führung von Prof. Th. VEBLEN und H. SCOTT - Technical Alliance 1920, Technocracy Inc. 1932).

2. GLOBALE MODELLE

Nach dem Zusammenbruch des sozialistischen Lagers und dem daraus folgenden Abbau der klassischen Konfliktlinien zwischen den beiden gegensätzlichen Gesellschaftssystemen treten neue Probleme, die sogenannten **globalen Probleme**, in den Vordergrund, die für den Fortbestand der Menschheit von entscheidender Bedeutung sind. Viele Autoren gliedern diese Probleme nach den Hauptelementen des interaktiven Zusammenhangs zwischen den Menschen, der Technik (als Vermittlung) und dem natürlichen Umfeld in

- a) am Menschen orientierte Probleme auf der sozio-ökonomischen Ebene,
- b) an der Technik orientierte Probleme der möglichen militärischen Selbstvernichtung der Menschheit und der Verletzlichkeit der Industriegesellschaft, und in
- c) Umweltprobleme.

³ C. P. BONINI, Simulation of Information and Decision Systems in the Firm, Englewood Cliffs, New York 1963

⁴ siehe dazu Jay FORRESTER, Industrial Dynamics, M.I.T.-Press, Cambridge, Mass., 1961

⁵ aus E. O. ATTINGER, Global Systems Dynamics, S. Karger, Basel, München, New York 1970, S. 165

Zwei dieser globalen Probleme (a und c) wurden schon in den siebziger Jahren im Rahmen der Weltmodelle von FORRESTER und MEADOWS mit sozialkybernetischen Methoden bearbeitet. Wir werden daher im folgenden diese Weltmodelle und spätere Weiterentwicklungen darstellen und damit gleichzeitig einige der gängigen Konzepte, Methoden und Modelle der Sozialkybernetik illustrieren, aber auch kritisieren. Für Details wird auf die zitierte Literatur verwiesen.

2.1. DIE MODELLE VON FORRESTER UND MEADOWS

Zunächst einige Bemerkungen zum historischen Hintergrund: Nach Ende des zweiten Weltkriegs war die Diskussion über die Weiterentwicklung der Menschheit von der Furcht vor einer weiteren, mit Atomwaffen geführten Auseinandersetzung überschattet - die Periode des kalten Krieges. Zu Beginn der Siebzigerjahre verringerte sich durch die Politik der Entspannung - d.h. die schrittweise Annäherung der beiden Großmächte USA und UdSSR - die Gefahr eines dritten Weltkrieges. Die Angst vor einer kurz bevorstehenden totalen Vernichtung legte sich. Neue Themen über längerfristige Zukunftsaussichten der Menschheit konnten behandelt werden. Die Zukunftsforschung (Futurologie) etablierte sich als Disziplin an den Universitäten. Gleichzeitig erreichten die sozialen Kosten in den Marktwirtschaften ein Ausmaß, das nicht mehr - wie zuvor - vorwiegend die untersten sozialen Schichten (Arbeiter) betraf, sondern auch die artikulationsfähigeren Schichten der Angestellten. Zunahme der Kriminalität, Umweltverschmutzung, der Vietnam-Krieg sind nur einzelne Beispiele von vielen. Viele Naturwissenschaftler, Physiker, Programmierer, Mathematiker, aber auch Manager wanderten, durch Arbeitslosigkeit und Kriegsforschung gedrängt, in Fachrichtungen mit einem humaneren Image ab.

"Die Konstruktion von Weltmodellen hat ... weltweite Aufmerksamkeit gefunden. Nicht nur der akademische Bereich, sondern auch offizielle Regierungsstellen, internationale Organisationen und die Medien bilden eine potentielle, umfassende Klientel für diese Arbeit".⁶ Bei "Welt II"⁷ und "Welt III"⁸ handelte es sich um mathematische Simulationsmodelle, die in der Programmiersprache DYNAMO abgefaßt wurden. Sie sind wesentlich mit dem Namen Jay FORRESTER⁹ verbunden. Die Modelle umfassen folgende Grundvariablen:

- Kapitalinvestitionen
- Bevölkerung
- natürliche Rohstoffe
- Nahrungsmittelproduktion
- geographischen Raum und
- Umweltverschmutzung

⁶ M. D. WARD und H. GUETZKOW, Integrierte globale Modellkonstruktion: ökonomisches Engineering oder Sozialwissenschaft?, Internationales Institut für vergleichende Gesellschaftsforschung, Wissenschaftszentrum Berlin, p.81 - 104, Berlin (West) 1981, S.1

⁷ J. FORRESTER, World Dynamics, Cambridge, Mass. 1971

⁸ D. MEADOWS, Die Grenzen des Wachstums, Stuttgart, 1972

⁹ Professor Jay FORRESTER baute 1953 den ersten Magnet- oder Matrixspeicher für EDV-Anlagen der ersten Generation (siehe dazu: Grundlagen der Computertechnik, Time-Life Bücher, Amsterdam 1990, 7. deutsche Auflage, 96). Ende der 50er Jahre setzte er als Direktor des Digital Computer Laboratoriums und der Division 6 des Lincoln Laboratoriums am Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.) erstmals Digitalrechner zur Analyse und Simulation *technischer Systeme* ein. Ab 1956 versuchte er mit einer Arbeitsgruppe an der Alfred P. Sloan Managementschule am M.I.T., die bisherigen Erfahrungen auf komplexe *soziale Systeme* anzuwenden. Zunächst wurde seine Methode wegen ihres nunmehrigen Anwendungsbereichs auf Industrieunternehmen unter dem Namen "Industrial Dynamics" bekannt (MIT Press, Cambridge, Mass., London 1961). In Forrester (Principles of Systems, MIT Press, Cambridge, Mass., London 1968) beschrieb er die "Philosophie" seiner Methode im Detail. Nach ihrer Anwendung auf die Entwicklungsproblematik von Städten verschob sich ihr Name zu "Urban Dynamics" (MIT Press, Cambridge, Mass., London 1969). In seinem Buch "World Dynamics" tritt Forrester für den Namen "System Dynamics" (FORRESTER 1971, a. a. O., 13) ein, der sich auf alle komplexen dynamischen Systeme bezieht.

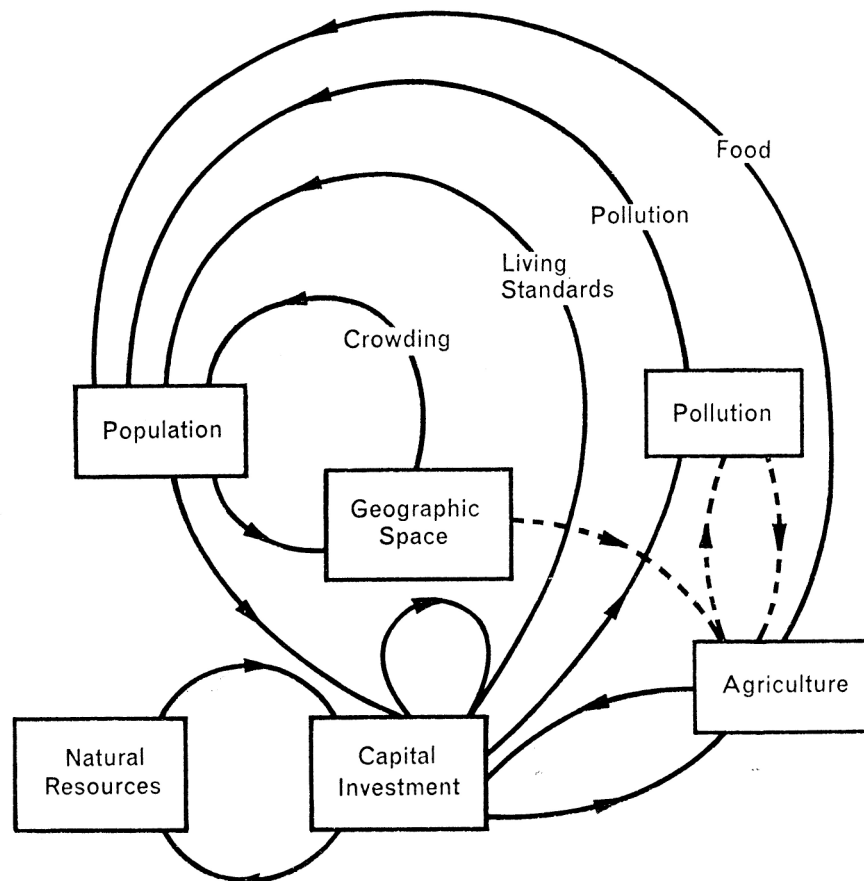


Figure 5. The main feedback loops of the world models. The boxes represent the main sub-systems of the world system. The arrows show the assumed causal links between them. Each of the feedback loops may be traced in detail on the diagrams of the complete world models (Figures 1 and 3). The broken arrows show links included only in World 3

Abbildung 4: Rückkopplungsschleifen in WORLD II und WORLD III
(Quelle: Cole, H. et al., Thinking about the Future, London 1973, p. 26)

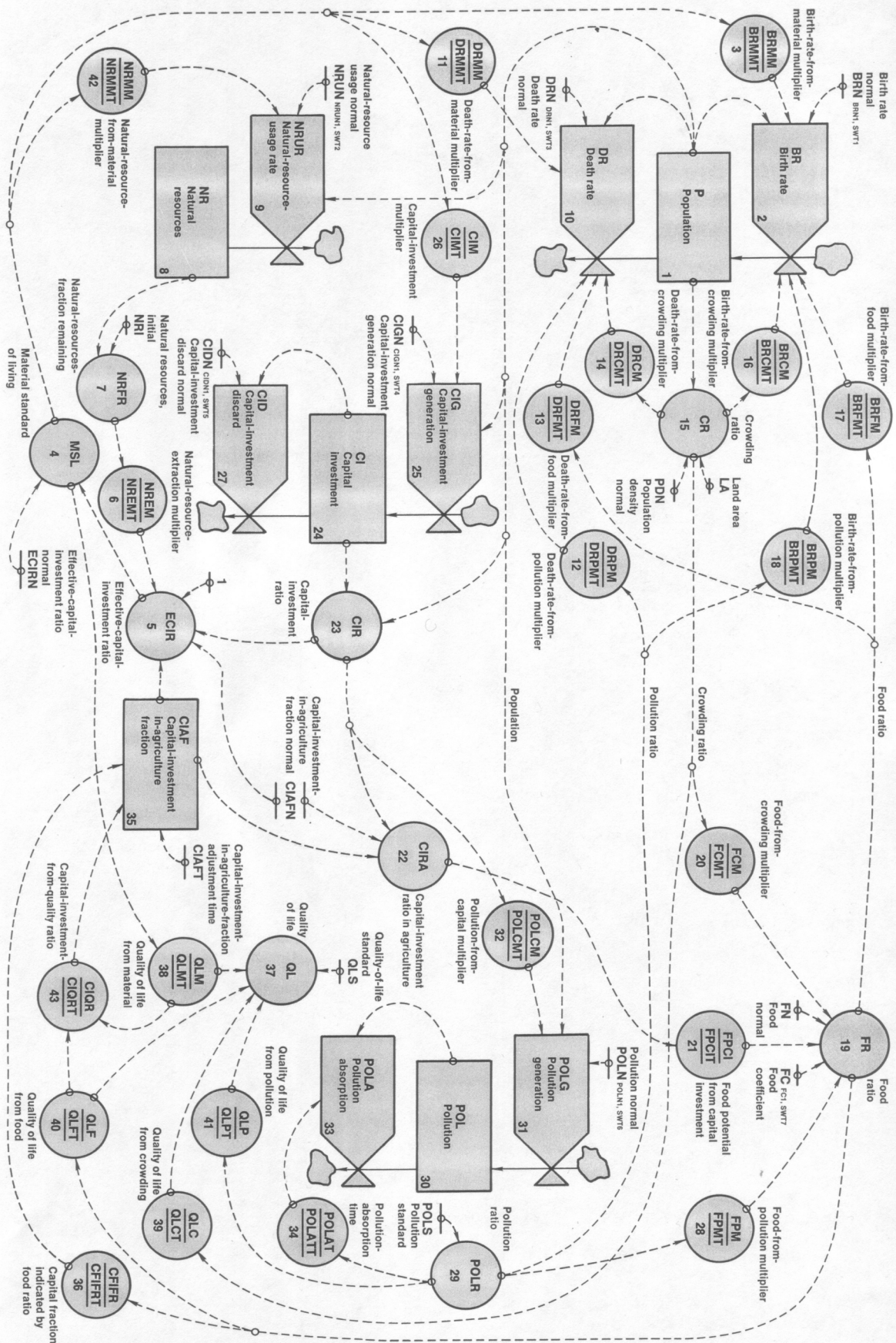


Figure 2-1 Complete diagram of the world model interrelating the five level variables — population, natural resources, capital investment, capital-investment-in-agriculture fraction, and pollution.

Abbildung 5: Vollständiges DYNAMO-Diagramm von WORLD II
(Quelle: Forrester, J., World Dynamics, Cambridge, Mass., 1971, Beilageblatt)

Die einzelnen Hauptvariablen werden über Hilfsgrößen miteinander verbunden. Die Zusammenhänge können in einem **Pfeildiagramm** einfach dargestellt werden (siehe Abbildung 4). Die zentrale Aussage dieser beiden Bücher ist nicht nur, daß exponentielles Wachstum in einer beschränkten Welt nicht ewig dauern kann, sondern daß der Zusammenbruch der Welt, gemessen an der Zahl der Erdbevölkerung, noch innerhalb der nächsten hundert Jahre auf uns zukommen werde, wenn nicht geeignete Gegenmaßnahmen durchgeführt werden, wie z.B.:

- Angleichung der Geburtenrate an die Sterberate ab 1975
- Reduktion der Umweltverschmutzung auf ein Viertel des Wertes von 1970
- Bessere Ausnützung der natürlichen Rohstoffe um den Faktor 4
- Erhöhung der Lebensdauer von Kapitalinvestitionen
- Verringerung der Nettoinvestition ab 1990 auf den Wert Null usw.

Die für die Modellierung verwendete Programmiersprache DYNAMO erlaubte es, ohne großen Lernaufwand Simulationsmodelle aufzubauen. Aus nostalgischen Gründen soll die Syntax und die graphische Darstellung von DYNAMO kurz illustriert werden. (Zur Darstellung von Welt II im DYNAMO - Diagramm siehe Abbildung 5).

2.1.1. Exkurs in die Programmiersprache DYNAMO

DYNAMO - Diagramme bestehen aus einer speziellen Anordnung von Symbolen für **Zustandsgrößen** (levels, stocks, Niveau-, Bestandsgrößen) und (Zu- oder Ab-) **Flüsse** (rates, flows, Veränderungsgrößen), die durch kontinuierliche oder gestrichelte Linien miteinander verbunden werden. Die kontinuierlichen Linien sollen Materialflüsse verkörpern, die gestrichelten Informationsflüsse. Die Symbolisierung der Zustandsgrößen erfolgt über rechteckige Kästchen, flows werden durch "Ventile" dargestellt (siehe Abbildung 6).

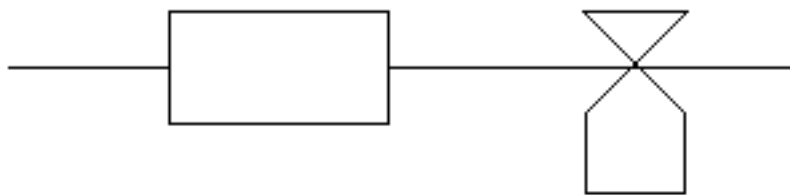


Abbildung 6: Levels und Rates in Dynamo

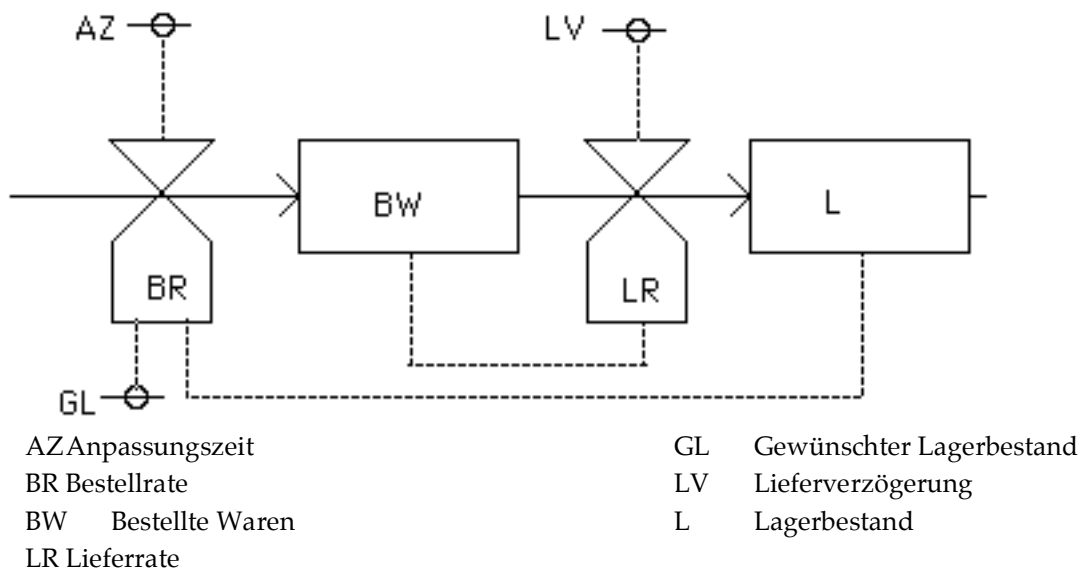


Abbildung 7: Lagerhaltungsbeispiel:

Die Grundgleichungen lauten

$$LR(t) = BW(t) / LV \quad (1)$$

BR(t) = (GL - L(t)) / AZ	(2)
BW(t+1) = BW(t) + BR(t) - LR(t)	(3)
L(t+1) = L(t) + LR(t)	(4)
In DYNAMO lautet die Formulierung der Gleichungen:	
L L.K = L.J+DT*LR.JK	entspricht (4)
L BW.K = BW.J+DT*(BR.JK-LR.JK)	entspricht (3)
R LR.KL = BW.K/LV	entspricht (1)
R BR.KL = (GL-KL)/AZ	entspricht (2)
C LV=10	Definition von Konstanten
C GL=100	
C AZ=7	
N L=LI	Anfangswerte
N BW=BWI	
C LI=100	Konstante
C BWI=70	
PRINT L,BW	Drucke die Variablen L und BW
PLOT L=L/BW=B	Zeichne Diagramme für L und BW
SPEC DT=.25/LENGTH=40/PRTPER=5/PLTPER=1	Wähle DT mit .25, simuliere 40
Zeiteinheiten, drucke nur	jeden 5.Wert, plote jeden
	Wert.

(Details können dem DYNAMO - Manual von A. L. PUGH III, DYNAMO II, Users Manual, Cambridge Mass. 1970 entnommen werden).

2.1.2. Die Aussagen der ersten Weltmodelle

Die beiden Simulationsmodelle beschreiben die Entwicklung der Welt von 1900 bis 2100 unter verschiedenen Nebenbedingungen. Als Ergebnis zeigt sich, daß verschiedene Krisen auftreten, die durch besondere Veränderungen der Parameter im Modell überwunden werden.

Im Standarddurchlauf der beiden Modelle resultiert die **erste Krise** aus der **Erschöpfung der Rohstoffe**. Die fehlenden Rohstoffe führen in "Welt II" zu einem Rückgang des materiellen Lebensstandards, dadurch verhungert ein Teil der Bevölkerung. Im Modell "Welt III" ist der Mechanismus komplizierter. Mit steigendem Rohstoffmangel muß mehr und mehr Kapital in diesem Sektor gebunden werden, sodaß für die Landwirtschaft und Dienstleistungen zu wenig überbleibt. Die Sterberate erhöht sich dadurch, die Bevölkerungszahl der Erde nimmt ab.

In beiden Modellen wurde angenommen, daß die Rohstoffe (einschließlich Energie) bei einem Verbrauch wie im Jahr 1970 zweihundertfünfzig Jahre lang ausreichen würden. Diese Annahmen scheinen problematisch, wie die zahlreichen Kritiker der Weltmodelle¹⁰ behaupten. Danach sei der Rohstoffvorrat der Welt keine fixe Größe, denn durch jede wissenschaftliche und technische Entdeckung könnte letzten Endes das, was heute als Abfall bei der Gewinnung von Rohstoffen betrachtet wird, als neue Rohstoffquelle ausgenutzt werden. Eine Wachstumsrate an Neuentdeckungen von 2,3 Prozent pro Jahr würde genügen, um über die im Modell prognostizierte Krise hinauszukommen. Insbesondere seien die Beschränkungen der Rohölvorräte viel zu niedrig angesetzt. Die Kritiker erwähnen Teersande in den USA, Ölschiefervorkommen in Colorado usw., die von FORRESTER und MEADOWS nicht einbezogen worden wären.

Würde man die Zeit des Vorhandenseins von Rohstoffen auf 500 Jahre hinaufsetzen, so bringt in den Weltmodellen die hohe Industrieproduktion starke **Umweltverschmutzung**, diese hat Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Produktion und danach wieder auf die Todesrate, also **Katastrophe Nr. 2**.

Kritiker setzen an der sehr einfachen Form des Submodells Umwelt an, das nur aus sieben Variablen besteht. Die Kosten für Umweltverschmutzungskontrolle seien weit geringer als üblicherweise angenommen wird. Eine OECD-Untersuchung für den Zeitraum 1971 - 1975 gibt in den USA 1,6 %, für die BRD 1,8 %, für Italien und die Niederlande weniger als 1 % des Bruttosozialproduktes an (ohne feste Abfälle).

¹⁰ siehe etwa H. COLE, C. FREEMAN, M. JAHODA, K. PAVITT, Thinking about the Future, A Critic of the Limits to Growth, Science Policy Research Unit, Sussex University Press, London 1973

In "Welt III" wird Katastrophe Nr. 2 durch eine effizientere Kontrolle der Umweltverschmutzung auf ein Viertel des Wertes von 1970 zumindest hypothetisch gelöst. Nun tritt die **Katastrophe Nr. 3** auf: fallende Grenzerträge bei landwirtschaftlichen Investitionen gemeinsam mit der Abnahme landwirtschaftlich nutzbarer Flächen durch Urbanisierung und Industrialisierung führen zu einem fallenden Pro-Kopf-**Nahrungsmittelniveau**, die Todesraten steigen wieder.

Die Kritiker weisen hier auf den "MALTHUSianismus" der Weltmodelle hin. Thomas Robert MALTHUS, (Englischer Geistlicher und Ökonom, 1766 - 1834, wichtiges Werk: Essay on Population) nahm an, daß die Bevölkerung exponentiell, die landwirtschaftliche Produktion aber nur linear zunehme. Er meinte, daß es für die Landarbeiter vorteilhaft wäre, ihre Löhne niedrigzuhalten, da sie sich dadurch nicht zu sehr vermehren würden, was sie vor einer Hungersnot bewahren würde. Er kam dadurch den Interessen des englischen Landadels entgegen. Schon 1829 wurde Malthus von TH. SADLER in dem Buch "Ireland - its Evils and their Remedies", kritisiert, wo nachgewiesen wird, daß das Elend nicht dort herrscht, wo MALTHUS es will, im Verhältnis zur Bevölkerungszahl, sondern im umgekehrten Verhältnis zu ihr. Auch heute läßt sich diese Beobachtung durchaus wiederholen.

Tatsächlich wären neue Landwirtschaftstechnologien entwickelt worden, mit deren Hilfe eine Weltbevölkerung von mehr als zehn Milliarden ernährt werden könnte. Der Übergang vom Agrar- zum Industriestadium würde den Bevölkerungszuwachs automatisch dämpfen. Die Krisen in der Landwirtschaft seien durch politische Ursachen hervorgerufen, nicht durch chemisch-technische. Auf Weltniveau wäre es im Prinzip möglich, die Landwirtschaft jener Länder auszudehnen, wo die Hektarerträge hoch seien. Aber auch die Kritiker meinen, daß es in dicht besiedelten Gebieten Südostasiens durchaus zu Grenzen der Nahrungsmittelproduktion pro Kopf kommen könnte, da diese Staaten nur schwer Industrieprodukte exportieren könnten, um dafür Nahrungsmittel zu importieren. Die Bevölkerung könne auch nicht so leicht in andere Gebiete auswandern, wie das in Europa im 19. Jahrhundert der Fall war.

Bei der landwirtschaftlichen Produktion scheint auch die Kritik kein Heilmittel zur Abhilfe vorschlagen zu können. Dies entspricht dem derzeitigen Stand der Welternährungssituation, mit permanenten Hungersnöten in Entwicklungsländern, die oft als bitteres Erbe von den imperialistischen Staaten hinterlassen wurde (siehe Indien), und zwar gerade von jenen, die sich jetzt durch "Entwicklungshilfe" um neue Märkte und Rohstofflieferanten bemühen.

Die **4. Krise** entsteht in Welt II unter der Annahme, daß sich durch die hohe Bevölkerungsdichte (rund 5,5 Milliarden Menschen im Jahr 2030, das ist 2,65 mal mehr, als die Weltbevölkerung 1970 betragen hat) die **Lebensqualität** im Jahr 2060 so verschlechtert hat, daß die Bevölkerung durch erhöhte Sterblichkeit wieder abnimmt. Der innere Mechanismus, der diese Abnahme verursachen soll, bleibt in Welt II weitgehend offen. Die Vorstellungen der Autoren könnten sich an Rattenexperimenten bei steigender Populationsdichte orientiert haben. Dort konnte eine Zunahme der Aggressionen, aber auch eine geringere Fruchtbarkeit beobachtet werden. Es bleibt allerdings fraglich, ob dieses Modell auf die Menschen übertragen werden darf.

Im Modell Welt III fehlt die Variable "Lebensqualität". Die Bevölkerung reduziert sich dennoch durch Nahrungsmittelmangel und fehlende Gesundheitsleistungen.

Das Sussex-Team versuchte durch kleine strukturelle Veränderungen des Modells Welt III, die durchaus im Bereich der Expertenschätzungen liegen, die Sensitivität des Modells zu testen. Im Umweltsektor, im Rohstoffsektor und im Bereich der Landwirtschaft wurde ein permanenter technischer Fortschritt von 2 % pro Jahr eingeführt. Das Ergebnis: Die Weltbevölkerung wächst ständig und stagniert schließlich im Jahr 2200 bei 11 Milliarden Menschen. Es treten weder Hungersnöte noch Verschmutzungskrisen auf. Der Standardlauf von Welt II kann jedoch nur eine Bevölkerung von maximal 5 Milliarden Menschen auf kurze Zeit ernähren¹¹.

Aus heutiger Sicht erscheinen die ersten Weltmodelle als allzu vergrößernde Abbilder der heutigen Welt. Die vorhandenen Unterschiede zwischen Nationen und Regionen wurden vernachlässigt, die Asymmetrien zwischen Nord und Süd werden nicht berücksichtigt. Die Probleme des Südens werden nicht gesondert

¹¹ weitere Kritik siehe P. FLEISSNER, Möglichkeiten und Grenzen globaler Simulationsmodelle, in: Österreichische Zeitschrift für Politikwissenschaft, Nr. 4, 1973, S. 375 - 386

hervorgehoben, sondern bloß als Konsequenz der zu großen Weltbevölkerungszahl angesprochen. Die Bevölkerungsdichte erscheint als Variable, die von den sozio-ökonomischen Strukturen weitgehend unabhängig ist¹².

Die im Anschluß an Forrester und Meadows entwickelten Weltmodelle versuchen, diese Einschränkungen der Modellbildung auf verschiedene Weise zu beheben.

2.2. DIE NACHFOLGER VON FORRESTER UND MEADOWS

2.2.1. Das PESTEL - MESAROVIC - Modell

1974 erschien der "Zweite Bericht an den Club of Rome"¹³. Diesem Bericht liegt ein methodisch unterschiedliches Simulationsmodell zugrunde, das als **hierarchisches Mehrebenen-Modell** konzipiert ist (siehe Abbildung 8).

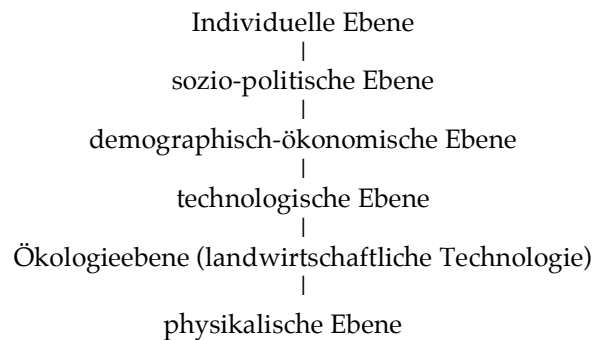


Abbildung 8: Die hierarchischen Strukturen des PESTEL/MESAROVIC-Modells

Das Modell nimmt nicht nur vertikal eine Schichtung an, sondern unterteilt die Welt auch horizontal in 10 Regionen. Soweit mir bekannt ist, war das Modell aber noch nie auf allen Ebenen gleichzeitig durchgerechnet worden. Es existieren nur die Sektoren Demographie, Ökonomie, Energie, Ernährung und Wasserreserven. Das Modell ist außerdem nicht, wie Welt II und III, als Prognoseinstrument gedacht, sondern soll als Entscheidungshilfe für Planer eingesetzt werden. Es ist interaktiv orientiert. Man geht nicht, wie bei FORRESTER und MEADOWS, von einer gegebenen Menge von Anfangsbedingungen und einigen zusätzlichen a-priori festgelegten Entscheidungsmechanismen aus, sondern das Modell wird interaktiv von Zeitperiode zu Zeitperiode neu, von außen anzugebenden Randbedingungen unterworfen. In jeder Zeitperiode kann der Benutzer auf den verschiedenen Ebenen seine Entscheidungen aus den von der Rechenanlage vorgegebenen Möglichkeiten auswählen, erhält zusätzlich die nötigen Informationen ausgedruckt und kann daher rasch im nächsten Schritt die Auswirkungen seiner Entscheidungen studieren.

¹² MÁRMORA L., Ökologie als Leitbild der Nord-Süd-Beziehungen, in: Peripherie Nr. 39/40, 10. Jahrgang, Dez. 1990, 100-126, 103/104.

¹³ MESAROVIC, M., E. PESTEL, Menschheit am Wendepunkt, DVA, Stuttgart 1974

Über dem oben abgebildeten Kausalmodell erheben sich dabei weitere Entscheidungsebenen (siehe Abbildung 9).

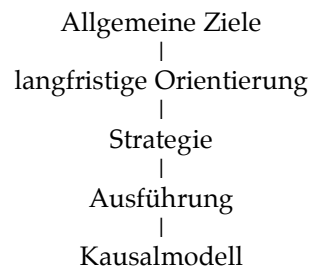


Abbildung 9: Die Entscheidungshierarchie des PESTEL/MESAROVIC-Modells

Fraglich bleibt, an wen sich dieses Modell eigentlich wendet, da keine Weltentscheidungszentrale vorhanden ist, die dieses Modell nützen könnte. Ferner ist die Zuordnung der Länder der Welt zu den zehn Regionen ein für allemal festgelegt. Damit ist auch das jeweilige, zum Zeitpunkt der Modellierung vorhandene Gesellschaftssystem im Modell festgeschrieben und kann nicht mehr verändert werden.

Einige Ergebnisse: das Pro-Kopf-Einkommensverhältnis zwischen westlichen Industrieländern und Lateinamerika wird sich in den nächsten 50 Jahren von 5:1 auf 8:1 erhöhen, gegenüber Südasien auf 20:1.

Geht man vom Ziel aus, ein Verhältnis von 3:1 im Pro-Kopf-Einkommen von Lateinamerika bzw. 5:1 für Südasien bis zum Jahr 2025 zu erreichen, würde man 7.200 Milliarden Dollar benötigen. "Die jährliche Hilfe würde ... schließlich 500 Milliarden Dollar betragen"¹⁴. Dies ist etwa die Höhe des gesamten Bruttosozialprodukts der USA im Jahr 1963, inflationsbedingt. Würde man mit dem Beginn der Hilfeleistungen bis zum Jahr 2000 warten, müßte man insgesamt 3.500 Milliarden Dollar mehr an Hilfe aufbringen, als in einer Variante, wo man schon im Jahr 1980 mit der Hilfe beginnt.

Die Bevölkerungsdichte in China und in Südasien bezogen auf die landwirtschaftlich genutzte Fläche wird im Jahr 2020 etwa acht mal höher liegen, und rascher als in den USA in diesem Jahr steigen. Regionale Hungerkatastrophen zeichnen sich ab.

Waren die ersten Weltmodelle in der Einschätzung der Zukunft von starkem Pessimismus geprägt, zeigt sich dieses Weltmodell im Bezug auf die Zukunftsaussichten der Menschheit relativ neutral. Es wird die Hoffnung zum Ausdruck gebracht, daß durch noch zu schaffende, bzw. bestehende Planungs- und Kriseninstitutionen, durch Entwicklungshilfe und mit Hilfe von Simulationsmodellen Katastrophensituationen vorhergesehen und erfolgreich bekämpft werden können.

2.2.2. Das **BARILOCHE-Modell**

Mit völlig anderer Orientierung als die ersten Modelle konstruierte in Bariloche (Argentinien) ein interdisziplinäres Forschungsteam ein Weltmodell aus der Sicht eines Entwicklungslandes. A. HERRERA, der Chef der Gruppe, argumentierte damit, daß zwei Drittel der Menschheit hungern, während die noch verbleibende Minorität an den Folgen des Überkonsums zu leiden beginne. Das Wirtschaftswachstum entfremde die Menschen immer mehr und zerstöre die menschliche und natürliche Umwelt. Ungleichheiten in der Versorgung existierten nicht nur zwischen entwickelten Ländern und Entwicklungsländern, sondern auch innerhalb der Dritten Welt. Privilegierte Minderheiten genießen dort ein Konsumniveau, das dem der Oberschichten der entwickelten Länder entspricht, während beträchtliche Bevölkerungsteile nicht einmal ihre elementarsten Bedürfnisse befriedigen könnten¹⁵.

¹⁴ a.a.O., S. 61

¹⁵ siehe dazu: Latin American World-Model, Proceedings of the second IASA-Symposium on Global Modelling, CP-76-8, Laxenburg 1976, bzw. A. O. HERRERA, H. SCOLNIK et al., Catastrophe or New Society? A Latin American World-Model, International Development Research, Ottawa, Canada, 1976; HERRERA, A. u. a., Die Grenzen des Elende - Das Bariloche-Modell. Frankfurt am Main 1976.

In den entwickelten Ländern werden gegenwärtig zwei Theorien vertreten:

1. Die Entwicklungsländer hätten aufgrund "natürlicher Barrieren" keine Chance, je den Lebensstandard der entwickelten Länder zu erreichen, man müsse zwar solidarisch über Entwicklungshilfe die Not lindern, die Industrialisierung der Entwicklungsländer würde aber die ganze Welt in eine Umweltkatastrophe führen.
2. Um die Ernährungskatastrophe zu verhindern, soll die Bevölkerungsexplosion durch staatliche Maßnahmen in den Entwicklungsländern eingedämmt werden. Bei diesem neo-malthusianischen Konzept ist Umweltverschmutzungskontrolle nur eine unwesentliche Korrekturmaßnahme.

Beide Ansichten würden die gegenwärtigen Verteilungsunterschiede kaum reduzieren. Auch die humanistische Varianten "zurück zur Natur", "Small is beautiful" oder "Soft Technology" spiegeln die Interessen einer Gesellschaft wider, die unter den negativen Effekten des Überkonsums, der Entfremdung, der Technisierung und der Unwirtlichkeit der Städte leide, meint HERRERA. Es werde dabei übersehen, daß die Gefahr nicht in der verstärkten Anwendung des technischen Fortschritts liege, sondern in der Art und Weise seines gesellschaftlichen Gebrauchs. Die Kräfte, die einer harmonischen Menschheitsentwicklung entgegenstünden, seien nicht physischer, sondern sozio-politischer Natur und würden von den gegenwärtigen Machtverteilungen in- bzw. zwischen den Ländern abhängen. In den Entwicklungsländern, die ja Hauptopfer dieser Situation seien, wachse daher das Bedürfnis nach Veränderung der gesellschaftlichen Organisation und der internationalen Beziehungen, die eine weitere Entwicklung der Menschheit aufhalten würde.

HERRERA leitet folgende sechs Thesen aus diesen allgemeinen Aussagen ab:

1. Die in den bisherigen Weltmodellen vorhergesagten Katastrophen bilden für einen großen Teil der Menschheit schon heute die Realität. Es ist nicht nötig, auf die Katastrophen in 80 bis 100 Jahren zu warten.
2. Die destruktive und irrationale Verwendung von Ressourcen und die zunehmende Umweltschädigung können nicht durch Reformmaßnahmen gestoppt werden, sondern nur durch die Schaffung einer neuen Gesellschaft, die mit ihrer Umwelt verträglich ist.
3. Keine Politik der Umweltkontrolle hat Aussicht auf Verwirklichung, solange nicht jeder Mensch einen akzeptablen Lebensstandard erreicht hat.
4. Die privilegierten Teile der Menschheit müssen ihre ökonomischen Wachstumsraten reduzieren, um den Entfremdungseffekt des Konsums, dem Druck auf die natürlichen Rohstoffe Einhalt zu gebieten.
5. Die entwickelten Länder sollten einen Teil ihres ökonomischen Überschusses an die Entwicklungsländer abtreten, damit diese ihre Stagnation überwinden könnten, die ja teilweise das Ergebnis der früheren oder noch immer andauernden Ausbeutung darstellt.
6. Die rationellste Methode, das Bevölkerungswachstum zu kontrollieren, besteht in der Verbesserung der allgemeinen Lebensbedingungen.

Ein Modell der Weltentwicklung müsse daher nach anderen Prinzipien als bisher konstruiert werden. Ziel der Entwicklung sei eine gleiche Weltgesellschaft. Ihr Prinzip sei das unaufhebbare Recht jedes Menschen auf Nahrung, Gesundheit, Wohnung und Erziehung. Erst die Erfüllung dieser Grundbedürfnisse ermögliche die Partizipation an der menschlichen Gesellschaft, unabhängig von jeder kulturellen, rassischen oder geschlechtsspezifischen Zugehörigkeit. Mit den über die Grundbedürfnisse hinausgehenden Bedürfnisse der Menschen bräuchte sich ein Entwicklungsmodell nicht zu beschäftigen. Herrera verlangt neben der materiellen Sicherheit auch eine Verstärkung des demokratischen Elements: Jedes Individuum muß an allen gesellschaftlichen Entscheidungen vollen Anteil haben. Die im Modell dargestellte Gesellschaft soll keine Konsumgesellschaft mehr sein, die These vom Konsum als Wert an sich müsse aufgegeben werden.

Die argentinische Gruppe verwendete daher keine deskriptive Methode, wie sie die früheren Modelle vorwiegend benützten, sondern ging **normativ** vor. Dem entspricht als mathematisches Verfahren ein **Optimierungsmodell** anstelle eines Simulationsmodells. Das Bruttonationalprodukt jeder Region wird in 5 Sektoren der Entstehungsseite unterteilt (Ernährung, Wohnen, Bildung, Konsum und Investitionen). Zusätzliche Variablen sind: Arbeitskräfte, Bevölkerung, Kapitalbestand, sonstiger Konsum und als zu maximierende Zielgröße die Lebenserwartung.

Zusätzlich zu den oben angeführten Variablen existiert im Modell ein System relativer Preise. Das Modell läuft ab 1960 zunächst deskriptiv. Ab 1980 wird das Modell als Optimierungsmodell eingesetzt. Nebenbedingungen, die vor allem relativ realistische Veränderungsbeschränkungen zwischen aufeinanderfolgenden Jahren enthalten, schließen die mathematische Formulierung des Optimierungsmodells ab. Die wichtigsten Annahmen der Modellkonstrukteure sind:

1. Die landwirtschaftliche Bevölkerung entwickelt sich monoton nicht wachsend.
2. Die täglichen pro-Kopf-Kalorien beschränken sich auf 3.000.
3. Der Konsumsektor darf 42 % des Bruttoinlandprodukts nicht überschreiten.
4. Der Bildungssektor darf höchstens um 10 % pro Jahr wachsen.
5. Die Beschäftigtenstruktur darf sich pro Jahr nicht mehr als um 2 % verändern.
6. Analoges gilt für die Kapitalstruktur mit 6 % und für die relativen Preise mit 1 %.
7. Die Lebenserwartung ist monoton nicht fallend.

Folgende Hauptergebnisse lassen sich ablesen: In den entwickelten Ländern ist die Befriedigung aller oben angeführten Grundbedürfnisse schon in den ersten Jahren nach Beginn der Optimierung erreicht. In Lateinamerika können die Grundbedürfnisse erst nach rund 40 Jahren befriedigt werden, wobei aber Ernährung, Gesundheit und Bildung schon vorher auf einen entsprechenden Standard gebracht wären. Die Bevölkerung Lateinamerikas, die in den Siebzigerjahren um etwa 2,5 % pro Jahr gewachsen ist, würde im Jahr 2020 nur noch mit 1 % wachsen. Wenige Jahre später würde das Wachstum auf 0,6 %, und danach auf Null fallen. Entsprechend werde die Geburtenrate von 37,5 (1970) auf 26,8 (2000) und auf 13,8 (2024) je 1.000 Einwohner fallen, um danach annähernd konstant zu bleiben. Die Kindersterblichkeit (68 Tote auf 1.000 Lebendgeburten) soll um 2000 den Wert 30 erreichen, der dem Wert der entwickelten Welt schon nahe wäre.

Die Modellrechnungen zeigen, daß sowohl das Bevölkerungswachstum wie auch die Gesundheitsbedingungen durch die Verbesserungen der materiellen Lebensbedingungen effektiv kontrolliert werden können. Weiters wird angenommen, daß, wenn in einer Region die Grundbedürfnisse erfüllt sind, die Wirtschaftswachstumsrate reduziert wird, damit Überkonsum vermieden werden kann. Das Modell sieht für die entwickelten Länder eine Verdoppelung des Konsums in den Achtzigerjahren vor, ein bescheidenes, aber sozial akzeptierbares Ziel, das mit der Aufrechterhaltung eines vernünftigen Wirtschaftswachstums verträglich ist. Dieselben Annahmen werden auch für Lateinamerika nach Erreichen der Basisbedürfnisse getroffen, allerdings mit höherer Zuwachsrates, um die noch bestehenden Ungleichheiten zu korrigieren. Für Afrika und Asien zeigt sich jedoch, daß diese Regionen in einer vernünftigen Zeitperiode nicht imstande sind, die Grundbedürfnisse zu erfüllen. Obwohl die Wirtschaft beider Regionen zunächst wächst, fallen die Wohlfahrtsindikatoren nach kurzer Zeit wieder ab. Die Kosten zur Kultivierung weiteren Ackerlandes werden zu groß und die Wirtschaft kollabiert.

Um zu sehen, ob durch **Entwicklungshilfe** der entwickelten Länder an Afrika und Asien eine Verbesserung der Situation entstehen kann, wurden weitere Simulationen durchgeführt. Dabei wurden folgende Annahmen getroffen:

1. Die Entwicklungshilfe besteht aus Nettotransfers, keinen Krediten. Die Zusammensetzung der Hilfe ist nicht spezifiziert.
2. Die Höhe der Hilfe übersteigt nicht 2 % des Brutto-Nationalprodukts der entwickelten Länder.
3. Der Anteil der Hilfe ist der Bevölkerung direkt, der Lebenserwartung dagegen indirekt proportional.
4. Das Hilfsprogramm beginnt 1980 mit 0,2 % des Bruttonationalprodukts und erreicht 1990 2 % des Bruttonationalprodukts.

Mit diesen Maßnahmen würde Afrika seine Grundbedürfnisse in ca. 65 Jahren, Asien die seinen in ca. 57 Jahren sättigen können. Das Modell zeigt, daß eine Entwicklungshilfe in der halben Höhe der Rüstungsausgaben mehr als die Hälfte der Menschheit von ihrem gegenwärtigen materiellen Elend befreien könnte.

Die Kritiker bemerken, daß dieses Modell wohl als abstraktes Beweismittel für das theoretische Vorhandensein des wirtschaftlichen Potentials der Entwicklungsländer eingesetzt werden könne, leider werde jedoch der Übergang zu einer planbaren Ökonomie (auf den es wesentlich ankäme nur kurz behandelt. Hier dürften die wesentliche Schwierigkeit der Anwendung des Modells liegen. Einige

Forderungen und a-priori Annahmen, die vor allem aus der Negation aller Mißstände entstanden sein dürften, sollen hier zitiert werden: "Als alternatives Modell wird hier ein Modell einer sozialistischen, demokratischen, auf vollständiger Partizipation beruhenden "self-managed" und "self-governed" Gesellschaft vorgeschlagen, die aus freien, gleichen, schöpferischen und verantwortungsvollen Menschen zusammengesetzt ist. Wir sprechen von einer sozialistischen Gesellschaft, wobei wir das Risiko auf uns nehmen, einen Ausdruck mit variabler und widersprüchlicher Bedeutung zu verwenden. Es wird ein System vorgeschlagen, in dem direkte Demokratie auf unmittelbaren und begrenzten Managementniveaus, und repräsentative Demokratie für sehr allgemeine und vermittelte Probleme angewendet wird ... Der Wert des sozialistischen Konzepts als Vorschlag für eine neue Gesellschaftsordnung wird so reich und fruchtbar sein, wie freie Menschen es wünschen ... Die Menschen sind nicht länger amorphe Objekte, Spielzeuge und Werkzeuge des Geschichtsprozesses und anderer Menschen, sondern werden Subjekte, die an der Gesamtheit von Rationalität, Freiheit, Spontaneität, Gleichheit und Verantwortlichkeit Anteil haben. Die Gesellschaft basiert auf den Rechten jeder Person auf Anerkennung und Entwicklung ihrer fundamentalen Fähigkeiten an Vernunft, Autonomie, Verschiedenheit, Kreativität und freier Aktualisierung ihrer Bedürfnisse und Möglichkeiten innerhalb der Gemeinschaft".

Waren die FORRESTER/MEADOWS-Modelle stark auf die Probleme der Ressourcenverknappung orientiert, erkannte das Bariloche-Modell demgegenüber keinerlei "physikalisch-natürliche" Wachstumsgrenzen an, die nicht durch politischen Willen und technologische Entwicklung überwindbar gewesen wären und unterschätzte somit ganz offensichtlich die tatsächlichen ökologischen Gefährdungen".¹⁶ Vom heutigen Standpunkt aus lag hier eine Polarisierung der Sichtweisen vor, die zu einem unlösbaren Dilemma führte: Beide Lösungsansätze führen in die Katastrophe. Ein Nullwachstum der Weltwirtschaft würde zu einer Explosion von Konflikten um die Verteilung des Reichtums führen, eine Fortsetzung des Wachstums - wie im Bariloche-Modell vorgesehen - jedoch zur Zerstörung der Umwelt und der Rohstoffbasis und damit zur Verschärfung globaler Destruktionspotentiale.

2.2.3. Das Modell MOIRA

MOIRA, benannt nach der griechischen Göttin des Schicksals, ist ein Modell internationaler Beziehungen in der Landwirtschaft. Es entstand im Rahmen des Projekts "Food for a Doubling World Population" unter der Leitung von Prof. LINNEMANN¹⁷. Die Struktur des Modells findet sich in Abbildung 10. Die Autoren weisen auf folgende Probleme hin: Das Modell ist sehr empfindlich auf Veränderungen des Wirtschaftswachstums und der Einkommensverteilung außerhalb der

¹⁶ MÁRMORA L., a.a.O., 104

¹⁷ Details findet man in: A. LINNEMANN, J. DE HOOGH, M. KEYZER und H. VAN HEEMST, MOIRA-Model of International Relations in Agriculture, North Holland, Amsterdam, 1979.

Landwirtschaft. Eine Reduktion der wirtschaftlichen Wachstumsrate auf die Hälfte würde viel niedrigere Marktpreise in der Landwirtschaft erzeugen und den Hunger in der Welt um 35 % erhöhen. Das Bevölkerungswachstum beeinflusst die Ergebnisse ebenfalls. Nimmt man nur halbes Bevölkerungswachstum verglichen mit dem Standardlauf an, kann der Hunger in der Welt um 30 % reduziert werden.

Die Autoren schlagen folgende Maßnahmen vor: Würde man in den reichen Ländern den Nahrungsmittelkonsum reduzieren, würden niedrigere Weltmarktpreise entstehen, die nicht zu einer Verbesserung des Nahrungsmittelangebots gerade in diesen Ländern führen würden, in denen der Hunger herrscht. Würden die reichen Länder Nahrungsmittelkäufe für die Armen in der Höhe von ungefähr 0,5% des Bruttonationalprodukts finanzieren, könnte dieses Szenario den Hunger abschaffen. Wichtige Voraussetzung ist dabei, daß die Nahrungsmittelproduktion durch diese Maßnahme wirklich stimuliert wird. Durch internationale Aktionen müßten die Weltmarktpreise hochgehalten werden. Würde man den Nahrungsmittelhandel liberalisieren, könnten negative Effekte für den Hunger in der Welt entstehen. Die Weltmarktpreise würden fallen, die Produktion an Nahrungsmitteln in den Entwicklungsländern würde ebenfalls fallen und der Hunger würde steigen.

2.2.4. Das SARU-Modell

Das Modell ist ein Ergebnis der Arbeit der Systems Analysis Research Unit (SARU) im englischen Umweltministerium. Peter C. ROBERTS leitete diese Gruppe. Es wurde konstruiert, um die Implikationen einer nationalen und internationalen Politik auf langfristige Trends in Umwelt und Gesellschaft zu studieren. Der Ökonomieteil des Modells basiert auf neoklassischen Überlegungen¹⁸. Zur Grundstruktur siehe die Abbildungen 11 und 12.

2.2.5. Weitere Modelle

Das **FUGI- Modell** entstand in der Zusammenarbeit mit verschiedenen Gruppen, die in der ganzen Welt verstreut sind. Es basiert auf Input-Output Techniken¹⁹.

Das **Weltmodell der Vereinten Nationen** entstand unter der Leitung des Ökonomenobelpreisträgers Wassily W. LEONTIEF²⁰.

Speziell auf dem Sektor der **internationalen Politik** sind interessante Modelle entwickelt worden, die auf die Abrüstungsfrage hinzielen. Klassisch ist dabei der Ansatz von

RICHARDSON²¹ geworden, der folgende mathematische Grundstruktur enthält:

$$\Delta Y = l.X - b.Y + h$$

$$\Delta X = k.Y - a.X + g$$

wobei Y und X die Rüstung zweier feindlicher Nationen (meist gemessen als Militärausgaben), ΔX und ΔY die entsprechenden Veränderungen, l und k die "Bedrohungs"-Parameter, a.X und b.Y wirtschaftliche Erschöpfungs-Faktoren sind und g und h historische Zwistigkeiten oder Feindseligkeiten zwischen zwei Nationen darstellen ... Das Modell ist mit Daten für die USA (X) und die UdSSR (Y) empirisch geschätzt worden²².

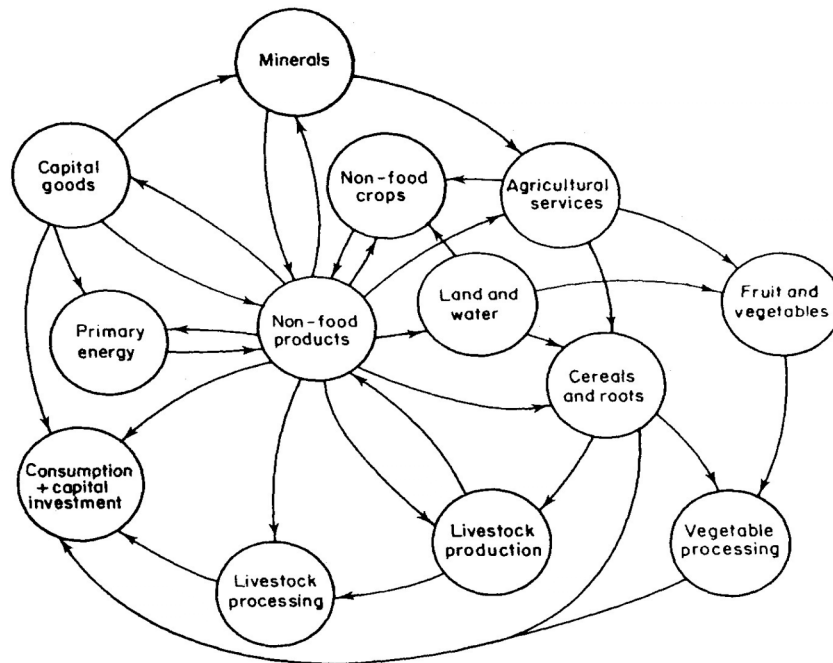
¹⁸ siehe dazu D. MEADOWS, J. RICHARDSON und G. BRUCKMANN, Groping in the Dark, The First Decade of Global Modelling, S. 71 und 72

¹⁹ siehe dazu Y. KAYA, A. ONISHI, Y. SUZUKI et al., Report on Project FUGI - Future of Global Interdependence, Fifth Global Modelling Conference, IIASA, Laxenburg, 1977

²⁰ siehe dazu W. LEONTIEF, A. CARTER, P. PETRI, The Future of the World Economy, A United Nations Study, Oxford University Press, New York 1977

²¹ L. F. RICHARDSON, Arms and Insecurity, Bockswood, Pittsburg, Pa. 1960

²² siehe M. D. WARD, H. GUETZKOW, Integrierte globale Modellkonstruktion: Ökonomisches Engineering oder Sozialwissenschaft? Wissenschaftszentrum Berlin, Internationales Institut für Vergleichende Gesellschaftsforschung, IIVG/p 81 - 104, Berlin (West), 1981



Note 1 The sectors feed each other indirectly via stocks.

Note 2 "Capital investment" is distributed to all the sectors according to a profitability criterion.

Note 3 Minor transactions are omitted for simplicity.

Abbildung 11: Die Verflechtungen der Subsektoren im SARU-Modell
(Quelle: siehe Abb. 10 oben)

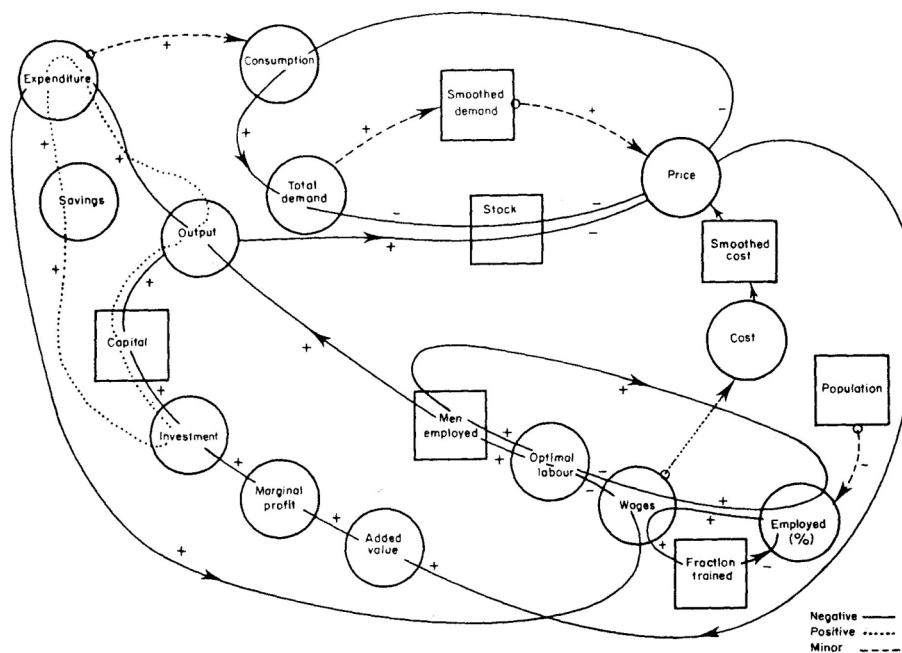


Figure 15. The principal variables and dominant feedback loops in the sectoral structure of SARUM. (Reproduced with the permission of the Controller of Her Britannic Majesty's Stationery Office from SARU staff, 1977, p. 23)

Abbildung 11: Die Hauptvariablen im SARU-Modell
(Quelle: siehe Abb. 10 oben)

Diese Ansätze wurden an der Universität Stanford wesentlich erweitert. Als methodischer Rahmen werden spieltheoretische Grundlagen benützt. Ex-post wurden für die Länder Großbritannien, Frankreich, Deutschland, Italien, Russland und Österreich-Ungarn ausgedehnte Datensammlungen für die Zeit von 1870 bis 1914 erhoben. Das erste Modell, das konstruiert wurde, behandelte Interessenskonflikte geographischer, ökonomischer, politischer und militärischer Natur zwischen diesen Ländern. Es wurde als dynamisches Modell mit 15 Gleichungen und 5 grundlegenden endogenen Variablen (Kolonialgebiet, militärische Ressourcen, Intensität von Schnittstellen - Heftigkeit kolonialer Konflikte, Allianzen und gewalttätiges Verhalten) entwickelt²³ (Abbildung 13).

Das Wissenschaftszentrum Berlin (siehe A. BREMER, T. R. CUSACK, K. W. DEUTSCH, B. M. POLLINS, U. WIDMAIER, usw.) stellte ein umfassendes sozio-politisches Globalmodell fertig, das sich aus 25 Staaten zusammengesetzt. Die Studie behandelt sowohl innerstaatliche Prozesse, wie z.B. Ressourcenallokation oder Entstehung und Aufrechterhaltung politischer Legitimität (Unterstützung), aber auch internationale Probleme wie Konflikt und Kooperation bzw. einige Aspekte der internationalen politischen Ökonomie²⁴.

2.2.6. Neuere Diskussionen zur langfristigen Entwicklung

Nachdem in den 70er Jahren der Einfluß der sogenannten "Globalisten" ("Wir sitzen alle in einem Boot") gegenüber den Anhängern einer Sicht "Das Boot ist voll" eher zurückgegangen war, wurden in der Mitte der 80er Jahre im BRUNDTLANDT-Bericht²⁵ die bisherigen Diskussionsschwerpunkte und Bewertungen verschoben²⁶:

1. Er knüpft an die Tradition der Globalisten an, ohne die vorhandenen Macht- und sozialen Ungleichgewichte zu verschleiern.
2. Die Ökologieproblematik wird nicht auf den Gesichtspunkt der Ressourcenverknappung verengt, sondern als systemisches und globales Problem begriffen.
3. Er führt den Begriff der "nachhaltigen" oder "dauerhaften" Entwicklung (sustainable development) ein und läßt dadurch die traditionellen Polarisierungen hinter sich.

Umweltzerstörung wird nun im Gegensatz zum BARILOCHE-Modell nicht mehr als Randproblem gesehen, auch nicht nur als ein Problem der Industrieländer alleine. Umweltzerstörung gilt nun nicht mehr als Folge der Armut, sondern auch und vielmehr als ihre Ursache (Dürre in der Sahel-Zone). Im Gegensatz zum FORRESTER/MEADOWS-Modell wird Wachstum als notwendig erachtet und Armut als Hauptursache der Bevölkerungszunahme angenommen.

Nachhaltige Entwicklung wird von beiden Polen, von Armut und Reichtum, gleichzeitig bedroht. Eine Strategie der Befriedigung der Grundbedürfnisse (also ein Minimum an quantitativem Wachstum) müsse mit einer Strategie des qualitativen Wachstums (also ein Maximum für das quantitative Wachstum) verbunden werden.

Die sogenannten **Modernisierungstheorien**, die den Weg der entwickelten Länder nachzuahmen vorschlagen, werden als Sackgasse bezeichnet, die später aufgekommenen **Dependenztheorien**, die zu einer vom Weltmarkt abgekoppelte Entwicklung des Binnenmarktes raten, werden wegen ihres offensichtlichen Scheiterns abgelehnt, also **weder Nachahmung der Industrieländer noch Abkopplung von ihnen**.

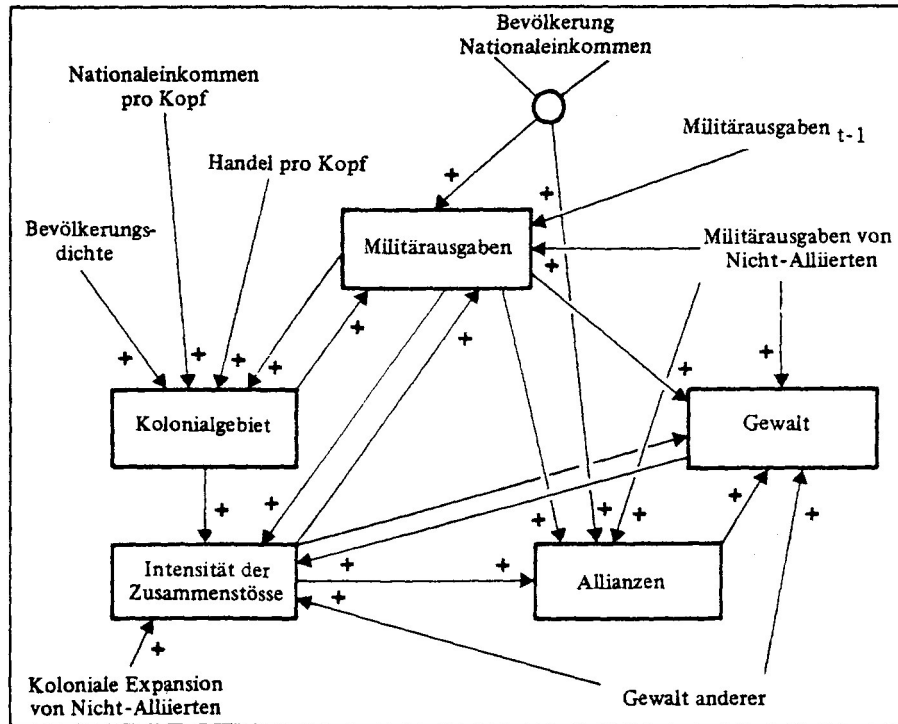
²³ siehe N. CHOUCRI und R. C. NORTH, Nations in Conflict, The MIT-Press, Cambridge, Mass., 1975

²⁴ M. WARD und H. GUETZKOW, a.a.O., S. 20

²⁵ Hauff, V. (Hg.), Unsere gemeinsame Zukunft. Der BRUNDTLANDT -Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung, Greven 1987. Der Bericht wurde auf Beschluß der UN-Generalversammlung von der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung unter dem Vorsitz der norwegischen Ministerpräsidentin Gro Harlem BRUNDTLANDT erstellt.

²⁶ MÁRMORA L., a.a.O., 105

Figur 2: Schematische Darstellung des Modells "Nationen im Konflikt"*



$$\text{Kolonialbereich} = \alpha_1 + \beta_1 (\text{Bevölkerungsdichte}) + \beta_2 (\text{Nationaleinkommen pro Kopf}) + \beta_3 (\text{Handel pro Kopf}) + \beta_4 (\text{Militärausgaben}) + \mu_1.$$

$$\text{Intensität der Zusammenstöße} = \alpha_2 + \beta_5 (\text{Kolonialgebiet}) + \beta_6 (\text{Militärausgaben}) + \beta_7 (\text{Kolonialgebiet der Nicht-Alliierten}) + \beta_8 (\text{Gewaltverhalten}) + \beta_9 (\text{Gewalt anderer}) + \mu_2.$$

$$\text{Militärausgaben} = \alpha_3 + \beta_{10} (\text{Militärausgaben}_{t-1}) + \beta_{11} (\text{Militärausgaben der Nicht-Alliierten}) + \beta_{12} (\text{Intensität der Zusammenstöße}) + \beta_{13} (\text{Kolonialgebiet}) + \beta_{14} (\text{Bevölkerung mal Nationaleinkommen}) + \mu_3.$$

$$\text{Allianzen} = \alpha_4 + \beta_{15} (\text{Militärausgaben}) + \beta_{16} (\text{Intensität der Zusammenstöße}) + \beta_{17} (\text{Militärausgaben der Nicht-Alliierten}) + \beta_{18} (\text{Bevölkerung mal Nationaleinkommen}) + \mu_4.$$

$$\text{Gewalt} = \alpha_5 + \beta_{19} (\text{Intensität der Zusammenstöße}) + \beta_{20} (\text{Militärausgaben}) + \beta_{21} (\text{Militärausgaben der Nicht-Alliierten}) + \beta_{22} (\text{Allianzen}) + \beta_{23} (\text{Gewalt anderer}) + \mu_5.$$

* direkt übernommen aus Choucri und North (1975: 168 – 169)

Abbildung 13: Schematische Darstellung des Modells "Nationen im Konflikt"
(Quelle: Choucri, N. and R. C. North, Global Simulations Models: A Comparative Study, New York 1975, pp. 168-169)

Die Vorteile des BRUNDTLAND-Berichts, nämlich der Versuch, zu einem breiten Konsens zur Überwindung der früheren Polarisierungen zu gelangen, sind gleichzeitig die Grundlage für seine Schwächen:

1. Es wird nicht erläutert, wer welche Kosten des Übergangs zu einer nachhaltigen Entwicklung tragen wird müssen, es ist unklar, mit welcher Strategie auf welche Interessensgruppe reagiert werden soll. Der Umverteilungsprozeß soll sich nur auf Zuwächse, nicht aber auf die Höhe der Einkommen selbst, oder auf Vermögen beziehen. Weder kommen eindeutige Aussagen zur Geburtenbeschränkung noch zur Atomenergie vor.
2. Trotz einer Milderung der Technologiegläubigkeit der 50er und 60er Jahre erwartet der Bericht Fortschritte von der zukünftigen Umwelt- und Energietechnik, und ist optimistisch, da er von einer leider nur vorübergehenden Phase der Entkopplung von Energieverbrauch und Wirtschaftswachstum in den entwickelten Ländern ausgeht.
3. Es wird nicht zwischen den sehr unterschiedlichen Strategien einer passiven, ressourcenintensiven, und einer aktiven, tendenziell ressourcenschonenden Weltmarktintegration unterschieden, es wird daher nicht klar, wie nachhaltiges Wirtschaften für die Entwicklungsländer konkret erreicht werden kann.

Einer der prominenten Kritiker des BRUNDTLAND-Berichts ist Ernst Ulrich von WEIZSÄCKER. Er läßt in seinem Buch *Erdpolitik*²⁷ diesen Bericht in zweierlei Hinsicht weit hinter sich:

1. Er schlägt eine internationale Klimakonvention und einen internationalen Klimafonds zur Finanzierung von CO₂-Absorptions- und Artenvielfaltprämien durch Treibhaus- und Atomstromabgaben vor. Durch eine Extraabgabe für Emissionen aus der Vergangenheit werden de facto vor allem die Industrieländer zur Finanzierung herangezogen, die Prämien kommen den Entwicklungsländern zugute.
2. Die Vorschläge für eine Klimakonvention werden mit Vorschlägen für eine ökologische Steuerpolitik des Nordens verknüpft.

In anderen Teilen seines Buches fällt er allerdings wieder auf dependenztheoretische Ansätze zurück mit ihren weltmarktentkoppelten subsistenz- und landwirtschaftszentrierten Gesellschaftsmodellen im Süden, und mit postindustriellen Kommunikations-, Informations- und Dienstleistungsgesellschaften im Norden. Er lehnt die Forderung nach einer neuen Weltwirtschaftsordnung ab.

²⁷ Darmstadt 1989

3. ZUR METHODE

Bevor wir auf die von uns verwendete systemdynamische Methode ausführlicher eingehen, wollen wir die Vor- und Nachteile diskutieren, die sich ganz allgemein bei der Anwendung formaler Modelle auf gesellschaftliche Fragen stellen.

3.1. FORMALE MODELLE UND INHALTLICHE ANALYSEN

Formale Modelle gesellschaftlicher Teilbereiche dienen der Darstellung der Struktur und Dynamik dieses Bereichs anhand der für diese Fragestellung wesentlichen Variablen in ihrem wechselseitigen Zusammenhang. Sie erlauben bedingte Prognosen (ex-post oder ex-ante) und Simulationen, also Experimente mit dem Modell anstelle der Wirklichkeit. Diese Experimente, die in der gesellschaftlichen Praxis kaum oder nur unter hohen politischen oder ökonomischen Kosten angestellt werden könnten, erfolgen im Modell unter wohldefinierten und kontrollierten Rahmenbedingungen bzw. mit quantitativ oder qualitativ unterschiedlichen Annahmen über die Zusammenhänge zwischen den Variablen.

Wichtigste Voraussetzung für die Konstruktion eines formalen Modells ist daher eine gute Kenntnis des zu modellierenden Sachbereichs in qualitativer wie in quantitativer Hinsicht. Der formalen Modellkonstruktion vorangehende inhaltliche, oft politisch-ökonomische Analysen, die sich der Szenario-Methode bedienen, oder mehr oder weniger komplexe Argumentationsketten enthalten, sind daher unverzichtbar, will man sich nicht wirklichkeitsfernen Glasperlenspielen hingeben. Diese inhaltlichen Analysen heben einzelne Gesichtspunkte, die im Erkenntnisinteresse liegen, hervor, andere lassen sie unbearbeitet. Sie besitzen den Anstrich der Lebendigkeit und Suggestivität für den Leser, in der Regel werden aber die Voraussetzungen für die Schlußfolgerungen nicht vollständig vermittelt. Vieles bleibt der Intuition der Untersuchenden überlassen.²⁸ Häufig ist die Nachvollziehbarkeit der Argumentation eingeschränkt.

Formale Modelle neigen dagegen zu einer gewissen Starrheit. So induzieren sie in der Regel eine bestimmte Strukturierung des Datenmaterials (bei Input-Output-Modellen etwa nach Branchen) und bieten eine Heuristik für das methodische Vorgehen (etwa das Aufsuchen von Ursache-Wirkungs-Beziehungen oder die Unterscheidung zwischen endogenen und exogenen Variablen bei ökonometrischen Modellen). Sie zwingen die Modellbauer, das Innere ihres Modells von seiner Umgebung klar abzugrenzen. Sie helfen, Widersprüche in den Annahmen aufzudecken und dadurch zu vermeiden. Überdies wird erreicht, daß alle Variablen über den ganzen Untersuchungszeitraum hinweg präzise definiert und ihre funktionalen Beziehungen eindeutig sind.

Ein Nachteil der formalen Modelle besteht darin, daß die Identität einer Variablen a priori festliegt, und die Variable im Laufe der Modellrechnung bloß quantitativer Veränderung unterzogen werden kann. Dies fällt vor allem dann ins Gewicht, wenn die Wirklichkeit, die abgebildet werden soll, qualitative Brüche aufweist. Das formale Modell per se kann keinen qualitativen Wandel hervorbringen.

3.2. PRINZIPIELLE PROBLEME DER FORMALEN MODELLIERUNG

3.2.1. Modelle sind gleichzeitig Abbilder und Entwürfe

²⁸ Ein gutes Beispiel für eine inhaltliche Analyse des Transformationsprozesses in Ostdeutschland findet sich bei R. DIETZ (The Impact of the Unification on the East German Economy, Forschungsbericht 172, Wiener Institut für Internationale Wirtschaftsvergleiche, Wien 1991), der mit seiner Szenariotechnik für die wichtigsten Variablen der Volkseinkommensrechnung zu ähnlichen Resultaten kommt wie P. FLEISSNER und U. LUDWIG (Von der Plan- zur Marktwirtschaft, Vieweg Verlag, Braunschweig 1992) mit einem systemdynamischen Modell.

Formale Modelle sind immer abstrakte Abbilder der Wirklichkeit, die allerdings in doppelter Weise bestimmt sind. Einerseits tragen Modelle Züge des abzubildenden Objektbereichs, andererseits gehen in sie die subjektiven Interessen der Modellkonstrukteure ein. Der *Abbildcharakter* des Modells stellt sicher, daß für die Fragestellung wesentliche Zusammenhänge im Modell wiedergefunden werden können, der *Entwurfscharakter* des Modells verweist auf die spezifischen Erkenntnisinteressen (im positiven Sinn) oder auf die blinden Flecken (im negativen Sinn) der Modellbauer. Beides - Erkenntnisinteresse und blinde Flecken - lassen sich aus der Spezifik der Abstraktion ablesen (immer vorausgesetzt, daß das innere Modell der beobachtenden Dritten reicher und umfassender ist als das gegenständliche Modell).

3.2.2. Formale Modelle und die Einmaligkeit historischer Prozesse

Nicht nur den SozialwissenschaftlerInnen ist klar, daß gesellschaftliche historische Prozesse einmalig und daher unwiederholbar sind. Darüber hinaus besteht kein Zweifel, daß die Geschichte nur eingeschränkte Voraussagbarkeit erlaubt. Die gesellschaftliche Entwicklung ist in die Zukunft hinein offen. Wir steigen nicht zweimal in den selben Fluß. Wären daher formale Modelle zur Erstellung von Prognosen grundsätzlich ungeeignet?

Dieser Frage gegenüber lassen sich zwei einander entgegengesetzte extreme Standpunkte einnehmen: Wir könnten einerseits die Auffassung vertreten, daß ein gesellschaftliches Phänomen durchaus zufällig ist und aus keiner wie auch immer gearteten Ursachenkonstellation streng eindeutig abgeleitet werden kann. Alle Ereignisse, die wir beobachten, hätten danach zufälligen Charakter und wären daher nicht vorhersehbar. Dies würde einer Sicht der Gesellschaft entsprechen, in der individuelle Entscheidungen dominieren, die als nicht vorwegnehmbar betrachtet werden. Selbst hier wird im allgemeinen dennoch eine Gesetzmäßigkeit angegeben werden können: Ist die Variable, die betrachtet wird, das Ergebnis der Entscheidungen vieler Wirtschaftssubjekte, und lassen sich die Ergebnisse der Einzelentscheidungen aggregieren, erlauben die zentralen Grenzwertsätze der Wahrscheinlichkeitstheorie durchaus Aussagen über das Aggregat. Im allgemeinen werden sich bei Zufallsvariablen charakteristische Größen wie Erwartungswert oder Streuung bzw. Momente höherer Ordnung abschätzen lassen, wenn auch die Prognose für den Einzelfall unmöglich ist.

Das andere Extrem würde die Annahme der exakten und eindeutigen Vorhersagbarkeit des historischen Prozesses aufgrund bekannter Zusammenhänge mit anderen bekannten Variablen bedeuten - eine deterministische Sicht der Gesellschaft, in der alles nach festen Regeln abläuft und das Auftreten aller Ereignisse prädestiniert ist.

Die pragmatische Wahrheit liegt - wie so oft - in der Mitte. Gehen wir von einer Kombination der beiden Extrema aus, müssen wir nicht mehr einen der beiden Grenzfälle wählen. Wir können der Auffassung sein, daß alle Ereignisse immer aus zufälligen *und* streng deterministischen Komponenten zusammengesetzt sind. Das einzelne Phänomen besitzt jeweils einen bestimmten Grad an Zufälligkeit oder - substitutiv dazu - an deterministischer Vorhersagbarkeit. Phänomene im Bereich der Astronomie sind mit einem hohen Grad von Vorhersagbarkeit ausgerüstet, Sonnenfinsternisse lassen sich sehr gut vorhersagen. Dagegen ist die Frage, wann ein bestimmtes Atom in einer Ansammlung spaltbaren Materials tatsächlich zerfällt, nur mittels Wahrscheinlichkeitsaussagen zu beantworten, was aber dem realen Prozeß durchaus Rechnung trägt. Quantenmechanische Prognosen über den Ort und den Impuls eines Teilchens sind über die Heisenbergsche Unschärferelation miteinander verbunden. Der Zufallsanteil ist nicht eliminierbar, sondern Bestandteil der Wirklichkeit selbst und damit als solcher zu akzeptieren.

Auf einen interessanten Modelltyp, der in der Literatur derzeit häufig besprochen wird, soll besonders verwiesen werden: Die chaotischen Systeme. Sie spielen in der Chaosforschung eine zentrale Rolle. Es handelt sich dabei um dynamische Modelle mit einem beschränkten Wertebereich der Variablen, die im Laufe der Modellzeit kleine Fehler in den Anfangsbedingungen oder in den Kenngrößen des mathematischen Modells (Parametern) verstärken, bis schließlich die Fehler in den Variablen so groß sind, daß das systematische Gesetz, das hinter den Prozessen steht, vom Zufall völlig "überwuchert" wird. Solche Modelle nennen wir instabile Modelle, da sich kleine Veränderungen in den Anfangsbedingungen zu großen Abweichungen von einem als "Standardvariante" akzeptierten Verlauf der Variablen aufschaukeln. Dieser so erzeugte Zufall tritt auch in Modellen auf, die ausschließlich von streng deterministischen Gesetzmäßigkeiten beherrscht sind.

Formale Modelle sind bei Prozessen mit hohem Zufallsanteil - gleichgültig, woher er kommt - nicht in der Lage, "exakt" zu prognostizieren oder "richtige" Simulationen zu liefern. Die Geschichte der Mißerfolge der Wirtschaftsprognosen mithilfe ökonometrischer Modelle, vor allem in Rezessionszeiten, bietet ein gutes Anschauungsmaterial für diese These. Außerdem läßt sich mit den Methoden der mathematischen Statistik zeigen, daß Prozesse mit Zufallsanteil immer unschärfer prognostiziert werden können, je weiter sie vom bekannten Datenmaterial aus betrachtet in der Zukunft liegen.

Diese Überlegungen raten zur Vorsicht gegenüber einem blinden Glauben an die Modellresultate und zu einem vorsichtigen und vernünftigen Umgang mit ihnen. Unserer Vorstellung nach können systemdynamische Modell am besten in *interaktiver* Weise eingesetzt werden. Als Begründung für diese Behauptung soll unsere Vorstellung vom geschichtlichen Prozeß herangezogen werden: Zu jedem historischen Zeitpunkt gibt es für gesellschaftliche Entscheidungen, egal, wer sie fällt, einen bestimmten Spielraum, einen Entscheidungsrahmen oder ein Entscheidungspotential. In Verhältnissen des reifen Kapitalismus wird dieser Spielraum kleiner sein als in Zeiten des Wechsels der Regulierungsweise, in Umbruchsperioden, die mit einem Wechsel des Gesellschaftssystems verbunden ist, entsprechend größer. Die Realisierung von Entscheidungen innerhalb dieses Spielraums ist nur unter hohen Unsicherheiten oder gar nicht vorherzusagen. Sozialwissenschaft kann in einer derartigen Situation versuchen, die verschiedenen Optionen im gegebenen Möglichkeitsfeld auszuloten, etwa durch Szenarios, Simulationen, politisch-ökonomische Analysen der Interessenkonstellationen usw. Dadurch lassen sich die möglichen Wege, die als Alternativen vor einer Gesellschaft liegen, wie im Lichte eines Scheinwerferkegels beleuchten. Es können positive wie negative Folgen der potentiellen Entscheidungen vorweggenommen und artikuliert werden. Die simulierten Alternativen werden nach möglichst kurzer Zeit, die von der Geschwindigkeit der Datenerhebung und Veröffentlichung abhängt, mit der Realität verglichen und dann jener Pfad ausgewählt, der dem tatsächlichen Verlauf der Daten am nächsten kommt. Um diesen herum werden sich die weiteren Möglichkeitsfelder gruppieren. Es kann aber auch der Fall eintreten, daß die Ironie der Geschichte den Modellkonstrukteuren ein Schnippchen schlägt. Dann ist es nötig, die innere Logik des formalen Modells neu zu überdenken und entsprechend der Informationen über die Realität umzustrukturieren. Im Zuge dieser Korrektur- oder Anpassungsvorgänge sind Lernprozesse sehr wahrscheinlich, die zu einem besseren Verständnis der gesellschaftlichen Prozesse führen können.

Unter günstigen Umständen sind Auswirkungen der Simulationen auf den Entscheidungsprozeß selbst möglich, wodurch eine zusätzliche Rückkopplungsschleife Realität wird, die als Elemente den Modellierungsprozeß und seine Ergebnisse, aber auch die Aktionen der Entscheidungsträger und deren Effekte enthält.

Ein derartiger Einsatz von formalen Modellen unterscheidet sich von der Anwendung ökonometrischer Modelle zur Erstellung punktueller Prognosen. Der Aspekt der Lernfähigkeit (Neuschätzung der Parameter bei Kenntnis neuer Daten) ist bei ökonometrischen Modellen weniger stark ausgeprägt..

3.2.3. Formale Modelle und qualitative Veränderungen

Mit besonderer Deutlichkeit zeigt sich der qualitative Wandel anhand der vor unseren Augen ablaufenden Ablösung eines Gesellschaftssystems durch ein anderes. In einem umfassenden Sinn betrachtet sind etwa die Phänomene, die in der Wirtschaft der DDR beobachtet worden waren, grundsätzlich von den Phänomenen der Gegenwart verschieden. Sie sind Ausdruck einer neuen Logik von Produktion und Verteilung und sind daher als qualitativ anders zu interpretieren. Unter einem eingeschränkten Blickwinkel und entsprechend einem reduzierten Erkenntnisinteresse können wir dennoch auf einer abstrakten Ebene vom qualitativen Wandel absehen und qualitative Gleichartigkeit postulieren. Beispiele dafür liefern Phänomene wie der pro Kopf-Verbrauch der Bevölkerung, die Beschäftigung oder auch die Demographie. In diesen Fällen lassen sich quantitative Indikatoren angeben, die quasi bruchlos, da auf abstrakter Ebene, den qualitativen Sprung des Systemwechsels überbrücken. Voraussetzung dafür ist die Existenz eines hinreichend abstrakten Maßes, das vor und nach dem qualitativen Sprung seine Bedeutung beibehalten kann und rational interpretierbar bleibt.

Treten durch den qualitativen Wandel bedingt neue Phänomene in Erscheinung, etwa die administrierte Arbeitslosigkeit im Falle der fünf neuen Länder, läßt sich die Erscheinung im formalen Modell nicht als Variable neuer Qualität generieren, sondern muß von vornherein im Modell vorgesehen sein, wenn sie auch

vor ihrem expliziten Erscheinen aufgrund der neuen Wirtschaftsordnung den Wert "Null" zugeordnet erhält.

Umgekehrt: Besitzt eine Variable den Wert "Null", ist dieses Faktum auf zwei Arten interpretierbar: In einem Fall könnte es bedeuten, daß zur Modellzeit diese Variable *als Qualität* noch gar *nicht existiert* hat oder nicht mehr existiert, im zweiten Fall kann ein Nullwert heißen, daß *der Möglichkeit nach* diese neue Qualität bereits vorhanden ist, aber den quantitativen Wert "Null" besitzt (wie etwa bei Kurzarbeit in Zeiten der Hochkonjunktur). Welcher der beiden Fälle vorliegt, kann von den Modellnutzern, die über diese externe Zusatzinformation verfügen, leicht aufgrund der Kenntnis des Zeitpunktes des qualitativen Umbruchs entschieden werden. Hier besteht die Notwendigkeit der Interpretation der Modellergebnisse durch den Benutzer selbst. Die Interpretation kann sinnvollerweise nicht vom Modell geleistet werden, da es nicht in der Lage ist, die Genese neuer Qualitäten explizit darzustellen.

3.3. WARUM SYSTEMDYNAMIK ANSTELLE ÖKONOMETRISCHER MODELLE?

Die Konstruktion empirisch abgestützter Wirtschaftsmodelle war in den letzten drei Jahrzehnten weitgehend eine Domäne des *ökonometrischen Modellbaus*, wobei größter Wert auf die exakte Schätzung der Parameter gelegt worden war, die in den Gleichungen vorkamen. Nichtsdestoweniger war die Prognosequalität dieser Modelle ziemlich beklagenswert. Am besten schnitten die Prognostiker ab, wenn sich die Wirtschaft gleichmäßig und krisenfrei (also ohne Wendepunkte und Struktureinbrüche) entwickelte, was ihnen den Ruf als "Schönwetterprognostiker" eintrug. Gerade in jenen Zeiten ist der Bedarf an Prognosen, die *business as usual* vorhersagen, relativ gering. In Rezessionszeiten dagegen, wo korrekte Prognosen bitter nötig sind, zeigten sich große Differenzen zwischen Prognose und Wirklichkeit, insbesondere in den Krisenjahren 1974/75²⁹. Die chronischen Fehlprognosen haben neuerdings einen ganzen Berufsstand in Schwierigkeiten gebracht. Großunternehmen wie etwa die Continental Bank, die Citybank, die Chase Manhattan Bank, die Chemical Bank, die Equitable Life Versicherungen, Kodak und Xerox haben ihre volkswirtschaftlichen Abteilungen reduziert oder sogar geschlossen. Data Resources, eine der bedeutenden US-Beratungsfirmen mit 500 Ökonomen hat 20 Prozent ihres Personals gekündigt.³⁰

Ökonometrische Modelle stützen sich mehrheitlich auf eine Datenbasis in der Form von gleich langen Zeitreihen, meist bestehend aus Jahresdaten. Dabei tritt ein merkwürdiger Widerspruch in Erscheinung. Die Zeitreihen sollten aus statistischen Gründen (vor allem zur Erzielung einer hohen Aussagekraft der statistischen Testverfahren) möglichst lang sein. Andererseits wird in langen Zeiträumen die häufig angenommene Voraussetzung der Strukturkonstanz verletzt. Die tatsächlich gewählte Zeitreihenlänge muß daher immer auf einem Kompromiß zwischen hoher statistischer Aussagekraft der Tests und der korrekten Abbildung der möglichst aktuellen Wirtschaftsstruktur beruhen. Gleichzeitig lassen sich beide Ziele nur in Ausnahmefällen erreichen.

Information, die nicht in Zeitreihenform verfügbar ist, wird meist vernachlässigt und geht nicht in die Modellkonstruktion ein. Die Zeitreihen sind zur statistischen Schätzung der Parameter der *Verhaltensgleichungen* notwendig, die das Ergebnis ökonometrischer Modelle wesentlich bestimmen. Verhaltensgleichungen bringen vorrangig Kausalbeziehungen zwischen den Ursachen (der unabhängigen Variablen) und der Wirkung (der abhängigen Variablen) zum Ausdruck. Volkswirtschaftliche Bilanzgleichungen oder die Beziehung von Mengenindikatoren, Preisindikatoren und Wertindikatoren werden in Form von *Definitionsgleichungen* in die ökonometrischen Modellen eingeführt. In letzteren ist zum Unterschied von den Verhaltensgleichungen kein Zufallselement enthalten.

Die Abstand aufeinanderfolgender Prognosezeitpunkte (Schrittweite) wird durch die Art der zur Verfügung stehenden Zeitreihen festgelegt. Sind Jahresdaten vorhanden, ist auch die Schrittweite ein Jahr. Innerhalb dieses Jahres geschieht sozusagen im Modell nichts, werden im Widerspruch zur Realität keine Entscheidungen gefällt oder Anpassungen vorgenommen.

²⁹ FLEISSNER, P., Das Sozialpartnerschaftsorakel: Zur Wirtschaftsprognose in Österreich, in: Fortschrittliche Wissenschaft, Heft 1/2, Wien 1981, S. 20 - 30

³⁰ LINDEN, D. W., Dreary days in the dismal science, in: "Forbes" vom 21. 1. 1991, zitiert nach: Zukunftsforschung Nr. 1, 1991, März 1991, Info Nr. 6470, S. 40

Frühe ökonometrische Modelle waren meist als Verwendungs-Verteilungs-Modelle konzipiert, d.h. die Produktionsseite der Erzeugung des gesellschaftlichen Reichtums wurde ausgeklammert. Auch beschränkten sich die meisten Modellbauer auf Flußgrößen. Bestandsgrößen und ihre Fortschreibung über eine der Lagerhaltung analoge Gleichung (Lagerbestand am Ende der Periode = Lagerbestand zu Beginn der Periode plus Zugänge minus Abgänge) blieben ausgeklammert. Häufig wurde nicht zwischen Angebots- und Nachfragegrößen unterschieden, sondern eine einzige Variable anstelle dieser beiden eingeführt. Sie brachte jene Werte zum Ausdruck, die tatsächlich am Markt beobachtet werden konnten.

Die Evaluierung ökonometrischer Modelle erfolgt vor allem auf der Grundlage statistischer Kennzahlen zur Messung der Übereinstimmung zwischen Prognose und beobachteten Daten, wobei zwischen der ex-post und der ex-ante Prognose unterschieden wird. Die Genauigkeit der Prognosen ist ein wichtiges Kriterium für die Qualität des ökonometrischen Modells.

Systemdynamische Modelle gehen von einer anderen Grundkonzeption als die ökonometrischen Modelle aus. Sie betonen die Struktur des Modells, die wichtiger wäre als die empirisch erhobenen Daten. Als wesentlich für das Modellverhalten werden nicht einzelne Ursache-Wirkungs-Glieder, sondern vielgliedrige Rückkopplungsketten angesehen. Die Modelle sind üblicherweise als Ungleichgewichtsmodelle konzipiert. So werden etwa Angebot und Nachfrage durch unterschiedlicher Modellgleichungen bestimmt. Obwohl im Prinzip das gleiche statistische Problem wie bei ökonometrischen Modellen vorliegt, werden die Modellparameter in der Praxis auch bei Existenz von Zeitreihen nur in seltenen Fällen mittels ökonometrischer Methoden geschätzt. Oft wird Expertenwissen oder auf der Mikroebene vorhandene Information bei der Bestimmung der Parameter herangezogen. Dies ermöglicht umgekehrt wieder, die Schrittweite des Modells sehr klein zu machen und Systeme mit kontinuierlicher Zeit anzunähern, wodurch es den simulierten Wirtschaftssubjekten in sehr kleinen Zeitabständen möglich ist, ihre Entscheidungen zu treffen.

Die Evaluierung der Modelle beruht auf der Übereinstimmung des *Verhaltenstypus* des Modelloutputs mit den Beobachtungen, nicht sosehr in der Übereinstimmung einer Punktprognose mit ihrer Realisierung. Systemdynamische Modelle werden eher zur *Simulation* als zur Prognose eingesetzt.

MEADOWS und ROBINSON³¹ betonen die Unterschiede zwischen ökonometrischen und systemdynamischen Modellen und bezeichnen sie als zwei unterschiedliche und unvereinbare Paradigmen. Diese Gegenüberstellung mag als Beschreibung des tatsächlichen Verhaltens zweier unterschiedlicher Modellbautraditionen durchaus berechtigt und richtig sein. Bei genauer Betrachtung der Methoden läßt sich aber auch ein beträchtliches Maß an Übereinstimmung zwischen ihnen und die Möglichkeit ihrer Hybridisierung ablesen.³²

In BRUCKMANN / FLEISSNER³³ wurde anhand eines Modells der österreichischen Wirtschaft ein derartiger Brückenschlag versucht. Vor allem bei Wachstumsraten, aber auch bei den Absolutwerten ließen sich bei der Vorhersage des nächsten Jahres für die Mehrheit der Variablen bessere Prognoseergebnisse erzielen als mit einem vergleichbaren ökonometrischen Modell des Österreichischen Instituts für Wirtschaftsforschung.

Die Methode der Systemdynamik hat seit ihrem Durchbruch durch die Arbeiten für den Club of Rome auf den verschiedensten Gebieten Anwendungen gefunden. Die Spannweite reicht von der Analyse der Zuckerkrankheit³⁴ über die Untersuchung von Gütermärkten³⁵ bis zur Wissenschaftssoziologie³⁶, von

³¹ MEADOWS, D. H. and J. M. ROBINSON, *The Electronic Oracle*, John Wiley, Bury St. Edmunds 1985

³² SOMMER, M., On the applicability of econometric methods to system dynamics models, in: *Dynamica*, Vol 10, Part II Winter 84, 91-102

³³ BRUCKMANN, G. und P. FLEISSNER (Hg), *Am Steuerrad der Wirtschaft, Ein ökonomisch-kybernetisches Modell für Österreich*, Wien New York 1989

³⁴ FOSTER, Richard O., *The Dynamics of Blood Sugar Regulation*, Thesis M.I.T. 1970

³⁵ MEADOWS, D. H. and J. M. ROBINSON, *The Electronic Oracle*, John Wiley, Bury St. Edmunds 1985

³⁶ ROBERTS, Edward B., *The Dynamics of Research and Development*, New York 1964

Modellen der Volkswirtschaft³⁷ bis zum Managementverhalten³⁸. Einen neueren Überblick über die Inhalte und die weltweite Verbreitung von Systemdynamik findet sich bei WILS³⁹. Als neuere deutschsprachige Lehrbücher können die Werke von BOSSEL⁴⁰ und von TROITSCH⁴¹ herangezogen werden. Viele Anwendungen finden sich in der internationalen Zeitschrift "System Dynamics Review", die von George Richardson bei Wiley herausgegeben wird.

³⁷ LEHMANN, G., Wirtschaftswachstum im Gleichgewicht - Eine System-Dynamics-Studie sozio-ökonomischer Entwicklungen in der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2000, Deutsche Verlags-Anstalt Stuttgart, Stuttgart 1975

³⁸ STERMAN, J., Modeling Managerial Behavior, in: Management Science, Nr. 3 März 1989, 321-339

³⁹ WILS, W., Overview of System Dynamics The World Over, Croon DeVries bv, Maarssen, Oktober 1988

⁴⁰ BOSSEL, H., Systemdynamik, Vieweg Verlag, Braunschweig 1988

⁴¹ TROITSCH, K. G., Modellbildung und Simulation, Westdeutscher Verlag, Opladen 1990

4. GRUNDKONZEPTE DER SYSTEMDYNAMIK

4.1. ZENTRALE BEGRIFFE UND VORGANGSWEISEN

System Dynamics ist eine Methode zum besseren Verständnis bestimmter Arten komplexer Probleme.

Gegenstand von System Dynamics sind **dynamische Vorgänge** in der Wirklichkeit, die sich letztlich auch quantitativ (als System von nichtlinearen gewöhnlichen Differentialgleichungen) beschreiben lassen (das Auskühlen einer Tasse Tee, das Schließen eines Wasserhahns, elektromagnetische Vorgänge in einem Schwingkreis, Bevölkerungswachstum, Wirtschaftsentwicklung usw.). Mit Hilfe von System Dynamics werden mathematische Modelle erzeugt, die zur **Simulation** bestimmter Züge der Wirklichkeit dienen. Bei der Erstellung von System-Dynamics-Modellen spielt das Prinzip der **Rückkopplung** eine zentrale Rolle.

Die Modellkonstruktion durchläuft in der Regel folgende Stufen, wobei manche Schritte mehrmals wiederholt werden (bereits in dieser Darstellung zeigt sich das Prinzip der Rückkopplung). Abb. 13 zeigt ein Rückkopplungsdiagramm (mathematisch ein gerichteter Graph), wie es zur Entwicklung eines Modellkonzepts verwendet wird:

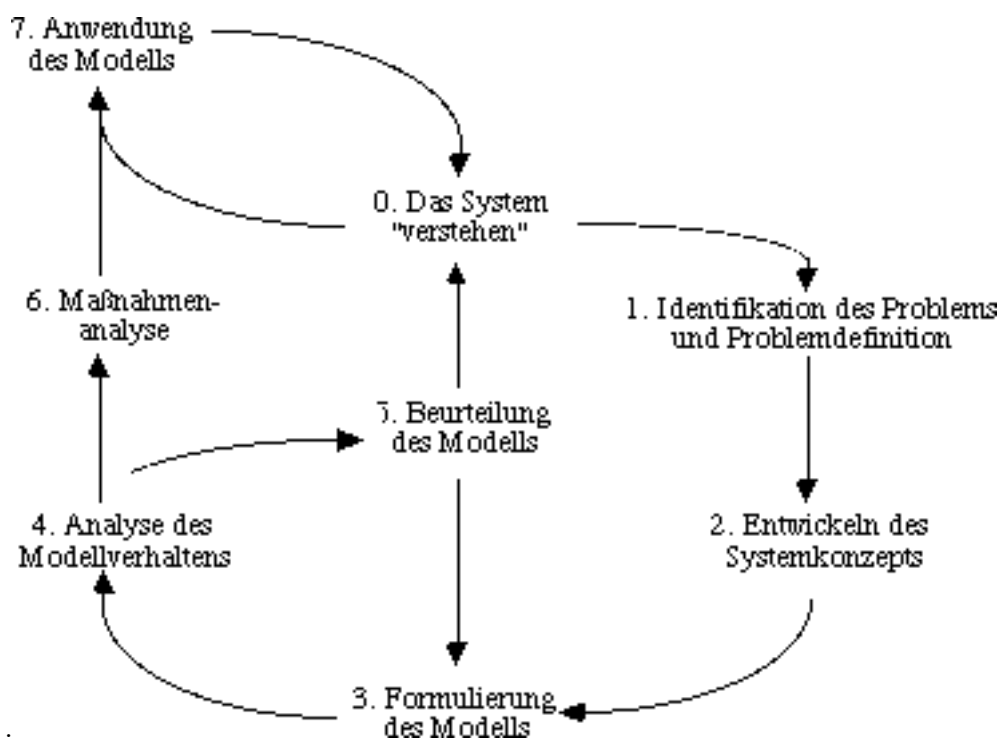


Abbildung 13: Stufen des Modellierungsprozesses

Anmerkungen: Zentral ist nicht das Modell, sondern das Problem, das verstanden bzw. gelöst werden soll. Als Faustregel ("Heuristik") zum besseren Verständnis des Problems gilt das Auffinden von Widersprüchen in der abzubildenden Wirklichkeit. Widersprüchliche Tendenzen lassen sich häufig in Form von Kausalbeziehungen und Rückkopplungsprozessen zwischen zu identifizierenden Indikatoren (Variablen) darstellen und in einem Rückkopplungsdiagramm ("Causal Loop Diagram") aufzeichnen. Die Variablen sind dabei so zu wählen, daß den Kausalbeziehungen eine **Polarität** zugeordnet werden kann (wenn X wächst, wird auch Y wachsen - positiver Kausalzusammenhang). Von der zeitlichen Verzögerung zwischen

Ursache und Wirkung wird zunächst abstrahiert. In sich geschlossene Kausalketten heißen **Rückkopplungsschleifen**. Die Polarität der Rückkopplungsschleife ergibt sich aus dem Produkt der Vorzeichen der einzelnen Polaritäten.

4.2. CAUSAL LOOP DIAGRAMME

Abbildung 14 zeigt ein (unvollständiges) Causal Loop Diagramm für eine Unternehmen.

Fragen: Welche Rückkopplungsschleifen (positive bzw. negative) treten auf? Welche Ergänzungen scheinen notwendig? Wie wird das System reagieren?

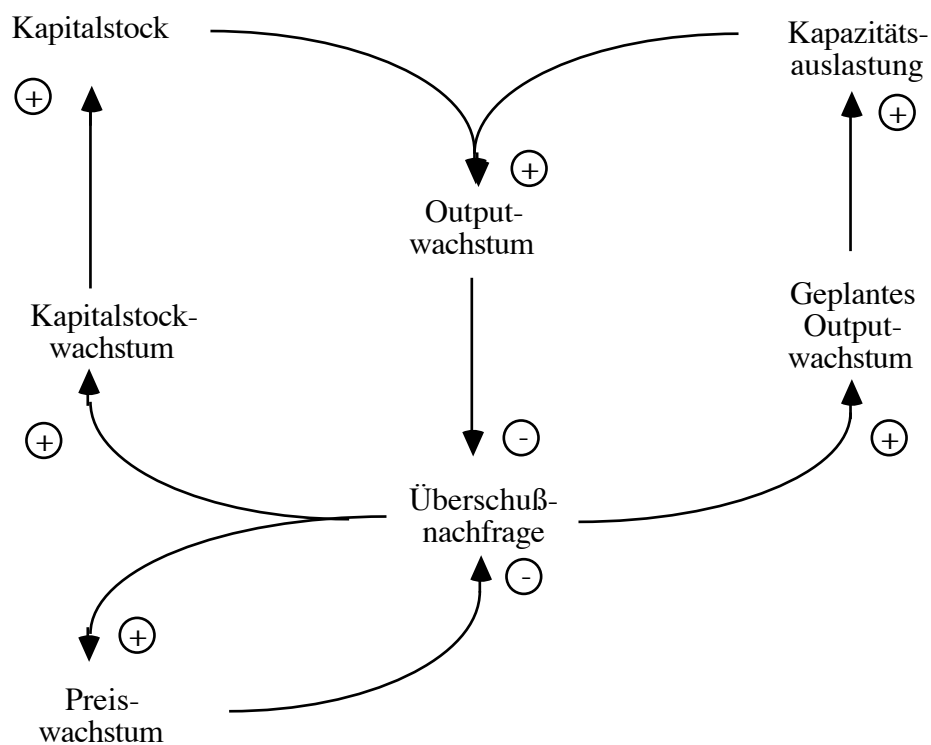


Abbildung 14: (Unvollständiges) Causal Loop Diagramm einer Unternehmung

4.3. RÜCKKOPPLUNGSPROZESSE

4.3.1. Positive Rückkopplung

Positive Rückkopplung liegt dann vor, wenn das Produkt der einzelnen Vorzeichen positiv ist.

Beispiele: die Lohn-Preis-Dynamik aus der Sicht der Unternehmer, eine vereinfachte Sicht des Wettrüstens, Bevölkerungswachstum, Wirtschaftswachstum, aber auch Aussterben einer Tierart usw.

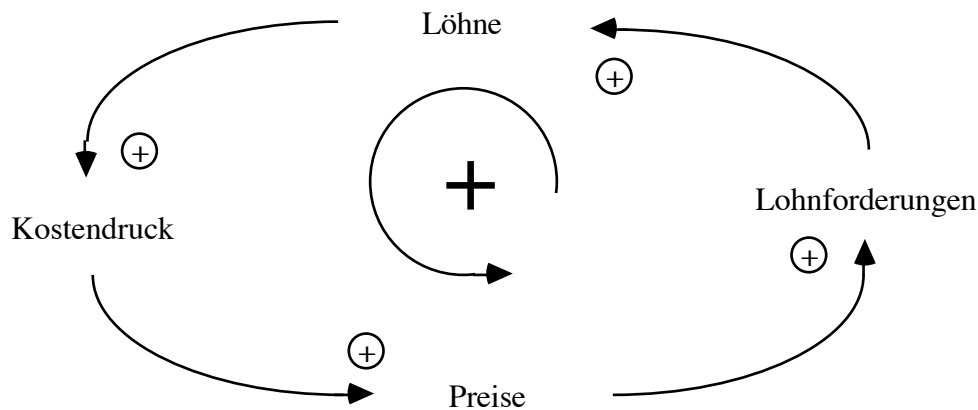


Abbildung 15: Positive Rückkopplung

Wirkung einer positiven Rückkopplung: Selbstverstärkung, im linearen Fall exponentielles Wachstum oder exponentieller Abfall.

4.3.2. Negative Rückkopplung

Negative Rückkopplung liegt dann vor, wenn das Produkt der einzelnen Vorzeichen in der Schleife negativ ist. Beispiele: Thermostat, Abschreibungen am Kapitalstock usw.

Die Elemente eines negativen Rückkopplungskreislaufs: Zustandsvariable (tatsächlicher Wert), Ziel (erwünschter Wert), Diskrepanz (Differenz zwischen erwünschtem und tatsächlichem Wert), Korrektur (Aktion, Eingriff, Maßnahme).

Wirkung einer negativen Rückkopplung: Zielorientiertes Verhalten (selbstregelnd, stabil, adaptiv, homöostatisch). Das Ziel kann auch den Wert Null haben. Treten in der Schleife Verzögerungen auf, sind Schwingungen möglich. Sie können in linearen Systemen abklingen, mit konstanter Amplitude oder mit wachsender Amplitude auftreten.

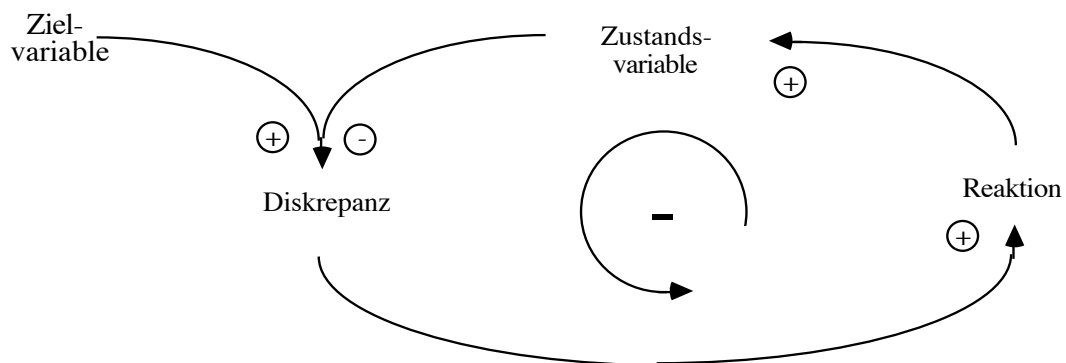


Abbildung 16: Negative Rückkopplung

4.4. MODELLIERUNG MIT STELLA

Im Prinzip können Simulationsmodelle natürlich in fast jeder beliebigen Programmiersprache geschrieben (etwa in FORTRAN, BASIC, PASCAL, C, ALGOL oder PL/1 usw.) oder im Rahmen von Tabellenkalkulations- oder Mathematik-Paketen (EXCEL bzw. MATHEMATICA) entwickelt werden. Eine benutzerfreundliche Ein- und Ausgabe bedarf aber eines besonderen Programmieraufwandes. Hier springen fertige Softwarepakete in die Bresche, etwa das bereits erwähnte PROFESSIONAL DYNAMO PLUS (unter MS-DOS) oder STELLA⁴² (am Macintosh). DYNAMO compiliert die Modelle, was zusätzliche Arbeitsgänge bedeutet, sich aber bei großen Modellen (mit mehr als 500 Statements) wohltuend auf die Rechenzeit auswirkt. Die Modellvariablen müssen allerdings unter DYNAMO mit Indizes geschrieben werden - eine Fehlerquelle bei der Modellkonstruktion. Bei STELLA mit seiner eleganten graphischen Eingabe und der daraus resultierenden Übersichtlichkeit existiert dieses Problem nicht, allerdings läßt es nur kleinere Modelle zu. STELLA ist u. E. daher bei kleinen Modellen vorzuziehen. Es ist jedoch als Interpreter konzipiert und braucht bei großen Modellen für einen Simulationslauf entsprechend lange. STELLA ist ein Simulationsprogramm, das derzeit (1991) ausschließlich auf dem PC Macintosh von Apple läuft. Die relativ geringe Verbreitung von Apple-Macintoshs bilden ein Hindernis für die Verbreitung von STELLA-Simulationsmodellen. Die Grundelemente von STELLA entsprechen denen von DYNAMO:

Levels (Bestandsgrößen, Stock-Größen, Integral, X)

Rates (Veränderungsgrößen, Flußgrößen, Ableitung von X nach der Zeit, dX/dt)

Hilfsgrößen, die Levels und Rates via Kausalitäten verbinden können.,

Levels dürfen ausschließlich durch Rates verändert werden. Es dürfen keine simultanen Gleichungen entstehen.

STELLA enthält weitere Hilfen zur Erstellung eines Diagramms:

Kausalpfeil, zur Verknüpfung der obigen Elemente,

Gespent, zur Verdoppelung einer Variablen an einer anderen Stelle im Diagramm,

Lunte, zum Löschen obiger Elemente.

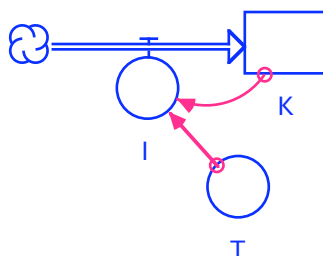
4.4.1. STELLA-Diagramm einer positiven Rückkopplung

Beispiel: Kapitalakkumulation mit konstanter Investitionsrate.

Variablen: Kapitalbestand K(Level)

Netto-Investitionen I (Rate)

Anfangswert für K, $K(0) = 1$



⁴² siehe dazu das Manual von RICHMOND, B., Steve PETERSON and Peter VESCUSO, An Academic user's Guide to Stella, Lyme 1989. Seit 1990 ist eine neue Version, STELLA II, auf dem Markt. Mit diesem Programm können auch diskrete Simulationen (etwa von Warteschlangenprozessen) und Sensitivitätsanalysen vorgenommen werden (siehe PETERSON, St. et al, STELLA II, Technical Documentation, Hanover, New Hampshire 1990). Eine andere STELLA-Version, STELLA-STACK, erlaubt die Anwendung von STELLA unter HYPERCARD, mit all seinen Möglichkeiten der (allerdings etwas langsamen) Computeranimation.

Die Gleichungen (direkt aus STELLA importiert):

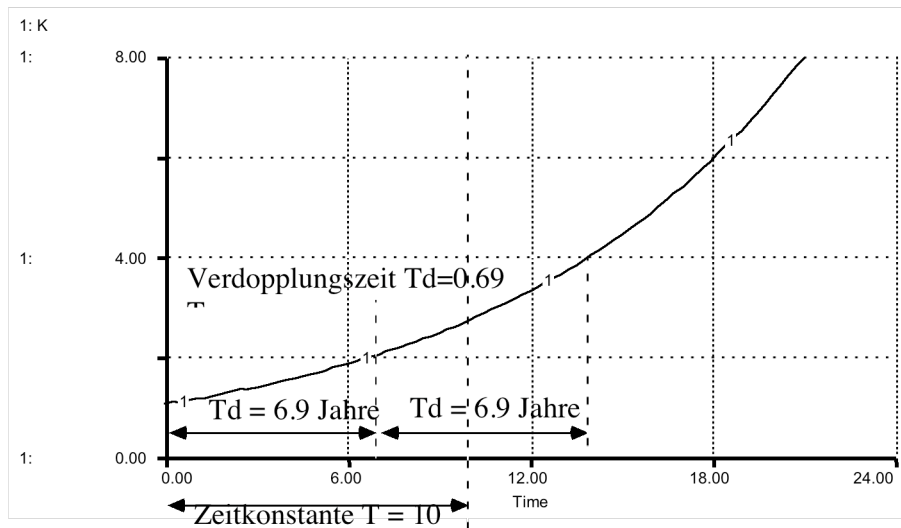
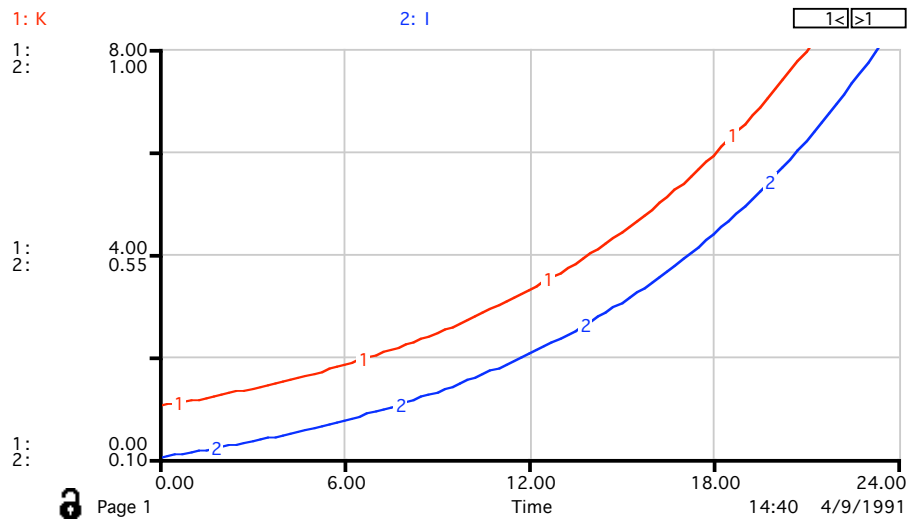
$$K(t) = K(t) + (I) * dt$$

INIT K = 1 {Milliarden S}

INFLOWS:

$$I = K/T \text{ {Milliarden S pro Jahr}}$$

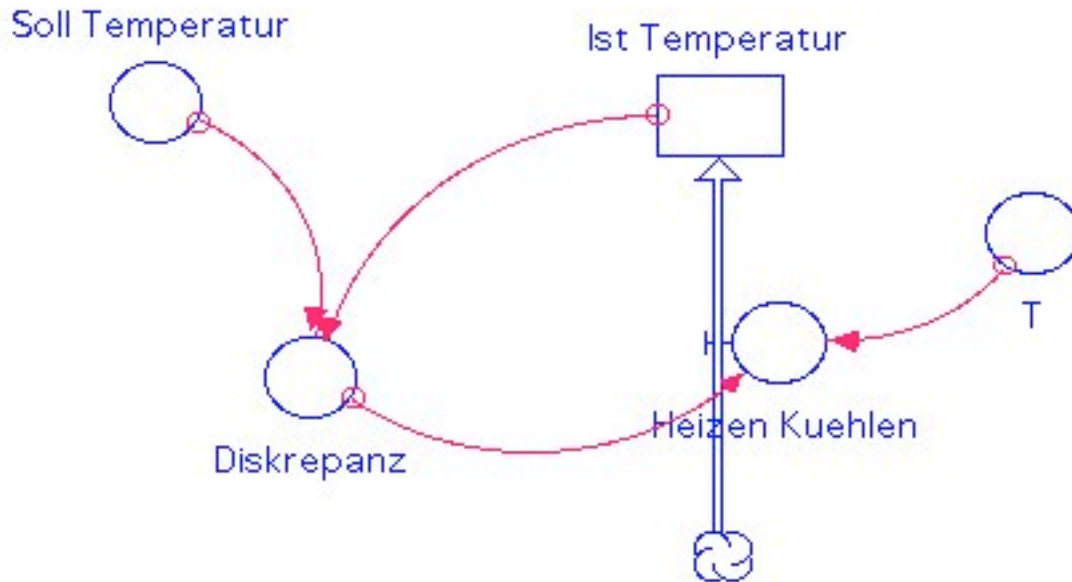
T = 10 {Jahre}



4.4.2. STELLA-Diagramm einer negativen Rückkopplung

Beispiel: Thermostat

Variablen: Ist-Temperatur
Heizen/Kühlen
Soll-Temperatur



$Ist_Temperatur(t) = Ist_Temperatur(t) + (Heizen_Kuehlen) * dt$

INIT Ist_Temperatur = 1 {Grad Celsius}

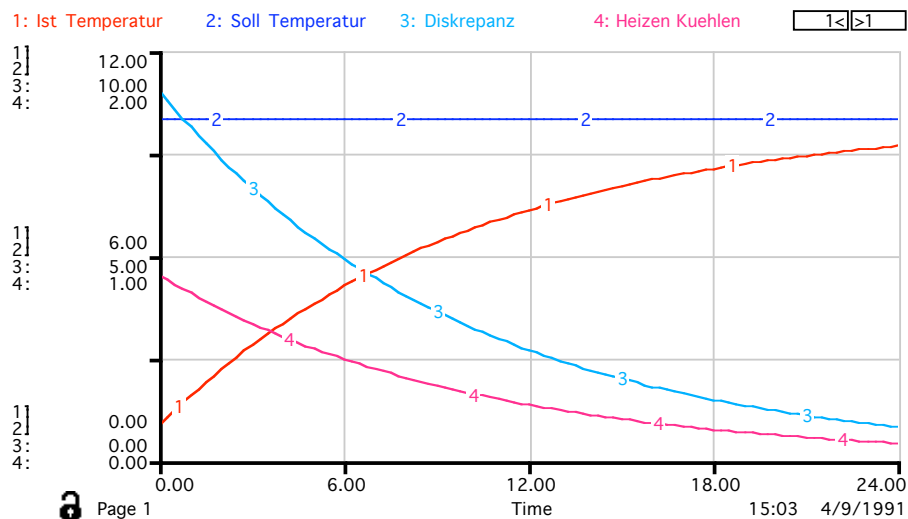
INFLOWS:

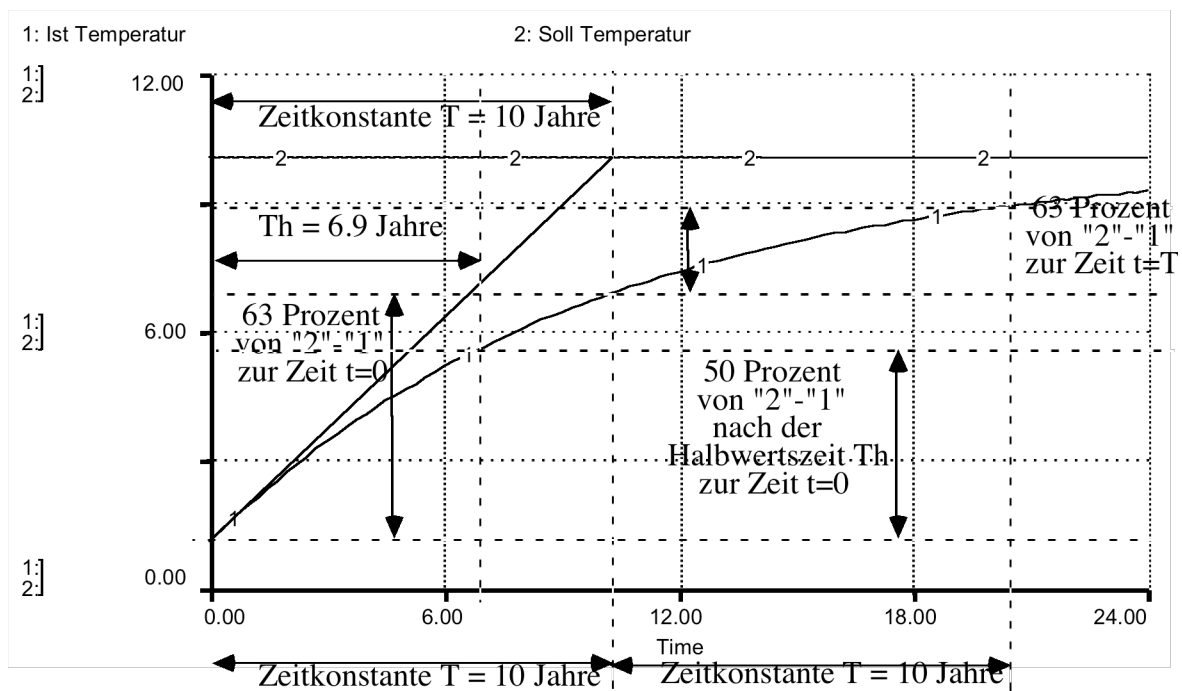
$Heizen_Kuehlen = Diskrepanz / T$ {Grad Celsius pro Stunde}

$Diskrepanz = Soll_Temperatur - Ist_Temperatur$ {Grad Celsius}

$Soll_Temperatur = 10$ {Temperatur in Grad Celsius}

$T = 10$ {Zeitkonstante in Stunden}





5. MATHEMATISCHE DARSTELLUNG VON SYSTEMEN MIT EINER BESTANDSGRÖSSE

5.1. POSITIVE RÜCKKOPPLUNG (SIEHE AUCH ABSCHNITT 4.1.)

5.1.1. Differenzengleichung

Aus den STELLA-Gleichungen

$$K = K + dt * (I) \quad (1)$$

$$INIT(K) = 1 \text{ \{Milliarden S\}} \quad (2)$$

$$I = K/T \text{ \{Milliarden S pro Jahr\}} \quad (3)$$

$$T = 10 \text{ \{Jahre\}} \quad (4)$$

läßt sich eine Differenzengleichung in üblicher mathematischer Notation gewinnen. Die Zuweisung (1) ist ein Programmierbefehl, es kann daher für K auf der linken und auf der rechten Seite der Zuweisung das gleiche Symbol verwendet werden. In mathematischer Notation entspricht diese Zuweisung einer Differenzengleichung erster Ordnung. Man erhält sie durch explizites Hinzufügen der Zeitpunkte, zu denen die Stock-Variable K und die Flow-Variable I bestimmt werden. Während die Bestandsgröße K zu einem bestimmten Zeitpunkt berechnet wird, ist die Flußgröße I auf ein Zeitintervall dt bezogen. dt stellt die (konstante) Schrittweite dar, mit der in STELLA intern integriert wird. Es ergibt sich daraus die Differenzengleichung

$$K(t+dt) = K(t) + I(t, t+dt) \cdot dt \quad (5)$$

Tatsächlich errechnet STELLA den Wert für I auf der rechten Seite von (5) aus Gleichung (3), bestimmt also den Wert von I zum Zeitpunkt t, und nicht für das Intervall [t, t+dt]. Unter dieser Vereinfachung von (5) ergibt sich

$$K(t+dt) = K(t) + I(t) \cdot dt \quad (6)$$

Durch Einsetzen von (3) in (6) erhalten wir die Differenzengleichung (7)

$$K(t+dt) = K(t) + (K(t)/T) \cdot dt, \quad (7)$$

die sich leicht iterativ lösen läßt, indem K(t) auf der rechten Seite von (7) herausgehoben wird:

$$K(t+dt) = K(t) (1 + dt/T). \quad (8)$$

Beginnen wir zum Zeitpunkt $t = t_0$ zu iterieren, erhalten wir nach n Schritten die Lösung (9)

$$K(t_0 + n \cdot dt) = K(t_0) (1 + dt/T)^n. \quad (9)$$

5.1.2. Verdopplungszeit bei Differenzengleichung

Die Berechnung der exakt dem Programm STELLA in seiner einfachsten Integrationsvariante entsprechenden Verdopplungszeit T_d , einer Konstanten längs der ganzen Trajektorie, erfolgt einfach aus der Bestimmung jenes Zeitabschnitts $n \cdot dt$, also jenes Vielfachen von dt, das zum Wert 2 $K(t_0)$ führt:

$$2 K(t_0) = K(t_0 + n \cdot dt) = K(t_0) (1 + dt/T)^n. \quad (10)$$

Durch Logarithmieren und Umstellen von (10) erhalten wir die exakte Verdopplungszeit T_d für die diskrete Variante der positiven Rückkopplung

$$T_d = n \cdot dt = dt \cdot \ln 2 / \ln(1 + dt/T). \quad (11)$$

5.1.3. Differentialgleichung

Interpretieren wir STELLA als Versuch, einen kontinuierlichen Prozeß anzunähern, können wir auch diesen explizit mathematisch zu beschreiben versuchen. Wir gehen von Gleichung (5) aus, bilden den Differenzenquotienten an der Stelle t und lassen durch Grenzübergang

$dt \rightarrow 0$ gehen.

$$\lim_{dt \rightarrow 0} \frac{K(t + dt) - K(t)}{dt} = \frac{dK(t)}{dt} = \lim_{dt \rightarrow 0} I(t, t + dt) = I(t) \quad (12)$$

Setzen wir nun (3) in (12) ein, erhalten wir die homogene lineare Differentialgleichung erster Ordnung

$$dK/dt = K/T \text{ oder } dK/dt - K/T = 0 \quad (13)$$

Durch Trennung der Variablen erhalten wir

$$dK/K = dt/T \quad (14)$$

Integration ergibt

$$\ln K(t) - \ln K(t_0) = (t - t_0)/T \quad (15)$$

Exponentieren führt zur Lösung

$$K(t) = K(t_0) e^{(t-t_0)/T}. \quad (16)$$

5.1.4. Verdopplungszeit bei Differentialgleichung

Aus (16) ist leicht zu ersehen, welche Rolle die Zeitkonstante T spielt: Nach dem Verstreichen des Zeitintervalls T ist die Startgröße um den Faktor e ($= 2.718\dots$) gewachsen.

Die Verdopplungszeit T_d für den kontinuierlichen Prozeß ergibt sich diesmal mit

$$T_d = T \ln 2 = 0.693 T.$$

Aufgabe: a) Beweise, daß die Verdopplungszeit für den diskreten Prozeß im Grenzübergang mit der Verdopplungszeit des kontinuierlichen Prozesses identisch ist (Hinweis: Anwendung der Regel von L'Hopital)

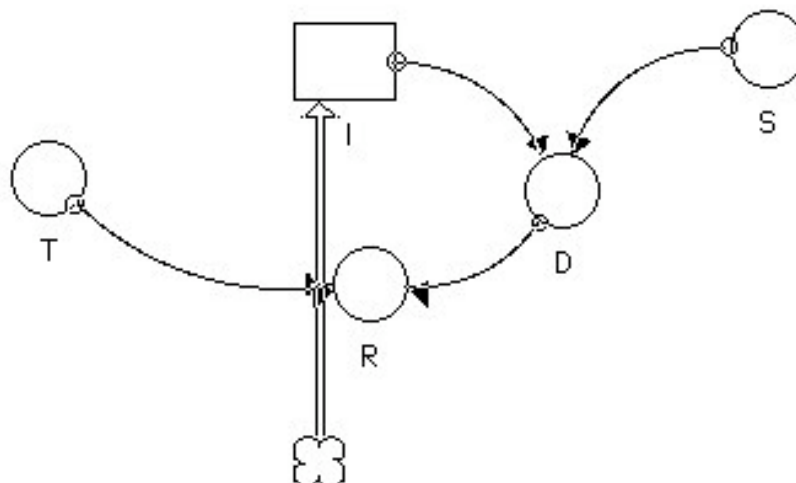
b) Argumentiere, warum die Verdopplungszeit für alle Zeitpunkte t gleich groß ist.

5.2. NEGATIVE RÜCKKOPPLUNG

Negative Rückkopplungen erster Ordnung bewirken das Heranführen einer Ist-Größe an eine Soll-Größe. Bei konstanter Soll-Größe schrumpft die Differenz zwischen den beiden Größen nach einer Exponentialfunktion. Präzise gesprochen erreicht die Ist-Größe die Soll-Größe allerdings erst nach unendlich langer Zeit.

5.2.1. Differenzengleichung

Das Beispiel des Thermostaten von Abschnitt 3.2. wird mit kurzen Variablennamen versehen (siehe folgendes STELLA-Diagramm).



Die STELLA-Gleichungen aus Abschnitt 3.2. lauten nun

$$I = I + dt * (R) \quad (1)$$

$$INIT(I) = I \text{ \{Grad Celsius\}} \quad (2)$$

$$D = S - I \text{ \{Grad Celsius\}} \quad (3)$$

$$R = D/T \text{ \{Grad Celsius pro Stunde\}} \quad (4)$$

$$S = 10 \text{ \{Grad Celsius\}} \quad (5)$$

$$T = 10 \text{ \{Stunden\}} \quad (6)$$

In mathematischer Schreibweise lautet nun die Differenzengleichung für die Ist-Temperatur I

$$I(t+dt) = I(t) + R(t, t+dt) \cdot dt \quad (7)$$

Substitution von (3) und (4) in (7) und Bestimmung der Variablen R zu Zeitpunkt t ergibt die inhomogene lineare Differenzengleichung erster Ordnung

$$I(t+dt) + I(t) (dt/T - 1) = dt \cdot S(t) / T \quad (8)$$

Die Lösung der Gleichung ergibt sich bei konstantem S durch Iteration aus

$$I(t+dt) = -I(t) (dt/T - 1) + dt \cdot S / T = I(t) (1 - dt/T) + dt \cdot S / T. \quad (9)$$

Ersetzen wir zur Abkürzung der Konstanten $(1 - dt/T)$ durch a und

$dt \cdot S / T$ durch b, erhalten wir

$$I(t_0 + n \cdot dt) = I(t_0) + (n-1) \cdot dt \cdot a + b. \quad (10)$$

Iteratives Einsetzen weist auf folgende Lösung hin, deren Richtigkeit wir durch vollständige Induktion beweisen:

$$I(t_0 + n \cdot dt) = I(t_0) a^n + b (a^n - 1)/(a - 1) \quad (11)$$

Zunächst testen wir auf Richtigkeit für $n=1$. Wir erhalten korrekterweise Gleichung (10)

$$I(t_0 + dt) = I(t_0) a + b (a - 1)/(a - 1) = I(t_0) a + b. \quad (12)$$

Nun ist die Richtigkeit des Schlusses von n auf n+1 zu zeigen. Gleichung (11) lautet für n+1 anstelle von n

$$I[t_0 + (n+1) \cdot dt] = I(t_0) a^{n+1} + b (a^{n+1} - 1)/(a - 1) \quad (13)$$

Ist dieses Resultat identisch mit dem Ergebnis, das wir erhalten, wenn wir (11) ein weiteres Mal iterieren, also in Gleichung (10) einsetzen und vereinfachen?

$$\begin{aligned} [I(t_0) a^n + b (a^n - 1)/(a - 1)] a + b &= I(t_0) a^{n+1} + b (a^{n+1} - a)/(a - 1) + b = \\ I(t_0) a^{n+1} + b (a^{n+1} - a + 1 - 1)/(a - 1) + b &= \\ I(t_0) a^{n+1} + b (a^{n+1} - 1)/(a - 1) - b (a - 1)/(a - 1) + b &= \\ I(t_0) a^{n+1} + b (a^{n+1} - 1)/(a - 1) & \quad q.e.d. \end{aligned} \quad (14)$$

In umgestellter Form, nach Trennung in einen variablen und einen konstanten Teil erhalten wir

$$I(t_0 + n \cdot dt) = [I(t_0) + b/(a-1)] a^n - b/(a-1) \quad (15)$$

Rücksubstitution ergibt nach einigen Vereinfachungen eine Lösung in den bereits vertrauten Variablennamen

$$\begin{aligned} I(t_0 + n \cdot dt) &= \\ \{I(t_0) + dt \cdot S / [(1 - dt/T) - 1] T\} (1 - dt/T)^n - dt \cdot S / \{T [(1 - dt/T) - 1]\} &= \\ [I(t_0) - S] (1 - dt/T)^n + S & \end{aligned} \quad (16)$$

Wie wir sehen können, schrumpft der variable Teil der Lösung mit großem n immer mehr, da $(1 - dt/T) < 1$, und nähert sich daher immer mehr der Soll-Temperatur S.

5.2.2. Halbwertszeit für Differenzengleichung

Als Kenngröße des negativen Rückkopplungsprozesses eignet sich die sogenannte "Halbwertszeit", das ist jene Zeit $T_h = n_h \cdot dt$, nach der die Abweichung der Ist-Größe von der Soll-Größe auf die Hälfte geschrumpft ist. Wir beginnen mit der Ausgangsgleichung für n_h

$$[I(t_0) - S]/2 = [I(t_0) - S] (1 - dt/T)^n \quad (17)$$

Daraus ergibt sich für n_h

$$n_h = \ln(1/2) / \ln(1 - dt/T) = -\ln 2 / \ln(1 - dt/T) \quad (18)$$

$$T_h = -dt \ln 2 / \ln(1 - dt/T) \quad (19)$$

5.2.3. Differentialgleichung

Zur Beschreibung der Differentialgleichung des Prozesses der negativen Rückkopplung stellen wir Gleichung (9) um, dividieren durch dt und führen wie in Abschnitt 4.1.3. den Grenzübergang bezüglich dt durch:

$$I(t + dt) - I(t) + I(t) dt / T = dt \cdot S / T \quad (20)$$

$$[I(t + dt) - I(t)] / dt + I(t) / T = S / T \quad (21)$$

Nach dem Grenzübergang für $dt \rightarrow 0$ erhalten wir eine inhomogene lineare Differentialgleichung erster Ordnung

$$dI(t)/dt + I(t) / T = S / T \quad (22)$$

Die Lösung erfolgt durch Addition der Lösung der homogenen Gleichung und einer Partikulärlösung der inhomogenen Gleichung. Die Lösung der homogenen Gleichung

$$dI(t)/dt + I(t) / T = 0 \quad (23)$$

lautet

$$I(t) = C \cdot e^{-t/T}, \quad (24)$$

wobei C eine Integrationskonstante darstellt. Versuchen wir eine Konstante als Partikulärlösung I_p von (22), erhalten wir nach Einsetzen

als Ergebnis für I_p

$$I_p = S, \quad (25)$$

die Soll-Größe S .

Die allgemeine Lösung lautet dann

$$I(t) = C \cdot e^{-t/T} + S \quad (26)$$

Sie sollte die Anfangsbedingung $I(t=t_0) = I_0$ erfüllen. Daraus folgt die Bestimmungsgleichung für C :

$$I_0 = C \cdot e^{-0/T} + S = C + S. \quad (27)$$

und C wird

$$C = I_0 - S. \quad (28)$$

Die gesuchte Lösung ergibt sich als

$$I(t) = (I_0 - S) \cdot e^{-t/T} + S. \quad (29)$$

Welche Rolle spielt hier die Zeitkonstante T ? Nach verstrichener Zeit T ist die anfängliche Abweichung vom Ist-Wert S mit dem Faktor $1/e$, also 0.368 mal kleiner geworden, also um 63.2 Prozent geschrumpft.

5.2.4. Halbwertszeit für Differentialgleichung

Die Halbwertszeit T_h errechnet sich aus der Gleichung

$$(I_0 - S)/2 = (I_0 - S) \cdot e^{-T_h/T} \quad (30)$$

mit

$$T_h = T \ln 2 = 0.693 T. \quad (31)$$

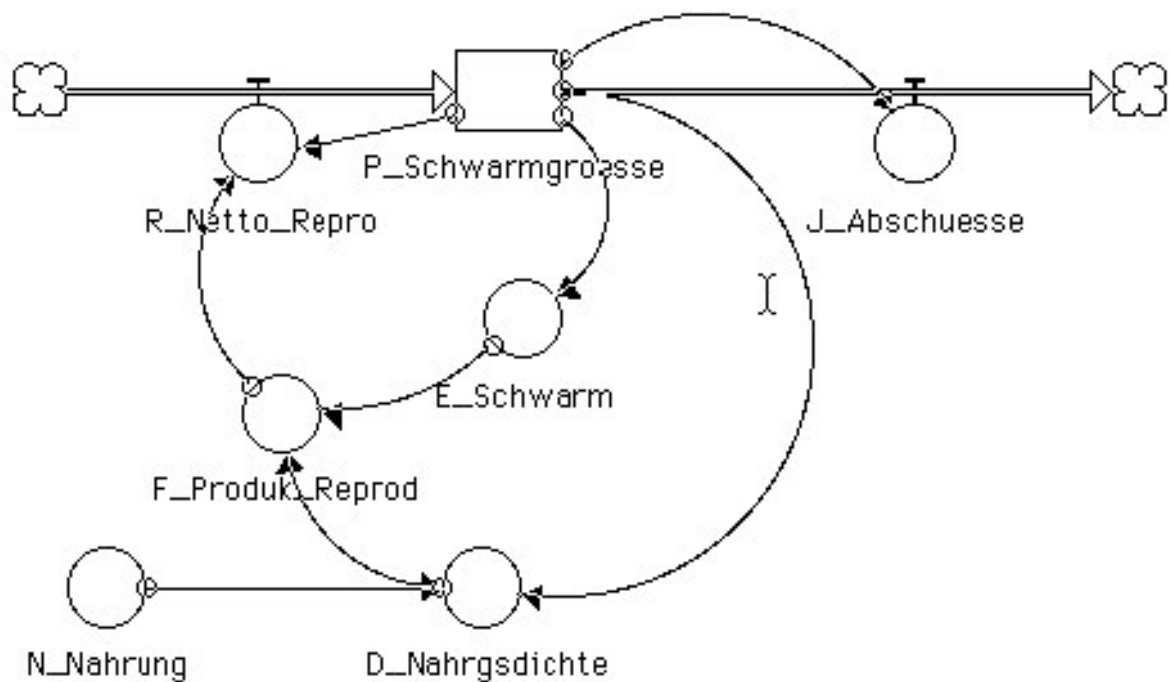
Aufgabe: a) Beweise, daß die Halbwertszeit für den diskreten Prozeß im Grenzübergang mit der Halbwertszeit des kontinuierlichen Prozesses identisch ist (Hinweis: Anwendung der Regel von L'Hopital)

b) Argumentiere, warum die Halbwertszeit für alle Zeitpunkte t gleich groß ist.

6. EIN BEISPIEL FÜR NICHTLINEARE RÜCKKOPPLUNG: DAS PLÖTZLICHE AUSSTERBEN DER PASSAGIERTAUBE (PASSENGER PIGEON)

Die Passagiertaupe im mittleren Westen der USA ist plötzlich ausgestorben, nachdem die Population der Tauben jahrelang annähernd konstant geblieben war. Die Tauben wurden als Leckerbissen gejagt. Von der Lebensweise dieser Tauben ist bekannt, daß sie sich in sehr dichten Schwärmen effektiv vermehren, daß ihre Reproduktionsrate bei geringeren Schwärmdichten aber rasch zurückgeht.

Mit dem folgenden Systemdynamik-Modell läßt sich eine Erklärung für das Aussterben der Art finden.



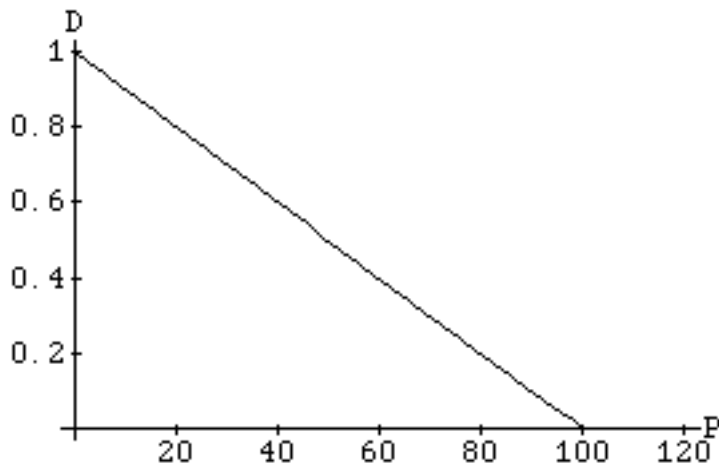
Wir beginnen den Schwarm bei einer Größe von 100 Tauben zu beobachten. Es werden im Durchschnitt 2.4 Abschüsse pro Monat getätigt. Was wird geschehen? Es kommt darauf an, ob die Abschüsse weniger sind als die Netto-Reproduktionsrate der Tauben, die sich aus drei Komponenten zusammensetzen läßt:

- Sie ist von der Schwarmgröße selbst abhängig, in dem Sinne, daß ein größerer Schwarm bei gleichem Reproduktionsverhalten mehr Nachwuchs hat. Dieser Zusammenhang kommt im ersten Faktor der nachstehenden Gleichung für die Netto-Reproduktionsrate zu Ausdruck

$$R_Netto_Repro = 0.1 * P_Schwarmgroesse * F_Produkt_Reprod$$

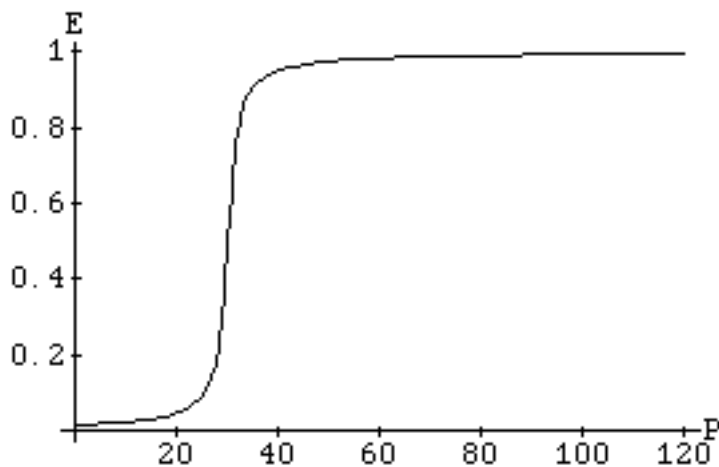
- Wird das Nahrungsangebot knapp, da die Populationsdichte wächst, wird die Netto-Reproduktionsrate kleiner. Die folgende Gleichung beschreibt den Einfluß der Nahrungsdichte auf die Reproduktionsrate, wobei eine Maximumfunktion das Negativwerden des Einflußfaktors $D_Nahrsgsdichte$ verhindern soll:

$$D_Nahrsgsdichte = \max(0, (1 - P_Schwarmgroesse / N_Nahrung))$$



- c) Der Schwarm reproduziert sich bei kleineren Dichten unterproportional zur Schwarmgröße. Der Effekt der Schwarmgröße wird durch E_{Schwarm} beschrieben:

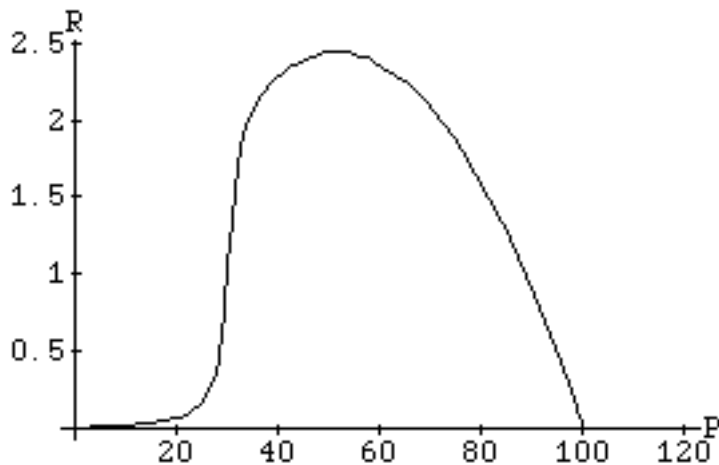
$$E_{\text{Schwarm}} = \arctan(P_{\text{Schwarmgroesse}}/3-10)/\pi + .5$$



Der vollständige Gleichungssatz lautet:

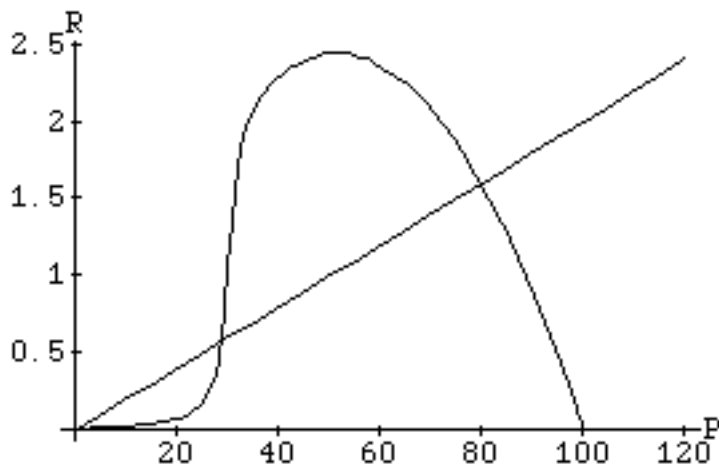
$$\begin{aligned} P_{\text{Schwarmgroesse}} &= P_{\text{Schwarmgroesse}} + dt * (R_{\text{Netto_Repro}} - J_{\text{Abschuesse}}) \\ \text{INIT}(P_{\text{Schwarmgroesse}}) &= 100 \text{ \{Anzahl der Tauben\}} \\ D_{\text{Nahrsgdichte}} &= \max(0, (1 - P_{\text{Schwarmgroesse}}/N_{\text{Nahrung}})) \\ &\quad \text{\{Effekt der Nahrungsdichte auf die Reprorate, dimensionslos\}} \\ E_{\text{Schwarm}} &= \arctan(P_{\text{Schwarmgroesse}}/3-10)/\pi + .5 \\ &\quad \text{\{Effekt der Schwarmgröße auf das Reproduktionsverhalten der Tauben, dimensionslos\}} \\ F_{\text{Produk_Reprod}} &= D_{\text{Nahrsgdichte}} * E_{\text{Schwarm}} \\ &\quad \text{\{Reproduktionsfaktor durch Nahrung und Schwarmgröße\}} \\ J_{\text{Abschuesse}} &= .02 * P_{\text{Schwarmgroesse}} \text{ \{Abschüsse pro Monat\}} \\ N_{\text{Nahrung}} &= 100 \text{ \{kg\}} \\ R_{\text{Netto_Repro}} &= 0.1 * P_{\text{Schwarmgroesse}} * F_{\text{Produk_Reprod}} \\ &\quad \text{\{Netto-Reproduktionszahl ohne Jagd, abhängig von Schwarmgröße und Reproduktionsfaktor\}} \end{aligned}$$

Das folgende Diagramm zeigt die Netto-Reproduktionsrate R in Abhängigkeit von der Schwarmgröße. Man beachte, daß die Reproduktionsrate bei sich vergrößernden Schwärmen immer kleiner, schließlich Null wird, da das Nahrungsangebot nicht reicht. Bei einer Schwarmgröße von etwa 55 ist die maximale Reproduktionsrate erreicht, wird der Schwarm kleiner, fällt die Reproduktionsrate steil ab.

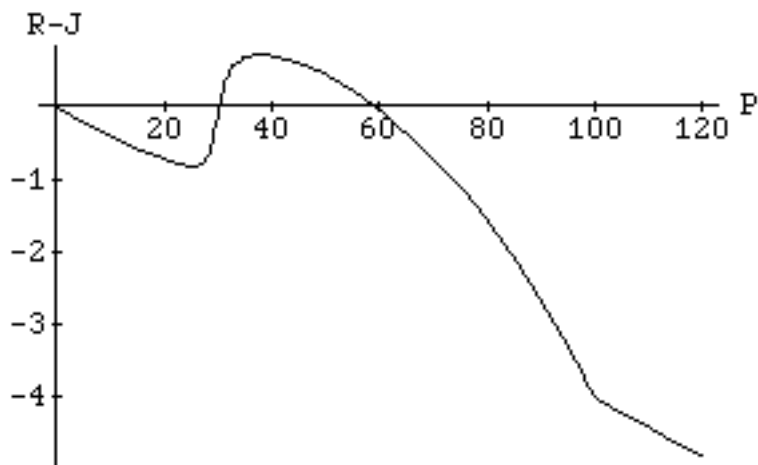


Wir können verschiedene Jagdintensitäten unterscheiden, wobei wir zur Schwarmgröße proportionale Abschüsse (konstante Abschußrate) annehmen:

- Die Abschußrate ist Null: Der Schwarm wird sich von jedem Ausgangspunkt seiner Maximalgröße von 100 nähern, die durch das Nahrungsmittelangebot erzwungen wird.
- Die Abschüsse in Abhängigkeit von der Schwarmgröße ergeben eine Gerade, die durch den Nullpunkt geht und einen positiven Winkel mit der x-Achse beschreibt, der kleiner als die Steigung der Tangente an die Kurve der Reproduktionsrate ist: Es gibt zwei Schnittpunkte der Jagdrate mit der Reproduktionsrate, in denen die Schwarmgröße konstant bleibt, also ebenso viele Tauben hinzukommen wie abgeschossen werden. Der linke Schnittpunkt ist instabil, d.h. bei kleinen Abweichungen wird der Schwarm zu schrumpfen oder zu wachsen beginnen. Links von dieser kritischen Schwarmgröße wird der Schwarm aussterben, rechts davon wird der Schwarm solange wachsen, bis der rechte zweite Schnittpunkt erreicht ist. Dieser rechte Schnittpunkt ist ein stabiler Punkt, da sich die Schwarmgrößen in der Umgebung dieses Punktes der Schwarmgröße des Schnittpunkts nähern.



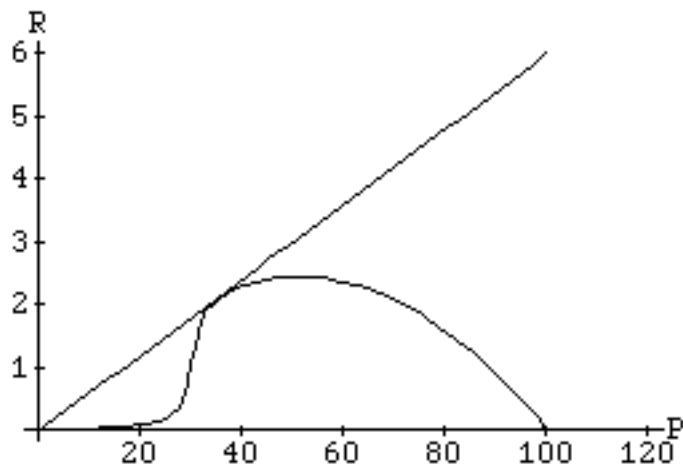
Stellen wir nicht die Netto-Reproduktionsrate, sondern den Netto-Zuwachs der Schwarmpopulation (also Netto-Reproduktionsrate nach Abzug der Abschüsse) in einer Grafik in Abhängigkeit von der Schwarmgröße dar, läßt sich das Stabilitätsverhalten der stationären Punkte (Schnittpunkte mit der x-Achse) leicht illustrieren: (umseitig)



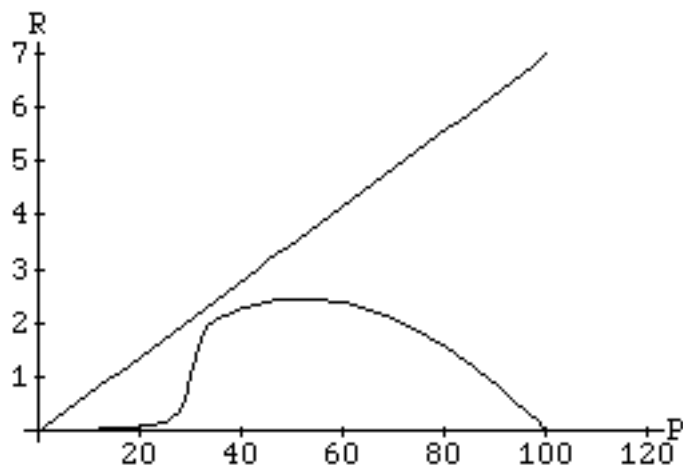
Der Ursprung selbst ist ein von rechts her gesehen stabiler Punkt, da eine positive Schwarmgröße (soweit sie kleiner als etwa 30 ist) abnehmen wird, bis Null erreicht ist. Der Punkt bei ca. 30 ist ein instabiler Punkt, der Punkt bei ca. 60 ist ein asymptotisch stabiler Punkt.

Aufgabe: Argumentiere, warum die Punkte als stabil oder instabil angesehen werden müssen!

- c) Im Grenzfall, der darin besteht, daß die maximale Netto-Reproduktionsrate von der Abschlußgeraden berührt wird, wird der Schwarm von hohen Werten her schrumpfen, um bei der Größe, die der maximalen Reproduktionsrate entspricht, zu verharren, bis eine kleine Störung zur vollständigen Auslöschung des Schwarmes führt. Dieser Fall ist in der folgenden Grafik dargestellt.



- d) Die Abschnitte sind immer höher als die maximale Netto-Reproduktion: Der Schwarm wird von jeder Ausgangsgröße beginnend aussterben



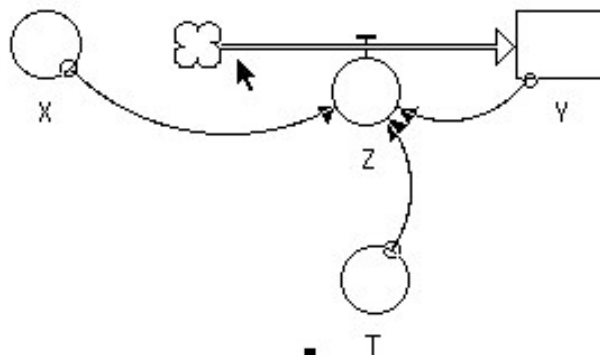
Fassen wir die Fälle a) bis d) zusammen: Hat der Schwarm eine hinreichende Größe, wird er bei niedrigen Jagdraten seine Größe nur geringfügig verändern. Immer wieder wird ein neuer stabiler Wert erreicht, solange, bis c), der Grenzfall eintritt. Dann genügt ein einziger Schuß zuviel, um die ganze Art zum Aussterben zu bringen.

Aus der Beobachtung des zeitlichen Verlaufs der Schwarmpopulation alleine läßt sich dieser rasche Zusammenbruch nicht prognostizieren! Erst die Kenntnis der inneren Zusammenhänge und die Anwendung von Systemanalyse vermag eine korrekte Vorhersage zu bieten!

7. DIE MODELLIERUNG VON VERZÖGERUNGEN

In der alltäglichen Wirklichkeit ist es häufig der Fall, daß die Effekte von irgendwelchen Maßnahmen sich erst nach einiger Zeit zeigen. Eine Veränderung der Variablen x , der Ursache, schlägt sich erst später in der Variablen y , der Wirkung, nieder.

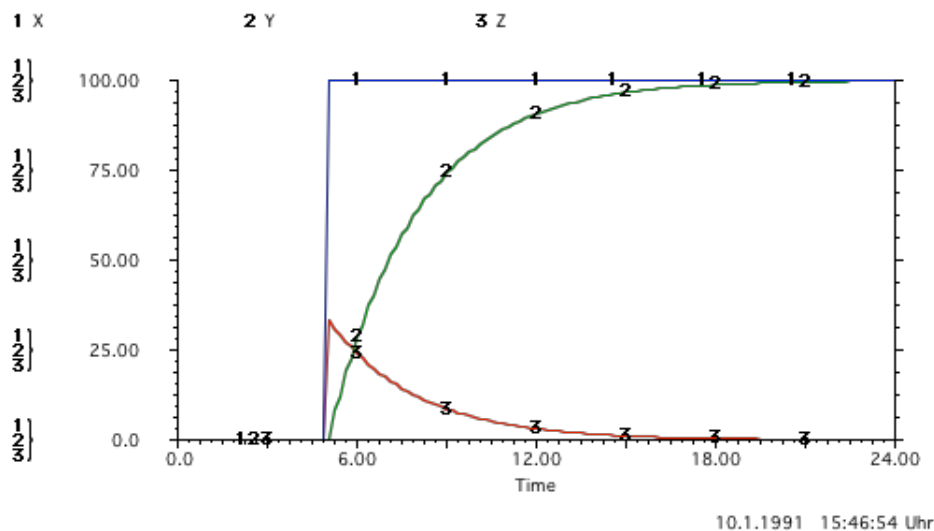
In kontinuierlichen Modellen lassen sich derartige Verzögerungen nur näherungsweise abbilden. Die einfachste und oft angewandte Methode ist die sogenannte SMOOTH-Funktion (Glättungsfunktion). Sie besteht aus einer einfachen Rate-Level-Kombination. Die Wirkungs-Variable Y wird je dt um die durch die Zeitkonstante T dividierte Differenz zwischen der Ursachen-Variablen X und dem laufenden Wert der Wirkungsvariablen Y erhöht. Das STELLA-Diagramm hat folgende Gestalt:



Die STELLA-Gleichungen der SMOOTH-Funktion lauten:

$Y = Y + dt * (Z)$
 $INIT(Y) = 0$ {Wirkungsvariable}
 $Z = (X - Y) / T$ {Zuwachs von Y je dt }
 $T = 3$ {Zeitkonstante, Jahre}
 $X = step(100, 5)$ {Ursachenvariable}

Im obigen Beispiel wurde X , die Ursachenvariable, als STEP-Funktion angenommen. In der Periode 5 springt X von Null auf den Wert 100. Das Ergebnis zeigt eine asymptotische Annäherung an den Input-Wert 100:



Die Differenzengleichung für die SMOOTH-Funktion lautet ähnlich wie Gleichung (9) aus Abschnitt 5.1.

$$Y(t+dt) = Y(t) (1 - dt/T) + X(t) \cdot dt / T \quad (1)$$

Ihre Lösung ergibt sich mit $a = dt/T > 0$ als

$$Y(t_0 + n \cdot dt) = Y(t_0) (1-a)^n + a \sum_{k=0}^{n-1} (1-a)^{n-k-1} X(t_0 + k \cdot dt) \quad (2)$$

Aufgabe: Beweise die Richtigkeit der Lösung (2) mittels vollständiger Induktion!

Die verzögerte Variable Y setzt sich additiv aus zwei Teilen zusammen: Der erste Teil strebt mit n gegen Unendlich gegen Null, der zweite Teil beinhaltet die gewichtete Summe der verzögerten Input-Variablen X(t). Die Gewichte werden immer größer, je näher X(t₀ + k·dt) zur Gegenwart, also zu t₀ + n·dt liegt, d.h. je größer k wird.

Aufgabe: Schreibe die Differentialgleichung für die SMOOTH-Funktion an und löse sie für X(t) = c für t > 0, X(t) = 0 sonst, und mit Y(0)=0 als Anfangsbedingung.

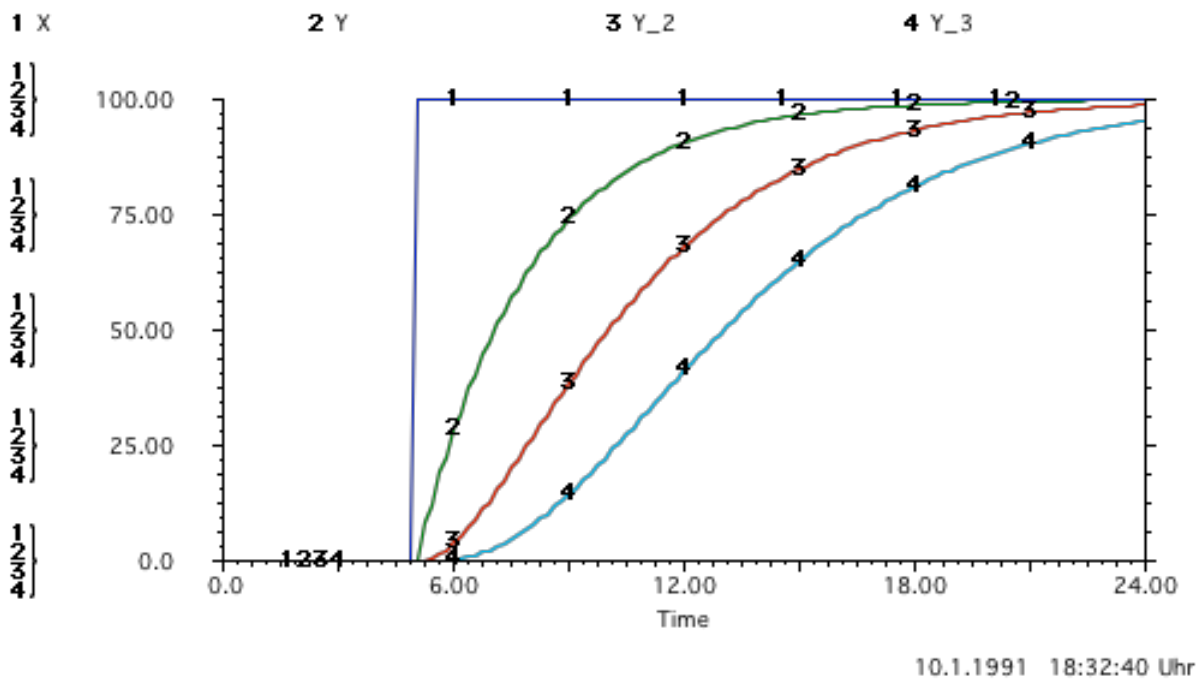
SMOOTH-Funktion können hintereinandergeschaltet werden (Serienschaltung). Je mehr derartige Funktionen aneinandergereiht werden, desto besser wird eine exakte Zeitverschiebung der Variablen X(t) angenähert. Nachstehend ein Beispiel für die STELLA-Gleichungen eines SMOOTH 3. Ordnung:

```

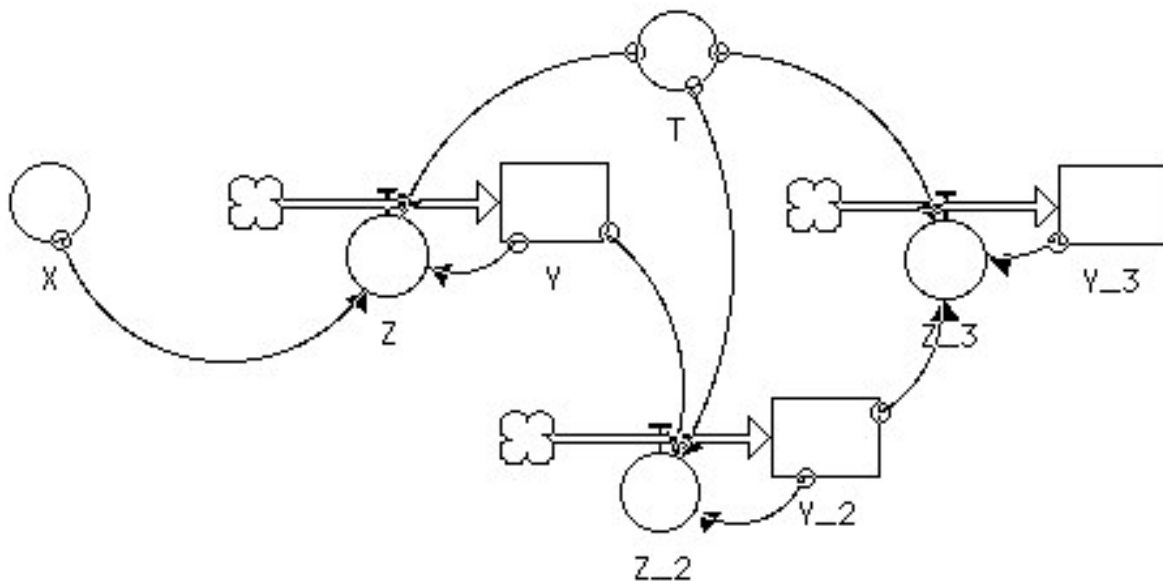
Y = Y + dt * ( Z )
INIT(Y) = 0
Y_2 = Y_2 + dt * ( Z_2 )
INIT(Y_2) = 0
Y_3 = Y_3 + dt * ( Z_3 )
INIT(Y_3) = 0
T = 3
X = step(100,5)
Z = (X-Y)/T
Z_2 = (Y-Y_2)/T
Z_3 = (Y_2-Y_3)/T

```

Die umseitige Abbildung zeigt die Antwort einer SMOOTH-Funktion auf eine STEP-Funktion in X. Die Variable Y ist Output eines SMOOTH erster Ordnung, Y_2 Output eines SMOOTH 2. Ordnung und Y_3 Output eines SMOOTH 3. Ordnung.



Das zugehörige STELLA-Diagramm hat die folgende Gestalt:



STELLA stellt "fertig programmierte" SMOOTH-Funktionen 1. und 3. Ordnung unter der Bezeichnung SMTH1 und SMTH3 zur Verfügung. Der Anfangswert für die verzögerte Variable kann entweder mit der Input-Variablen X identisch gewählt werden (Default Value) oder durch explizite Angabe eines gewünschten Wertes festgelegt werden.

Die Syntax der SMOOTH-Funktionen lautet wie folgt:

SMTH1(Input-Variable, Zeitkonstante T, < Anfangswert >)
 SMTH3(Input-Variable, Zeitkonstante T, < Anfangswert >)⁴³

⁴³ Beim SMOOTH 3. Ordnung werden in STELLA alle drei Anfangswerte gleichgesetzt!

Insbesondere bei der Konstruktion von Wirtschaftsmodellen, aber auch bei vielen naturwissenschaftlichen Fragestellungen liegen die Daten des zu modellierenden Bereichs in diskreter Form vor. Bei exakt ganzzahligen "time-lags" ergibt sich kein besonderes Problem. Die Zeitverzögerung wird durch SMOOTH-Funktionen angenähert, die ganzzahlige Zeitkonstanten (z.B. $T = \text{ein oder zwei Jahre}$) erhalten. Verzögerungsglieder in systemdynamischen Modellen lassen aber auch nicht-ganzzahlige Zeitkonstanten zu. Es stellt sich die Frage, wie sich aus diskreten Daten nicht-ganzzahlige Verzögerungen bestimmen lassen.

Die Schätzung der Zeitverschiebung bei nicht-ganzzahligen Verzögerungen wird durch eine Schätzgleichung ermöglicht, die nicht nur eine (ganzzahlig) zeitverzögerte Variable enthält, sondern deren zwei. Einmal wird der erwartete nicht-ganzzahlige time-lag auf die nächste ganze Zahl abgerundet, das zweite Mal aufgerundet. Die so erhaltenen Werte bilden die ganzzahligen Verzögerungen, mit denen die unabhängige Variable in die Schätzgleichung aufgenommen wird. Die Zeitkonstante wird aus der Summe der niedrigsten Verzögerungszeit plus dem Anteil des Koeffizienten bei der stärker verzögerten Variablen and der Koeffizientensumme berechnet.

Beispiel: Unsere Datenbasis bestehe aus Monatsdaten. Wir erwarten zwischen dem verfügbaren Einkommen Y einer Volkswirtschaft und den Konsumausgaben C eine Verzögerung zwischen von etwas weniger als einem Jahr. Die korrekte Form einer linearen Gleichung wäre danach

$$C(t) = a \cdot Y(t-T) + b, \quad 0 < T < 12 \quad (3)$$

Ausgrund von Korrelationsanalysen mit verzögerten Daten finden wir, daß die höchsten Korrelationen bei Verzögerungen von 6 und 7 Monaten liegen. Wir versuchen für die ökonometrische Schätzung nach der oben erwähnten Regel die Gleichung

$$C(t) = a_0 \cdot Y(t-T_0) + a_1 \cdot Y(t-T_1) + b, \quad T_0 = 6, \quad T_1 = 7 \quad (4)$$

Haben die Werte für a_0 und a_1 , die sich aus der ökonometrischen Schätzung ergeben, gleiches Vorzeichen, können sie als Gewichte der verzögerten Variablen Y angesehen werden. Die Zeitkonstante T läßt sich dann als durchschnittliche Verzögerung der Variablen Y wie folgt berechnen:

$$T = T_0 + a_1/(a_0 + a_1)$$

Der so gewonnene Wert von T wird in die SMOOTH-Funktion eingesetzt.

8. SYSTEME MIT ZWEI BESTANDSGRÖSSEN

Die einfachste Konfiguration aus Bestands- und Flußgrößen, die Schwingungen hervorbringen kann, besteht aus einer negativen Rückkopplungsschleife mit zwei Bestandsgrößen.

Am Beispiel eines vereinfachten Marktmodells mit Angebot und Nachfrage soll das Verhalten dieser Rückkopplungsschleife illustriert werden. Märkte, auf denen Waren gegen Geld getauscht und gleichzeitig die individuellen Aufwendungen der einzelnen Produzenten mit den gesellschaftlich durchschnittlichen Aufwendungen konfrontiert werden, lassen sich in erster Näherung durch Angebots- und Nachfragefunktionen beschreiben. Diese Funktionen stellen das wahrscheinliche Verhalten der Anbieter und der Nachfrager bezüglich der angebotenen bzw. nachgefragten Gesamtmenge am Markt, meist in Abhängigkeit vom Preis, dar.

8.1. STATISCHE DARSTELLUNG

Nachfragefunktion

(Demand, nachgefragte Menge D als Funktion des Preises P):

$$D = a_D - b_D P \quad (1)$$

Angebotsfunktion

(Supply, angebotene Menge S als Funktion des Preises P)

$$S = a_S + b_S P \quad (2)$$

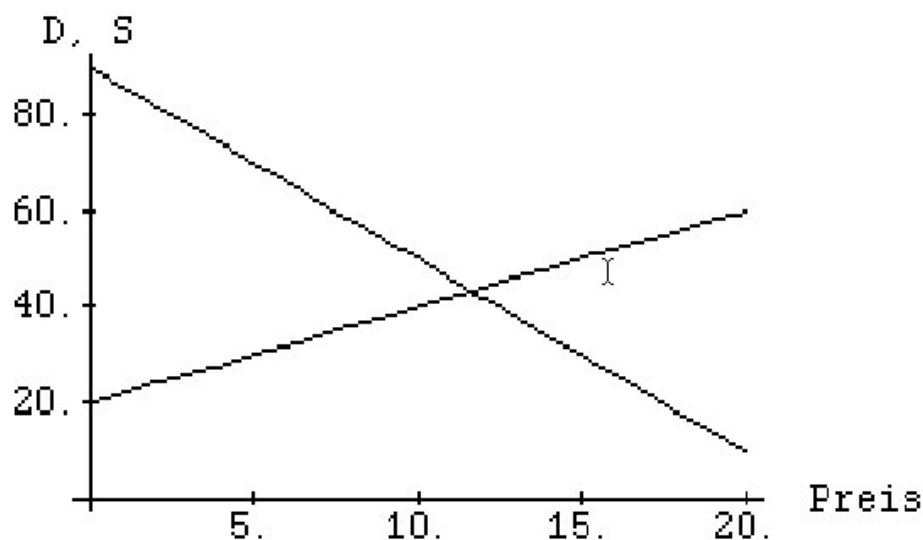
Das Schaubild zeigt, daß es einen einzigen Preis P^* gibt, der ein Gleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage herstellt. Er entspricht einer Menge $X^* = D^* = S^*$.

Die Gleichgewichtswerte für P^* und X^* lauten als Funktion der Parameter der linearen Gleichungen

$$P^* = (a_D - a_S) / (b_D + b_S) \quad \text{und} \quad (3)$$

$$X^* = (a_D b_S + a_S b_D) / (b_D + b_S) \quad (4)$$

Es ist zu beachten, daß bei Preisen ungleich dem Gleichgewichtswert P^* "tatsächlich" die Mengen $X(P) = \min(D, S)$ gehandelt werden.



8.2. DYNAMISCHE DARSTELLUNG

In 8.1. wurde der Preis P als exogen festgelegt angenommen. Es ist wirklichkeitsnäher, einen Anpassungsmechanismus für den Preis in Abhängigkeit von der Größe des Ungleichgewichts vorzusehen. Besteht ein Überangebot am Markt, wird sich ein Preisverfall einstellen, bei einem Nachfrageüberhang wird der Preis erhöht werden. Zusätzlich zu den Gleichungen (1) und (2) tritt eine Gleichung zur Preisanpassung. Zunächst soll der diskrete Fall behandelt werden, bei dem die Preise von einem Tag auf den anderen adaptiert werden, was dem Fall einer Differenzengleichung entspricht:

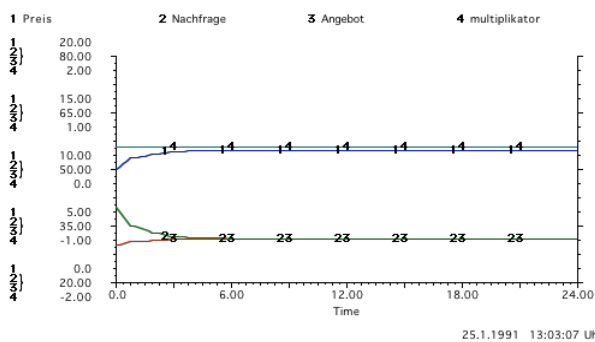
$$P(t+1) = P(t) + a_P [D(t) - S(t)] \quad (5)$$

Unter Angabe des Anfangswertes P_0 zum Zeitpunkt $t = t_0$ lässt sich das Differenzengleichungssystem iterativ lösen. Die explizite Darstellung der Lösung für P lautet:

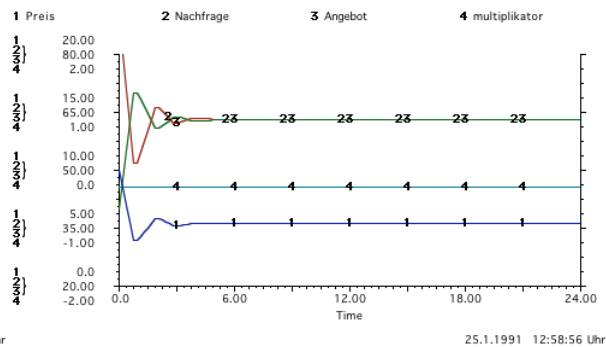
$$P(t-t_0) = -(a_D - a_S)/(b_D + b_S) + [P_0 - (a_D - a_S)/(b_D + b_S)] [1 - a_P(b_S + b_D)]^{(t-t_0)} \quad (6)$$

Der Preis schwankt um die Gleichgewichtslösung (3). Ob er sich im Laufe der Zeit der Gleichgewichtslösung nähert oder sich von ihr entfernt, hängt offenbar von der Konstanten $C = [1 - a_P(b_S + b_D)]$ ab. Ist diese Konstante bei nichtnegativen a_P , b_S und b_D dem Betrag nach < 1 , wird sich der Preis dem Gleichgewichtswert nähern, ist $C > 0$, von der gleichen Seite (also von oben oder von unten) (Fall 1). Liegt C zwischen 0 und -1, wird der Gleichgewichtspreis alternierend angenähert (Fall 2). Ist sie kleiner als -1, entfernt sich der Preis alternierend vom Gleichgewicht (Fall 3). Ist die Konstante exakt gleich -1, entsteht eine Schwingung mit konstanter Amplitude, deren Periode zwei Zeitperioden beträgt (Fall 4).

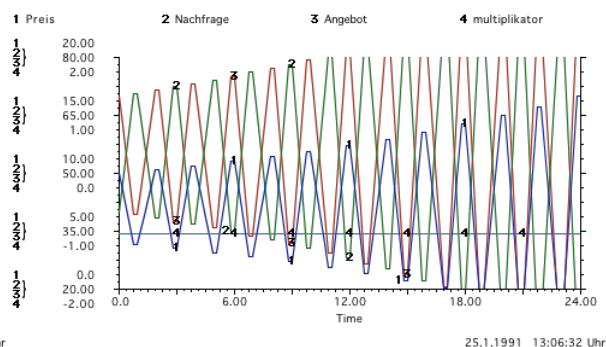
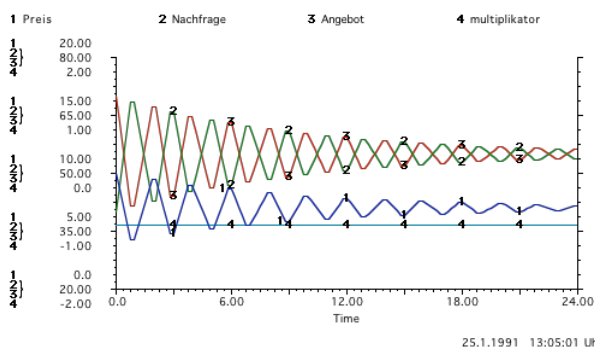
Fall 1 ($C = +0.4$)



Fall 2 ($C = -0.3$)



Fall 3 ($C = -0.9$) Fall 4 ($C = -1.05$)



Aufgabe: Zeige die Richtigkeit der Lösung!

Formulieren wir das Marktmodell für stetige Prozesse, indem wir in Gleichung (5) die Schrittweite gegen Null gehen lassen, erhalten wir eine uns schon bekannte Differentialgleichung erster Ordnung, von der wir wissen, daß sie sich nur nach Exponentialfunktionen verhalten wird.

$$dP(t)/dt = a_P [D(t) - S(t)] = a_P [a_D - b_D P(t) - a_S - b_S P(t)] \quad (7)$$

mit der Lösung vom Typ

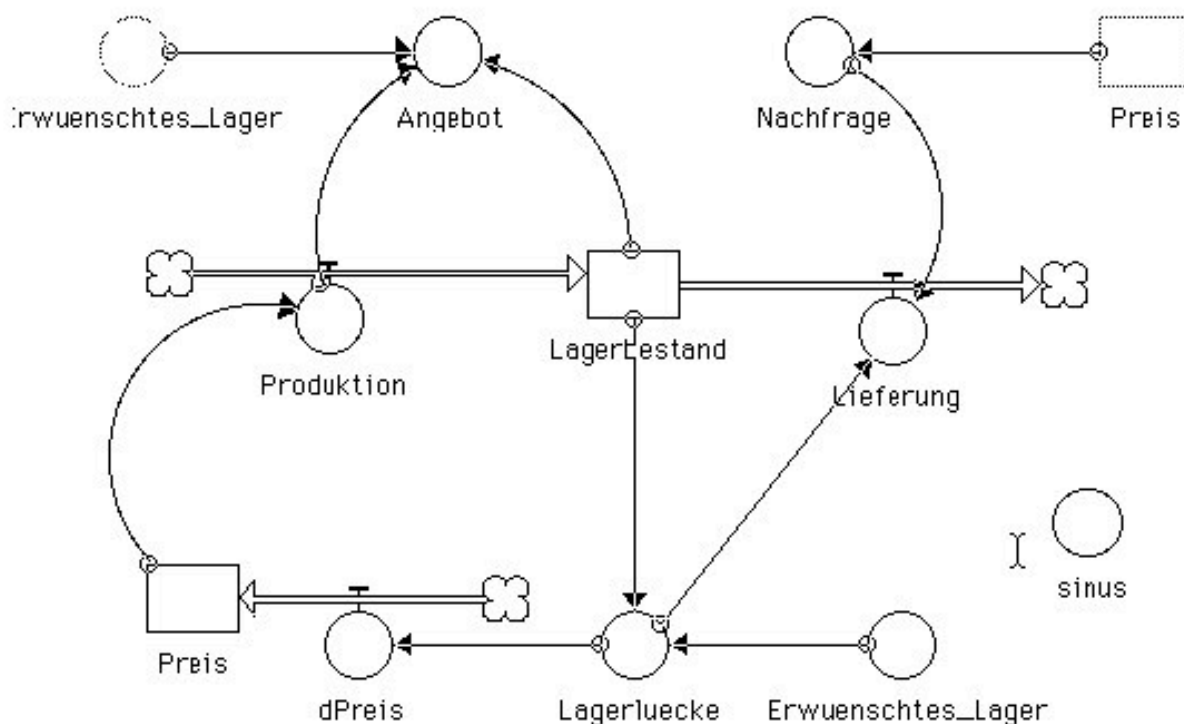
$$P(t) = A e^{-a_P(b_S + b_D)(t - t_0)} + B \quad (8)$$

Die Geschwindigkeit der Anpassung an den Gleichgewichtswert wird durch die Zeitkonstante $T = 1/[a_P(b_S + b_D)]$ bestimmt.

8.3. MARKT MIT LAGERHALTUNG

In einer weiteren Stufe soll ein idealisierter Markt dargestellt werden, der von einem Unternehmen beliefert wird. Das Unternehmen hält einen Lagerbestand, um nicht lieferunfähig zu werden. Es verändert den Verkaufspreis seines Produkts nach folgender Regel: Liegt der Lagerstand über einer gewünschten Höhe, wird der Preis gesenkt, um die Nachfrage zu stimulieren. Gleichzeitig wird die Produktion in Abhängigkeit vom Preis zurückgefahren. Das potentielle Käuferverhalten wird durch eine Nachfragefunktion beschrieben, die vom Preis mit negativem Vorzeichen abhängt.

Das STELLA-Diagramm hat folgende Gestalt:



Die Produktionsfunktion in Abhängigkeit vom Preis lautet:

$$Produktion = 2 * Preis + 20 \quad (9)$$

{Produktion in Abhängigkeit vom Preis, Stück pro Monat}

Die Nachfragefunktion (hier zunächst identisch mit den Lieferungen) in Abhängigkeit vom Preis lautet

$$Nachfrage = 90 - 4 * Preis \quad (10)$$

{Nachfrage in Abhängigkeit vom Preis, Stück pro Monat}

Die restlichen Gleichungen lauten:

$$\begin{aligned} \text{Lager} &= \text{Lager} + dt * (\text{Produktion} - \text{Lieferung}) \\ \text{INIT}(\text{Lagerbestand}) &= 50 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{Preis} &= \text{Preis} + dt * (d\text{Preis}) \\ \text{INIT}(\text{Preis}) &= 10 \text{ \{Preis in Schilling\}} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{Angebot} &= \text{Produktion} + \text{Lagerbestand} - \text{Erwünschtes_Lager} \\ d\text{Preis} &= \text{Lagerluecke} / 20 \text{ \{Preisveraenderung in Schilling/Monat\}} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\text{Erwünschtes_Lager} = 40 \text{ \{Erwünschte Lagerquote in Monaten\}} \quad (14)$$

$$\text{Lagerluecke} = \text{Erwünschtes_Lager} - \text{Lager} \text{ \{Lagerluecke in Stück\}} \quad (15)$$

$$\text{Lieferung} = \text{Nachfrage} \text{ \{Lieferung pro Monat in Stück\}} \quad (16)$$

Die Differentialgleichung für die Lagerbestand ergibt sich mit (9), (10), (11) und (16) nach Grenzübergang für $dt \rightarrow 0$ als:

$$\begin{aligned} d\text{Lager}/dt &= \text{Produktion} - \text{Lieferung} = 2 * \text{Preis} + 20 - 90 + 4 * \text{Preis} \\ &= -70 + 6 * \text{Preis} \end{aligned} \quad (17)$$

Aus (12), (13) und (15) folgt nach Grenzübergang

$$d\text{Preis}/dt = \text{Lagerluecke} / 20 = (\text{Erwünschtes_Lager} - \text{Lager}) / 20 \quad (18)$$

Ableitung von (17) nach dt und Einsetzen von (18) ergibt

$$d(d\text{Lager}/dt)/dt = 3/10 * ((\text{Erwünschtes_Lager} - \text{Lager})) \quad (19)$$

(19) stellt eine lineare inhomogene Differentialgleichung zweiter Ordnung in der Variablen "Lager" dar, deren homogene Gleichung sich mit folgendem Ansatz lösen läßt

$$\text{Lager}_h(t) = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (20)$$

Durch Einsetzen von (20) in die homogene Gleichung von (19) erhalten wir ω :

$$-A \omega^2 \cos(\omega t + \varphi) = -0.3 A \cos(\omega t + \varphi) \quad (21)$$

$\omega^2 = 0.3$ und daher $\omega_1 = +0.54772$, $\omega_2 = -0.54772$

Der Kreisfrequenz $\omega = 2\pi/T$ entspricht eine Schwingungsdauer von

$$T = 2\pi/\omega = 11.147 \text{ Monaten.}$$

Eine konstante Partikulärlösung B ergibt sich aus

$$\text{Lager}_p(t) = B = 40$$

Die allgemeine Lösung lautet daher

$$\text{Lager}(t) = \text{Lager}_h(t) + \text{Lager}_p(t) = A \cos(0.54772 t + \varphi) + 40 \quad (22)$$

Aus der Anpassung an die Anfangsbedingung in (11) folgt für $t=0$

$$\begin{aligned} \text{Lager}(t=0) &= 50 = A \cos \varphi + 40 \\ A \cos \varphi &= 10 \end{aligned} \quad (23)$$

und aus (12) und (17) folgt

$$-\omega A \sin \varphi = -10 \quad (24)$$

Dividieren wir (24) durch (23), erhalten wir die Bestimmungsgleichung für φ

$$\tan \varphi = 10/\omega \quad (25)$$

und daraus

$$\varphi = 61.289 \text{ in Grad oder } 1.0697 \text{ im Bogenmaß} \quad (26)$$

Einsetzen von φ in (23) ergibt für A den Wert

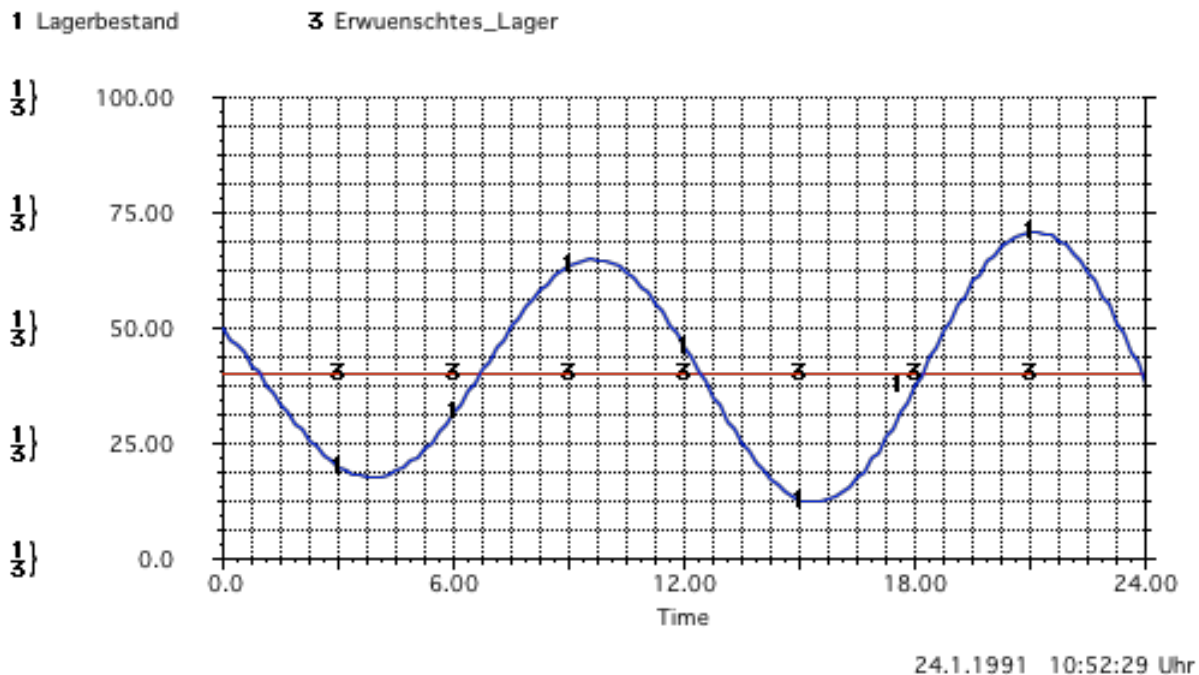
$$A = 10/\cos \varphi = 10/0.48038 = 20.8166.$$

Die an die Anfangswerte angepaßte Lösung lautet

$$\text{Lager}(t) = 20.8166 \cdot \cos(0.54772 t + 1.0697) + 40, \quad (27)$$

also eine ungedämpfte Schwingung mit konstanter Amplitude.

An der folgenden Graphik, die direkt aus STELLA übernommen wurde, fällt auf, daß die Amplitude der Schwingung im Gegensatz zu (27) nicht konstant bleibt, sondern mit der Zeit wächst. Grund dafür ist die Integrationsmethode, die in diesem Falle auf einfachste Weise durch iteratives Berechnen der Differenzengleichungen nach jedem Zeitschritt dt erfolgte. Dieses sogenannte EULER-Verfahren ist dadurch charakterisiert, daß die Flußgrößen zu Beginn des Zeitintervalls berechnet und während des Zeitintervalls dt konstant gehalten werden. Dadurch ergeben sich Approximationsfehler, die durch eine Verkleinerung der Schrittweite dt reduziert werden können. Nähert sich die Schrittweite dt sehr kleinen Werten, treten wieder numerische Ungenauigkeiten auf, die das Ergebnis verfälschen. Der Vorteil des EULER-Verfahrens ist seine Einfachheit, der Nachteil seine geringe Genauigkeit.



Das von STELLA als Alternative in zwei Varianten angebotene RUNGE-KUTTA-Verfahren (RUNGE-KUTTA 2 und RUNGE-KUTTA 4) ist genauer, benötigt aber mehr Rechenaufwand und ist daher langsamer. Die Flußgrößen werden im Zeitintervall dt nicht mehr konstant gehalten, sondern innerhalb des Intervalls für eine bestimmte Anzahl von Punkten (2 oder 4) explizit berechnet.

RUNGE-KUTTA 4 benützt folgenden Algorithmus: Die Flußgröße $F(t,X)$, eine Funktion der Zeit und etwaiger Bestandsgrößen X , wird hintereinander an vier Stellen berechnet

$$\begin{aligned} F_1 &= dt * F(t, X) \\ F_2 &= dt * F(t + dt/2, X + F_1/2) \\ F_3 &= dt * F(t + dt/2, X + F_2/2) \\ F_4 &= dt * F(t + dt, X + F_3) \end{aligned}$$

Danach werden die Bestandsgrößen aufdatiert

$$X_t = X_{t-dt} + 1/6 * (F_1 + F_2 + F_3 + F_4)$$

und die interne Modellzeit um dt erhöht

$$t = t + dt$$

Danach beginnt die nächste Iteration.

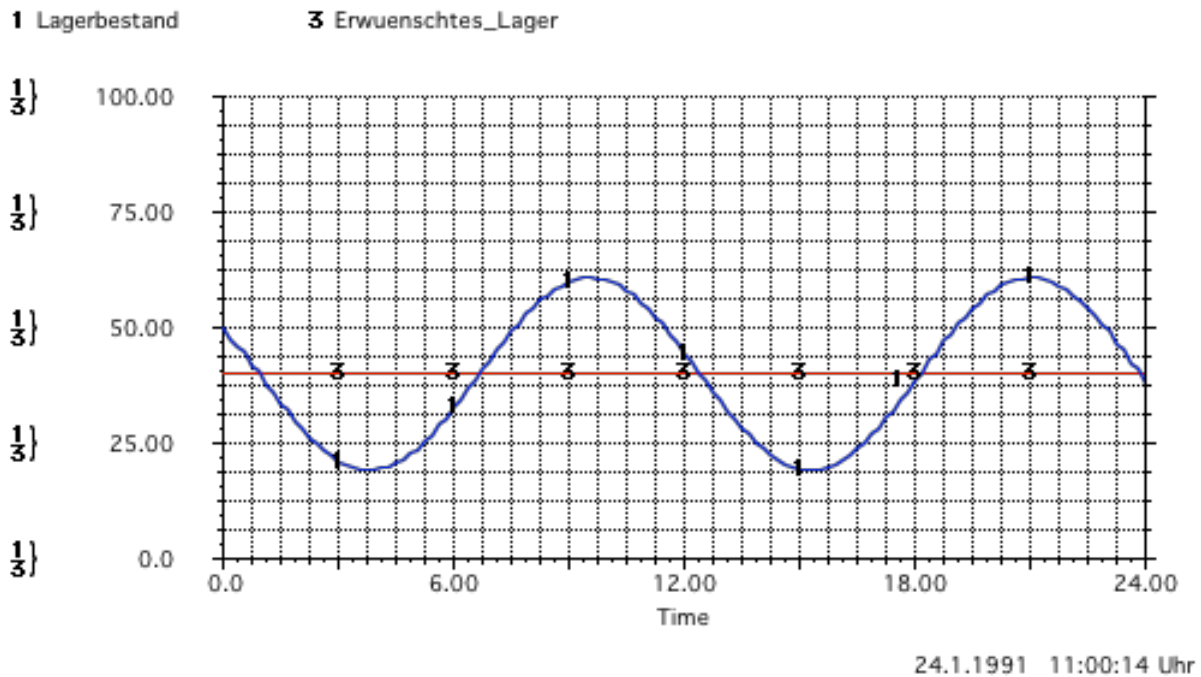
Das RUNGE-KUTTA-Verfahren 2ter Ordnung ist etwas einfacher und daher schneller. Es kommt mit zwei Bewertungen je dt aus:

$$\begin{aligned} F_1 &= dt * F(t, X) \\ F_2 &= dt * F(t + dt, X + F_1) \\ X_t &= X_{t-dt} + 1/2 * (F_1 + F_2) \end{aligned}$$

In der Praxis wird ausprobiert, ob sich beim Übergang vom EULER-Verfahren auf RUNGE-KUTTA für das Simulationsergebnis intolerable Unterschiede ergeben. Sind keine derartigen Unterschiede feststellbar, kann in den meisten Fällen weiterhin EULER benutzt werden.

Wenden wir RUNGE-KUTTA 2 auf das obige Beispiel an, werden die Abweichungen von der exakten Lösung unsichtbar. Anwendung von RUNGE-KUTTA 4 zeigt keine sichtbare Verbesserung gegenüber RUNGE-KUTTA 2, obwohl durchaus kleinere numerische Unterschiede bestehen. Die folgende Tabelle zeigt einen Vergleich der Integrationsmethoden

Zeit	Lagerbestand EULER	Lagerbestand RUNGE-KUTTA 2	Lagerbestand RUNGE-KUTTA 4	Exakte Lösung Gleichung (19)
0.0	50.00	50.00	50.00	50.00
0.125	48.75	48.73	48.73	48.73
0.250	47.45	47.41	47.41	47.41
0.375	46.12	46.06	46.07	46.07
0.500	44.74	44.69	44.69	44.69
0.625	43.34	43.29	43.29	43.29
0.750	41.92	41.87	41.88	41.88
0.875	40.48	40.45	40.45	40.45
1.00	39.03	39.02	39.03	39.03
...				
8.00	56.16	54.08	54.02	54.02
8.13	57.39	55.09	55.04	55.04
8.25	58.55	56.04	55.99	55.99
8.38	59.62	56.91	56.87	56.87
8.50	60.61	57.70	57.66	57.66
8.63	61.51	58.41	58.37	58.37
8.75	62.30	59.04	59.00	59.00
8.88	63.00	59.57	59.54	59.54
9.00	63.59	60.01	59.98	59.98
9.13	64.08	60.36	60.34	60.33
9.25	64.45	60.61	60.59	60.59
9.38	64.71	60.76	60.75	60.75
9.50	64.86	60.82	60.82	60.82
9.63	64.89	60.78	60.78	60.78
9.75	64.81	60.64	60.65	60.65
9.88	64.60	60.41	60.42	60.42
10.00	64.29	60.08	60.10	60.10
...				
23.00	55.05	49.25	49.42	49.43
23.13	53.11	47.95	48.13	48.13
23.25	51.11	46.61	46.80	46.80
23.38	49.04	45.24	45.44	45.44
23.50	46.93	43.85	44.05	44.05
23.63	44.77	42.44	42.65	42.65
23.75	42.57	41.02	41.23	41.23
23.88	40.36	39.59	39.80	39.81
24.00	38.13	38.17	38.38	38.38



8.4. MARKT MIT AUSWIRKUNGEN DER LAGERBESTÄNDE AUF DIE LIEFERUNGEN

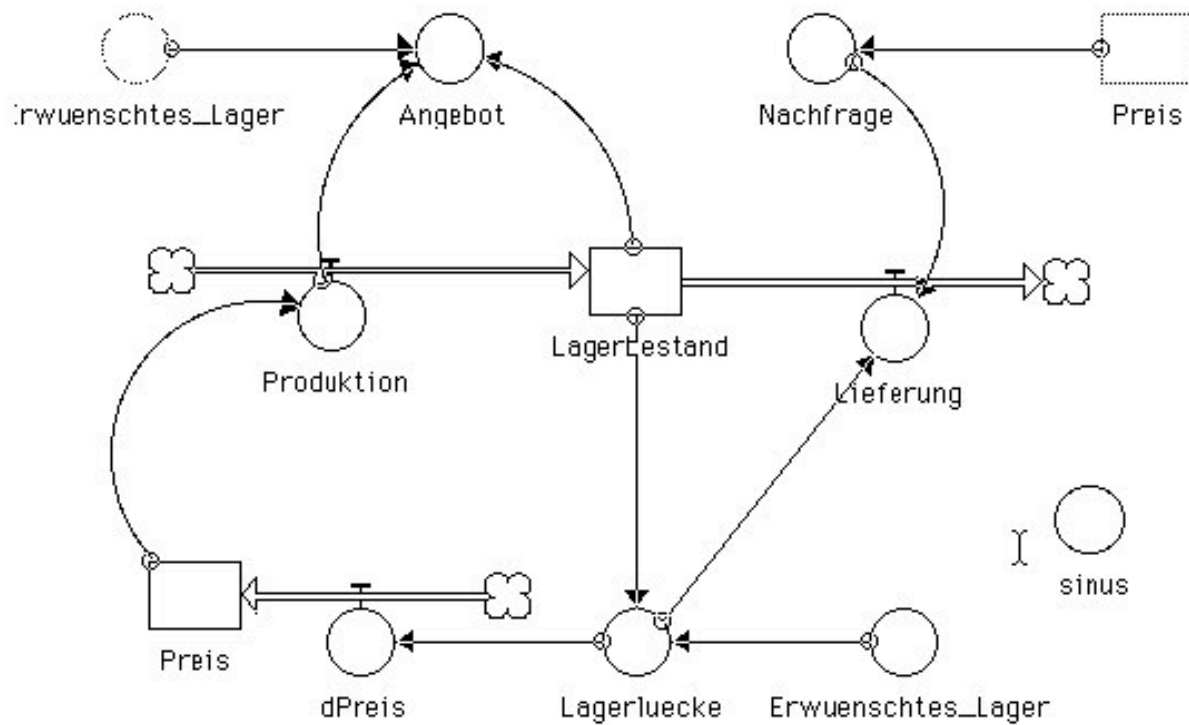
Diese Variante ist dadurch gekennzeichnet, daß die Lieferungen nicht nur von der Nachfrage bestimmt sind, sondern auch bei Vorhandensein eines Lagerbestandes, der das erwünschte Ausmaß übersteigt, zusätzlich erhöht, ansonsten gedrosselt werden. Durch Ersatz der Lieferungsgleichung (16) durch

$$\text{Lieferung} = \text{Nachfrage} + a_L (\text{Lager} - \text{Erwuensches_Lager}) \quad (28)$$

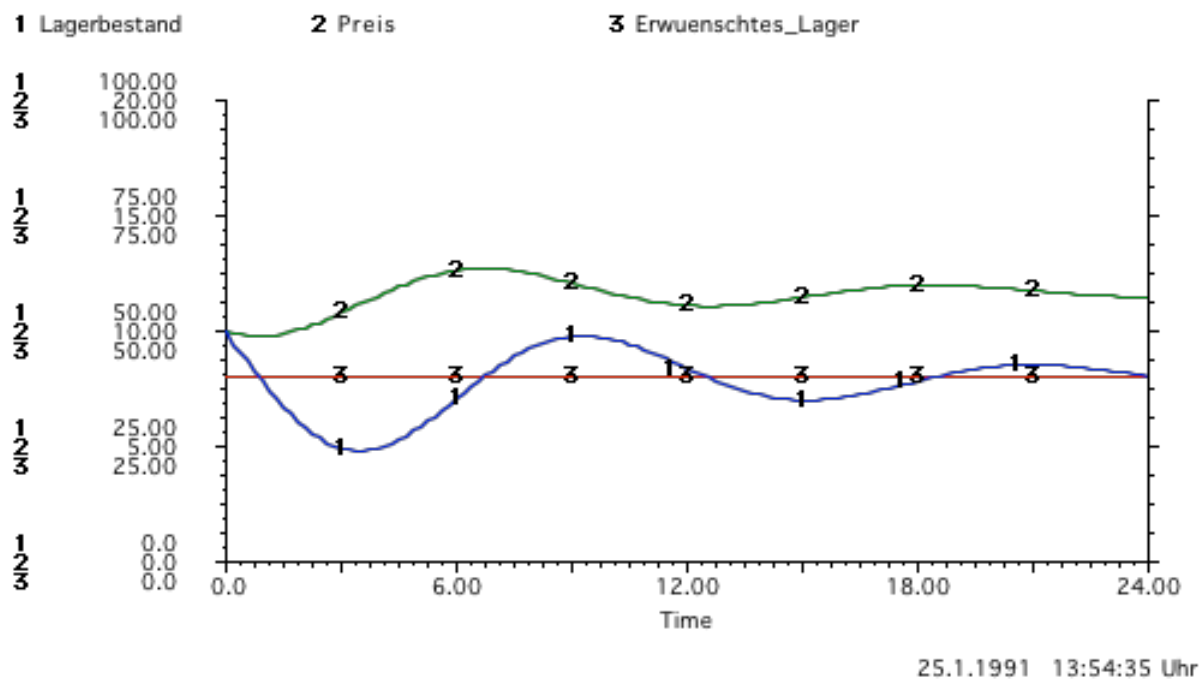
{Lieferung pro Monat in Stück}

ergibt sich eine Differentialgleichung zweiter Ordnung mit einem Dämpfungsglied.

Das STELLA-Diagramm ist nur unwesentlich verändert gegenüber dem vorigen Abschnitt (umseitig)



Die Lösung hat folgende Gestalt:



Aufgabe: Schreibe die Differentialgleichung für die Lagerbestände explizit an und löse sie auch numerisch ($a_L = 0.2$)