

Mag. Reinhard WAGNER

# **Stock-Flow-Thinking und Bathtub Dynamics**

## **Eine Theorie von Bestands- und Flussgrößen**

### **Dissertation**

Zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

Universität Klagenfurt

Fakultät für Wirtschaftswissenschaften und Informatik

1. Begutachter: Ao. Univ. Prof. Dr. Günther OSSIMITZ  
Institut für Mathematik, Universität Klagenfurt
2. Begutachter: Ao. Univ. Prof. Dr. Reinhold LAZAR  
Institut für Geographie und Raumforschung, Karl-Franzens-Universität Graz

NOVEMBER 2004

## **EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Schrift verfasst und die mit ihr unmittelbar verbundenen Arbeiten selbst durchgeführt habe. Die in der Schrift verwendete Literatur sowie das Ausmaß der mir im gesamten Arbeitsvorgang gewährten Unterstützung sind ausnahmslos angegeben. Die Schrift ist noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt worden.

Mag. Reinhard WAGNER

Graz, November 2004

## VORWORT

Der Thematik des Stock-Flow-Thinkings begegnete ich zum ersten Mal im Jahr 2000, als ich im Rahmen einer Lehrveranstaltung in einem Zweierteam an der Auswertung der ersten diesbezüglichen empirischen Untersuchung von Prof. Günther OSSIMITZ mitarbeiten durfte. Wie sich zeigte, sollte diese Mitarbeit – um in der systemischen Ausdrucksweise zu bleiben – noch weitreichende (und äußerst positive!) „Fern- und Nebenwirkungen“ für mich haben. Denn nicht nur, dass diese Beteiligung nun Jahre später zum Thema der vorliegenden Dissertation führte, vielmehr lernte ich im Zuge dieser Projektarbeit auch meine geliebte Frau kennen...

Ich danke meinem Freund und Betreuer Günther OSSIMITZ für die zahlreichen Ideenanstöße und Tipps, welche er stets während der Ausarbeitungsphase für mich zur Verfügung hatte. Ohne ihn wäre die Qualität dieser Arbeit eine andere.

Weiters danke ich auch Reinhold LAZAR, der sich spontan bereit erklärte die Zweitbetreuung der Dissertation zu übernehmen. Auf Grund seines (und auch meines) geographischen Backgrounds habe ich stellenweise versucht, der eigentlich systemwissenschaftlich ausgerichteten Arbeit einen Bezug zum Gebiet der Geographie zu geben.

Darüber hinaus danke ich all jenen anderen Personen, die auf die eine oder andere Weise zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen haben.

Reinhard WAGNER

Graz, im November 2004

# INHALTSÜBERSICHT

Ehrenwörtliche Erklärung .....	II
Vorwort .....	III
Inhaltsübersicht .....	IV
Inhaltsverzeichnis .....	V
Abkürzungsverzeichnis .....	IX
<b>Abstract .....</b>	<b>1</b>
<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>2</b>
<b>1. Einführung .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Systems Thinking und System Dynamics .....</b>	<b>8</b>
<b>3. Darstellung von Bestands- und Flussgrößen .....</b>	<b>28</b>
<b>4. Stocks vs. Flows – der Abriss einer Theorie .....</b>	<b>36</b>
<b>5. Die Verbindung zwischen Bestands- und Flussgrößen .....</b>	<b>64</b>
<b>6. Untersuchungen zum Thema Stock-Flow-Thinking .....</b>	<b>93</b>
<b>7. Erklärungsversuche .....</b>	<b>139</b>
<b>8. Die Bedeutung der Theorie von Stocks und Flows für diese Untersuchungen ..</b>	<b>145</b>
<b>9. Bestands- und Flussgrößen in geographischen Kontexten .....</b>	<b>149</b>
<b>10. System Dynamics und Geographie .....</b>	<b>161</b>
<b>11. Reflexion .....</b>	<b>183</b>
Literaturverzeichnis .....	X
Anhang .....	XVII

# INHALTSVERZEICHNIS

Ehrenwörtliche Erklärung .....	II
Vorwort .....	III
Inhaltsübersicht .....	IV
Inhaltsverzeichnis .....	V
Abkürzungsverzeichnis .....	IX
<b>Abstract .....</b>	<b>1</b>
<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>2</b>
<b>1. Einführung .....</b>	<b>3</b>
1.1. Einleitung und Problemstellung .....	3
1.2. Zielsetzung der Arbeit .....	6
1.3. Formaler Aufbau der Arbeit .....	7
<b>2. Systems Thinking und System Dynamics .....</b>	<b>8</b>
2.1. Systemwissenschaften .....	8
2.2. Mentale Modelle .....	12
2.3. System Dynamics .....	13
2.4. Systems Thinking .....	14
2.5. Komplexe dynamische Situationen und Stock-Flow-Thinking .....	18
<b>3. Darstellung von Bestands- und Flussgrößen .....</b>	<b>28</b>
3.1. Wirkungsdiagramme .....	28
3.2. Flussdiagramme .....	31
<b>4. Stocks vs. Flows – der Abriss einer Theorie .....</b>	<b>36</b>
4.1. Das Konzept von Beständen und Flüssen in unterschiedlichen Disziplinen .....	37
4.2. Stocks und Flows bei unterschiedlichen Autoren .....	37
4.3. Identifizierung von SF .....	40
4.3.1. Bestandsgrößen .....	41
4.3.1.1. Die Bedeutung von Bestandsgrößen für Systeme .....	49
4.3.1.2. Negative Werte bei Bestandsgrößen .....	50
4.3.2. Flussgrößen .....	52
4.3.2.1. Die Bedeutung von Flussgrößen für Systeme .....	60
4.3.2.2. Graubereiche zwischen Bestands- und Flussgrößen .....	60
4.3.3. Stocks und Flows – eine Definition .....	62

<b>5. Die Verbindung zwischen Bestands- und Flussgrößen .....</b>	<b>64</b>
5.1. Graphisches Integrieren .....	64
5.2. Graphisches Differenzieren .....	69
5.3. Die Dynamik von Bestands- und Flussgrößen – Stocks u. Flows vs. Feedback .71	
5.3.1. Positives Feedback – Exponentielles Wachstum .....	72
5.3.2. Negatives Feedback – Goal Seeking Behavior .....	75
5.3.3. Logistisches Wachstum .....	77
5.3.4. Overshoot-and-Collapse .....	80
5.3.5. Oszillationen .....	81
5.3.6. Andere Formen von Dynamik .....	85
5.4. Managing a Stock .....	87
<b>6. Untersuchungen zum Thema Stock-Flow-Thinking .....</b>	<b>93</b>
6.1. BOOTH-SWEENEY/STERMAN (2000): Bathtub Dynamics .....	93
6.1.1. Bath Tub / Cash Flow (BT/CF) .....	94
6.1.2. The Manufacturing Case (MC) .....	99
6.1.3. Signifikante Zusammenhänge und Ergebnisse .....	103
6.2. ZAHN/KAPMEIER (2001) .....	105
6.2.1. Bath Tub / Cash Flow (BT/CF) .....	105
6.2.2. The Manufacturing Case (MC) .....	107
6.2.3. Erkenntnisse .....	108
6.3. OSSIMITZ (2001a / 2001b) .....	108
6.3.1. Staatsschulden vs. Budgetdefizit .....	109
6.3.2. Das Alpenhotel .....	110
6.3.3. Bath Tub / Cash Flow (BT/CF) .....	111
6.3.4. Restliche Aufgabenstellungen .....	112
6.3.5. Erkenntnisse .....	113
6.4. KAINZ/OSSIMITZ (2002) bzw. OSSIMITZ et al. (2001) .....	114
6.4.1. Aufgabe A .....	115
6.4.2. Aufgabe B .....	116
6.4.3. Aufgabe C .....	117
6.4.4. Aufgabe D .....	117
6.4.5. Aufgabe E .....	118
6.4.6. Ergebnisse und Erkenntnisse .....	118
6.5. STERMAN/BOOTH-SWEENEY (2002): Cloudy Skies .....	120
6.5.1. Das Null-Emissions – Szenario (ZE) .....	122

6.5.2.	Das stabile CO <sub>2</sub> Emissions – Szenario .....	123
6.5.3.	Erkenntnisse .....	126
6.6.	Weitere Untersuchungen in den USA und Kanada .....	126
6.6.1.	Bath Tub / Cash Flow (BT/CF) .....	128
6.6.2.	The Department Store (DS) .....	128
6.6.3.	The Manufacturing Case (MC) .....	129
6.6.4.	Erkenntnisse .....	129
6.7.	KAPMEIER (2004) .....	130
6.7.1.	Bath Tub / Cash Flow (BT/CF) .....	130
6.7.2.	The Manufacturing Case (MC) .....	131
6.7.3.	The Department Store (DS).....	132
6.7.4.	Erkenntnisse .....	132
6.8.	ARMENIA/ORNORI/BERTINI (2004) .....	133
6.8.1.	Pretest - Bath Tub / Cash Flow (BT/CF) .....	134
6.8.2.	Posttest - The Manufacturing / The Department Store Case (MC/DS) ..	134
6.8.3.	Erkenntnisse .....	135
6.9.	Zusammenfassung und Bedeutung der Ergebnisse .....	136
<b>7.</b>	<b>Erklärungsversuche .....</b>	<b>139</b>
7.1.	Einwände .....	139
7.1.1.	Motivationsmangel .....	139
7.1.2.	Realitätsfremde Aufgabenstellungen .....	140
7.1.3.	Zeitmangel .....	142
7.2.	Stock – Flow – Unverständnis und mentale Modelle .....	142
<b>8.</b>	<b>Die Bedeutung der Theorie von Stocks und Flows für diese Untersuchungen .</b>	<b>145</b>
<b>9.</b>	<b>Bestands- und Flussgrößen in geographischen Kontexten .....</b>	<b>149</b>
9.1.	Klima .....	149
9.2.	Management von (nicht) erneuerbaren Ressourcen .....	153
9.3.	Bevölkerungswachstum .....	155
9.4.	Weitere Beispiele .....	160
<b>10.</b>	<b>System Dynamics und Geographie .....</b>	<b>161</b>
10.1.	System Dynamics .....	161
10.1.1.	Urban Dynamics – Stadtentwicklung .....	162
10.1.2.	World Dynamics .....	164
10.1.3.	Klimamodelle .....	165
10.2.	Probleme der SD in der Geographie .....	170

10.3. Modellbildung in der Geographie .....	174
10.3.1. Makroanalytische Modelle .....	176
10.3.2. Mikroanalytische Modelle .....	177
10.3.2.1. Multi-Agenten-Systeme .....	178
10.3.2.2. Zelluläre Automaten .....	180
10.4. Möglichkeiten der SD in der Geographie .....	181
<b>11. Reflexion .....</b>	<b>183</b>
11.1. Was konnte diese Dissertation leisten? .....	183
11.2. Was habe ich persönlich gelernt? .....	184
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>..X</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>XVII</b>

# ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

<b>bspw.</b>	beispielsweise
<b>BT/CF</b>	Bath Tub / Cash Flow (Bezeichnung einer Aufgabenstellung der Untersuchung von BOOTH-SWEENEY/STERMAN 2000)
<b>CLD</b>	Causal-Loop-Diagramm (Wirkungsdiagramm)
<b>DS</b>	Department Store (Bezeichnung einer Aufgabenstellung einer in STERMAN 2002 geschilderten Untersuchung. Diese basiert sehr stark auf der „Alpenhotelaufgabe von OSSIMITZ 2001a)
<b>GIS</b>	Geographisches Informationssystem
<b>MAS</b>	Multi-Agenten-System
<b>MC</b>	Manufacturing Case (Bezeichnung einer Aufgabenstellung der Untersuchung von BOOTH-SWEENEY/STERMAN 2000)
<b>MIT</b>	Massachusetts Institute of Technology (USA)
<b>MOF</b>	Misperception of feedback (Erklärungshypothese von STERMAN 1989 für das menschliche Fehlverhalten in dynamisch komplexen Situationen)
<b>SD</b>	Systemdynamik (System Dynamics)
<b>SFD</b>	Stock-Flow-Diagramm (Flussdiagramm)
<b>ST</b>	Systemdenken, systemisches Denken (Systems Thinking)
<b>vgl.</b>	vergleiche
<b>Vpn</b>	Versuchsperson, -en

# ABSTRACT

Dissertation, Reinhard Wagner

## **Stock-Flow-Thinking and Bathtub Dynamics. A Theory of Stocks and Flows.**

Coached by: Ao. Univ. Prof. Dr. Günther OSSIMITZ

Ao. Univ. Prof. Dr. Reinhold LAZAR

Fakultät für Wirtschaftswissenschaften und Informatik, Universität Klagenfurt

The branch of research of Stock-Flow-Thinking, also known as “Bathtub Dynamics”, which deals mainly with stock concepts (levels) and flow concepts (rates), has developed from the investigation of human behaviour in complex dynamic situations. Those two elementary parts of systems (stocks and flows) are the basic requirements for all kinds of dynamic development processes in natural systems. However, several studies could proof that the human intuitive comprehension of stocks and flows is extremely modest, which could thoroughly be the matter of a crucial source for the well known human deficiency in complex dynamic situations.

This paper comprehends four parts. The first one is an introduction of systems thinking and the “System Dynamics” – modelling method. Ensuing the second part tries to have a look at the characteristics of stocks and flows, as well as their role in systems in a theoretical way. By this means a communicable theoretical knowledge of these two components of systems shall be generated, whereby it might be possible to abolish the observed shortcomings in future. Stocks and flows are not only inseparably connected with but also require each other. While flows deal with changes in stock-variables, stocks represent useful accumulations of flows. A change of stocks through inflows and outflows provokes, in connection with feedbacks and time delays, different kinds of dynamic growth or oscillation processes. A better understanding of stocks and flows would therefore at the same time result in a better understanding of internal processes in systems and also cause a more system-compatible human behaviour regarding feedforward control, steering and governance of systems.

The third part of the dissertation presents the published studies in the field research of Bathtub Dynamics and provides therefore a detailed summary of the up-to-date level of research. In conclusion, in the fourth and last part an attempt of creating a connection to geographical concerns is made by identifying stocks and flows in the field of geography and emphasizing problems and types of quantitative modelling in geographical systems.

# ZUSAMMENFASSUNG

Dissertation, Reinhard Wagner

## **Stock-Flow-Thinking und Bathtub Dynamics. Eine Theorie von Bestands- und Flussgrößen.**

Betreuer: Ao. Univ. Prof. Dr. Günther OSSIMITZ

Ao. Univ. Prof. Dr. Reinhold LAZAR

Fakultät für Wirtschaftswissenschaften und Informatik, Universität Klagenfurt

Ausgehend von der Erforschung des menschlichen Verhaltens in dynamisch komplexen Situationen entwickelte sich der Forschungszweig des Stock-Flow-Thinkings, auch bekannt als Bathtub Dynamics, welcher sich mit Bestandsgrößen (Stocks) und Flussgrößen (Flows) beschäftigt. Diese beiden Größen sind für sämtliche dynamische Entwicklungsprozesse in natürlichen Systemen Grundvoraussetzung. Dennoch – so konnten mehrere Untersuchungen zeigen – ist das intuitive Verständnis von Stocks und Flows äußerst bescheiden, wobei es sich durchaus um eine entscheidende Quelle für das bekannte menschliche Versagen in komplexen dynamischen Systemen handeln könnte.

Die vorliegende Arbeit umfasst vier Bereiche: In ersten Abschnitt wird eine Einführung in die Systemwissenschaften und die System Dynamics – Modelliermethode gegeben. Darauf folgend wird im zweiten Teil der Versuch unternommen, sich auf theoretischer Ebene mit den Eigenschaften von Stocks und Flows und ihrer Rolle in Systemen auseinander zu setzen. Auf diese Weise soll ein vermittelbares theoretisches Wissen über diese Größen erarbeitet werden, wodurch in der Folge auch die beobachteten Defizite bekämpft werden könnten. Bestands- und Flussgrößen sind untrennbar miteinander verknüpft - sie bedingen einander. Während es sich bei Flussgrößen um Veränderungen von Beständen handelt, stellen Bestandsgrößen wiederum sinnvolle Akkumulationen von Flussgrößen dar. Die Veränderung dieser Bestände durch Zu- und Abflüsse bewirkt in Zusammenhang mit Rückkoppelungen (Feedback) und Zeitverzögerungen unterschiedliche dynamische Wachstums- bzw. Oszillationsprozesse. Ein besseres Verständnis von Stocks und Flows würde daher gleichzeitig ein besseres Verständnis systeminterner Abläufe und ein systemgerechteres Handeln in Hinblick auf Lenkungs- und Steuerungsmaßnahmen von Systemen bewirken.

Im dritten Teil der Arbeit werden die bis dato veröffentlichten Studien des Forschungsgebietes der Bathtub Dynamics und somit der aktuelle Forschungsstand umfangreich zusammengefasst. Abschließend wird im vierten und letzten Teil der Versuch unternommen, einen Konnex zu geographischen Belangen zu schaffen, indem exemplarisch Bestands- und Flussgrößen in der Geographie sowie Probleme und Methoden quantitativer Modellierung geographischer Systeme aufgezeigt werden.

# 1. Einführung

## 1.1. Einleitung und Problemstellung

Das Systemdenken<sup>1</sup> (systemisches Denken, Systems Thinking) unterscheidet sich deutlich vom nach wie vor weit verbreiteten kartesischen, reduktionistischen Ursache-Wirkungs-Denken. Dieses stellt den Versuch dar, durch das Verstehen der einzelnen kleinen Teile die Gesamtheit einer Situation zu erfassen. Die Systemtheorie hingegen basiert auf „Systemen“ und setzt sich mit den Beziehungen zwischen den Teilen und den übergeordneten Zusammenhängen auseinander. Ein „systemisches Denken“ soll helfen, komplexe Situationen besser handhaben sowie verstehen zu können und wird daher von vielen Autoren zunehmend behandelt und gefordert (vgl. DÖRNER 1989, GOMEZ/PROBST 1987, OSSIMITZ 1998/2000a/2000b, O’CONNOR/MCDERMOTT 1998, RICHARDSON 1991, RICHMOND 1993/1994, SENGE 1990, STERMAN 2000/2002b, VESTER 1985/1999/2000, WAGNER 2002, etc.). Komplexe Situationen, d.h. Zustände mit einer Vielzahl unterschiedlicher einander beeinflussender Variablen, bei geringer Kenntnis der Struktur der Zusammenhänge (Intransparenz der Beziehungen) und einer dynamischen Entwicklung, werden immer häufiger. In dynamischen komplexen Systemen liegen Ursache und Wirkung oftmals nicht nur zeitlich und räumlich weit voneinander entfernt, sondern sind auch in vielen Fällen nicht mehr klar voneinander unterscheidbar. Das – zumindest uns westlich orientierten Menschen – angelernte Ursache-Wirkungs-Denken stößt zunehmend an seine Grenzen, es ist notwendig „umzudenken“. Der systemische Ansatz ist in der Lage, einen Einblick in die Struktur eines Sachverhalts zu geben und dadurch bessere und nachhaltigere Lösungsvarianten in komplexen Situationen zu erreichen. Er ermöglicht sensible Systemteile und damit Hebelpunkte für Eingriffe und Steuerungsmaßnahmen zu identifizieren, sowie die Zusammenhänge zwischen dem betrachteten und den über- und untergeordneten Systemen (Super- und Subsystemen) mit zu berücksichtigen. Dadurch verleiht es dem Betrachter eine höhere Entscheidungskompetenz.

Ein fundamentaler Teil von natürlichen dynamischen Systemen sind neben Rückkoppelungen und Zeitverzögerungen auch so genannte Bestandsgrößen (Stocks) und Flussgrößen (Flows). Diese wurden von Jay W. FORRESTER in seinem Buch „Industrial Dynamics“ (FORRESTER 1961) erstmals als Systemkomponenten identifiziert und stellen auch das Thema der vorliegenden Arbeit dar. Vereinfacht gesagt, handelt es sich bei Bestandsgrößen um Akkumulationen innerhalb eines Systems und bei Flussgrößen um deren Veränderung pro Zeiteinheit.<sup>2</sup> Bestandsgrößen bestimmen den Zustand eines

---

<sup>1</sup> Genauere Betrachtung in Kap. 2.1 und 2.4.

<sup>2</sup> Genauere Betrachtung in Kap. 4.

Systems und sind *zeitpunktbezogen*, d.h. sie sind bei einem Anhalten der Zeit – zu einem Zeitpunkt – messbar oder zählbar. Flussgrößen nehmen erst über einen Zeitraum einen Wert an und verändern die Bestandsgrößen im Verlauf der Zeit. Diese beiden Größen sind für jede dynamische Entwicklung von Systemen ausschlaggebend. Sie und ihre Beziehungen untereinander zu verstehen, d.h. die Fähigkeit zum „Stock-Flow-Thinking“, ist somit ein Schlüssel zum Vermögen dynamische Komplexität erfassen, beurteilen und darstellen zu können und dadurch auch ein Schlüssel zum systemischen Denken. Davon abgesehen gilt es natürlich auch zu verstehen, wie sich das Verhalten des Systems durch die Interaktion seiner Komponenten im zeitlichen Verlauf ergibt, Wirkungen und Rückkoppelungen im System sowie Zeitverzögerungen und ihre Bedeutung zu erkennen, nichtlineare Zusammenhänge zu verstehen, etc. (vgl. BOOTH-SWEENEY/STERMAN 2000).

Das Verhalten von Menschen in dynamisch komplexen Situationen<sup>3</sup>, war Thema einer Vielzahl von Untersuchungen und Ausarbeitungen (z.B. BREHMER/ALLARD 1991, DIEHL/STERMAN 1995, DÖRNER/REITHER 1978, DÖRNER 1989, GREEN 1997, JENSEN 2003, JENSEN/BREHMER 2003, KAMPMANN/STERMAN 1998, MOXNES 1998/2000, STERMAN 1989, etc.). Es zeigte sich dabei durchwegs, dass bereits die Einführung von sehr geringer dynamischer Komplexität zu stark abnehmender Leistung der Testpersonen führte. Auch mit mehrmaligen Versuchen, unbegrenzter Versuchszeit und Anreizen die Leistung zu verbessern, ist im Allgemeinen die Verbesserung der Ergebnisse nur sehr gering. Das schlechte Abschneiden in solchen Testsituationen legt die Vermutung nahe, dass die (wenn auch äußerst geringe) dynamische Komplexität der Systeme die gemanagt werden sollen, die üblichen kognitiven Fähigkeiten der Menschen übersteigt. Dies würde bedeuten, dass wir zwar die einzelnen Bausteine und ihre Beziehungen wie etwa Bestands- und Flussgrößen oder Rückkoppelungen sehr wohl in der Lage sind zu verstehen, aber von Natur aus nur begrenzt dazu fähig sind, komplexe Systeme mit einer Vielzahl von interagierenden Variablen zu erfassen, sie zu lenken und in sie einzugreifen.

Zielsetzung diverser Untersuchungen war es daher, das Verständnis genau dieser Teilkomponenten – wie Stocks und Flows, Rückkoppelungen, Zeitverzögerungen sowie Nichtlinearitäten – näher zu betrachten. Die Ergebnisse zeigten, dass die Defizite und somit die Ursachen für das schlechte Abschneiden und die Probleme von Testpersonen in komplexen dynamischen Situationen bereits eine Stufe niedriger, nämlich beim Verstehen der Teilkomponenten liegen. Betreffend Bestands- und Flussgrößen konnten Linda BOOTH-SWEENEY und John D. STERMAN (BOOTH-SWEENEY/STERMAN 2000) in einer aufsehenerregenden empirischen Studie an (größtenteils Post-graduate) Studenten des renommierten Massachusetts Institute of Technology (MIT) zeigen, dass selbst diese hoch

---

<sup>3</sup> Der Begriff der dynamischen Komplexität wird in Kapitel 2.1. näher erläutert.

ausgebildeten Personen bereits in äußerst einfachen Aufgabenstellungen Bestands- und Flussgrößen nicht handhaben konnten. Die Fragestellungen verlangten an und für sich nur sehr geringe Vorbildung: die Fähigkeiten Graphen interpretieren sowie zeichnen zu können und mathematisches Basiswissen wie etwa die Berechnung der Fläche eines Dreiecks. Dennoch schnitten die hoch qualifizierten Versuchspersonen (Vpn) bereits bei diesen Aufgabenstellungen, welche noch dazu in vollkommen banale Deckgeschichten wie bspw. das Befüllen einer Badewanne gekleidet waren, erschreckend schlecht ab.<sup>4</sup> Nachfolgeuntersuchungen (OSSIMITZ 2001a, ZAHN/KAPMEIER 2001, OSSIMITZ et al. 2001, KAINZ/OSSIMITZ 2002, STERMAN/BOOTH-SWEENEY 2002, FISHER 2003, HEINBOKEL/POTASH 2003, KUBANEK 2003, LYNEIS/LYNEIS 2003, QUADEN/TICOTSKY 2003, ZARAZA 2003, KAPMEIER 2004, ARMENIA/ONORI/BERTINI 2004) zeigten, dass die Ergebnisse keine Ausnahme darstellten. Schon in sehr einfachen Situationen mit nur äußerst wenigen sich verändernden Variablen (in manchen Fällen einer einzigen!) schätzt ein Großteil der Probanden dynamische Systeme und Situationen vollkommen falsch ein und würde sich bei einer notwendigen Entscheidung in einer derartigen realen Situation auch falsch verhalten.

Warum diese schlechten Ergebnisse zu Tage treten, konnte noch nicht zufriedenstellend geklärt werden. Eine Möglichkeit ist das Fehlen der Aufarbeitung des theoretischen Hintergrundes von Bestands- und Flussgrößen. Die meisten Autoren haben ihre empirischen Studien durchgeführt, ohne auch nur ein einziges Mal den Begriff einer Bestands- oder Flussgröße zu definieren. Das war allerdings auch nicht das Ziel dieser Untersuchungen, vielmehr sollte das intuitive Verständnis der Probanden über diese Größen anhand einfacher dynamischer Aufgabenstellungen überprüft werden. Dennoch liegt es nahe, dass das Fehlen einer Theorie zum Thema mit eine Ursache für die mangelhaften Leistungen ist. Denn kann man erst mal auf ein vormals erlerntes theoretisches Wissen zurückgreifen, ist anzunehmen, dass man dieses Wissen zumindest partiell auch in der Praxis anwenden und somit auch die Struktur und Dynamik unterschiedlicher Situationen besser erfassen kann. Eine Theorie zum Thema hat daher das Potential, Defizite zu beseitigen bzw. zu vermeiden. In der Tat finden sich – von den erwähnten empirischen Untersuchungen abgesehen – auch in der restlichen systemwissenschaftlichen Literatur kaum Aussagen über Stocks und Flows in theoretischer Form.

---

<sup>4</sup> Der Titel der Untersuchung von BOOTH-SWEENEY/STERMAN (2000) ist an diese Deckgeschichte des Befüllens und Entleerens einer Badewanne angelehnt und lautet „Bathtub Dynamics: Initial Results of a Systems Thinking Inventory“ – was der Erforschung von Bestands- und Flussgrößen neben dem Namen „Stock-Flow-Thinking“ auch den Namen „Bathtub Dynamics“ einbrachte.

## 1.2. Zielsetzung der Arbeit

Die vorliegende Dissertation hat vier zentrale Punkte zum Ziel:

- (1) Zum Zweck einer besseren Verständlichkeit soll ein einleitender Überblick über den Inhalt und die Bedeutung des Systemdenkens, der System Dynamics Modelliermethode, die Erforschung von komplexen dynamischen Situationen und die Darstellungsmethoden von Bestands- und Flussgrößen gegeben werden.
- (2) Die angesprochenen Studien konnten zeigen, dass teilweise gravierende und alarmierende Mängel im Verständnis von bereits einfachsten dynamischen Situationen und beim Umgang mit Bestands- und Flussgrößen als wichtigen Bestandteil von natürlichen Systemen, bestehen. Gleichzeitig finden sich in der systemwissenschaftlichen Literatur kaum theoretische Aussagen zu diesem Thema. Es soll daher eine Theorie zum Thema Bestands- und Flussgrößen ausgearbeitet werden, welche helfen soll, diese Defizite zu beheben. Diese Theorie soll sich abschließend mit einer *Definition* der Begriffe „Bestandsgröße“ und „Flussgröße“ auseinandersetzen. Zuvor sollen die *Eigenschaften* dieser Größen ebenso eingehend betrachtet werden, wie ihre *Bedeutung* für Systeme und nachfolgend ihr dynamisches *Zusammenspiel*. Letzteres ist für sämtliche Wachstumsvorgänge in natürlichen Systemen verantwortlich bzw. notwendig. Diese sollen daher auf theoretischer Ebene mit Hilfe von Flussdiagrammen erläutert werden. Darüber hinaus werden der Umgang mit bzw. das Management von Bestands- und Flussgrößen sowie die dabei auftretenden Probleme und Fehler anhand angewandter Beispiele wie dem Supply Chain Management oder natürlichen Ressourcen behandelt.
- (3) Der aktuelle Stand der Forschung zum Thema Bathtub Dynamics bzw. Stock-Flow-Thinking soll umfangreich dargestellt werden. Zu diesem Zweck werden die vorhandenen empirischen Untersuchungen, ausgehend von der Pionierarbeit von BOOTH-SWEENEY/STERMAN (2000), welcher besonders Platz eingeräumt wird, aufgearbeitet und chronologisch mit ihren wichtigsten Ergebnissen und Erkenntnissen dargestellt. Die vorliegende Arbeit soll demnach einen guten Überblick über die gesamte bereits durchgeführte Forschungstätigkeit geben, sodass es nicht unbedingt notwendig ist, auf andere oder die Originalquellen selbst zurückgreifen zu müssen, um über den Themenbereich informiert zu sein.
- (4) Es soll die Rolle von Bestands- und Flussgrößen bzw. die Möglichkeiten der System Dynamics Modelliermethode im Bereich der geographischen Forschung

betrachtet und knapp präsentiert werden. Dabei sollen die Grenzen und die Leistungsfähigkeit systemdynamischer Modellierung in der Geographie angesprochen werden. Zusätzlich wird in Bezug auf das Phänomen des Stock-Flow-Thinkings dahingehend eingegangen, dass Beispiele von Stocks und Flows in geographischen Kontexten etwas näher analysiert werden.

Dieser vierte Punkt ist gegenüber den ersten dreien, speziell gegenüber der theoretischen Betrachtung von Bestands- und Flussgrößen und dem Überblick über den Stand der Forschung, von untergeordneter Relevanz. Er wird daher vergleichsweise kurz und prägnant abgehandelt werden.

### **1.3. Formaler Aufbau der Arbeit**

Die Arbeit ist den vier Zielen gemäß auch in vier Teile gegliedert, Teil 1 (Kapitel 2 und 3) umfasst den angesprochenen Überblick über die Rolle des Systemdenkens und der System Dynamics, die Forschung von komplexen dynamischen Situationen und die Darstellungsmethoden von Stocks und Flows.

Teil 2 (Kapitel 4 und 5) setzt sich mit der theoretischen Abhandlung von Bestands- und Flussgrößen auseinander. Zu diesem Bereich zählt auch Kapitel 8, welches die Bedeutung dieser Theorie in Hinblick auf die empirischen Untersuchungen und die beobachteten Verständnismängel betrachtet. Teil 3 (Kapitel 6 und 7) beinhaltet die umfassende Darstellung des Forschungsstandes auf diesem Gebiet und Teil 4 (Kapitel 9 und 10) spricht schließlich die Bedeutung der System Dynamics sowie von Stocks und Flows in der Geographie an.

Die einzelnen Teile sind jedoch nicht absolut streng voneinander getrennt bzw. trennbar, vielmehr ergänzen sie sich teilweise gegenseitig. Ich habe im Sinne der Lesbarkeit jedoch darauf geachtet, die Zahl an Vorwärtsverweisen gering zu halten und den einzelnen Teilen ein abgerundetes Bild zu verleihen. Dadurch waren an manchen Stellen geringe Redundanzen nicht vermeidbar. Ich möchte den Leser bitten, diese zu entschuldigen.

Die obligatorische Zusammenfassung befindet sich in deutscher und englischer Version bereits am Beginn der Arbeit, sodass das 11. und abschließende Kapitel eine eher persönlichere Reflexion darstellt. Ich werde darin versuchen zusammenzufassen, was diese Dissertation leisten konnte und meine persönlichen Schlussfolgerungen zum Thema darlegen.

## 2. Systems Thinking und System Dynamics

### 2.1. Systemwissenschaften

Die Systemwissenschaft bzw. die Systemtheorie setzt sich mit der Betrachtung verschiedener Arten von „Systemen“ auseinander. Da der Begriff des Systems sehr allgemein verstanden wird und sich in beinahe allen Wissenschaftsdisziplinen Systeme finden, ist die Systemwissenschaft ein stark interdisziplinärer Ansatz. Sie ist darum bemüht, die Funktionsweise des Systems zu erkennen und sein Verhalten zu beobachten. Dabei lassen sich allgemeine Aspekte und Funktionsmechanismen erkennen, welche konventionellerweise in den einzelnen Forschungsrichtungen isoliert erforscht werden. Systemtheoretische Erkenntnisse können durch diese umgekehrte Herangehensweise schnell in gänzlich unterschiedlichen Disziplinen für wissenschaftliche Fortschritte sorgen. Für jene Systeme in die der Mensch steuernd oder korrigierend eingreift, versucht die Systemwissenschaft durch dieses bessere Verständnis der Struktur auch Regeln für den Umgang und die Gestaltung von Steuerungsmaßnahmen zu finden.

Unter einem System (aus dem Griechischem *systema* = „Zusammenstellung“ bzw. „das Zusammengestellte“) wird allgemein formuliert eine Ansammlung von miteinander in Verbindung stehenden unterschiedlichen Elementen verstanden, welche insgesamt ein gemeinsames Ganzes bilden.<sup>5</sup> Entscheidend sind dabei die *Beziehungen* die zwischen den Systemelementen bestehen. Sie sind es, die dem System nicht nur sein Wesen verleihen, sondern auch sein Verhalten und seine Struktur determinieren. Die ARISTOTELES zugeschriebene und inzwischen weit verbreitete Aussage „Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile“ spielt auf genau diesen Sachverhalt an.

Systeme sind meist Teil eines oder mehrerer übergeordneter Systeme, so genannter „Supersysteme“. Im Gegenzug dazu bestehen sie selbst wiederum aus Teilen, die auch für sich alleine genommen ein System darstellen - diese werden „Subsysteme“ genannt. Betrachtet man bspw. den menschlichen Körper, so besteht er aus unterschiedlichen Teilen, welche in Beziehung zueinander stehen und auch eine bestimmte Funktion, Organisation und Dynamik aufweisen – er ist ein System. Die einzelnen Teile des Systems Mensch wie z.B. Herz, Niere, Blutkreislauf, etc. sind Subsysteme; das Gesellschaftssystem, in dem sich der Mensch befindet, oder aber beliebige andere soziale Systeme in denen er lebt oder arbeitet, stellen Supersysteme dar.

Die Beziehungen zwischen den einzelnen Komponenten führen in vielen Systemen zu einer großen Vielfalt unterschiedlicher möglicher Systemzustände, welche sich durch die dynamische Entwicklung auch im Lauf der Zeit ändern. Je größer die Zahl der Elemente und

---

<sup>5</sup> Für eine genauere Betrachtung des Systembegriffs siehe u.a. BERTALANFFY 1968, KAPMEIER 1999, OSSIMITZ 1998/2000a, WAGNER 2002.

je stärker und vielfältiger die Beziehungen zwischen ihnen, desto größer ist generell auch die Zahl der möglichen Zustände und desto geringer die Möglichkeit einer exakten Entwicklungsprognose. Systeme mit einer großen Variablenzahl und vielfältigen Beziehungen untereinander werden gemeinhin als „komplex“ (lat. „complexus“: die Gesamtheit, etwas das aus mehreren Teilen besteht) bezeichnet. Im Widerspruch dazu steht jedoch z.B. das Dreikörperproblem der Himmelsmechanik: Wie der französische Mathematiker Henri POINCARÉ (1845-1912) zeigen konnte, kann bereits ein System aus nur drei Bestandteilen (Himmelskörper), welche sich durch ihre gegenseitige Anziehung (Gravitation) beeinflussen, äußerst komplex sein. Eine bestimmte Größe der Variablenzahl kann also keine notwendige Bedingung für Komplexität sein. Aus diesem Grund handelt es sich dabei eher um einen subjektiven Begriff, der von Vorbildung und Wissen über die Struktur des betrachteten Systems abhängt (vgl. DIEBNER 2001).

„Es ist nicht exakt definiert, was Komplexität im naturwissenschaftlichen Sinne ist. Es handelt sich in aller Regel um zusammengesetzte Systeme, deren Eigenschaften teilweise kontraintuitiv sind und deren Beschreibung meist einen gehobenen mathematischen Aufwand mit sich bringen. [...] Komplexe Systeme zeichnen sich also durch eine potentielle dynamische Vielfalt aus.“ DIEBNER 2001, S. 4; (Hervorhebung R.W.)

In dieser Aussage werden gleich mehrere interessante Aspekte angesprochen. Am wichtigsten ist wohl die im letzten Satz erwähnte potentielle Vielfalt an Systemzuständen, die komplexe Systeme kennzeichnen. Denn bloß eine hohe Zahl an Komponenten reicht wie oben beschrieben nicht aus, um ein komplexes System zu erhalten. Durch die Eigenschaft des Systems in seiner dynamischen Entwicklung eine große Vielfalt möglicher Zustände zu erlauben und zu erreichen, bekommt es unabhängig von seiner Zahl an Variablen einen hohen Grad an Komplexität. Ihre Erfassung, Beschreibung und eventuell sogar Steuerung wird dadurch weit schwieriger.

Gleichzeitig nimmt der Autor auch den Begriff der „dynamischen Komplexität“ vorweg. Dieser beschreibt eine Situation, in welcher sich die Systemkomponenten und die Beziehungen zwischen ihnen ständig verändern. Oftmals tritt sie in Systemen auf, in welchen Ursache und Wirkung zeitlich und/oder räumlich weit voneinander getrennt liegen. Das Wirkungsgefüge des betreffenden Systems kann dann äußerst undurchsichtig sein, eine gezielte Steuerung oder Beeinflussung wird erschwert. In unserer heutigen Welt begegnen wir durch die immer größer werdende Vernetztheit und die ständige Veränderung der Systembeziehungen bzw. die Generierung neuer Beziehungen, solchen dynamisch komplexen Situationen immer öfter (vgl. VESTER 1999).

Zusätzlich spricht DIEBNER auch eine wichtige Eigenschaft vor allem sozialer Systeme an – das kontraintuitive Verhalten. Dieses geht auf eine Veröffentlichung von Jay W. FORRESTER zurück (FORRESTER 1971a). Er entwickelte darin eine Theorie darüber, weshalb in der Realität derart oft Beeinflussungen eines Systems, meist in Zusammenhang mit politischen

Programmen, genau das Gegenteil dessen bewirken, was eigentlich beabsichtigt war. Er führte Beispiele anhand der Bevölkerungsentwicklung, der Qualität des städtischen Lebens und Programmen zum Städtewachstum an und kam zu dem Schluss, dass die Ursache für dieses wie er es nennt „Counterintuitive Behavior“ (kontraintuitives Verhalten) darin liegt, dass die Dynamik dieser sozialen Systeme nicht oder nicht richtig verstanden wird.

„Evolutionary processes have not given us the mental ability to interpret properly the dynamic behavior of those complex systems in which we are now imbedded.“ FORRESTER 1971a, S. 2;

FORRESTER (1971a) erarbeitete drei „Counterintuitive Behaviors“, welche besonders schwer wiegen:

- Soziale Systeme sind gegenüber den meisten politische Eingriffen, die das Verhalten des Systems ändern sollen, unempfindlich, da sie die Aufmerksamkeit auf Bereiche lenken, in welchen Eingriffe wenig bewirken können. Komplexe Systeme, von welchen hier die Rede ist, besitzen eine starke interne Vernetzung. Das klassische Ursache-Wirkungs-Denken stößt hier an seine Grenzen. Eine Ursache an einer Stelle macht sich bspw. erst mit großer zeitlicher Verzögerung und das eventuell sogar noch an vollkommen anderer Stelle im System bemerkbar, sodass wir dann Ursache und Wirkung nicht mehr miteinander in Verbindung bringen können. Wir versuchen die Wirkung zu bekämpfen, ohne die (vielleicht nach wie vor bestehende) Ursache zu beachten. Manchmal bietet sich uns sogar eine zufällige Symptomursache, die dann leidenschaftlich bekämpft wird – ohne gewünschten Effekt freilich.
- Soziale Systeme besitzen dennoch Hebelpunkte, welche eine effektive Systemsteuerung ermöglichen. Diese Hebelpunkte befinden sich meist an anderen Stellen als erwartet, sie bergen aber auch die Gefahr missbräuchlicher Nutzung. Im Falle der Stadtentwicklung eruiert FORRESTER z.B. in der Wohnsituation der Bevölkerung einen derartigen Hebel (siehe unten).
- Es besteht ein Widerspruch zwischen kurz- und langfristigen Konsequenzen politischer Eingriffe. Meist bewirkt eine Politik die kurzfristig Verbesserungen zur Folge hat, auf lange Sicht gehörige Verschlechterungen. Umgekehrt können Eingriffe mit langfristigen positiven Effekten kurzzeitig Nachteile bewirken. Die nahe Zukunft ist aber – vor allem für Politiker – der entscheidende Zeitbereich, sodass dadurch sehr oft Entscheidungen getätigt werden, welche langfristig von Nachteil sind.

Mittels der damals noch sehr jungen und ebenfalls von ihm entwickelten System Dynamics – Methode (SD) (vgl. FORRESTER 1961 bzw. Kap. 2.3.) versuchte FORRESTER ein besseres Verständnis für diese komplexen und stark miteinander interagierenden Systeme zu bewirken. System Dynamics (SD) simuliert reale Systeme in Computernmodellen und ermöglicht dadurch Erkenntnisse über die Funktionsweise bzw. den Aufbau des betreffenden

Systems zu erlangen. Der Gebrauch von Modellen ist für diesen Zweck nichts Ungewöhnliches, trägt doch jeder Mensch eine immense Vielzahl an mentalen Modellen stets in sich. Wir treffen Entscheidungen anhand des Bildes – des Modells – das wir uns von einer Situation gemacht haben. Egal ob es sich um ein privates Problem oder um eine Investitionsentscheidung für die eigene Firma handelt, versuchen wir die Auswirkungen und Zusammenhänge abzuschätzen und bestmöglich zu handeln. Da unsere mentalen Modelle jedoch unvollständig und unpräzise sind und wir dadurch oft falsche Implikationen für die Zukunft daraus ziehen, kann unser Handeln trotz besten Wissens und Gewissens oft genau zum Gegenteil dessen führen, das wir erreichen wollten. Computermodelle im Allgemeinen und System Dynamics Modelle im Speziellen sind in dieser Hinsicht klarer sowie präziser und geben genauere Auskunft über die Struktur eines Systems. Es steht außer Frage, dass diese Modelle ebenfalls stets nur so gut sein können, wie der Experte der es erstellt. Ein gutes Modell bildet jedoch die entscheidenden Sachverhalte und Zusammenhänge eines Systems ab und gibt Auskunft über dessen Verhalten.

In seinem Buch „Urban Dynamics“ (FORRESTER 1969) stellte FORRESTER das Modell einer Stadt dar und zeigte wie Wohnungsmarkt, Wirtschaft und Bevölkerungsprozesse interagieren. Die systemimmanente Struktur des Systems, die sich durch die Modellierung offenbarte, war folgende: Wann immer man etwas zur Verbesserung eines Bereiches des städtischen Lebens unternahm, war in erster Linie ein Ansteigen der Bevölkerungszahl die Folge, wodurch sich andere Bedingungen in der Stadt verschlechterten und man wieder das alte mangelhafte Gleichgewicht erreichte. Aber auch in anderer Hinsicht entdeckte FORRESTER Erstaunliches: So war es etwa kontraproduktiv, in einem Viertel mit zu wenigen Billigwohnungen den unteren Einkommensschichten dadurch zu helfen, indem man für mehr kostengünstige Wohnungen sorgte. Dies bewirkte nämlich genau das Gegenteil – es führte zu einer Vergrößerung der unteren Einkommensschicht, denn das Gebiet wird für die ärmere jobsuchende Schicht attraktiver. Für die reichere jobschaffende Schicht wird das Gebiet jedoch immer weniger attraktiv – sie wandert ab. Die ökonomischen Bedingungen des Gebietes sinken und der Bedarf an zusätzlichen Billigwohnungen steigt.

„The consequence is a downward spiral that draws in the low-income population, depresses their economic condition, prevents escape, and reduces hope. All of this is done with the best of intentions.”

FORRESTER 1971a, S. 9;

FORRESTER überspitzt schließlich dieses Erkenntnis des dem intuitivem Verständnis widersprechenden Verhaltens von sozialen Systemen in folgender Aussage:

„If we were malicious and wanted to create urban slums, trap low-income people in ghetto areas, and increase the number of people on welfare, we could do little better than follow present policies.“

FORRESTER 1971a, S. 9;

## 2.2. Mentale Modelle

Wie angesprochen, besitzt jeder Mensch eine Vielzahl an mentalen Modellen, d.h. mehr oder weniger exakte Gedankenkonstrukte über den Zusammenhang gewisser Situationen (vgl. JOHNSON-LAIRD 1983). Dies entspricht auch dem Standpunkt des Radikalen Konstruktivismus (vgl. GLASERSFELD 1996) welcher aussagt, dass sämtliches menschliche Denken gemäß unseren Bildern und Sichtweisen (=Modellen) der Welt vonstatten geht. Eine typische Eigenschaft mentaler Modelle ist, dass sie in aller Regel ungenau und unvollständig sind, die tatsächlichen Zusammenhänge also nicht exakt erfassen. Speziell für dynamisch komplexe Situationen sind sie daher unzureichend:

„Mental models are fuzzy, incomplete, and imprecisely stated. Furthermore, within a single individual, mental models change with time, even during the flow of a single conversation.“ FORRESTER 1971a, S. 3;

Die Fähigkeit von Menschen in einem mentalen Modell dynamische Vorgänge zu simulieren und dadurch Entwicklungsszenarien vorherzusehen ist beschränkt und durch die Unvollständigkeit des Modells fehlerhaft. Konstruierte, formale Modelle hingegen, wie sie etwa im Rahmen der SD erstellt werden, werden zwar auf Basis der mentalen Vorstellungen erschaffen, anschließend aber verfeinert. Sie können dabei behilflich sein, die Struktur des Systems zu durchleuchten, mögliche Entwicklungsszenarien vorherzusagen, Hebelpunkte zu identifizieren und damit wirkungsvollere Lenkungsingriffe zu ermöglichen. Formale Modelle sind folglich besser für die Betrachtung von komplexen Systemen geeignet und können dazu beitragen, die mentalen Modelle des Betrachters zu verbessern, um seine Entscheidungs-Beurteilungsfähigkeit zu erhöhen. Der Begriff des mentalen Modells ist daher zentral für den systemischen Ansatz – denn speziell die mentalen Modelle sind es, die es zu verändern gilt. DOYLE/FORD (1998) untersuchten allgemeine Beschreibungen von mentalen Modellen eingehend und entdeckten, dass sich in der Literatur selten exakte Definitionen und größtenteils widersprüchliche, vage und zu allgemein formulierte Aussagen zum Thema finden. Aus diesem Grund haben die Autoren eine eigene Definition von mentalen Modellen entwickelt, um den Austausch zwischen Wissenschaftlern sowie den Forschungsprozess zum Zwecke des Verstehens, Beschreibens und vor allem Verbesserns von mentalen Modellen zu erleichtern. Auf Anregung von LANE (1999), welcher geringfügige Unstimmigkeiten in dieser Definition aufzeigte, wurde sie von DOYLE und FORD (1999) überarbeitet und zur folgenden sehr brauchbaren Definition verbessert:

„A mental model of a dynamic system is a relatively enduring and accessible, but limited, internal conceptual representation of an external system (*historical, existing or projected*) whose structure is *analogous* to the perceived structure of that system.“ DOYLE/FORD 1999, S. 414;

### 2.3. System Dynamics (SD)

Die SD – Modelliermethode wurde Ende der 1950er Jahre von Jay W. FORRESTER am Massachusetts Institute of Technology (MIT) entwickelt.<sup>6</sup> Sie stellt ein Verfahren dar, dynamische Situationen und Systeme zu analysieren. Das mentale Modell des Menschen, mit welchem er nur begrenzt dazu fähig ist das System zu simulieren, wird also externalisiert und mittels einer Computersoftware nachgebaut. Bei SD-Modellen wird exakt zwischen Bestandsgrößen (engl. Stocks, Stock Variables, Levels) und Flussgrößen (engl. Flows, Flow variables, Rates) unterschieden. Bestandsgrößen repräsentieren den gegenwärtigen Zustand eines Systems, z.B. die Menge an CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre. Flussgrößen hingegen wirken verändernd, z.B. das pro Tag abgebaute oder ausgestoßene CO<sub>2</sub>. Alle SD – Modelle setzen sich im Wesentlichen aus diesen beiden Größen zusammen (vgl. Kap. 3.2.), wobei alle Elemente quantitativ in das Modell eingegeben werden (Anfangswerte), sodass eine mathematische Berechnung zukünftiger Systemzustände möglich ist.

Dieses Modell wird anschließend so lange verfeinert, bis es möglichst gut das reale System imitiert. Durch die Computersimulation des Systems wird versucht, die interne Struktur in Hinblick auf Nichtlinearitäten, Rückkoppelungsstrukturen und Komplexität zu erforschen. Die Simulation unterschiedlicher Eingriffe soll das Verständnis des betrachteten Systems erhöhen und das Ableiten von Entscheidungsregeln für die Steuerung des Systems oder für Eingriffe ermöglichen. Dennoch handelt es sich verständlicherweise noch immer nur um ein Modell, d.h. um eine Abstraktion der realen Gegebenheiten. Aus diesem Grund gilt es bei der Konstruktion des Modells – je nach Zweck der Simulation – einige wichtige Dinge zu beachten, d.h. die Konstruktion erfordert Expertenwissen. Es gilt bspw. eine Systemgrenze zu ziehen, innerhalb derer sämtliche für den Zweck der Simulation wichtigen Komponenten und internen Prozesse liegen. Des Weiteren muss z.B. ein geeigneter Auflösungsgrad gewählt werden – es erscheint unangebracht bei der Simulation eines Wirtschaftssystems einige Prozesse bis auf Molekülebene genau simulieren zu wollen.<sup>7</sup> Trotz aller Abstraktion muss das Modell realistisch bleiben und sollte je nach Ziel auch für Nicht-SD-Experten Einblicke in die Systemstruktur ermöglichen.

Über die Struktur des Modells lassen sich Rückschlüsse über das reale System ziehen, wodurch die mentalen Modelle des Betrachters verbessert werden. Dieser Lernprozess ist umso größer, je stärker man in die Erstellung der Simulation involviert ist. Man lernt das kontraintuitive Verhalten des Systems verstehen, Rück-, Fern- und Nebenwirkungen abzuschätzen und erreicht dadurch ein höheres Systemverständnis und eine kompetentere Entscheidungsfähigkeit – die Korrektheit der eigenen mentalen Simulationen wird erhöht.

---

<sup>6</sup> Eine ausführliche Betrachtung der System Dynamics findet sich in FORRESTER 1961/1969/1971a, KAPMEIER 1999, OSSIMITZ 2000b oder STERMAN 2000.

<sup>7</sup> Für eine eingehende Betrachtung der Simulation von Systemen siehe STERMAN (2000).

Die ersten Anwendungsgebiete der SD lagen in den Bereichen der Simulation von Unternehmenswachstum, Lagerbeständen sowie stadtgeographischen Prozessen. In der Folge wurde SD aber auch dazu verwendet, die Zusammenhänge der Weltwirtschaft, des Ressourcenverbrauchs und der Umwelt zu erforschen (vgl. MEADOWS et al. 1972). Heute wird SD weit verbreitet genutzt, um Systeme unterschiedlicher Art und aus verschiedensten Bereichen, sei es der Sozial-, Wirtschafts- oder Umweltbereich etc., zu analysieren. Immer öfter wird SD auch dazu verwendet, „systemisches Denken“ bei Entscheidungsträgern zu fördern und das alte, inzwischen nicht mehr effektive Ursache-Wirkungs-Denken zu bekämpfen. SD-Modelle bieten die Möglichkeit, die Problemlösungskapazität und den Entscheidungsprozess unter dynamischen Bedingungen zu schulen und zu verbessern.

## 2.4. Systems Thinking

Systems Thinking (ST) (systemisches Denken, Systemdenken) setzt im Prinzip direkt an den System Dynamics (SD) – Ansatz an. SD hat zum Ziel, durch quantitative Modellierung eine Verbesserung des Systemverständnisses der Menschen zu erreichen. ST versucht nun ebenfalls, jedoch meist ohne quantitative Modellierung, eine solche Verbesserung zu bewirken. Unter Systemdenken wird meist ein solches Denken verstanden, das systemimmanente Strukturen und Eigenheiten wie z.B. Rückkoppelungen, Zeitverzögerungen, Fern- und Nebenwirkungen etc. berücksichtigt und dadurch ein allgemein systemgerechteres Handeln bewirkt. Es handelt sich um einen Denkansatz, in welchem die Gesamtheit einer Situation, mit allen ihren Verstrickungen und ihrer Vernetztheit betrachtet wird. Aus diesem Grund wird es auch oft als „holistisches“ (griech. ganz, ganzheitlich) Denken bezeichnet. Es existiert jedoch keine einheitliche allgemein gültige Definition von Systemdenken. Vielmehr haben die einzelnen Autoren sogar eine stark unterschiedliche Auffassung des Begriffs. OSSIMITZ (2000b) gibt darüber einen Überblick und unterscheidet zu diesem Zweck drei große unterschiedliche Systemansätze:<sup>8</sup>

- „**Qualitative Ansätze**: der biokybernetische Ansatz von Frederic Vester, systemorientierte Managementansätze wie etwa von Gomez/Probst bis hin zu Peter Senge's *Fifth Discipline*, bei der organisationales Lernen als eine Art kollektive Variante systemischen Denkens betrachtet wird.
- Der Forschungsansatz **Komplexes Problemlösen** in der deutschen Kognitionspsychologie (Dörner, Funke, Putz-Osterloh): Anhand von computersimulierten Szenarien wird untersucht, wie sich Versuchspersonen in komplexen, systemischen Situationen verhalten und was sie dabei denken.
- Der **system dynamics** Ansatz: Im Zentrum stehen zunächst systemdynamische Simulationsmodelle. Erst im Laufe der Zeit kommt der Aspekt *systems thinking* hinzu, vor allem als Marketingvehikel zum Verkauf entsprechender Softwareprodukte und als Argument, *system dynamics* auf breiter Ebene im Schulunterricht einzuführen.“ OSSIMITZ 2000b, S. 2;

---

<sup>8</sup> OSSIMITZ (2000b) bietet neben dieser detaillierten Beschreibung der Entwicklung des Systemischen Denkens auch einen umfassenden Überblick über die in der Literatur auffindbaren Definitionen.

All diese Ansätze entstanden mehr oder weniger parallel seit den 1950er Jahren als Jay W. FORRESTER mit der Entwicklung der SD begann. Der Ansatz „Komplexes Problemlösen“ basiert wie beschrieben auf quantitativen Simulationsmodellen realer Situationen, welche allerdings qualitativ gelöst werden müssen. Er nimmt somit eine Zwischenstellung zwischen SD und dem qualitativen Ansatz ein (welcher für sich ebenfalls auf den Erkenntnissen FORRESTERS bzw. der SD beruht). In FORRESTERS SD-Kreisen war die Bezeichnung Systemdenken dennoch lange Zeit mit System Dynamics ident. Erst in den 1980er Jahren, als Frederic VESTER im deutschen Sprachraum als Vertreter des qualitativen Ansatzes längst ein „vernetztes Denken“ propagierte (vgl. VESTER 1985), ging ein Teil der SD-Community anfangs aus marketingtechnischen Gründen zur Bezeichnung „Systems Thinking“ über und versuchte SD im Schulunterricht zu etablieren (vgl. OSSIMITZ 2000b). Es handelte sich dabei aber nach wie vor um die beschriebene quantitative SD – Modelliermethode.

Peter SENGE, wie FORRESTER am MIT tätig, entwickelte 1990 in seinem vielumwobenen Buch „The Fifth Discipline: The Art and Practice of the Learning Organization“ (SENGE 1990, dt.1998) das Konzept einer lernenden Organisation. Dafür sieht er fünf Disziplinen als entscheidend an: Personal Mastery, Mental Models, Building Shared Vision, Team Learning und Systems Thinking. ST ist für ihn die umfassende, verbindende, vermittelnde und zentrale Disziplin, womit er ein Erkennen der Ganzheiten, der Wechselbeziehungen und der Veränderungsmuster von Situationen anstatt dem linearen Ursache-Wirkungs-Denken meint.

„Die Praxis des Systemdenkens beginnt mit dem Verständnis eines einfachen Konzepts, des sogenannten „Feedback“, das aufzeigt, wie Handlungen sich wechselseitig verstärken oder kompensieren (ausgleichen) können.“ SENGE 1998, S. 94;

Darüber hinaus sieht er das Erkennen systemischer Grundmuster, so genannter „Systemarchetypen“ – immer wiederkehrender gleicher Strukturmuster in Systemen – sowie ein fundamentales Umdenken hin zur systemischen Sicht der Dinge („Metanoia“), als notwendig für ein systemisches Denken an. Damit bildete Senge eine weitere Brücke zwischen dem quantitativen SD – Ansatz und dem qualitativen Systemdenken.

Die weiteren in der systemwissenschaftlichen Literatur bekannten Autoren gehen unterschiedlich stark auf das Konzept des ST ein und haben auch divergierende Vorstellungen davon: So versteht bspw. RICHARDSON (1991) darunter primär ein Denken in Rückkoppelungs- oder Wirkungskreisen (vgl. Kap. 3.1.) und nennt diese Art zu denken daher auch „Feedback Thought“ (feedback: engl. Rückkoppelung). GOMEZ/PROBST (1987) verstehen unter ihrem „Vernetzten Denken“ ein systemgerechtes Handeln in komplexen Managementsituationen, wobei es systemische Lenkungs- und Steuergrößen zu identifizieren und bekannte Denkfehler im Umgang mit Systemen zu vermeiden gilt. DÖRNER (1989) reduziert hingegen das systemische Denken (ST) auf die Fähigkeit des Gebrauchs

des „gesunden Menschenverstandes“ in einer komplexen dynamischen Situation und ihn auf die Gegebenheiten der Situation einzustellen. Dieser Auffassung ist nur schwierig beizupflichten. Denn es mag stimmen, dass viele Neben- und Auswirkungen anthropogener Eingriffe in komplexe Systeme im Nachhinein klar verständlich sind und es wirkt, als ob der Handelnde diese Entwicklung unter Gebrauch seines Menschenverstandes vorausahnen hätte müssen, dennoch entspricht die Definition DÖRNERs eher dem „Im Nachhinein ist man immer gescheiter“ – Grundsatz. Wie FORRESTER (1971a) zeigen konnte, verhalten sich sehr viele Systeme *kontraintuitiv*, d.h. gegensätzlich zur intuitiven Erwartung. Gebraucht man nun seinen – naturgemäß *intuitiven* – Menschenverstand um ein solches System zu steuern, sollte man aus diesem Grund wohl eher nicht mit einem erfolgreichen Ergebnis rechnen. ST mag in vielen Fällen nahe am gesunden Menschenverstand liegen, gerade die von DÖRNER (1989) selbst präsentierten Studien zeigen hingegen, dass sehr viele Probanden äußerst mangelhafte Ergebnisse in solchen Situationen erzielten und ihr gesunder Menschenverstand demnach nicht ausreichte. Meines Erachtens dient das systemische Denken (ST) genau dazu, das mentale Modell des Menschenverstandes für dynamisch komplexe Systeme zu verbessern und ihm sozusagen beizubringen systemgerecht zu denken, d.h. der Struktur des Systems gerecht zu handeln.

FORRESTER (1994), der Begründer der SD, sieht ST nur als eine Teilfähigkeit, die zum Verständnis seiner SD-Methode notwendig ist, wie z.B. die simple Fähigkeit sich der Existenz von Systemen allgemein bewusst zu sein (vgl. FORRESTER 1994, S. 10-11). Er vertritt den Standpunkt, dass nur SD wirklich einen Einblick in Systeme geben kann, ST hingegen einige Gefahren birgt. Laut FORRESTER kann systemisches Denken (ST) zwar positiv in dem Sinne wirken, dass es auf die Existenz und Bedeutung von Systemen aufmerksam macht oder auch indem es als Wegbereiter zur „wahren“ Methode Systeme zu betrachten – nämlich der System Dynamics – fungiert. Die Gefahr besteht jedoch laut FORRESTER darin, jemand könne glauben, dass er rein durch ST Systeme wirklich versteht. Denn dazu ist man ihm zufolge eben nur durch SD in der Lage. Er begründet dies – interessanterweise für die vorliegende Arbeit – damit, dass das ST keine quantitativen Darstellungsmethoden (wie Stock-Flow-Diagramme – vgl. Kap. 3.2.) verwendet, sondern lediglich qualitative Wirkungsdiagramme (auch Kausaldiagramme oder Causal-Loop-Diagramme genannt – vgl. Kap. 3.1.) in denen nicht exakt zwischen Bestands- und Flussgrößen unterschieden werden muss. Aus diesem Grund ist in Wirkungsdiagrammen und somit auch für das ST die Dynamik von Systemen nicht beobachtbar.<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup> OSSIMITZ (2000b) setzt dem ein Beispiel aus WATZLAWICK et al. (1969) entgegen, in welchem der eskalierende Streit eines Ehepaars beschrieben wird. Er demonstriert damit, dass in manchen Fällen genau das Gegenteil der Aussage FORRESTERs der Fall ist. In diesem Beispiel kann ein Wirkungsdiagramm nämlich sogar sehr gut die Dynamik des Systems aufzeigen, während ein Stock-Flow-Diagramm nur über die Schaffung abstrakter Bestandsgrößen dazu in der Lage ist.

RICHMONDS (1993/1994) Auffassung von systemischem Denken steht jener von FORRESTER stark gegenüber. Für ihn ist ST nicht ein praktischer Teil der SD, sondern umgekehrt System Dynamics ein Teil des Systemdenkens (RICHMOND 1994). Er bezeichnet das systemische Denken auch als „System Dynamics with an aura“ (RICHMOND 1994, S. 4). Im Erkennen von gegenseitigen Abhängigkeiten und Rückkoppelungen sieht er eine entscheidende Stärke von ST. Hinsichtlich notwendiger Fähigkeiten für systemisches Denken weist RICHMOND (1993) neben dem Denken in Rückkoppelungsstrukturen und dem strukturellen Denken (Aufbau des Systems, Unterscheidung zwischen Bestands- und Flussgrößen) u.a. auch auf das Denken in generischen Strukturen hin. Letzten Endes versteht RICHMOND unter ST die Kunst und Wissenschaft zuverlässige Rückschlüsse und Aussagen über Systeme durch Entwicklung eines tiefergehenden Verständnisses der zu Grunde liegenden Struktur des Systems treffen zu können (vgl. RICHMOND 1994).

OSSIMITZ (1998/2000b) beschäftigte sich als einer weniger Autoren mit einer umfassenden *Definition* von Systemdenken, anstatt mit allgemeinen Aussagen zum Thema. Für ihn umfasst ST vier Dimensionen, welche an dieser Stelle nur kurz beschrieben werden sollen:

- A) Vernetztes Denken: Es gilt Rückkoppelungen, Rückkoppelungskreise und auch indirekte Wirkungen in einem System zu erkennen und zu beachten. Eine Hilfe kann dabei das Darstellungsmittel des Wirkungsdiagramms (Causal-Loop-Diagramm; vgl. Kap. 3.1.) sein.
- B) Dynamisches Denken: Die Eigendynamik von Systemen zu erkennen und zu berücksichtigen, zukünftige Entwicklungsmöglichkeiten, langfristige Wirkungen, typische systemische Zeitgestalten (Zeitverzögerungen, Wachstumstypen, etc.) zu identifizieren sowie die Fähigkeit Zeitgestalten darzustellen, fasst OSSIMITZ als „dynamisches Denken“ zusammen.
- C) Denken in Modellen: Sich über die Modellhaftigkeit des eigenen Denkens (Radikaler Konstruktivismus) im Klaren zu sein und in bewusst wahrgenommenen Modellen zu denken ist hierbei entscheidend. Modelle heben stets gewisse Aspekte hervor und vernachlässigen andere. Eine Situation aus anderen Blickwinkeln, durch andere Modelle zu sehen, ist ein wichtiger Aspekt zum systemischen Denken.
- D) Systemgerechtes Handeln: Hierfür ist ein bewusst reflektiertes Handeln beim Umgang mit bzw. Steuern oder Weiterentwickeln von Systemen sowie eine gewisse Transferierbarkeit dieser Fähigkeit auf unterschiedliche komplexe Systeme notwendig.

Mit dieser Definition vereint OSSIMITZ (1998/2000b) die unterschiedlichen systemischen Ansätze und deren Verständnis von ST. Sowohl die qualitativen Ansätze von VESTER,

GOMEZ/PROBST und SENGE, das Rückkoppelungsdenken von RICHARDSON, die eher quantitativ SD - orientierten Sichtweisen von RICHMOND und FORRESTER als auch jene von DÖRNER und der kognitionspsychologischen deutschen Schule des komplexen Problemlösens finden sich in den einzelnen Dimensionen seiner Definition von ST. Diese sind zwar auf den ersten Blick mit den sieben „systemic thinking skills“ RICHMONDS (1993) verwandt, hingegen entkoppelt sie OSSIMITZ von der SD und vertritt somit den Standpunkt, dass systemisches Denken auch ohne detailliertes systemdynamisches Modellierwissen – und somit auch für Laien – möglich und sinnvoll ist.

## **2.5. Komplexe dynamische Situationen und Stock-Flow-Thinking**

Um zu veranschaulichen, welche Rolle Bestands- und Flussgrößen in Systemen besitzen, bzw. welche Auswirkungen eine Nichtbeachtung oder ein Unverständnis der durch sie hervorgerufenen Dynamik haben kann, möchte ich an dieser Stelle etwas näher auf den Ausgangspunkt der „Stock-Flow-Thinking“ Forschung eingehen – dieser findet sich in Untersuchungen des Verhaltens von Menschen in komplexen dynamischen Situationen. Wie oben beschrieben, sind unsere mentalen Modelle nur mehr oder weniger genau und korrekt. Speziell in komplexen, kontraintuitiven, hoch dynamischen Systemen, in welche der Mensch versucht lenkend oder korrigierend einzugreifen, kann dieses fehlerhafte Modell und Denken verhängnisvolle Folgen nach sich ziehen. Oft wird eine Situation trotz bester Absichten des Handelnden sogar dramatisch verschlechtert. Die Beispiele solcher Eingriffe mit negativen Folgen sind zahlreich. Stellvertretend sei hier nur auf FORRESTER (1969/1971a), MOXNES (1998) und DÖRNER (1989) hingewiesen. DÖRNER (1989, S. 12) führt ein besonders erschütterndes reales Beispiel eines Entwicklungshilfeprojektes im Okavangodelta im südlichen Afrika an (vgl. auch Kap. 5.3.4.). In der Absicht die Lebensbedingungen der ansässigen Bevölkerung zu verbessern, wurde im Rahmen dieses Projektes die Größe der Rinderherden und die Zahl der Brunnen gesteigert. Doch das wenige Gras auf den Weiden konnte die immer größer werdende Zahl an Rindern nicht ernähren und das Grundwasser floss nicht schnell genug nach, um die Wasserentnahme aufzuwiegen. Als der Regen ausblieb versiegten die Brunnen, die Weiden verfielen zu Steppen, die Rinder starben und die Bevölkerung erlitt eine schwere Hungerkatastrophe.

Das Management mehrerer Bestandsgrößen (Anzahl der Rinder, Wassermenge, Grasmenge und Bevölkerungsgröße) ging in diesem Fall schief. Die Vermutung liegt nahe, dass die Projektleiter nicht nur die systemeigenen Zusammenhänge und Rückkoppelungen (z.B. Wasserentnahme als Trinkwasser und zur Bewässerung → Vergrößerung der Weiden und damit der Rinderzahl → Vergrößerung der Bevölkerung → höherer Bedarf an Nahrungsmitteln und Wasser → stärkere Wasserentnahme → ...) nicht beachtetten, sondern

auch kein Verständnis der Charakteristika von den Zusammenhängen zwischen Bestands- und Flussgrößen hatten. Die Folge solcher menschlicher Eingriffe in komplexe Systeme ist ein systemisches Gesetz, das SENGE (1998) als „Die Lösungen von gestern sind die Probleme von heute“ bezeichnet. Gemeint sind damit Symptombehandlungen von Problemen, welche das Wiederkehren desselben Problems in verstärkter Form oder aber das Auftreten eines anderen weit schwerwiegenderen Problems nach sich ziehen. Das menschliche Denken hat nicht nur einen begrenzten Raum- und Zeithorizont, in welchem Auswirkungen noch mit dem eigenen Handeln in Verbindung gebracht werden, sondern auch einen strengen Fokus auf ein Problem und dessen eine Ursache. Gerade in komplexen Situationen haben Probleme hingegen meist mehrere Ursachen. Unterschiedlichste Prozesse laufen gleichzeitig ab und eine Verbesserung einer Variable kann direkt zu einer Verschlechterung einer anderen führen. Diese wird dann aber wieder nur als vollkommen neues unabhängiges Problem betrachtet, anstelle der Beachtung der Beziehung zwischen den einzelnen Systemvariablen.

Auch beim bewussten Management von Beständen, wie es etwa der Umgang mit nicht oder nur langsam erneuerbaren Ressourcen darstellt, versagt das menschliche Handeln oftmals. GORDON (1954) und HARDIN (1968) konnten zeigen, dass offener Zugang zu solchen Ressourcen (wie z.B. Fisch-, Wald- oder Grundwasserreservoirs) zu übermäßig starker Entnahme und bedingt durch die konkurrierende Nutzung sowie die angestrebte individuelle Profitmaximierung jedes Handelnden zur Ausbeutung der Ressource führt. HARDIN (1968) nennt dies „Tragedy of the Commons – Die Tragödie der Gemeingüter“. Während in Fällen wie den Ölreserven oder internationalen Fischgewässern die Ursachen in der Beteiligung einer Vielzahl von konkurrierenden Konzernen oder aber in unterschiedlichen Auffassungen von nachhaltiger Nutzung etc. liegen mögen, tritt dieses Missmanagement von Ressourcen auch in weit einfacheren Systemen und Situationen zu Tage, in welchen nicht mehrere Interessensgruppen individuelle Ziele verfolgen – das Problem der Gemeingüter also gar nicht gegeben ist (vgl. auch Kap. 5.4.). MOXNES (1998) berichtet von einem solchen Fall: Im Jahr 1911 wurden auf St. Paul Island in Alaska Rentiere angesiedelt, um die ansässige Bevölkerung mit Fleisch zu versorgen. Rentiere ernähren sich von Flechten und diese waren auf der Insel zahlreich vorhanden. Man vergrößerte die Herde bis zum Jahr 1938 auf rund 2000 Tiere - zwölf Jahre später waren nur noch acht Tiere übrig. Was war geschehen? Durch die für das Gebiet und den Bestand an Flechten viel zu große Zahl an Tieren konnten die Flechten nicht schnell genug nachwachsen und bald waren keine Flechten mehr übrig geblieben - die Tiere verhungerten. Man war nicht dazu in der Lage, den Bestand an Tieren und Flechten in einem dynamischen Gleichgewicht zu halten. Wohl gemerkt gab es keine konkurrierenden Rentierzüchter oder Ähnliches – die Flechten waren also kein Gemeingut im

oben beschriebenen Sinne. Man versuchte lediglich eine einzelne Rentierherde anzusiedeln und deren Größe auf einem Niveau zu stabilisieren, welches eine dauerhafte Versorgung der Bevölkerung mit Fleisch gewährleistet.

Dieses und ähnliche Ereignisse führten in den Folgejahren – vor allem nach dem Aufkommen von Computern – zu einer Fülle von empirischen Untersuchungen solcher Situationen und auch zur Entstehung des Forschungsansatzes „Komplexes Problemlösen“ der deutschen Kognitionspsychologie (DÖRNER, FUNKE, PUTZ-OSTERLOH, etc.). Deren wichtigste Ergebnisse wurden von DÖRNER (1989) zusammengefasst. Die Forschungsergebnisse aller Untersuchungen zeigten, dass Menschen beim Management von dynamisch komplexen Situationen große Schwierigkeiten haben und sachlogische, schwerwiegende und unter realen Umständen kostenintensive Fehler begingen. STERMAN (1989) sieht den Grund für diese schlechten Ergebnisse und für die Unfähigkeit von Menschen sich in dynamisch komplexen Situation richtig zu verhalten, in fehlerhaften mentalen Modellen der Situation und einer dadurch hervorgerufenen „Misperception of feedback“ (MOF). Darunter versteht er eine mangelhafte Auffassungsgabe, ein schwaches Verständnis von Rückkoppelungsstrukturen und die Unfähigkeit von diesen Strukturen die Dynamik des Systems abzuleiten (vgl. STERMAN 1989 und DIEHL/STERMAN 1995). Diese MOF Hypothese wurde in der Folge von mehreren Autoren unterstützt.

MOXNES (1998) wählte die oben beschriebene Geschichte der Rentiere auf St. Paul Island auch als Coverstory für eine seiner Untersuchungen aus. Er konnte feststellen, dass sämtliche seiner 48 Testpersonen Strategien wählten, welche eine für den Flechtennachwuchs zu große Rentierherde bewirkte und letzten Endes zu ähnlichen Ergebnissen wie in der Realität führten. Selbst unter Ausschluss des Gemeingüterproblems, welches bei miteinander konkurrierenden Ressourcennutzern auftritt, kommt es wie MOXNES (1998) zeigen konnte, demnach zu einer Ausbeutung und Vernichtung von erneuerbaren Ressourcen – obwohl eine nachhaltige Nutzung ohne weiteres bewerkstelligbar wäre. In einer Nachfolgeuntersuchung (MOXNES 2000) führte MOXNES eine ähnliche Studie an größtenteils professionellen Entscheidungsträgern durch. Sie mussten die Größe einer Fischereiflotte für ein bestimmtes fischreiches Gebiet mit dem Ziel einer nachhaltigen Profitmaximierung managen. Zu diesem Zweck sollte verständlicherweise die Menge der gefangenen Fische pro Jahr maximal dem Nachwuchs an Fischen entsprechen und diesen keinesfalls übertreffen. 96% der Probanden überfischten das Gebiet – was MOXNES zu dem Ergebnis führte, dass auch professionelle Entscheidungsträger Rückkoppelungsstrukturen nicht oder falsch verstehen, die Wichtigkeit von Zeitverzögerungen unterschätzen und Stock-Flow Zusammenhänge nicht berücksichtigen.

DIEHL/STERMAN (1995) setzten Probanden vor die Aufgabe einen Warenbestand (bei stochastischen Verkäufen) zu managen und variierten bei den einzelnen Aufgaben die

Stärke der Rückkoppelungen und die Größe der Zeitverzögerungen (Reaktionszeit des Systems zwischen Ursache und Wirkung). Sie entdeckten, dass die Fähigkeit der Probanden in den untersuchten Situationen richtig zu handeln mit der Größe der Zeitverzögerung und der Stärke der Nebenwirkungen von Handlungen abnahm. In den schwierigeren Aufgabenstellungen wurden die Leistungen der Testpersonen sogar von einem einfachen „do-nothing“ Szenario übertroffen, d.h. der Output des Systems wäre vorteilhafter gewesen, wenn die Vpn überhaupt nicht (mit der Intention den Output zu verbessern) in das System eingegriffen hätten (vgl. DIEHL/STERMAN 1995).

Auch BREHMER/ALLARD (1991) untersuchten die Rolle von Zeitverzögerungen in Zusammenhang mit dynamisch komplexen Situationen und versetzten Probanden in die Rolle eines Feuerwehrhauptmanns, der die Löscharbeiten eines Waldbrandes leiten muss. Von einem Erkundungsflugzeug bekommt dieser Informationen über die genaue Lage und Entwicklung des Feuers, die von ihm entsendeten Löschtrupps erstatten ihm ebenfalls Bericht. BREHMER/ALLARD kamen zu dem Ergebnis, dass bereits eine minimale Zeitverzögerung in der Berichterstattung die Fähigkeit zur Kontrolle des Systems stark herabsetzt. In der Tat berücksichtigten einige Vpn diese Zeitverzögerung bei der Steuerung des Systems überhaupt nicht – und das obwohl es sich bei Zeitverzögerungen um eine alltägliche Angelegenheit handelt. Denn es benötigt auch im Alltag eine gewisse Zeit, bis eine Handlung ihren gewünschten Effekt zeigt, oder aber bis die Information über den Effekt wieder den Handelnden erreicht. Die Verzögerung ist dabei von Fall zu Fall unterschiedlich lang. In unbekanntem, dynamisch komplexen Situationen stellen diese Zeitverzögerungen eine Quelle von Fehlverhalten dar. Denn sie verlangsamen die Akkumulation von Erfahrung (da Ursache und Wirkung meist nicht mehr klar einander zuordenbar sind), das Testen von eigenen Hypothesen über die Struktur der Situation und den Lerneffekt betreffend eigener Handlungen. WAGENAAR/SAGARIA (1975), WAGENAAR (1978) und WAGENAAR/TIMMERS (1979) konnten zeigen, dass Menschen bei der Einschätzung von Dynamik und im Speziellen von exponentiellem Wachstum generell stark dazu tendieren in linearen Modellen zu denken. Wir extrapolieren linear und unterschätzen dadurch exponentielle Wachstumsvorgänge oft mehr als deutlich.

Ein klassisches Experiment in diesem Zusammenhang stellt auch die Untersuchung eines Räuber-Beutetier-Systems dar (vgl. bspw. DÖRNER 1989, GREEN, 1997, JENSEN 2003, JENSEN/BREHMER 2003). Die Struktur eines solchen Systems entspricht den von DOYLE/FORD (1998) ausgearbeiteten Mindestanforderungen eines dynamisch komplexen Systems: Nur zwei Variablen, die sich über insgesamt zwei Wirkungsketten gegenseitig beeinflussen – es handelt sich also (wie auch schon bei dem Rentierexperiment) um das einfachst mögliche dynamisch komplexe System. DÖRNER (1989) beobachtete, dass den Probanden bereits das Prognostizieren der Entwicklung der beiden Populationen – ohne

selbst in das System eingreifen zu müssen - extrem schwer fiel. JENSEN (2003) und JENSEN/BREHMER (2003) ließen ihre Versuchspersonen mit dem Auftrag ein Gleichgewicht zwischen den beiden Populationen herzustellen steuernd in das System eingreifen. Die Probanden konnten jedoch nur die Räuberpopulation (Füchse) direkt beeinflussen. Die Beutetierpopulation (Hasen) wurde indirekt durch die Zahl an Füchsen geregelt. Trotz der strukturellen Einfachheit des Systems fiel den Vpn die Aufgabenstellung übermäßig schwer. In weiteren Untersuchungsgruppen gab JENSEN (2003) den Testpersonen unterschiedliche Hilfestellung mit der Intention ihnen die Struktur des Systems zu verdeutlichen und somit das Verständnis des Systems zu erhöhen. Überraschenderweise führten selbst deutliche Hilfestellungen kaum zu besseren Resultaten – was sich mit einer der Erkenntnisse von MOXNES (2000) deckt: Er berichtet, dass selbst Zusatzinformation, die man als „giving away the answer“ interpretieren könnte, zu keiner signifikanten Verbesserung in den Ergebnissen führte (vgl. MOXNES 2000, S. 341).

Die Untersuchungen der deutschen Kognitionspsychologie beschäftigten sich im Vergleich zu diesen einfachsten Situationen mit nur wenigen Variablen auch zusätzlich mit weit komplexeren Systemen. So wurden Computerszenarien geschaffen, die realen Situationen sehr ähnlich waren, wie u.a. eine afrikanische Steppenlandschaft namens „Tanaland“ in welche die jeweilige Vpn als Entwicklungshelfer kam, oder das noch deutlich komplexere Szenario „Lohhausen“, in welchem die Vpn in die Rolle des mit großen Kompetenzen ausgestatteten Bürgermeisters schlüpfte (vgl. DÖRNER/REITHER 1978, DÖRNER 1989). Zu den schon bei den anderen Untersuchungen vorhandenen Schwierigkeiten der Situation wie Komplexität, Vernetztheit und Dynamik kam hierbei auch noch Intransparenz der Struktur und Polytelie (Vielzieligkeit) hinzu. Die Ergebnisse waren den oben angeführten ähnlich. Fast ausnahmslos schafften es die Probanden (unabhängig von ihrem IQ-Wert) die ursprünglich relativ stabilen, wenngleich auch nicht optimalen Zustände in katastrophale Zustände überzuführen – trotz bester Absichten. DÖRNER (1989) sieht die Gründe dafür in einem Handeln ohne vorherige Situationsanalyse, mangelnder Zieldefinition, geringem Verständnis der Eigendynamik von Systemen (Wachstum, Zeitverzögerungen, Rückkoppelungen, etc), Flucht in Projektemacherei (Konzentration auf einzelne Detailaufgaben) und Selbstüberschätzung.

Die Erkenntnisse DÖRNER (1989) stimmen damit auch weitgehend mit der MOF-Hypothese STERMANS (1989) überein. Die Ursachen für das in der Realität immer wieder auftretende Missmanagement von Systemen, wobei Menschen durch ihr Eingreifen oftmals mehr Schaden anrichten als sonst entstanden wäre, liegen offenkundlich tatsächlich in einem Unverständnis der systeminternen Abläufe und Zusammenhänge (Wachstumsvorgänge, Verzögerungen, Rückkoppelungen, Fern- und Nebenwirkungen) und falschen mentalen Modellen. Untersuchungen anhand immer einfacherer Systeme konnten zeigen, dass bereits

in einfachsten dynamischen Situationen dieselben Probleme auftraten. Es handelt sich also gar nicht unbedingt um eine *zu hohe Komplexität*, welche durch die Vernetztheit einer Unmenge an Variablen hervorgerufen wird, sondern um Defizite auf einer viel niedrigeren Stufe. Auch bei nur wenigen Variablen (in manchen Fällen nur zwei oder gar einer einzigen) stießen die Probanden, welche meist hoch ausgebildet und/oder professionelle Entscheidungsträger waren, auf nicht geahnte Schwierigkeiten. Linda BOOTH-SWEENEY und John D. STERMAN beschlossen den Ursachen dafür weiter auf den Grund zu gehen und die Forschung auf einem für diese Szenarien noch fundamentaleren Gebiet weiterzuführen. Denn selbst für diese einfachen Systeme mit nur zwei Variablen, die sich gegenseitig beeinflussen, ist ein Verständnis von *Dynamik* eine Grundvoraussetzung. Dynamik wiederum entsteht in Systemen durch das zeitliche Zusammenwirken von Bestands- und Flussgrößen. Ihre Untersuchungen dieser für das Verständnis von Dynamik und somit auch für dynamische komplexe Situationen quer durch alle Bereiche so wichtigen Größen, führten zu der schon angesprochenen und in Kap. 6.1. ausführlich behandelten Publikation „Bathtub Dynamics: Initial Results of a Systems Thinking Inventory“ (BOOTH-SWEENEY/STERMAN 2000). Tatsächlich zeigte sich, dass bereits auf diesem fundamentalen Gebiet und selbst bei hoch ausgebildeten Personen schwerwiegende Defizite vorhanden sind. Sowohl die Unterscheidung zwischen Bestands- und Flussgrößen als auch der Umgang mit ihnen, d.h. ihre Bedeutung und Relevanz für Systeme zu erkennen oder auch nur den zeitlichen Verlauf *eines* Bestandes bei gegebenem Zufluss nachvollziehen zu können, riefen beträchtliche Schwierigkeiten hervor. Es handelt sich bei diesem Unverständnis von Bestands- und Flussgrößen demnach zweifellos um (zumindest) eine der Ursachen für die in Realität immer öfter auftretenden fehlerhaften Eingriffe und Lenkungsversuche von Systemen. Denn wenn schon auf diesem Level schwerwiegende Mängel gegeben sind, ist es nachvollziehbar, dass auch in komplexen Systemen das Systemverständnis nicht besser sein kann. Gelingt es diesen Defiziten entgegenzuwirken oder sie zu verringern - wozu die vorliegende Arbeit einen Beitrag leisten soll - könnte dies weitreichende positive Folgen nach sich ziehen.

Um zu zeigen wie weitverbreitet die Schwierigkeiten beim Umgang mit Stocks und Flows sind, möchte ich zum Abschluss dieses Kapitels noch auf zwei Studien verweisen:

- 1) In den 1980er Jahren war der Gebrauch von Kokain in den Vereinigten Staaten von Amerika weit verbreitet (vgl. HOMER 1993, STERMAN 2000). Er nahm sogar solche Ausmaße an, dass die amerikanische Regierung beschloss, ein umfassendes Programm zur Bekämpfung des Drogenmissbrauchs, im Speziellen des Kokainmissbrauchs, zu starten. In den Jahren danach stieg zwar die Zahl an Verhaftungen, Verurteilungen, Krankenhauseinlieferungen und Todesfällen in Zusammenhang mit Kokainmissbrauch, dennoch zeigten die regelmäßig von der Regierung in Auftrag gegebenen Untersuchungen

zu den Alkohol- und Drogengewohnheiten der amerikanischen Bevölkerung ein verbessertes Bild. In diesen Erhebungen wurden repräsentativen Gruppen Fragen wie z.B. ob sie jemals bzw. ob sie im letzten Monat oder im letzten Jahr Kokain konsumiert haben, gestellt. Die Daten zeigten eine starke Zurückdrängung des Kokainmissbrauchs. Hatten im Jahr 1985 noch 3% der Bevölkerung innerhalb des letzten Monats Kokain konsumiert, waren es im Jahr 1990 nur noch 1%. Auch die Zahl jener Personen, die jemals in ihrem Leben Kokain probiert hatten, ging von 1982 bis 1988 um 3,2% zurück. Die Regierung verkaufte diese Ergebnisse und damit das ins Leben gerufene Drogenbekämpfungsprogramm als großen Erfolg, die Erfolgszahlen wurden über die Medien verbreitet. Noch härtere Strafen, mehr Gefängnisse, mehr Geldmittel und eine Ausdehnung des Bekämpfungsprogramms wurde gefordert, um dem Problem vollständig Herr werden zu können. Die gestiegene Zahl an Verhaftungen, Verurteilungen etc. wurde als Zeichen der Effektivität des Programms und somit des Erfolgs interpretiert.

Im Jahr 1993 erstellte Jack B. HOMER, im Auftrag des „National Institute of Justice“, ein umfangreiches System Dynamics Modell des amerikanischen Kokainmarktes bzw. des Konsums (HOMER 1993). Extrem vereinfacht wird in dem Modell Folgendes ersichtlich (vgl. Abb. 2.1.):<sup>10</sup> Es gibt zwei Bestandsgrößen – zum einen die Zahl jener Menschen, die noch nie Kokain konsumiert haben und zum anderen die Zahl jener, die es schon mindestens einmal probiert haben (unabhängig, ob nur ein einziges Mal oder regelmäßig). Wann immer jemand zum aller ersten Mal diese Droge benutzt, wandert er automatisch vom ersten in den zweiten Bestand und kann verständlicherweise auch nie mehr wieder zum ersten Bestand zurück. Dies ist die einzige Zuflussgröße für den Bestand an Menschen, die schon mindestens einmal Kokain benutzt haben. Der Zufluss jenes Bestandes an Menschen, die es noch nie benutzt haben, kann ausschließlich über die Geburtenziffer erfolgen. Dieser Bestand hat zwei Abflussgrößen: Sterbefälle und erstmaliger Gebrauch von Kokain, wodurch man in den zweiten Bestand wechselt. Sterbefälle stellen auch den einzigsten Abfluss der Bestandsgröße der Kokainkonsumenten dar.<sup>11</sup> Die Todesrate ist dabei für diese Gruppe nur geringfügig höher, als jene der übrigen Bevölkerung.

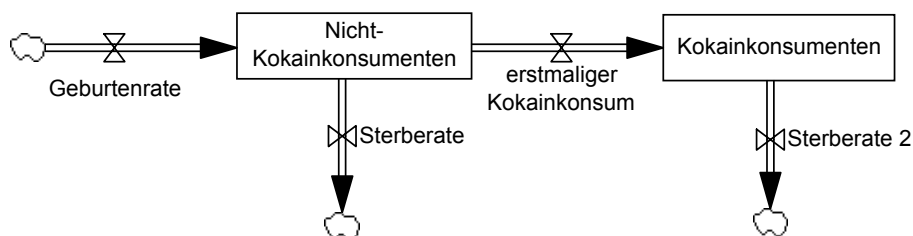


Abb. 2.1.

<sup>10</sup> Es handelt sich bei dieser Abbildung um ein Stock-Flow-Diagramm. Diese werden in Kap. 3.2. näher erläutert.

<sup>11</sup> Beide Bestandsgrößen werden in Realität auch durch Zu- und Abwanderung verändert. Diese sind jedoch vergleichsweise gering bzw. für die beiden Bestände nur begrenzt unterschiedlich groß. Sie können daher – zumindest für diesen Fall – vernachlässigt werden.

Das Stock-Flow Modell HOMERS zeigte nun, dass die Daten der Erhebungen unmöglich stimmen konnten. Denn unter keinen wie auch immer gearteten Umständen konnte der Bestand an Menschen die schon einmal in ihrem Leben Kokain konsumiert haben innerhalb von nur sechs Jahren (1982-1988) um 3,2% sinken. Denn wie erwähnt ist die einzige Möglichkeit den Bestand zu verringern der Todesfall - d.h. er verringert sich nur dann, wenn die Zahl an Todesfällen jene der neu dazukommenden Kokainkonsumenten übersteigt. Aber selbst unter der utopischen Annahme, dass im Jahr 1985 von einem Moment auf den anderen kein einziger Einwohner mehr Kokain zum ersten Mal ausprobiert hat (der Zufluss also auf Null gefallen wäre), ist der Abfluss des Bestandes (die Sterberate) zu gering, um eine solche Verringerung bewirken zu können. Die Daten der Erhebungen waren demnach auf keinen Fall in dem Sinne zu interpretieren, dass die Verringerung des Bestandes auf einen Erfolg des Drogenbekämpfungsprogramms der Regierung zurückzuführen war. Vielmehr dürften wohl andere Ursachen für diese scheinbare Verringerung verantwortlich gewesen sein, wie z.B. eine Unterrepräsentation der aktiven Drogenkonsumenten in den Umfragen sowie – bedingt durch die härteren Strafen und die geringere soziale Akzeptanz von Kokaingebrauch – eine weit geringere Bereitschaft auf die Fragen wahrheitsgemäß zu antworten. In der Tat zeigte das Modell HOMERS, dass sich die Gruppe der Kokainkonsumenten nicht nur keinesfalls um mehr als 3% verkleinert haben konnte, sondern im Gegenteil – dass sie sich sogar weiter vergrößert haben musste. Denn die Zahl jener, die die Droge zum ersten Mal konsumierten und somit in den zweiten Bestand wanderten, war größer als die Zahl der Todesfälle dieses Bestandes. Der Kokaingebrauch war demnach trotz des Bekämpfungsprogramms der Regierung gestiegen anstatt wie behauptet gesunken. Das Bemerkenswerte hierbei ist nun aber nicht, dass eine Erhebung entweder fehlerhaft war oder ihre Ergebnisse vollkommen falsch interpretiert wurden, auch nicht, dass eine Regierung bewusst oder unbewusst diese falschen Resultate für sich genutzt hat, sondern dass es trotz öffentlicher Diskussion über diese Ergebnisse und über das Drogenbekämpfungsprogramm mehrere Jahre dauerte, bis entdeckt wurde, dass die Daten in dieser Form nicht stimmen konnten. Denn dass dieser Bestand an Einwohnern mit Kokainerfahrung nicht innerhalb derart kurzer Zeit so deutlich kleiner werden konnte, hätte eigentlich bereits auch von einem engagierten Journalisten mit einem Vorstellungsvermögen von Bestands- und Flussgrößen entdeckt werden können.

2) Aber auch Wissenschaftler, welche selbst Untersuchungen zum Thema komplexes Problemlösen durchführen, beachten nicht immer die Bedeutung von Bestands- und Flussgrößen: Wie JENSEN (2003) beobachtet hat, unterlief David W. GREEN ein solcher Fehler. Die empirische Studie von GREEN (1997) zielte auf die Untersuchung des Verständnisses von Rückkoppelungen in einem Räuber-Beutetier-System (Füchse-Hasen)

ab. Die Testpersonen mussten zu diesem Zweck abschätzen, wie sich eine Veränderung bei einer der beiden Populationen auf die andere und dadurch wieder auf die erste auswirkt. Dahinter steckt die Annahme des typischen oszillierenden Verhaltens eines Räuber-Beutetiersystems, in welchem ausschließlich über die Anzahl der Feinde die Größe der Beutetierpopulation geregelt wird und rein über das „Nahrungsangebot“ (Beutetiere, z.B. Hasen) jene der Räuberpopulation (z.B. Füchse). Es ergibt sich das in Abb. 2.2. dargestellte schwingende Verhalten beider Populationsgrößen. Denn ist eine große Zahl an Beutetieren vorhanden, können sich die Räubertiere optimal vermehren. Irgendwann gibt es dann aber derart viele Räuber, dass durch die kleiner werdende Zahl an Beutetieren die Nahrungssituation äußerst schlecht ist. Viele Tiere der Räuberpopulation verhungern – die Population verkleinert sich. Nun herrschen optimale Bedingungen für eine Vermehrung der Beutetiere, da ja jetzt die Zahl an Räubern sehr klein ist – der Kreislauf beginnt von neuem.<sup>12</sup>

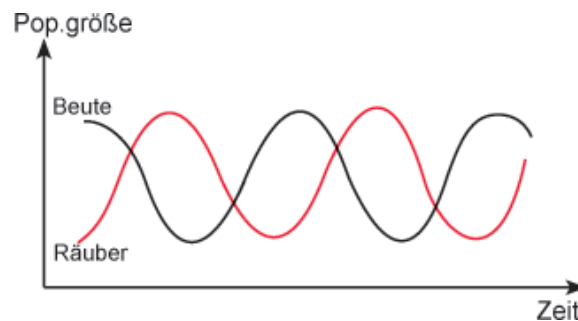


Abb. 2.2.

GREEN (1997) stellte fest, dass die Fähigkeit seiner Testpersonen, diese Beziehungen der beiden Populationen (Füchse und Hasen) richtig einzuschätzen und deren Verhalten vorherzusagen, sehr groß war. Im Rahmen der Studie wurde den Probanden u.a. folgende Abbildung vorgelegt (R = Rabbits, F = Foxes):

$$\mathbf{R} \Rightarrow \mathbf{F} \Rightarrow \mathbf{R} \Rightarrow \mathbf{F}$$

Period 1   Period 2   Period 3

Abb. 2.3. (nach GREEN 1997, S. 207)

Die Probanden sollten nun vorhersagen, wie sich eine 30%ige Vergrößerung der Hasenpopulation auf die Zahl an Füchsen in Periode 1 auswirkt. Anschließend galt es zu bestimmen, wie sich nun diese Veränderung der Fuchspopulation auf die Hasen auswirkt (Periode 2) und zu guter Letzt, welche Folge dies wiederum auf die Fuchspopulation hat (Periode 3). Die Antwort auf die GREEN abzielte und die er als richtig wertete, war folgende: Eine 30%ige Vergrößerung der Hasenzahl führt (durch das vergrößerte Nahrungsangebot)

<sup>12</sup> Dieses oszillierende Wachstumsverhalten kann sich nur dann ergeben, wenn sowohl die Beutetierpopulation keine zusätzlichen Feinde besitzt, das Nahrungsangebot für die Beutetiere konstant bleibt und die Räuberpopulation sich ausschließlich von den Beutetieren ernährt. Dementsprechend selten ist in der Natur eine solch klare Schwingung beobachtbar.

zu einer Vermehrung der Füchse (Periode 1), mehr Füchse bewirken aber anschließend eine Verringerung der Zahl an Hasen (Periode 2) und weniger Hasen führen (durch Nahrungsmangel) zu einer Verringerung der Anzahl an Füchsen (Periode 3).

Genau genommen ist ohne eine Information über die Anfangsbedingungen und über das Gleichgewicht zwischen den beiden Populationen die Aufgabe jedoch unlösbar. Entscheidend dafür, ob die Fuchspopulation noch wachsen kann oder ob sie sich verkleinert, ist nämlich die Zahl an Hasen, die für die Ernährung der momentanen Anzahl an Füchsen notwendig ist. Nehmen wir an, 70 Füchse brauchen einen 1000-köpfigen Hasenbestand um eine genügend große Zahl fangen und sich davon ernähren zu können. Sind mehr als 1000 Hasen vorhanden, herrschen optimale Nahrungsbedingungen – der Fuchsbestand wächst. Sind weniger als 1000 Hasen vorhanden, gestaltet sich der Fang schwierig und die Füchse finden zu wenig Beute. Die Nahrungsbedingungen sind schlecht – die Fuchspopulation sinkt. Ist die Hasenpopulation nun zu Beginn der Periode 1 nahe diesem Gleichgewichtswert, z.B. 900, wird sie tatsächlich durch die plötzliche Vergrößerung diesen übertreffen und auch zu der von GREEN erwarteten Vermehrung an Füchsen führen (da diese plötzlich mehr Nahrung finden, als für ihre momentane Zahl notwendig ist). Liegt die Hasenpopulation allerdings weit vom Gleichgewichtswert entfernt (z.B. 500), dann kann auch die plötzliche Vermehrung um 30% keinen Umschwung bewirken: Die Füchse finden dann auch nach wie vor für ihre Anzahl zu wenig an Nahrung und ihre Population wird sich verkleinern – nur eben etwas langsamer als zuvor. Eine größere Zahl an Hasen kann also auch durchaus eine sinkende Zahl an Füchsen bedeuten – dieses kontraintuitive Verhalten wurde von GREEN (1997) ignoriert, wodurch die Ergebnisse seiner Studie nur bedingt von Nutzen sind - da ohne Hinweis auf die Anfangsbedingungen *jede* Antwort der Vpn zulässig ist.

Wenn man die Struktur dieses Systems näher betrachtet wird klar, dass eine Veränderung im Hasenbestand niemals direkt jenen der Füchse beeinflussen kann: Der Bestand an Hasen nimmt nämlich nur Einfluss auf die *Flussgrößen* des Fuchsbestandes – den Zufluss (Geburten) und den Abfluss (Todesfälle) an Füchsen. Die Zahl an Füchsen steigt aber nur dann, wenn der Zufluss (Geburten) größer ist als der Abfluss (Todesfälle). Ist das System sehr weit von Gleichgewicht in dem Sinne entfernt, dass für die Zahl an Füchsen viel zu wenige Hasen vorhanden sind, dann ist der Nettofluss (Geburten und Todesfälle saldiert) der Population stark negativ – sie verkleinert sich. Unter diesen Umständen kann auch eine Verringerung dieses negativen Nettoflusses, wie sie durch die um 30% höhere Hasenzahl eintritt, nichts daran ändern. Der Nettofluss bleibt negativ.

Es gilt daher *sowohl Bestands- als auch ihre dazugehörigen Flussgrößen* zu beachten (Stock-Flow-Thinking), um eine Aussage über das dynamische Verhalten eines Bestandes treffen zu können.

### 3. Darstellung von Bestands- und Flussgrößen

Um die folgende Betrachtung von Systemen bzw. Bestands- und Flussgrößen anschaulich zu gestalten, ist es notwendig eine geeignete Darstellungsform einzuführen. Es sollen hier zwei zentrale Darstellungsarten von Systemzusammenhängen angesprochen und kurz beleuchtet werden. Während es sich bei Wirkungsdiagrammen um jene Abbildungsmöglichkeit handelt, welche die Vertreter des „Systems Thinking“ bevorzugen, stellen Flussdiagramme jene der System Dynamics – Methode dar.

#### 3.1. Wirkungsdiagramme

Bei Wirkungsdiagrammen (Kausaldiagrammen), auch bekannt unter dem englischsprachigen Namen Causal-Loop-Diagramme (CLD's), handelt es sich um geschlossene Kreise von Ursache-Wirkungs-Pfeilen, welche die Wirkungen zwischen den einzelnen Variablen eines Systems darstellen. CLD's bestehen aus zwei unterschiedlichen Bausteinen, nämlich den namentlich angeführten Systemelementen und den Wirkungspfeilen, welche diese Elemente miteinander verbinden. In Systemen existieren ganz generell zwei Arten von Wirkungen: positive und negative. In Wirkungsdiagrammen werden genau diese Wirkungen graphisch dargestellt. Eine positive Wirkung bedeutet, dass eine Vergrößerung (Verkleinerung) der Variable A, ebenfalls zu einer *relativen* Vergrößerung (Verkleinerung) der Variable B führt, d.h. größer (kleiner) als sich die Variable ansonsten verändert hätte.<sup>13</sup> Sie wird durch ein "+" Zeichen neben dem Wirkungspfeil verbildlicht. Eine negative Wirkung, durch ein "-" Symbol neben dem Wirkungspfeil erkenntlich gemacht, bedeutet umgekehrt, dass eine Vergrößerung (Verkleinerung) der Variable A zu einer *relativen* Verkleinerung (Vergrößerung) von Variable B führt, d.h. kleiner (größer) als sich die Variable ansonsten verändert hätte.<sup>14</sup>



Abb. 3.1.



Abb.3.2.

Abb. 3.1. zeigt ein konkretes Beispiel für eine positive Wirkung: je mehr (weniger) von der Ursache, desto mehr (weniger) von der Wirkung. Je mehr körperliche Betätigung, desto mehr Ermüdung des Körpers, je weniger körperliche Betätigung, desto weniger Ermüdung. Ein negatives Vorzeichen (Abb. 3.2.) bedeutet im Gegenzug: je mehr von der Ursache, desto weniger von der Wirkung bzw. je weniger von der Ursache, desto mehr von der Wirkung. Je

<sup>13</sup> Man beachte in der Definition das Wort „relativ“, es wird an späterer Stelle dieses Kapitels genauer erklärt.

<sup>14</sup> Die Bezeichnungen „positiv“ und „negativ“ sind in der Folge keinesfalls wertend zu verstehen. Eine „positive“ Wirkung bedeutet eine Auswirkung gleichgerichtet mit der Ursache, eine „negative“ Wirkung steht für eine der Ursache entgegen gerichtete Auswirkung.

mehr Zeit für Erholung, desto weniger Stress, je weniger Zeit für Erholung, desto mehr Stress empfindet man.

In komplexen Situationen gilt es allerdings eine Vielzahl von Variablen zu berücksichtigen und mit einzubeziehen. Diese werden dann in CLD's insgesamt meist so dargestellt, dass sich ein geschlossener Wirkungskreis ergibt. Er zeigt das Verhalten und die Struktur des Systems an und kann entweder selbstverstärkend d.h. eskalierend, oder aber ausgleichend d.h. stabilisierend sein. Beide Typen werden in der Mitte der Abbildung durch ein entsprechendes Symbol gekennzeichnet, eskalierende Wirkungsdiagramme mit einem von einem Pfeil umrandeten "+" Symbol, stabilisierende durch ein gleichfalls umrandetes "-" Symbol. Abb. 3.3. zeigt ein CLD, das die Lebenssituation eines fiktiven afrikanischen (Bevölkerungs-)Stammes, welchen OSSIMITZ (2000b) beschreibt, darstellt.

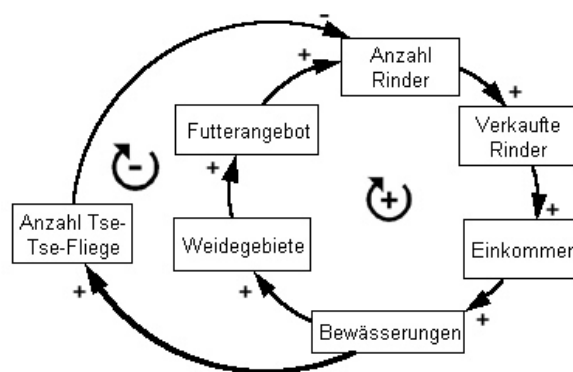


Abb. 3.3. (aus WAGNER 2002, S. 32)

An dieser Abbildung erkennt man auch sehr schnell eine Problematik sämtlicher Darstellungsmethoden und Modelle. Welche Faktoren und Variablen werden noch mit aufgenommen, welche nicht? Ein Modell stellt eine reelle Situation stets nur vereinfacht dar, es kann niemals alle Komponenten der Realität enthalten und diese 1:1 simulieren. Dadurch liefern unterschiedlich genaue Modelle auch oftmals differierende Ergebnisse und Vorhersagen. So kann in der Abbildung der rechte Wirkungskreis (welcher eine sich selbst verstärkende Zahl an Rindern anzeigt) natürlich nur bei diesem Auflösungsgrad eskalierend sein, bei exakterer und umfangreicherer Darstellung ist es (durch begrenzte Fläche der Weidegebiete, durch begrenztes Futterangebot, etc.) nicht mehr möglich, dass sich die Anzahl der Rinder immer selbst verstärkt und gegen unendlich strebt. Ein Beispiel für eine nicht aufgenommene Größe stellt hierbei etwa die Menge an verfügbarem Wasser oder an gefressenem Futter dar.

Ob ein Wirkungskreis nun eskalierend oder aber stabilisierend ist, lässt sich auf zwei Arten feststellen. Die erste und einfachere Variante ist, die Zahl der negativen Wirkungen in der Darstellung abzuzählen. Ergibt sich eine gerade Zahl negativer Wirkungen, ist der Wirkungskreis insgesamt eskalierend und sich selbst verstärkend, eine ungerade Zahl

bedeutet hingegen, dass er stabilisierend und ausgleichend ist. Die exaktere Methode ist allerdings, eine kleine Veränderung in einer der Variablen über den gesamten Wirkungskreis bis hin zur Ausgangsvariable zu verfolgen. Wird diese kleine Veränderung verstärkt, ist der Wirkungskreis eskalierend, wird sie abgeschwächt, ist er stabilisierend.<sup>15</sup>

Die generelle Vorgehensweise bei der Erstellung von CLD's ist folgende: Variablen auswählen → Wirkungspfeile von Ursache zu Wirkung einzeichnen → Polarität festlegen → Zeitverzögerungen einzeichnen (diese werden – falls relevant – durch eine Unterbrechung des Wirkungspfeils kenntlich gemacht) → Polarität des Wirkungskreises vermerken.

Der große Vorteil von CLD's liegt gewiss in ihrer Einfachheit, in ihrer relativ leichten Handhabung und in ihrer großen Anschaulichkeit. So lassen sich damit (auch für Laien) sehr schnell und einfach die mentalen Modelle unterschiedlicher Personen und Situationen darstellen. Diese mentalen Modelle enthalten Annahmen und Hypothesen über die Dynamik und Wechselwirkungen der Komponenten der Situation (des Systems) und erlauben dadurch Rückschlüsse über Fehlannahmen (z.B. falsche Kausalität), Ungenauigkeiten und zu starke Vereinfachung (Weglassen eines wichtigen Zusammenhangs) des eigenen (mentalen) Modells einer Situation. So groß dieser Vorteil auch sein mag, stoßen CLD's dennoch auch auf Probleme und Grenzen in ihrer Anwendung. Diese werden insbesondere dann schnell erreicht, sobald es um quantitative Aussagen, um computergestützte Modellierung eines Systems oder um das Ableiten einer Vorhersage aus der Darstellung geht. CLD's beschreiben nämlich lediglich die *Wirkungsbeziehungen* des beobachteten Systems sehr gut, d.h. sie zeigen, wie sich das System qualitativ im Falle der Veränderung einer Variable verhält. Sie beschreiben aber nicht sein quantitatives Verhalten zu einem gewissen Moment. Wie sich das System bspw. in naher Zukunft verhalten wird, ob eine Variable steigt oder ob sie fällt, ist aus einem CLD nicht vorhersagbar – es zeigt bloß, wie sich das System bei einer möglichen Verkleinerung/Vergrößerung dieser Variable relativ verändern wird.<sup>16</sup>

Ein zweiter großer Nachteil von CLD's liegt zweifelsohne darin, dass sie nicht zwischen Bestandsgrößen und Flussgrößen unterscheiden (vgl. STERMAN 2000). So ist in Abb. 3.4. die Bevölkerung eine Bestandsgröße, die sich über die Flussgrößen Todesfälle/Jahr und Geburten/Jahr ändert. Der positive Wirkungspfeil von den Geburten/Jahr zur Bevölkerung ist jedoch nur halb korrekt. Mehr Geburten/Jahr steigern die Bevölkerungszahl, weniger

---

<sup>15</sup> Der Grund dafür liegt in den unterschiedlich starken Ausprägungen der einzelnen Wirkungen. In Abb. 3.3. wirkt sich eine stärkere Bewässerung durch die Vermehrung der Tse-Tse-Fliege zwar im Prinzip negativ auf die Anzahl der Rinder aus, doch angenommen die Vermehrung der Fliege wäre nur marginal, dann könnte auch trotz einer stärkeren Bewässerung und mehr Tse-Tse-Fliegen die Zahl der Rinder weiterhin steigen. Der Wirkungskreis wäre in diesem Fall - obwohl *eine* und damit eine ungerade Zahl an negativen Wirkungen enthalten ist - eskalierend.

<sup>16</sup> So kann man in Abb. 3.3. weder die exakte Zahl an Rindern eruieren, noch eine Aussage darüber treffen, ob sie im Falle einer stärkeren Bewässerung steigt oder fällt.

Geburten/Jahr führen aber nicht zu einer Verringerung der Bevölkerungszahl.<sup>17</sup> Geburten können die Bevölkerung nur vermehren und niemals verringern.

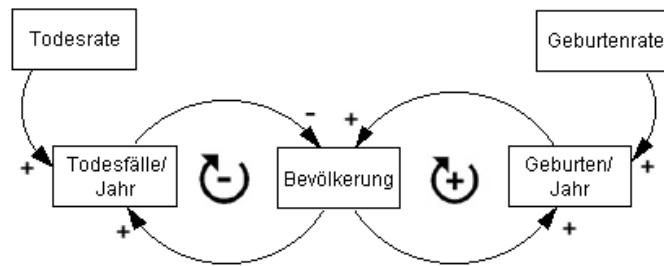


Abb. 3.4.

Selbiges gilt in umgekehrter Art und Weise für die Sterbefälle/Jahr – sie können die Bevölkerung nur verringern und niemals vermehren.<sup>18</sup> Diese Vermischung von Beständen und Flüssen in CLD's ist problematisch und führt auch dazu, dass es nicht möglich ist vorherzusagen, wie sich das System verhält, z.B. ob in dem vorliegenden Fall die Bevölkerung steigt oder fällt. Darüber lässt sich erst nach Vergleich der beiden Flussgrößen Geburten/Jahr und Sterbefälle/Jahr eine Aussage treffen.

### 3.2. Flussdiagramme (Stock-Flow-Diagramme, SFD's)

Eine zweite systemwissenschaftliche Form der Darstellung von Systemen stellen so genannte Flussdiagramme dar. Auch sie sind unter ihrem englischen Namen Stock-Flow-Diagramme (SFD's) besser bekannt. SFD's sind die zentrale Darstellungsmethode in der SD und gehen bis auf deren Anfänge durch Jay W. FORRESTER zurück (vgl. FORRESTER 1961). Sie sind die Methode, um ein System mit Hilfe einer Software darzustellen und zu simulieren – die Schnittstelle zwischen Realität, Realitätsabbildung (Modell) und Computersimulation sozusagen. Gegenüber den CLD's weisen sie einige Vorteile auf, besitzen aber auch gewisse Nachteile. SFD's unterscheiden, wie der Name schon vermuten lässt, im Gegensatz zu CLD's, sehr exakt zwischen Bestandsgrößen und Flussgrößen (Stocks und Flows):

- Bestandsgrößen werden in SFD's als Rechtecke dargestellt, demnach wie ein Behälter, der einen Bestand enthält (vgl. Abb. 3.5.). Sie repräsentieren den Zustand des Systems und besitzen zu jedem Zeitpunkt einen messbaren Wert. Im Modell ergibt sich dieser aus dem Anfangswert und den nachfolgenden Flussgrößen.

<sup>17</sup> Dieser Sachverhalt veranlasste RICHARDSON (1997), die in den 1990er Jahren aufkommende Notation statt der + und – Zeichen in CLD's die Bezeichnung s (für same direction) und o (für opposite direction) zu verwenden, zu kritisieren. Denn eine Verringerung der Geburten führt keineswegs direkt zu einer in absoluten Zahlen kleineren Bevölkerung.

<sup>18</sup> Aus diesem Grund sind positive und negative Wirkungen in ihrer Definition mit dem Zusatz „relativ“ versehen worden. Die Sterbefälle/Jahr können nämlich bei Verringerung indirekt durchaus zu einer Vermehrung der Bevölkerung führen, da die Geburten/Jahr unverändert bleiben. Die Bevölkerung wird im Vergleich zu keiner Verringerung bei den Sterbefällen *relativ* erhöht.

- Flussgrößen werden durch dicke Pfeile (meist mit einem Ventil in der Mitte) dargestellt. Sie verändern die Bestandsgrößen.
  - Ein Pfeil der auf einen Stock zeigt, stellt einen Zufluss für diesen dar und erhöht ihn.
  - Abflüsse werden als vom Bestand wegzeigende Pfeile dargestellt, welche ihn somit verringern.

Ein Pfeil von einem Stock zu einem anderen, ist dadurch gleichzeitig ein Abfluss des einen und Zufluss des anderen Bestands. Sehr oft befindet sich an einem der beiden Enden jedoch eine Wolke:

- Diese Wolken stellen Quellen und Senken für Flussgrößen außerhalb des Modells dar – sie repräsentieren die System- bzw. Modellgrenze. Den Quellen entspringen Zuflüsse, Abflüsse können (wenn sie nicht Zufluss für einen anderen Bestand sind) in Senken verschwinden. Für Quellen und Senken wird unendliche Kapazität vorausgesetzt, da sie sich außerhalb der Betrachtung befinden und somit für das Modell auch keine Relevanz besitzen sollten.
- Konstante Größen werden bisweilen durch ein auf der Spitze stehendes Quadrat dargestellt. Sie sind entweder von außen vorgegebene Größen (z.B. physikalische Größen) oder verändern sich im Betrachtungszeitraum derart langsam und geringfügig dass sie als konstant angenommen werden können. Je nach Modellierssoftware können Konstanten auch zu den „Hilfsgrößen“ zählen:
- Hilfsgrößen: Hierbei handelt es sich um Zwischengrößen von Berechnungen. Sie stellen einen Konverter dar, hinter dem sich eine mathematische Funktion oder Rechenvorschrift verbirgt, d.h. wie aus den eingehenden Daten (Pfeile) die betrachtete Modellgröße errechnet wird. Ein Beispiel für eine solche Hilfsgröße stellt bspw. die Bevölkerungsdichte dar. Diese ist keine eigene Bestandsgröße, sondern wird durch Division von Bevölkerung und Fläche berechnet. Hilfsgrößen werden als Kreis, oder aber ganz ohne Umrandung – nur als Text – abgebildet.
- Informationsflüsse: Sie stellen Wirkungen dar, welche nicht in Form von einem Fluss von Quantitäten (wie bei den Flussgrößen) ablaufen, sondern auf Informationsbasis. Sie werden als dünne Pfeile dargestellt. So beeinflusst bspw. die Größe einer Bevölkerung die absolute Größe des Zu- oder auch Abflusses. Aus diesem Grund wird vom Bestand Bevölkerungsgröße ein Informationspfeil auf die jeweilige Flussgröße vermerkt.



Abb. 3.5.

Aus diesen Grundbausteinen setzen sich im Prinzip alle SFD's und damit natürlich auch alle abgebildeten Systeme zusammen. Wichtig zu beachten ist, dass Pfeile nicht die Bedeutung einer Wirkung, sondern jene einer Eingangsgröße für die Berechnung jener Variable auf welche sie zeigen haben. Zusätzlich stecken hinter den Elementen auch konkrete Zahlen, wodurch eine quantitative Berechnung möglich wird. Die generelle Struktur sieht dann wie folgt aus:



Abb. 3.6.

In einem konkreten Beispiel eines Bestands an Büchern in einer Bibliothek lässt sich die Situation mit Hilfe eines SFD's folgendermaßen darstellen:

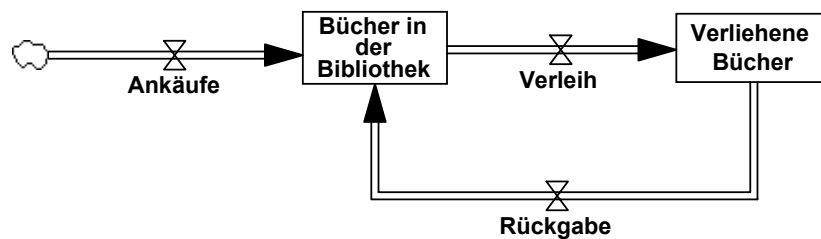


Abb. 3.7.

Der Stock an Büchern wird in diesem Fall nur durch die Flussgrößen Ankauf und Rückgabe erhöht und durch Verleih von Büchern verringert. Durch das Entleihen von Büchern bildet sich ein neuer Bestand, nämlich jener der „Verliehenen Bücher“. Sein einziger Abfluss ist jener der Rückgabe, wodurch die Bücher wieder in den ursprünglichen Bestand in der Bibliothek zurückwandern. Die Quelle der Ankäufe wird hier nicht näher modelliert, da es für dieses einfache Modell nicht von Wichtigkeit ist, woher die neuen Bücher kommen. Sämtliche andere Flussgrößen, wie z.B. Diebstahl, Abhandenkommen, Bücherspenden durch Sponsoren, etc. sind nicht ins Modell integriert, und daher de facto =0 gesetzt.<sup>19</sup> Wollte man den Bestand an Büchern in der Bibliothek realistischer simulieren, müsste man all diese Größen oder einen Teil von ihnen sehr wohl mit in die Modellierung aufnehmen. Dies ist in Abb. 3.8. realisiert. Hier sind bereits die eben erwähnten Größen in das Modell integriert. Der Schwund an Büchern beinhaltet Diebstahl und sonstiges Abhandenkommen von Büchern aus der Bibliothek. Verliehene Bücher, die verloren gehen, werden durch Ankäufe (welche natürlich der Entlehner bezahlen muss) ersetzt und wurden - da es sich ebenso um Ankäufe handelt - nicht extra im Modell simuliert.

<sup>19</sup> Dies ist nur bei additiven Zusammenhängen gültig, bei multiplikativen Zusammenhängen sind sie durch die Nicht-Aufnahme in das Modell automatisch =1 gesetzt.

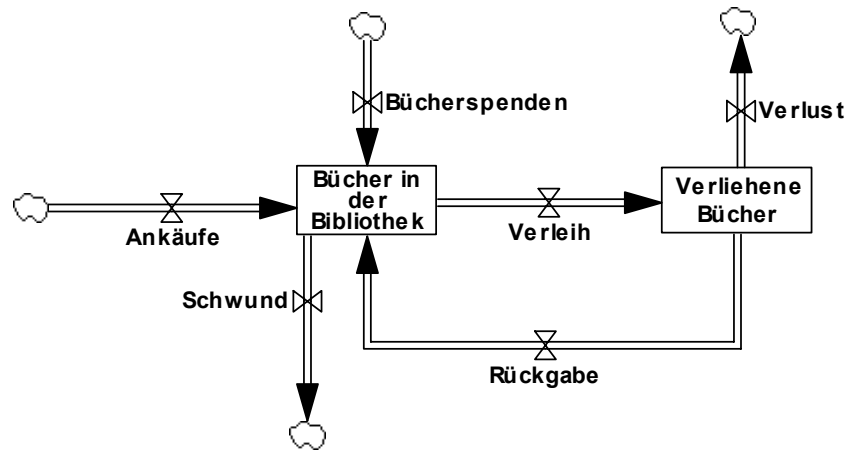


Abb. 3.8.

Diese beiden Abbildungen zeigen erneut, wie auch schon unter 3.1. kurz angesprochen, dass für ein und dieselbe Situation verschiedene Modelle möglich sind. Der Auflösungs- und Genauigkeitsgrad ist dabei unterschiedlich und hängt in erster Linie von der Sichtweise ab. Mal ist ein äußerst exaktes Modell notwendig, das alle nur erdenklichen Faktoren berücksichtigt, mal nur ein sehr grobes. Welche Variablen und Elemente es noch gilt mit einzubeziehen und welche nicht mehr, das muss der Modellierer vor allem aufgrund seiner Erfahrung entscheiden.

Die Vorteile von SFD's liegen ohne Zweifel in der Möglichkeit, (ausgehend von einem Anfangswert) quantitative Aussagen über das System treffen zu können und sein zukünftiges Verhalten und die Auswirkungen möglicher Eingriffe von außen vorherzusagen bzw. zu simulieren. Im Unterschied zu CLD's, welche nur die qualitative Struktur abbilden, wird in SFD's das System „modelliert“. Dieses Modell der Realität kann anschließend z.B. in Hinblick auf unterschiedliche Steuerungsmaßnahmen oder Eingriffe die beste Variante herausfiltern und als Entscheidungshilfe dienen. Dabei gilt jedoch stets, dass das Ergebnis nur so gut wie das Modell ist – ein schlechtes oder ungenaues Modell wird wenig brauchbare, ein realistisches, umfangreiches Modell vermutlich sehr gute Resultate liefern. In der exakten Unterscheidung zwischen Beständen und Flüssen in SFD's liegt ein weiterer Vorteil. Genügend theoretisches Wissen über diese Größen vorausgesetzt, gibt dieser Aufbau der Modelle einen großen Einblick in die vorhandenen Steuerungsmöglichkeiten eines Systems. Ein Nachteil dieser Darstellungsmethode liegt aber sicherlich in dem größeren Expertenwissen, das für eine korrekte Anwendung (Wahl des Auflösungsgrades, Konstruktion, Eingabe in Modellersoftware, Berechnungen, etc.) nötig ist. Während Wirkungsdiagramme sehr leicht nach einer kurzen Einführung auch durch Laien verwendbar sind, stellen SFD's einen höheren Anforderungsgrad. Zusätzlich ist auch die Anschaulichkeit für Nicht-Experten in vielen Fällen weitaus geringer.

CLD's lassen sich hingegen schneller, einfacher und dadurch auch kostensparender anwenden. FORRESTER (1994) sieht in CLD's jedoch die Gefahr einer Irreleitung von Nicht-Experten, wenn sie mittels CLD's Systemzusammenhänge versuchen selbst zu verstehen. Er meint, dass dies nur mittels System Dynamics und damit per SFD's möglich ist. Auch RICHMOND ist selbiger Ansicht. Anhänger eines qualitativen Ansatzes zum Systemdenken wie z.B. GOMEZ/PROBST, RICHARDSON, SENGE, OSSIMITZ, O'CONNOR/MCDERMOTT, VESTER etc. sehen hingegen in CLD's eine ausgezeichnete Möglichkeit, einen Einblick in die Systemstruktur komplexer Systeme zu erhalten. Gerade in ihrer Einfachheit liegt ihre große Stärke. Denn wie RICHMOND (1993) selbst erwähnt, denkt nach wie vor ein Großteil der Menschen in additiven Listen (z.B. antworten die meisten Menschen auf die Frage nach dem Grund des Überbevölkerungsproblems mit einer Aufzählung isolierter Gründe und sehen nicht dass die meisten Ursachen eng miteinander verbunden sind und einander bedingen). CLD's können bereits an diesem Punkt ansetzen und die Denkansätze mehr in die Richtung eines vernetzten, systemischen Denkens lenken. Vermutlich ist das auch einer der Gründe, weshalb ein gewisser Trend hin zur Verwendung von CLD's beobachtbar ist und sie bei immer mehr Autoren Verwendung finden.

Trotz dieser vielfältigen Vorteile von CLD's sind für die weiteren Kapitel dieser Ausarbeitung SFD's, vor allem durch ihre exakte Unterscheidung zwischen Stocks und Flows, besser geeignet. Aus diesem Grund werde ich in der Folge für die Abbildung beschriebener Sachverhalte und Systeme in erster Linie die Darstellungsvariante der SFD's benutzen.

## 4. Stocks und Flows – der Abriss einer Theorie

Bestandsgrößen (Zustandsgrößen, engl.: Stocks, Level oder Stock Variables) und Flussgrößen (Veränderungsgrößen, engl.: Flows, Rates oder Flow Variables) zählen gemeinsam mit Rückkoppelungen, Nichtlinearitäten, Zeitverzögerungen und Dynamik zu den Grundbausteinen komplexer Situationen und Systeme. Bestandsgrößen sind dabei nichts anderes als Akkumulationen, Flussgrößen deren Veränderung pro Zeiteinheit. Beide sind uns allen aus dem alltäglichen Leben sehr vertraut. So ist etwa unser aktueller Kontostand eine Bestandsgröße, welche sich nur über Zu- und Abflüsse (Flussgrößen) verändert. Auch die Menge an Artikeln in einem Lager ist eine Bestandsgröße, oder aber die Anzahl an Milchpackungen in unserem Kühlschrank und auch die Menge an Treibstoff im Autotank. Sie alle können sich wie der Kontostand nur über Zu- und Abflüsse, also Flussgrößen, verändern. Im Normalfall können wir auch sehr gut mit diesen Beständen und den dazugehörigen Flüssen umgehen, und wenn uns einmal die Milch oder der Treibstoff, ausgeht ist das ohne Zweifel eher auf eine Unaufmerksamkeit, denn auf ein Unverständnis des Sachverhaltes zurückzuführen. Obwohl wir demnach mit diesen Typen von Größen sehr vertraut scheinen, haben wir in manchen Situationen bereits Probleme zwischen ihnen zu unterscheiden: Ist die CO<sub>2</sub> – Konzentration in der Atmosphäre eine Bestands- oder eine Flussgröße? Und wie sieht es mit dem staatlichen Budgetdefizit aus? Selbst Experten haben bei der Beantwortung dieser Fragen oft Probleme. Sie sind sich des dramatischen und dennoch einfachen Unterschiedes zwischen diesen beiden Größen nicht bewusst und treffen dadurch Entscheidungen, welche negative und verheerende Folgen haben können (vgl. DÖRNER 1999, HOMER 1993, MOXNES 1998/2000, STERMAN/BOOTH-SWEENEY 2002, etc.). Auch in der SD unterscheidet man analog zwischen Bestands- und Flussgrößen. Sie bilden das Grundgerüst systemdynamischer Modellierung und Simulation. Denn will man ein System mit Hilfe einer Modelliersoftware wie z.B. Vensim<sup>20</sup> oder Powersim<sup>21</sup> simulieren, ist man gezwungen, genau zwischen diesen beiden Arten von Größen zu unterscheiden.

An dieser Stelle soll versucht werden, das bestehende Wissen über Stocks und Flows darzustellen und in die Tiefe zu erweitern. Mehrere Autoren haben sich mit Stocks und Flows, meist im Rahmen empirischer Untersuchungen über deren Zusammenspiel, auseinander gesetzt (vgl. Kap. 6). Der theoretische Hintergrund zu diesen Größen wurde dabei jedoch, wenn überhaupt, nur am Rande behandelt. Es soll daher der Versuch unternommen werden, diesen theoretischen Hintergrund aufzuarbeiten und vielleicht auf diesem Wege die inzwischen schon zahlreich beobachteten falschen Auffassungen von Bestands- und Flussgrößen zu bekämpfen. Zu diesem Zweck ist es sinnvoll, zuerst einen

---

<sup>20</sup> Vensim®, Ventana Systems, Inc.; [www.vensim.com](http://www.vensim.com)

<sup>21</sup> Powersim®, Powersim Software AS; [www.powersim.com](http://www.powersim.com)

kurzen Blick auf unterschiedliche Wissenschaftsdisziplinen zu werfen, um die Bandbreite des Stock-Flow Konzeptes aufzuzeigen und anschließend die schon bestehende Literatur zum Thema zu beleuchten, ehe man sich genauer mit einer Theorie über Bestands- und Flussgrößen auseinander setzen kann.

#### **4.1. Das Konzept von Beständen und Flüssen in unterschiedlichen Disziplinen**

Stocks und Flows sind in äußerst vielen Sparten und wissenschaftlichen Disziplinen ein alltäglicher Bestandteil, wenngleich auch nicht immer auf den ersten Blick. In der Mathematik und der Systemdynamik spricht man von Integralen und Zustandsvariablen als Bestände sowie der (ersten) Ableitung als Flussgröße. Die deskriptive (beschreibende) Statistik unterscheidet sehr genau zwischen so genannten Bewegungs- und Bestandsmassen (vgl. z.B. WAGENFÜHR 1974), welche eine große Ähnlichkeit mit Stocks und Flows aufweisen - Bewegungsmassen sind absolute Veränderungen von Beständen in bestimmten Zeitintervallen, Bestandsmassen zeitpunktbezogene Größen. In der Ökonomie spricht man von Staatsschulden, Arbeitslosenraten und Bevölkerungsständen als Bestandsgrößen, während Exporte, Importe, Geburten und Sterbefälle Flussgrößen sind. Betriebswirtschaftlich sind Lagerbestände Bestandsgrößen und Einkäufe und Verkäufe Flussgrößen. Ebenfalls betriebswirtschaftlich ermittelt eine Firmenbilanz den Jahreserfolg eines Unternehmens durch Gegenüberstellung von Vermögen und Schulden (Bestandsgrößen), die Gewinn- und Verlustrechnung ermittelt selbiges durch Gegenüberstellung der Erlöse und Aufwendungen des Jahres (Flussgrößen). In der Medizin spricht man bei Blutfettgehalt, Zuckergehalt, Anzahl an Leukozyten etc. von Beständen, deren Zufuhr, Abbau und Umwandlung sind logischerweise hingegen Flussgrößen.

Diese Liste ließe sich beinahe endlos fortsetzen und man sieht, dass man eigentlich permanent mit Stocks und Flows unterschiedlicher Art und unterschiedlichen Erscheinungsbildes konfrontiert ist. Umso nachdenklicher stimmt daher die schon erwähnte Unfähigkeit vieler Personen, zwischen diesen beiden Größen in einer konkreten Situation zu unterscheiden bzw. sie adäquat zu beurteilen.

#### **4.2. Stocks und Flows bei unterschiedlichen Autoren**

Wie oben angesprochen, findet sich in der Literatur nur sehr wenig zum theoretischen Hintergrund von Stocks und Flows. Meist wird das Konzept dieser Größen (falls überhaupt) nur äußerst kurz gestreift, um dann ausführlich von einer empirischen Studie zum Thema zu berichten (vgl. BOOTH-SWEENEY/STERMAN 2000, ZAHN/KAPMEIER 2001, OSSIMITZ 2001a, KAINZ/OSSIMITZ 2002, STERMAN/BOOTH-SWEENEY 2002, FISHER 2003, HEINBOKEL/POTASH 2003, KUBANEK 2003, LYNEIS/LYNEIS 2003, QUADEN/TICOTSKY 2003, ZARAZA 2003, KAPMEIER

2004, ARMENIA/ONORI/BERTINI 2004). Dennoch soll an dieser Stelle versucht werden aufzuzeigen, welche Aussagen in der Literatur zum Thema auffindbar sind.

Das Konzept der Stocks und Flows wurde erstmals von Jay W. FORRESTER in seinem Buch „Industrial Dynamics“ (FORRESTER 1961) erwähnt. In diesem Werk beschäftigt sich FORRESTER ausgiebig mit der SD-Modelliermethode, entwickelt die Flussdiagramm-Darstellungsmethode (Stock-Flow-Diagramme) und beschäftigt sich auch an mehreren Stellen mit dem Thema Stocks (welche er meist „Levels“ nennt) und Flows. Er schreibt:

„The levels are the accumulations within the system. They are inventories, goods in transit, bank balances, factory space, and number of employees. Levels are the present values of those variables that have resulted from the accumulated difference between inflows and outflows. [...] Levels exist in the information network as well as in the physical network of material, etc. “Awareness levels” exist in the mental attitudes that influence decisions. Levels of satisfaction, of optimism, and of recollection of a past disastrous depression, all influence economic behavior.” FORRESTER 1961, S. 68;

Damit gibt FORRESTER nicht nur eine genauere Beschreibung seines Verständnisses von Beständen ab, sondern erweitert auch gleichzeitig das Bestandskonzept auf nicht-materielle Einheiten – eine Tatsache, die bei vielen späteren Autoren zu Unrecht keine Beachtung findet. Zum Thema Flussgrößen („rates“) schreibt der Autor:

“Rates define the present, instantaneous flows between the levels in the system. The rates correspond to activity, while the levels measure the resulting state to which the system has been brought by the activity.” FORRESTER 1961, S. 69;

BREIEROVA (1996) geht ebenso mit dem systemdynamischen Modellieransatz an das Verhältnis zwischen Stocks und Flows heran und stellt fest:

„[...]stocks represent real-world accumulations and [...] flows represent changes over time in the stocks.” BREIEROVA 1996, S. 3;

AGATSTEIN/BREIEROVA (1996b) schenken im Rahmen einer Einführung zum graphischen Integrieren dem Nettofluss besondere Beachtung, definieren diesen mathematisch und erfinden jene Aufgabenstellungen, welche Jahre später in den Untersuchungen von BOOTH-SWEENEY/STERMAN (2000) und beinahe allen darauf basierenden Folgeuntersuchungen Verwendung finden. Sie sensibilisieren auch aufbauend auf den Erkenntnissen von OH (1995) und AGATSTEIN/BREIEROVA (1996a) den Sachverhalt, dass ein Bestand nur dann steigt, wenn der Nettofluss positiv ist und nur dann sinkt, wenn dieser negativ ist (vgl. AGATSTEIN/BREIEROVA 1996b, S. 21f).<sup>22</sup>

---

<sup>22</sup> Das darf jedoch nicht so verstanden werden, dass sich bei einem Nettofluss von Null im betreffenden Bestand nichts verändert. Bereits an dieser Stelle sei der strukturelle Unterschied zwischen Zu- und Abflüssen kurz vermerkt. Sind Zu- und Abflüsse exakt gleich groß, d.h. der Nettofluss ist gleich Null, führt das in Bestandsgrößen zwar zu keiner sichtbaren Änderung, dennoch in sehr vielen zu einer internen strukturellen Änderung. (Sind bspw. in einer Bevölkerung Geburten und Sterbefälle exakt gleich groß, bleibt sie zwar auf demselben absoluten Niveau, dennoch ändert sich die interne Zusammensetzung der Bevölkerung sehr wohl.)

LAUGHTON (1996) setzt diese Arbeit fort und beschäftigt sich mit dem umgekehrten graphischen Integrieren, d.h. vom Verhalten des Stocks auf das Verhalten der Flussgrößen zu schließen. Eine nähere Definition zu Beständen und Flüssen ist leider jedoch nicht eruierbar. ZHU/RATHA (1997) beschäftigen sich ebenfalls mit dem graphischen Integrieren und führen aus, welche Arten von Flüssen welche Auswirkung auf einen Bestand haben:

„[...] positive flows (inflows to a stock) increase the value of the stock, while negative flows (outflows from a stock) decrease the value of the stock. The slope of the flow graph determines how rapidly the value of the stock changes. Thus, flows that are increasing in magnitude and flows that are decreasing in magnitude affect stocks in different ways.“ ZHU/RATHA 1997, S. 5;

Auf diese unterschiedlichen Auswirkungen gehen sie in der Folge genauer ein und liefern damit einen interessanten Beitrag zur Ausformulierung eines theoretischen Hintergrundes über das Stock-Flow-Konzept.

MARTIN (1997a) führt in die Grundlagen des systemdynamischen Modellierens mit der Software STELLA<sup>23</sup> ein und ist dabei ebenfalls gezwungen, auf die Unterscheidung zwischen Stocks und Flows einzugehen. Er hält sich bei seiner Unterscheidung eng an die Erkenntnisse von FORRESTER (1961), unter dessen Leitung er auch diesen Artikel geschrieben hat:

„Stocks are accumulations. Stocks hold the current state of the system: what you would see if you were to take a snapshot of the system. [...] Stocks fully describe the condition of the system at any point of time. [...] Flows do the changing.“ MARTIN 1997a, S. 5;

John D. STERMAN widmet in seinem umfassenden Werk „Business Dynamics. Systems Thinking and Modelling for a Complex World“ (STERMAN 2000) zwar zwei volle Kapitel (6 und 7) dem Konzept von Stocks und Flows indem er eine Vielzahl von Beispielen beschreibt, die Eigenschaften von Beständen umreißt und das Konzept zum Zwecke der systemdynamischen Modellierung mit Hilfe von Flussdiagrammen in einer entsprechenden Software aufarbeitet. Dennoch findet sich auch bei ihm keine nähere Definition (abgesehen von einer mathematischen) von Stocks und Flows, sondern eher allgemeine Formulierungen:

„Stocks are quantities of material or other accumulations. They are the states of the system. The flows are the rates at which these system states change.“ STERMAN 2000, S. 198;

Der Autor liefert auch eine umfangreiche Sammlung an Beispielen und versucht stets den Konnex zum systemdynamischen Modellieren aufzuzeigen, vermeidet es aber genauer zu definieren, was er unter Bestands- und Flussgrößen versteht und beschränkt sich auf die Wiederholung von bekannten Aussagen. Diese stimmen zwar im Prinzip durchaus mit dem überein, was auch ich auf den folgenden Seiten erörtern werde, jedoch umfassen sie bei weitem nicht sämtliche zu berücksichtigenden Aspekte.

---

<sup>23</sup> Stella®, ISEESYSTEMS; [www.iseesystems.com](http://www.iseesystems.com)

OSSIMITZ (2001b) zitiert die in der deskriptiven Statistik bekannten Bewegungs- und Bestandsmassen und erkennt ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal zwischen Stocks und Flows:

„Bewegungsmassen (Bewegungsgrößen) sind absolute Veränderungen von Beständen in bestimmten Zeitintervallen, während Bestände selbst zeitpunktbezogen ermittelt werden.“ OSSIMITZ 2001b, S. 1;

Eine erste Definition, wenn auch nicht von Flussgrößen sondern ausschließlich von Bestandsgrößen, liefert derselbe Autor in einem anderen Paper (OSSIMITZ 2001c):

„Eine Bestandsgröße ist eine Größe, die, ausgehend von einem bestimmten Wert, im Laufe der Zeit ausschließlich durch Zuflüsse vergrößert und durch Abflüsse verringert wird.“ OSSIMITZ 2001c, S. 1;

Das Besondere an dieser Aussage ist vor allem, dass es sich - die Pionierarbeit FORRESTER'S (1961) vielleicht ausgenommen - um eine der ersten Definitionen überhaupt handelt, welche sich in der Literatur zum Thema findet. Ob sie auch inhaltlich aufrechterhalten werden kann, wird noch auf den weiteren Seiten dieses Kapitels zu klären sein. Gibt es auch Größen, die sich ausgehend von einem bestimmten Wert über einen Zeitraum ausschließlich durch Flussgrößen ändern und *keine* Bestandsgrößen sind bzw. gibt es Größen, die sich zusätzlich durch andere Ursachen verändern und *dennoch* Bestandsgrößen sind?

### 4.3. Identifizierung von Stocks und Flows

Bestands- und Flussgrößen sind sehr eng miteinander verknüpft – sie bedingen einander. Es ist daher nicht möglich Bestandsgrößen zu betrachten, ohne Flussgrößen mit einzubeziehen und umgekehrt. Da ein sequentieller Text jedoch nur eine aufeinanderfolgende Beschreibung ermöglicht, stellt sich die Frage, mit welcher der beiden Größen man beginnt. Ich habe mich dafür entschieden, zuerst die Eigenschaften von Bestands-, anschließend jene der Flussgrößen näher zu erläutern und aufbauend auf diesen Überlegungen eine Definition zu erarbeiten. Vor dieser genaueren Betrachtung möchte ich an dieser Stelle noch einmal kurz das alltägliche Verständnis von diesen beiden Größen ins Gedächtnis rufen. Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei Bestandsgrößen oder „Beständen“ wie wir sie einfach nennen, in erster Linie um Akkumulationen von (meist) materiellen Einheiten. Sie verändern sich durch Zu- und Abflüsse und sind uns eigentlich sehr vertraut und wohlbekannt. So ist zum Beispiel die Wassermenge, welche sich zu einem bestimmten Zeitpunkt in einer Badewanne befindet eine Bestandsgröße. Sie kann sich nur über zu- und abfließendes Wasser (Flussgrößen) verändern. Ebenfalls stellt wie bereits weiter oben angeführt ein Kontostand zum Zeitpunkt X einen gewissen Bestand dar – eine Bestandsgröße – welche sich bis zum Zeitpunkt Y nur durch Behebungen und Einzahlungen (Flussgrößen) verändert. Es steckt jedoch mehr hinter dem Konzept von Bestands- und Flussgrößen als wir im Alltagsumgang mit ihnen vermuten.

#### 4.3.1. Bestandsgrößen

Betrachten wir zuerst die Eigenschaften bzw. Eigenheiten von Bestandsgrößen, welche bereits zum Teil die oben angeführten Definitionen von Bestandsgrößen widerspiegeln:

- a. Sie sind zeitpunktbezogene Größen
- b. Sie stellen Akkumulationen von Flussgrößen dar
- c. Sie können sich (ohne ihr Wesen zu verlieren) ausschließlich durch Flussgrößen (Zu- und Abfluss) verändern
- d. Sie verändern sich über einen Zeitraum genau um den Saldo der Zu- und Abflüsse
- e. Sie besitzen mind. einen Zu- und/oder einen Abfluss (Flussgrößen)

##### Ad a. Sie sind zeitpunktbezogene Größen

Bestandsgrößen sind Größen, d.h. Zahlen mit einer bestimmten Dimension (Stück / Liter / Euro / km<sup>2</sup> etc.). Darüber hinaus sind sie zeitpunktbezogen – sie werden zu einem Zeitpunkt gemessen und beschreiben somit die Ausprägung eines bestimmten Sachverhaltes in diesem Moment. Natürlich kann man Stocks auch über einen Zeitraum beobachten, das Ergebnis ist dann eben – graphisch dargestellt – eine Kurve über die Bestandsentwicklung<sup>24</sup> bzw. ein durchschnittlicher „Bestand“. Es handelt sich hierbei wohl eher um ein semantisches Problem, denn in der Tat ist ein Bestand eine Größe, welche zu einem *Zeitpunkt* gemessen die Menge einer bestimmten Akkumulation angibt. Man könnte also die Bestandsgrößen in einem System dadurch bestimmen, dass man sich dieses System zeitlich eingefroren oder fotografiert vorstellt. Bei diesem „Schnappschusstest“ (vgl. FORRESTER 1961, MARTIN 1997a, STERMAN 2000) wären sämtliche Größen, welche man in diesem eingefrorenen Zustand messen oder zählen kann, oder welchen man einen bestimmten Wert zuordnen kann (inklusive der psychologischen Zustände, etc.), Bestandsgrößen, alle anderen Flussgrößen. Die Anzahl an Personen in einem Raum ist dann genauso ein Bestand wie die Temperatur in diesem Raum oder der Sauerstoffgehalt. Ob die Zahl an Personen, die Temperatur oder der Sauerstoffgehalt aber gerade steigt oder fällt, lässt sich selbstverständlich nicht eruieren, dazu wären die dazugehörigen Flussgrößen notwendig. Ein *durchschnittlicher, d.h. ein über einen Zeitraum gemessener und anschließend gemittelter Bestand* benötigt das Zusammenspiel über einen *Zeitraum* zwischen einem Stock und den dazugehörigen Flows. In einem Schnappschusstest kann er nirgendwo beobachtbar sein. Bedingt durch diese Zeitraumbezogenheit können durchschnittliche Bestände nicht als

---

<sup>24</sup> So erfasst bspw. ein Thermo- oder ein Hydrograph zwar die Größe des Bestandes zu einem Zeitpunkt, stellt aber durch seine ständige Fortschreibung (über einen *Zeitraum*) auch die Bestandsentwicklung dar. Auf diese Art und Weise kann die Messung einer Bestandsgröße natürlich auch über einen Zeitraum erfolgen, auch wenn eine Messung prinzipiell zu einem Zeitpunkt stattfindet.

Bestandsgröße angesehen werden.<sup>25</sup> Diese Argumentation steht allerdings im Widerspruch zu FORRESTER (1961), welcher hierbei etwas großzügiger vorgeht und über einen Zeitraum gemittelte Größen (Durchschnittsgrößen) folgendes schreibt:

„Average sales are often spoken of in business practice as a level – the level of sales or the level of business. The average sales level is obtained by integrating (summing) the moment actual sales rate over some period of time like a year; it is therefore of the same mathematical equation form that describes the other levels in the system. By the test of bringing the system to rest, we see that average sales for the last year is a level.” FORRESTER 1961, S. 68f;

FORRESTER betrachtet demnach auch durchschnittliche Bestände, wie das durchschnittliche Verkaufsniveau des letzten Jahres als Bestandsgröße. Tatsächlich kann man mathematisch für das Integral der Verkäufe über den Zeitraum des letzten Jahres auch für jeden Moment ( $\lim \rightarrow 0$ ) einen Wert bestimmen und könnte daher das angesprochene Verkaufsniveau vom Prinzip als Bestandsgröße auffassen. Streng genommen stellen meines Erachtens aus oben angeführten Gründen durchschnittliche Bestände jedoch keine Bestandsgrößen dar.

Eine Sonderrolle fällt hierbei der Geschwindigkeit zu. Sie unterscheidet sich von den eben angesprochenen durchschnittlichen Beständen grundsätzlich. Eine Geschwindigkeit als Bestandsgröße zu sehen, scheint aber dennoch auf den ersten Blick durch ihre Einheit Weg/Zeit im Widerspruch zu der Zeitpunktbezogenheit von Stocks zu stehen. Im erwähnten Schnappschusstest würde man sie wohl eher als Flussgröße auffassen, da sie kaum zu einem Zeitpunkt messbar ist. Denn dafür ist stets ein Zeitintervall notwendig. Gemeint ist hier jedoch die Momentangeschwindigkeit, d.h. jene Geschwindigkeit, zu einem unendlich kleinen Zeitintervall ( $\lim \rightarrow 0$ ). Im Unterschied zu anderen Flussgrößen ist bei der Geschwindigkeit eine derartige Annäherung durchaus angebracht. Das ist speziell deshalb der Fall, da die Beschleunigung mit ihrer Einheit Weg/Zeit<sup>2</sup>, auch unter dieser Annahme noch sinnvoll als Zu- und Abfluss der Bestandsgröße Geschwindigkeit aufgefasst werden kann. Obwohl also eine gewisse (hinreichend kleine) Zeitdauer als Messintervall unbedingt erforderlich erscheint, um die Größe der Momentangeschwindigkeit zu bestimmen, kann sie als zeitpunktbezogen und damit als Bestandsgröße verstanden werden.

---

<sup>25</sup> Zusätzlich ist der Durchschnittswert des Bestandes in Fällen diskreter und nicht stetiger Veränderung oft zu keinem Zeitpunkt vorhanden gewesen: Nehmen wir bspw. die Zahl an Gästen in einem Restaurant als Bestand – eine diskrete Größe. Die Zahl mag um 18 Uhr zehn Gäste betragen haben, um 19 Uhr 30 Gäste, um 20 Uhr waren es 40 Gäste und um 21 Uhr schließlich 22 Gäste. Das ergibt einen durchschnittlichen Bestand von 25,5 Gästen. Und obwohl wir nun von einem durchschnittlichen *Bestand* sprechen, haben sich dennoch in Wirklichkeit bestimmt zu keinem einzigen Zeitpunkt genau 25,5 Gäste im Restaurant befunden. Der Durchschnittswert und andere statistische Kenngrößen (wie z.B. die Standardabweichung) erlauben aber Rückschlüsse über die zeitliche Entwicklung einer Bestandsgröße und spielen daher eine wichtige Rolle. Sie stellen aber in der Stock-Flow-Sichtweise lediglich Hilfsgrößen und nicht Bestandsgrößen im eigentlichen Sinn dar.

### **Ad. b. Sie stellen Akkumulationen von Flussgrößen dar**

Jeder Bestand ist durch Zuflüsse über einen Zeitraum entstanden. Obwohl also Bestandsgrößen eigentlich zeitpunktbezogen sind, ist ein Zeitraum nötig, um sie zu verändern bzw. zu bilden. Ein See entsteht durch den Zufluss an Wasser und ein Baum durch Zufluss (und anschließender Umwandlung) von Nährstoffen. Eine andere Möglichkeit gibt es nicht. Selbst wenn etwas spontan materialisiert worden wäre, ist genau der Fluss an Materie während dieses Prozesses als Zufluss zu sehen. Bestände stellen also Akkumulationen von Zuflüssen (und Abflüssen) dar. Woher kommen aber diese Flussgrößen? Sehr schnell gerät man bei dieser Frage in ein Dilemma. Wie wir noch sehen werden, handelt es sich bei Flussgrößen um sinnvolle Veränderungen von Beständen und meist auch um Bewegungen von Quantitäten *von einem Bestand zu einem anderen*. Wenn sie aber von einem anderen Bestand kommen, ist es zwar richtig, dass Bestände durch Akkumulation von Flussgrößen entstehen, es ist aber falsch zu glauben, dass Flussgrößen „zuerst da waren“ und somit jeder Bestand durch Flussgrößen entstanden ist. Es ergibt sich die bekannte Henne-Ei-Problematik. Es ist nicht möglich zu sagen, welche der beiden Größen zuerst vorhanden war. Denn für einen Bestand sind Flussgrößen notwendig und für eine Flussgröße Bestände. Dennoch, so lässt sich zusammenfassen, entstehen Bestände durch Akkumulationen von Flussgrößen.

Des Öfteren kommen jedoch auch Bestandsveränderungen vor, welche nicht als Flussgrößen aufgefasst werden können (vgl. auch unten). Eine Überwachungskamera, welche durch Videoaufnahme den Bestand (die Anzahl) an Menschen in einem Raum aufzeichnet, kann durch Unterbrechung der Aufnahme einen spontanen Sprung im Bestand darstellen. Während anfangs der Bestand korrekt wiedergegeben wird und durch ein- und ausgehende Personen (Flussgrößen) verändert wird, stellt dieser Sprung keine Flussgröße dar. Der Bestand hört mit dem Ende der korrekten Aufnahme auf zu existieren und mit dem Wiedereinstieg der Aufnahme beginnt ein neuer Bestand. Dieser neue Bestand ist zwar vom Prinzip ebenfalls durch Flussgrößen entstanden (von irgendwo müssen die Menschen ja gekommen sein), für die Betrachtung hat dies aber keinerlei Relevanz. Er muss daher ab diesem Zeitpunkt als neuer Anfangsbestand betrachtet werden. Ähnliches ist auch in vielen Systemmodellen der Fall. Wann immer es keine Relevanz besitzt, durch welche Flussgrößen oder Prozesse ein Bestand entstanden ist, wird eine Ausgangssituation, d.h. ein Anfangsbestand als Beginn der Simulation herangezogen.

### **Ad c. Sie können sich (ohne ihr Wesen zu verlieren) ausschließlich durch Flussgrößen (Zu- und Abfluss) verändern**

Bestandsgrößen können sich verändern bzw. genauer: sie werden verändert. Die korrespondierenden Flussgrößen wirken auf den Bestand. Ist die Summe aller Zuflüsse

größer als die Summe sämtlicher Abflüsse, wächst der Bestand. Ist das umgekehrte der Fall, wird der Bestand notwendigerweise sinken. Sind Zuflüsse und Abflüsse in jedem Moment exakt gleich groß, bleibt der Bestand auf seinem Niveau, wobei es allerdings einen Unterschied macht, ob die Flussgrößen sich auf einem Level von 0 (der Bestand bleibt vollkommen derselbe) oder darüber befinden (der Bestand bleibt zwar gesamt gesehen gleich groß, es findet aber dennoch eine Veränderung statt).<sup>26</sup>

Der entscheidende Punkt bei diesem Kennmerkmal von Beständen ist bereits im ersten Satz des vorigen Absatzes enthalten: „...sie werden verändert.“ Dies hat weitreichende Implikationen. Es ist nämlich absolut unmöglich, einen Bestand direkt zu beeinflussen. Jegliche absichtliche Beeinflussung eines Bestandes kann ausschließlich über die Regulierung der dazugehörigen Zuflüsse und Abflüsse geschehen. Keine Bestandsgröße kann direkt gesteuert werden, denn jede Steuerung erfolgt über Flussgrößen.

Dessen sind sich nicht nur der Durchschnittsmensch im Alltag, sondern auch politische Entscheidungsträger und Personen, deren berufliche Aufgabe es ist, einen Bestand zu managen, häufig nicht bewusst. Der Unterschied besteht jedoch darin, dass es für den Alltag in den meisten Situationen nicht notwendig ist, das aufmerksam und aktiv zu beachten, da wir ganz automatisch Bestände über Flüsse regulieren. Politiker und sonstige Entscheidungsträger haben es heute hingegen zunehmend mit äußerst komplexen und meist hoch dynamischen Situationen zu tun. Sie müssen den Bestand an Arbeitsplätzen in einem Land, den Bestand an Kraftfahrzeugen, den relativen Bestand der arbeitsfähigen Bevölkerung zur Gesamtbevölkerung, den Bestand an Ausbildungsplätzen u.v.a.m. managen und je nach politischer Einstellung und Situation in eine bestimmte Richtung lenken. All diese Bestandsgrößen lassen sich aber keinesfalls direkt und auch nur sehr selten unabhängig von anderen Stocks verändern. Wir leben in dieser Hinsicht in einem äußerst dichten Wirkungsgefüge, in dem jede Handlung auch Neben- und Fernwirkungen aufweist. Es ist nicht möglich, die Zahl an Arbeitsplätzen zu erhöhen, ohne dass sich dies (in welcher Form auch immer) auf Steuereinnahmen und somit das Budgetdefizit, auf die Attraktivität des Wirtschaftsstandortes, auf die Umwelt, auf die verkehrstechnische Anbindung und den öffentlichen Verkehr, auf das soziale Gefüge, auf mögliche Konkurrenzbetriebe und somit auch wieder auf die Zahl der Arbeitsplätze (eventuell Restrukturierung in den Betrieben durch die neue Konkurrenz), etc. auswirkt.

Die Aufgabe der Entscheidungsträger ist es deshalb, jene Flussgrößen zu eruieren, welche tatsächlich auch bei Veränderung den gewünschten Effekt bewirken. Kein Bestand lässt sich direkt verändern und dennoch ist in Wahlversprechen stets die Rede davon, dass man die

---

<sup>26</sup> Z.B. Bestand an Patienten in einem Krankenhaus: Werden an einem Tag weder neue Patienten aufgenommen noch bestehende entlassen, bleibt der Bestand gleich groß und auch derselbe. Wird aber an einem Tag eine bestimmte Anzahl neu aufgenommen und werden gleich viele entlassen, dann bleibt zwar die Größe gesamt ebenfalls gleich, der Bestand ist jetzt aber anders strukturiert – er hat sich verändert.

Zahl der Arbeitsplätze erhöhen will oder für ausreichend Lehrstellen sorgen will. Es ist verständlich, dass in diesen Fällen nur der Bestand an Arbeitsplätzen oder Lehrstellen für die Bevölkerung von Interesse ist und nicht so sehr wie stark oder schwach dieser Bestand wächst, dennoch verraten derartige Aussagen, dass viele Menschen fälschlicherweise „in Beständen denken“. Richtigerweise sollte man in solchen Fällen die Flussgrößen, durch welche man hofft die Zahl der Arbeitsplätze zu erhöhen, wie etwa geringere Unternehmensbesteuerung, Förderungen, etc. beim Namen nennen.

#### **Ad. d. Sie verändern sich über einen Zeitraum genau um den Saldo der Zu- und Abflüsse**

Bestandsgrößen verändern sich wie eben beschrieben ausschließlich über die dazugehörigen Zu- und Abflüsse. Die Veränderung des Stocks entspricht dabei stets exakt dem Nettofluss, d.h. wenn man die Zuflüsse und Abflüsse in einem Zeitraum gegeneinander aufsummiert (saldiert) erhält man einen positiven oder negativen Nettofluss. Ein positiver Nettofluss bewirkt eine Erhöhung des Bestandes, ein negativer verständlicherweise eine Senkung. Die Größe der Erhöhung/Senkung muss erzwingenermaßen exakt gleich dem Nettofluss sein. Tut sie das in einem Modell nicht, gibt es nur eine mögliche Erklärung – ein Zu- oder Abfluss wurde nicht oder nicht exakt in das Modell aufgenommen. Dieser Sachverhalt lässt sich auch mathematisch darstellen. Die Größe des Bestandes zum Zeitpunkt  $t_1$  entspricht der Summe aus dem Bestand zum Zeitpunkt  $t_0$  und dem Integral der Flussgrößen über den Zeitraum  $t_0$  bis  $t_1$ :

$$\text{Bestand } (t_1) = \text{Bestand } (t_0) + \int_{t_0}^{t_1} [\text{Zuflüsse} - \text{Abflüsse}] dt$$

Dass sich ein Bestand nur um den Nettofluss seiner Flussgrößen ändert, mag für den Leser in dieser aufgearbeiteten Form klar und selbsterklärend wirken. In der Realität jedoch hat, wie u.a. STERMAN/BOOTH-SWEENEY (2002) eindrucksvoll zeigen konnten, ein Großteil der Menschen Schwierigkeiten mit diesem Sachverhalt. Genauer gesagt wird dieser Zusammenhang oftmals schlichtweg nicht berücksichtigt. Die Probanden der Untersuchung von STERMAN/BOOTH-SWEENEY (ausführliche Beschreibung der Untersuchung siehe Kap. 6.5.) verwechselten den *Zufluss* zum atmosphärischen CO<sub>2</sub> - Bestand mit dem *Nettofluss*. Sie dachten durchwegs, dass bei einem stark wachsenden Bestand (d.h. stark positiver Nettofluss – hoher Zufluss und vergleichsweise geringer Abfluss) bereits eine geringfügige Senkung oder gar ein Konstanthalten des Zuflusses auch eine Senkung/Konstanthaltung des Bestandes (im konkreten Fall des CO<sub>2</sub> – Bestandes) bedeuten müsse. In der Tat blieben aber der Nettofluss dennoch weiterhin stark positiv und das starke Wachstum bestehen. Die Testpersonen ignorierten diesen Zusammenhang jedoch bzw. erkannten ihn nicht.

#### Ad. e. Sie besitzen mind. einen Zu- und/oder einen Abfluss (Flussgrößen)

Es stellt sich die Frage, wie viele Zu- und Abflüsse ein Stock aufweisen muss, damit man ihn als solchen bezeichnen kann. Meiner Auffassung nach ist dazu mindestens ein Zufluss und/oder ein Abfluss notwendig. Dass es sich bei einem Bestand mit jeweils einem oder mehreren Zu- und Abflüssen um eine Bestandsgröße handelt, dürfte an dieser Stelle durch die oben angeführten Erläuterungen außer Diskussion stehen. Wir haben zwar bis zu diesem Moment in erster Linie Bestände mit je einem Inflow und Outflow betrachtet, Bestände können aber natürlich (wie in Realität meist der Fall) eine Vielzahl von Zu- und Abflüssen aufweisen. So zu sind bspw. betreffend den Wasserbestand eines Sees, die Zufuhr von Wasser aus Bächen, Regen und Kondensation allesamt Zuflüsse, während Verdunstung, Abfließen, Versickern von Wasser sowie künstliche Entnahme die dazugehörigen Abflüsse darstellen. Es ist aus diesem Grund interessant zu betrachten, ob auch Bestände mit nur *einem* Zufluss oder nur *einem* Abfluss die typischen Eigenschaften von Bestandsgrößen aufweisen: Ein Beispiel für Ersteres ist etwa ein Kilometerzähler in einem Auto. Er zeigt stets den aktuellen Kilometerstand an und erhöht sich durch gefahrene Kilometer, was seinen Zufluss darstellt. Einen Abfluss besitzt er nicht. Selbst wenn ein Auto rückwärts fährt, zählt der Kilometerzähler nicht zurück, vielmehr sind Autos generell derartig gebaut, dass Kilometerzähler dabei überhaupt nicht (oder eventuell sogar nach vorne) zählen. Auch etwaige Manipulationen am Kilometerstand können nicht als Abfluss gewertet werden, denn sie rauben ihm ein wesentliches Merkmal eines Bestandes, sodass er im Moment der Manipulation aufhört ein Bestand zu sein bzw. ab diesem Zeitpunkt ein neuer Bestand beginnt (vgl. b.).

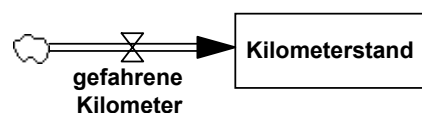


Abb. 4.1.

Die Frage ist nun, ob es sich bei einem Kilometerzähler bzw. bei dem dargestellten Kilometerstand um eine Bestandsgröße handelt. Wenn wir uns die bisher angeführten Kriterien und Kennmerkmale von Stocks vor Augen führen, ist diese Frage mit einem klaren Ja zu beantworten. Der Kilometerstand ist eine zeitpunktbezogene Größe, er stellt die Akkumulation eines Zuflusses dar (der gefahrenen Kilometer), er verändert sich ausschließlich durch Flussgrößen und seine Veränderung über einen Zeitraum entspricht genau dem Nettofluss seiner Flussgrößen (wobei der Abfluss wie erwähnt stets 0 ist und daher Nettofluss = Zufluss gilt). Auch Größen mit nur einem Zufluss und ohne Abfluss können also prinzipiell Bestandsgrößen darstellen und so bezeichnet werden.

Der Zerfall von radioaktivem Material (vgl. Abb. 4.2.) ist ein Exempel für einen Bestand *ohne* Zufluss und mit nur *einem* Abfluss - nämlich dem Zerfall des Materials, abhängig von der Zerfallsrate.<sup>27</sup> Auch in diesem Fall sind alle bisher angeführten Eigenheiten von Bestandsgrößen (Zeitpunktbezogenheit, etc.) erkennbar, man darf also meiner Interpretation nach auch hier von einer Bestandsgröße sprechen.

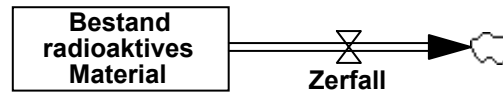


Abb. 4.2.

Besitzt eine Größe auf lange Sicht weder einen erkennbaren Zufluss noch einen Abfluss, geht ein entscheidendes Attribut von Bestandsgrößen verloren und damit auch die zeitliche Entwicklung dieser Größe. In diesem Sinn sollte weder ein Tisch, ein Stein noch ein Stück Glas als Bestandsgröße aufgefasst werden. Es ist zwar argumentierbar, dass auch ein Stein oder ein Tisch einem Zerfallsprozess unterliegt und es sich daher um einen Bestand mit einem Abfluss handelt, objektiv betrachtet ist jedoch dieser Zerfallsprozess – sofern überhaupt vorhanden – nahe 0. So lange es also für eine Betrachtung nicht von entscheidender Bedeutung ist den Tisch in seiner zeitlichen Verfallsentwicklung zu beobachten, sollte er keinesfalls als Bestandsgröße angesehen werden. Dasselbe gilt für das Stück Glas oder für den Stein.

Bestandsgrößen benötigen daher auf lange Sicht mindestens einen Zufluss oder einen Abfluss, um als solche zu gelten.<sup>28</sup>

STERMAN (2000) hingegen geht einen Schritt weiter und sieht auch in Dingen ohne Zu- und Abfluss wie z.B. Produktpreisen einen Bestand. Er argumentiert:

„Why is the price of a product a stock? Prizes characterize the state of the system, in this case how much you must pay per unit. A price posted on an item remains in effect until it is changed, just as the number of widgets in an inventory remains constant until it is changed by a flow of production or shipments.“ STERMAN 2000, S. 199;

Diese Argumentation STERMANS kann ich nur bedingt unterstützen. Willkürlich festgelegte Preise, wie hier geschildert, haben mit Stocks im eigentlichen Sinn wenig gemeinsam. Sie charakterisieren zwar den Zustand des Systems tatsächlich in einer Art und Weise, so lange der Preis jedoch nicht über Angebot und Nachfrage bestimmt ist und dadurch eine

<sup>27</sup> Selbstverständlich ist auch dieser Bestand an radioaktivem Material irgendwann durch einen Zufluss entstanden, da dies jedoch für die vorliegende Betrachtung irrelevant ist, kann man einen Anfangswert des Bestandes ohne Zufluss als Ausgangspunkt der Betrachtung annehmen.

<sup>28</sup> Über einen gewissen Zeitraum ist es aber durchaus möglich, dass ein Bestand keine Flussgrößen besitzt und somit einen konstanten Wert aufweist. Ein Konto bleibt ein Konto auch wenn keine Einzahlungen oder Behebungen stattfinden. Genauso bleibt ein Lager eine Bestandsgröße, auch wenn über einen bestimmten Zeitraum keine Produkte geliefert oder verkauft werden. Das Entscheidende ist, dass mindestens ein Zu- und/oder Abfluss *möglich* und früher oder später auch vorhanden ist.

Veränderung einer dieser Größen auch eine Veränderung des Preises bewirkt, sollte man wohl eher nicht von einer Bestandsgröße sprechen. Die eigenmächtige Veränderung des Preises als Flussgröße zu sehen wie es z.B. die Produktion oder der Verkauf von Lagereinheiten ist und dadurch den willkürlichen Preis als Bestand zu betrachten, wäre meiner Meinung nach so, als ob man ein Objekt wie einen Stein deshalb als Bestandsgröße sieht, weil man ihm von Zeit zu Zeit einen anderen Namen gibt. Selbst bei marktmäßig bestimmten Preisen ist es zweifelhaft, ob sie eine Bestandsgröße darstellen. Angebot und Nachfrage könnten zwar als Flussgrößen aufgefasst werden, die korrespondierende Bestandsgröße wäre dann aber wohl eher die kumulierte Nachfrage, welche sich u.a. durch das Preisniveau verändert. Ein Preis kann daher keine Bestandsgröße sein.

Auch ein anderer Grund spricht gegen die Argumentation STERMANS: Angenommen, der von ihm geschilderte Preis wäre tatsächlich ein Bestand – ist er es auch dann noch, wenn er wie die oben erwähnte Videoaufzeichnung beliebig verändert werden kann? Nehmen wir als Beispiel vielleicht besser ein Bankkonto. Ein Bankkonto ist eine Bestandsgröße. Ihre Flussgrößen sind Einzahlungen, Auszahlungen sowie Soll- und Habens-Zinsen. Wenn ich nun den Kontostand wie STERMANS Preis einfach durchstreichen kann und einen neuen hinschreibe, ohne dass ich die Differenz auf ein anderes Konto verbuche oder sonst irgendwie behebe, handelt es sich bei diesem Bankkonto tatsächlich noch um eine Bestandsgröße? Vermutlich nicht, denn das Wesen des Kontos wird grundlegend verändert, es verliert seine Grundfunktion und kann daher auch nicht mehr als Konto und damit auch nicht mehr als Bestandsgröße bezeichnet werden. Selbst wenn STERMANS Preis demnach eine Bestandsgröße wäre, dürfte eine absolut beliebige Veränderung nicht möglich sein, damit sein Wesen als Bestandsgröße aufrecht bleiben kann.

Ich bin mir dessen bewusst, dass die Argumentation bei relativ abstrakten Begriffen wie Preisen manches Mal schwierig ist und unterschiedliche Interpretationen möglich sind. Dennoch hoffe ich, dass die Argumentation klar und nachvollziehbar bleibt. Noch etwas heikler kann die Definition von Stocks und Flows bei immateriellen Begriffen und Dingen werden, denn bisher wurde außer am Beginn dieses Kapitels noch nicht klar darauf verwiesen, dass es sich bei Bestandsgrößen nicht unbedingt um materielle Akkumulationen handeln muss. Auch das Wissen oder die Erinnerung eines Menschen ist genauso ein Stock, wie sein psychologischer Zustand oder sein mentales Modell einer Situation. Sie alle verändern sich durch Flussgrößen (neue Information, Eindrücke, Vergessen, Verdrängen, etc.), stellen durchwegs Akkumulationen dieser Flussgrößen dar und besitzen auch alle weiteren für Stocks typische Eigenschaften. Bestandsgrößen können also auch immateriellen oder gar abstrakten Charakter besitzen.

#### **4.3.1.1. Die Bedeutung von Bestandsgrößen für Systeme**

(vgl. MASS 1980, STERMAN 2000)

- a) Sie repräsentieren den momentanen Zustand eines Systems und sind (teilweise) Grundlage für Entscheidungen.
- b) Sie geben einem System Trägheit, Geschichte und Erinnerungsvermögen.
- c) Sie sind eine Quelle für Verzögerungen.
- d) Sie ermöglichen und dämpfen dynamische Ungleichgewichte.

##### **Ad a. Sie repräsentieren den momentanen Zustand eines Systems und sind (teilweise) Grundlage für Entscheidungen**

Die Zahl der Einwohner einer Stadt, die Zahl der Jugendlichen, der Gefängnisinsassen, der Kleinkinder, der Arbeitslosen, der Groß- und Mittelbetriebe, u.v.a.m. sind allesamt Bestandsgrößen, welche den gegenwärtigen Zustand einer Stadt beschreiben. Sie sind für die Stadtplaner und –politiker die Grundlage für Entscheidungen über Eingriffe in dieses System. Allerdings spielen natürlich auch die jeweiligen Flussgrößen eine ganz entscheidende Rolle. Denn es macht einen großen Unterschied, wenn man heute in einer Stadt 10.000 Arbeitslose hat, es im Vormonat aber nur 7.000 und noch einen Monat davor nur 3.000 waren, oder aber es in den Vormonaten 20.000 bzw. 40.000 waren. Mit anderen Worten: Der Entwicklungstrend und somit die Flussgrößen spielen als Grundlage für Entscheidungen ebenfalls eine absolut fundamentale Rolle.

##### **Ad b. Sie geben einem System Trägheit, Geschichte und Erinnerungsvermögen**

Ereignisse der Vergangenheit werden in Beständen akkumuliert. Dadurch erhält das System eine Geschichte, Trägheit und Erinnerungsvermögen. Der Bestand an Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKWs) in der Atmosphäre, welche bekanntlich für die Zerstörung der Ozonschicht verantwortlich sind, wird für Jahrzehnte hoch bleiben, auch wenn der Ausstoß an FCKWs irgendwann auf absolut Null gesenkt wird, da der natürliche Abbau nur sehr langsam erfolgt. Die Emissionen der Vergangenheit sind dadurch noch lange Zeit sichtbar, das System ist träge und erhält eine Geschichte.

##### **Ad c. Sie sind eine Quelle für Verzögerungen**

Eine zeitliche Verzögerung ist ein Prozess, in welchem der Output gegenüber dem Input um eine gewisse Zeit verschoben bzw. verzögert ist. Während dieser Zeit muss der Input aber irgendwo zwischengelagert werden, dies geschieht in einem Bestand. Bestände und Verzögerungen sind dadurch untrennbar miteinander verbunden. Wenn man etwa einen Brief per Post verschickt, wird zwischen Abschicken und Ankommen des Briefs eine Verzögerung auftreten, da ein Transport in Nullzeit nicht möglich ist. In dieser Zeit wird der

Brief irgendwo zwischengelagert und kann an dieser Stelle als Bestand aufgefasst werden. Analog dazu wird auch bei einem Wasserschlauch zwischen Aufdrehen des Wasserhahns und dem Austreten des Wassers ein neuer Bestand an Wasser gebildet, nämlich der Wasserbestand im Schlauch. Dieser Bestand wird in der Folge auch Änderungen des Inputs „auffangen“ und zwischenlagern. Denn wenn sich der Input bei Vorhandensein einer Verzögerung ändert, wird auch der Output nachhinken und sich erst nach dieser Verzögerung an den Input anpassen. Dreht man nun also den Wasserhahn etwas mehr auf, wird sich zuerst der Bestand an Wasser im Schlauch erhöhen und erst nach der Verzögerung der Transportzeit wird sich auch der Output erhöhen.

#### **Ad d. Sie ermöglichen und dämpfen dynamische Ungleichgewichte**

Bestände ermöglichen aber nicht nur Verzögerungen zwischen Zu- und Abflüssen, sondern absorbieren auch etwaige Unterschiede zwischen ihnen. Im Gleichgewicht entspricht der gesamte Output dem gesamten Input. In der Realität bestehen jedoch meist Unterschiede zwischen Output und Input. Zu diesem Zweck werden so genannte „Bufferbestände“ eingerichtet, welche die Unterschiede ausgleichen und absorbieren. So wird es etwa einem lebenden Organismus erst durch die Fähigkeit zur Speicherung von Flüssigkeit im Körper ermöglicht, mit der zeitlich differierenden Zufuhr und Bedarf an Flüssigkeit umzugehen. Ohne diesen Buffer müsste notwendigerweise die Zufuhr an Wasser stets exakt dem Bedarf entsprechen, oder aber der Bedarf könnte nur dann gedeckt werden, wenn gerade Wasser zugeführt wird. In der Zwischenzeit würde der Körper stets an Wassermangel leiden.

Auch der menschliche Bedarf an sonstigen Nahrungsmittelprodukten entspricht zeitlich nicht exakt der Produktion dieser. Um diesen Unterschied auszugleichen, müssen die Lebensmittel in einem Bestand zwischengelagert werden, sei es in einem Supermarkt, in Kühlhäusern oder im Gefrierschrank. Erst dadurch werden Ungleichgewichte zwischen Zu- und Abfluss ermöglicht.

#### **4.3.1.2. Negative Werte bei Bestandsgrößen**

Einen interessanten Aspekt bei Bestandsgrößen stellen negative Werte dar. Bei sehr vielen Stocks ergeben sie keinen Sinn bzw. sind überhaupt nicht möglich, bei anderen wiederum sind sie vollkommen selbstverständlich. So ist bspw. kein negativer Bevölkerungsstand, kein negativer Bestand an Gästen oder gar ein negativer Treibstoffstand im Autotank denkbar. Diese Tatsache betrifft vor allem physische Bestände, bei ihnen ist Null die Untergrenze. Das bedeutet in seiner Konsequenz, dass zeitlich vor einem Abfluss aus dem Stock ein Zufluss erfolgt sein muss. Aus keinem Lager kann ein Artikel ausgeliefert werden, welcher nicht zuvor ins Lager geliefert wurde. Der Motor eines Autos kann keinen Treibstoff aus dem Tank entnehmen, wenn nicht zuvor auch Treibstoff getankt wurde. Der Grund dafür liegt darin,

dass ein negativer physischer Bestand unmöglich ist. Anders ist der Sachverhalt allerdings bei Beständen, welche mit Geld zu tun haben, wie etwa einem Bankkonto. Dieses erlaubt sehr wohl negative Werte und ermöglicht dadurch Behebungen noch *bevor* die notwendigen Einzahlungen getätigt wurden. Dies ist ein grundlegender Unterschied zwischen „finanziellen“ und materiellen (physischen) Stocks. Bei einem Bankkonto mit einem Guthaben von 2.000€ kann man sehr wohl 3.000€ beheben und den überzogenen Betrag später nachzahlen. Umgelegt auf einen materiellen Bestand würde das aber zu dem bekannten Witz führen: „Wenn in einem Lift zwei Personen drinnen sind und fünf aussteigen, dann müssen drei hineingehen, damit keiner mehr drinnen ist.“ Bei einem materiellen Stock ist also bei einem Bestand von 0 kein Abfluss mehr möglich, bei „finanziellen“ sehr wohl.

Auch eine dritte Kategorie von Bestandsgrößen ist in diesem Bezug festzustellen. So wird bspw. bei der betriebswirtschaftlichen Haben-Soll-Rechnung oder der Geschwindigkeit mit negativen Werten deutlich anders verfahren. Hier werden negative Werte ganz einfach in positive umgewandelt. Eine negative Geschwindigkeit ist somit ganz einfach eine positive Geschwindigkeit in eine andere Richtung. Und finanzielle Forderungen an Unternehmen werden betriebswirtschaftlich nicht etwa von der Haben – Seite abgezogen, wodurch sich dann negative „Haben“ – Werte ergeben würden, sondern werden als positive Zahlen in die Soll – Verrechnung aufgenommen. Auch ausstehende Bestellungen werden in einem Lager nicht etwa als negativer Lagerstand gewertet (obwohl das in diesem Fall begrenzt möglich wäre), sondern eben als positiver Wert „offene Bestellungen“.

Im Zusammenhang mit negativen Werten von Beständen sind prinzipiell also drei unterschiedliche Typen von Bestandsgrößen eruiert: Erstens jene, welche keinerlei negativen Werte erlauben. Diese sind meist materieller Natur, sie können aber auch immateriell sein – man denke nur an das Wissen oder das Gedächtnis eines Menschen als Stock – ein negatives Gedächtnis oder negatives Wissen ist nicht möglich. Zweitens ist bei finanziellen Bestandsgrößen ein negativer Wert ohne Probleme bewerkstelligbar. Das Paradebeispiel hierbei sind Bankkonten sowie alle Arten von Krediten.<sup>29</sup> Die dritte und letzte Art von Stocks ist in diesem Zusammenhang jene, welche negative Werte in positive umdeutet. Damit geht auch meist eine andere semantische Bezeichnung einher.

---

<sup>29</sup> Einen nicht-finanziellen Stock, welcher (scheinbar) aber auch negative Werte zulässt, stellt die in Grad Celsius gemessene Temperatur dar. Diese ist jedoch ein Sonderfall in der Hinsicht, dass der Nullpunkt und somit der Übergang zu negativen Werten, von Menschenhand künstlich festgelegt wurde und nicht mit dem absoluten Nullpunkt (-273,15° Celsius), d.h. der theoretisch tiefstmöglichen Temperatur übereinstimmt. Ein negativer Celsius Wert ist daher zwar an sich eine negative Zahl, aber meines Erachtens kein negativer Bestand. Selbiges wäre der Fall, wenn wir bei Entfernungsmessungen einen künstlichen Nullpunkt bei 2 Metern festgelegt hätten. Ein 1,80m großer Mensch wäre dann ebenfalls -0,2m groß, womit es sich um eine negative Zahl, aber nicht um einen negativen Bestand handeln würde. Die Kelvinskala, deren Nullpunkt dem absoluten Nullpunkt entspricht, ist in dieser Hinsicht exakter und zeigt, dass es sich bei einem negativen Celsius Wert tatsächlich nicht um einen negativen Bestand handelt.

### 4.3.2. Flussgrößen

Bevor wir nun versuchen, diese Kennmerkmale von Bestandsgrößen zu einer Definition zusammenzufassen, ist es sinnvoll, auch die Flussgrößen näher unter die Lupe zu nehmen. Auch sie besitzen einige charakteristische Eigenheiten:

- a. Flussgrößen können Zu- oder Abflüsse sein
- b. Sie sind zeitraumbezogen
- c. Sie stellen die Veränderung eines Bestandes pro Zeiteinheit dar
- d. Zu- und Abflüsse sind üblicherweise strukturell verschieden
- e. Sie sind die einzige Möglichkeit Bestände zu verändern
- f. „Biflüsse“ können sowohl positiv als auch negativ sein

#### Ad. a. Flussgrößen können Zu- oder Abflüsse sein

Flussgrößen können entweder positiv sein, d.h. sie werden zum beobachteten Bestand addiert und erhöhen diesen (Zufluss), oder aber negativ, d.h. sie werden subtrahiert und verringern ihn (Abfluss). Ein Abfluss ist aber nicht etwa ein negativer Zufluss, genau wie ein Zufluss kein positiver Abfluss ist. Denn es besteht meist ein grundlegender Unterschied in der Struktur zwischen einem Zufluss einer Bestandsgröße und einem Abfluss derselben Bestandsgröße. Beide können natürlich auch den Wert 0 aufweisen, was aber bedeutet, dass sie nicht vorhanden sind und deshalb für den beobachteten Zeitraum auch keinerlei relevante Bedeutung besitzen.

Sowohl bei Zuflüssen als auch bei Abflüssen gilt es zwischen stetigen und diskreten Veränderungen zu unterscheiden. Bei diskreten Veränderungen (z.B. ankommende und abreisende Gäste in einem Hotel) kann sich auch der Bestand stets nur diskret, d.h. um eine ganze Einheit wie 1 Person und niemals etwa um 0,5 oder 0,1 Personen verändern. Mathematisch entspricht die Berechnung des Stocks bei diskreten Flussgrößen dem Verfahren der Addition bzw. Subtraktion.

$$\text{Bestand}(t_1) = \text{Bestand}(t_0) + \sum \text{Zuflüsse}(t_0-t_1) - \sum \text{Abflüsse}(t_0-t_1)$$

Eine stetige Veränderung, wie sie bspw. beim Zu- oder Abfluss des Wasserbestandes in der Badewanne gegeben ist, verändert natürlich auch den Bestand dementsprechend stetig. Mathematisch entspricht dies dem Integral:

$$\text{Bestand}(t_1) = \text{Bestand}(t_0) + \int_{t_0}^{t_1} \text{Zuflüsse} \, dt - \int_{t_0}^{t_1} \text{Abflüsse} \, dt$$

Diese unterschiedliche mathematische Berechnung spielt jedoch trotz des grundlegenden Unterschiedes zwischen diskreten und stetigen Größen keine entscheidende Rolle. Die

zugehörigen Bestandsgrößen stetiger Flussgrößen können aber exakter zu einem Zeitpunkt gemessen werden als jene diskreter Flussgrößen. FORRESTER (1961) vertritt zu diesem Thema die Auffassung, dass auch sehr viele diskrete Größen als stetig zu betrachten sind:

„Real systems are more nearly continuous than is commonly supposed. There may be an annual budget, but it is frequently modified by new conditions. Even the signing of a particular contract, which may seem a discontinuous step, is usually preceded by a period of negotiation, by a continuously rising expectation of completing the agreement, and by actions to prepare oneself for the obligations that it will impose.”  
FORRESTER 1961, S. 64f;

Eine Besonderheit von Flussgrößen ist, dass sie meist gleichzeitig sowohl ein Zufluss als auch ein Abfluss sein können (vgl. Abb. 4.3.). Denn ein Zufluss eines Bestandes ist natürlich meist auch gleichzeitig Abfluss eines anderen, bspw. ist der Prozess des Abschmelzens von Gletschereis zugleich *Abfluss* des Bestandes Gletschereis und auch *Zufluss* zu einem anderen Bestand, in diesem Fall jenem des Schmelzwassers. Ähnlich verhält es sich auch mit so gut wie allen anderen Flussgrößen – ob etwas ein Zu- oder ein Abfluss ist, lässt sich nur unter dem Bezug auf einen bestimmten Bestand sagen. Dennoch ist natürlich vom Blickwinkel eines bestimmten Bestandes sein Zufluss daher etwas gänzlich anderes als sein Abfluss.

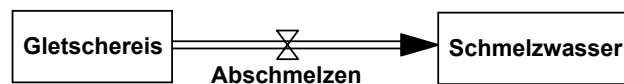


Abb. 4.3.

Diese Besonderheit ist jedoch nicht für alle Flussgrößen gegeben. Man denke nur an die Entstehung eines Buches oder an die Geburt eines Menschen. Diese Zuflüsse können nicht unbedingt als Abflüsse und somit bestandssenkende Größen eines anderen Stocks gesehen werden.

#### **Ad. b. Sie sind zeitraumbezogen**

Das wohl wichtigste Kennmerkmal von Flussgrößen und zugleich auch deren deutlichstes Unterscheidungsmerkmal zu den Bestandsgrößen ist ihre Zeitraum- oder Zeitintervallbezogenheit. Die Einheit in der Flussgrößen gemessen werden, ist stets *Veränderung/Zeit* und somit *zeitraumbezogen*.<sup>30</sup> Während Bestandsgrößen immer zu einem *Zeitpunkt* gemessen werden und daher Momentaufnahmen darstellen, ist das bei Flows in der Regel nicht möglich. Ein Grund dafür liegt darin, dass eine Momentmessung – mangels Messmöglichkeiten – meist schlichtweg nicht durchführbar ist, z.B. wie viele Kinder werden in Österreich in genau diesem Moment geboren? Zum anderen ergeben, zumindest diskrete Flussgrößen, auf einen Zeitpunkt bezogen keinen Sinn. So kann man etwa durchaus die

<sup>30</sup> Daran ändert sich auch nichts, wenn man wie in der Mathematik üblich, Momentanveränderungen von Flussprozessen betrachtet.

Zahl der Neugeborenen pro Jahr (in Österreich pro Jahr ca. 72.000) auf einen „Moment“ wie eine Sekunde umlegen, der Informationsgehalt wird dabei aber fraglich: Was sagt es uns, wenn wir wissen, dass in dieser Sekunde in Österreich genau 0,002 Kinder geboren werden?<sup>31</sup>

Mangels einer Messmöglichkeit werden Flussgrößen oftmals sogar über die Differenzbildung zweier Bestandsgrößen ermittelt: Im Falle der Überprüfung der Schadstoffkonzentration im Stadtklima sind die Ausstoßraten durch die Fläche der Stadt und durch die Vielzahl an Emittenten nicht direkt messbar. Sie lassen sich aber dennoch über den Vergleich der Konzentrationswerte zu unterschiedlichen Zeitpunkten ermitteln, allerdings um die Abbauraten bereinigt. Auch die Flussgröße Schneefall wird über die Menge an gefallenem Schnee gemessen, also ebenso über den Vergleich zweier Bestände (vor und nach dem Schneefall). Einen großen Teil der Informationen über Flussgrößen beziehen wir dadurch indirekt über Bestandsgrößen. Für Systeme mit nur Zuflüssen oder nur Abflüssen gilt demnach:

$$\text{Zuflüsse bzw. Abflüsse}(t_0-t_1) = \text{Bestand } (t_1) - \text{Bestand } (t_0)$$

Besitzt ein System sowohl Zuflüsse als auch Abflüsse, was den Regelfall darstellt, gilt:

$$\text{Nettofluss}(t_0-t_1) = \text{Bestand } (t_1) - \text{Bestand } (t_0)$$

Wie aber Flussgrößen durch den Vergleich zweier Bestände gemessen werden können, ist das auch bei Bestandsgrößen, etwa durch Fortschreibung von Flussgrößen, machbar. Der Lagerstand zu Jahresbeginn wird auf diese Weise durch die verkauften und vom Großhändler neu gelieferten Produkte fortgeschrieben und nicht jeden Tag vollständig neu abgezählt. Erst bei der Inventur wird die Fortschreibung auf den tatsächlichen Bestand (Abweichung durch Fehler bei der Fortschreibung, Diebstahl etc.) korrigiert. Selbiges passiert bei Volkszählungen und anschließender 10-jähriger Fortschreibung der Bevölkerungsdaten.

Daraus, dass Flussgrößen stets über einen Zeitraum gemessen werden, ergibt sich auch notwendigerweise, dass sie in diesem Zeitraum keineswegs konstant sein müssen. Ein Zu- oder Abfluss kann einmal stärker und einmal schwächer sein - über das Zeitintervall gemessen wird sich ein Mittelwert ergeben. Beide können im Laufe des Zeitrahmens auch durchaus vorübergehend den Wert 0 annehmen und insgesamt dennoch einen positiven

---

<sup>31</sup> Dieser Bedeutungsverlust bei einer Annäherung des Zeitraums an einen Zeitpunkt ist bei stetigen Flussgrößen weit geringer. Man kann z.B. den Zufluss zu einem Wasserbehältnis durchaus mit der Einheit Liter/Zehntelsekunde angeben, ohne dass eine gravierende Veränderung des Informationsgehaltes wie im Falle der Geburten eintritt, denn der Wasserzufluss enthält auch dann noch dieselbe Plausibilität und es mag in gewissen Fällen sogar durchaus erwünscht sein, den Zeitraum derart klein zu wählen.

bzw. negativen Wert aufweisen. Einige wenige Flussgrößen, die so genannten „Biflüsse“ können sogar alternierend positive und negative Werte besitzen (siehe unten).

#### **Ad. c. Sie stellen die Veränderung eines Bestandes pro Zeiteinheit dar**

An dieser Stelle ist es wichtig zwischen so genannten Bewegungs- oder Veränderungsgrößen und den eben beschriebenen Flussgrößen zu unterscheiden. Erstere sind absolute Veränderungen von Beständen, Flussgrößen sind jedoch relative Veränderungen *pro Zeiteinheit*. Der Unterschied besteht also darin, dass Flussgrößen auf einen gewissen Zeitraum bezogen werden und Veränderungsgrößen nicht. Diese repräsentieren absolute Veränderungen und können daher bei unterschiedlichen Längen der dazwischenliegenden Zeitintervalle nicht direkt miteinander verglichen werden. So kann man etwa 500 mit einem Auto gefahrene Kilometer in fünf Monaten nicht direkt mit 300 gefahrenen Kilometern in zwei Monaten vergleichen. Erst über die Aufteilung in einen gleich langen Zeitraum (z.B. ein Monat) und somit die Umwandlung in Flussgrößen ist ein Vergleich möglich. Die korrespondierende Flussgröße wäre, wenn man als Zeiteinheit Monate heranzieht, im ersten Fall 100km/Monat, im zweiten 150km/Monat.

Dennoch sind Bewegungsgrößen vor allem im alltäglichen Gebrauch unmittelbarer und leichter greifbar – um Flussgrößen zu erhalten, müssen wir in der Regel erst umrechnen. Flussgrößen sind aber durch ihre Vergleichbarkeit aussagekräftiger als Bewegungs- oder Veränderungsgrößen und werden deshalb in der systemdynamischen Modellierung Letzteren vorgezogen. Jene Wassermenge, welche also zwischen zwei Zeitpunkten oder über eine gewisse Zeitdauer in eine Badewanne zu- oder abgeflossen ist, ist – sofern sie als *Menge pro Zeiteinheit* angegeben wird - demnach eine Flussgröße.<sup>32</sup> Intuitiv würden wir aber auf die Frage nach der Menge zugeflossenen Wassers mehrheitlich „x Liter“ (wobei x für die Menge zugeflossenen Wassers steht) antworten, d.h. ohne Bezug auf einen Zeitraum, wodurch es sich um eine Bewegungsgröße handelt. Dies ist auch nachvollziehbar, aber erst der Bezug auf einen (wenn möglich üblichen) Zeitraum ergibt eine vergleichbare Größe.

#### **Ad. d. Zu- und Abflüsse sind üblicherweise strukturell verschieden**

In den meisten Systemen besteht zwischen Zu- und Abflüssen ein struktureller Unterschied, d.h. sie sind oft grundsätzlich verschieden (vgl. OSSIMITZ 2001c). Die Geburt eines Menschen ist etwas anderes als sein Tod, der Verkauf eines Artikels etwas anderes als sein Ankauf, zufließendes Wasser etwas anderes als einsickerndes Wasser und Einbringung von Schadstoffen in die Atmosphäre etwas anderes als deren Abbau. Dennoch lassen sich die

---

<sup>32</sup> Die Einheit Menge/Zeiteinheit ist jedoch kein zwingendes Unterscheidungsmerkmal zu Bestandsgrößen, da auch gewisse Bestände diese Einheit aufweisen können. Flussgrößen hingegen besitzen immer diese Zeitraumbezogenheit und damit die Einheit Menge/Zeiteinheit.

Zu- und Abflüsse in den meisten Fällen direkt saldieren, so ergibt bspw. die Differenz zwischen der Anzahl verkaufter und angekaufter Artikel im letzten Quartal die Nettoänderung des Lagerbestandes in diesem Zeitraum. Diese strukturelle Verschiedenheit von Zu- und Abflüssen ist aber wie bereits unter Punkt a. angesprochen nur vom Standpunkt einer bestimmten Bestandsgröße aus gegeben. Ihre Zuflüsse und Abflüsse sind in der Regel (strukturell) verschiedenartig. Ein einzelner Flussprozess hingegen ist meist zugleich Abfluss eines Bestandes und Zufluss eines anderen. So ist das Tanken an einer Tankstelle (Zufluss zum Bestand „Treibstoff im Auto“) strukturell etwas Grundverschiedenes als der Verbrauch von Treibstoff durch den Motor (Abfluss des Bestandes). Dennoch handelt es sich bei dem angesprochenen Zufluss (tanken) gleichzeitig auch um einen Abfluss (nämlich vom Lagerbestand an Treibstoff der Tankstelle). Bei der Behandlung dieser beiden Typen von Flussgrößen ist daher die Betrachtungsweise bzw. die Frage, welche Bestandsgröße im Mittelpunkt des Interesses ist, entscheidend.

Ein wichtiger Aspekt von Zu- und Abflüssen besteht darin, dass in beinahe allen Fällen der Zufluss zeitlich vor dem Abfluss erfolgen muss (vgl. Kap. 4.3.1.2.). In einer Badewanne kann kein Wasser abfließen, bevor es zugeflossen ist, es kann kein Produkt verkauft werden, bevor es hergestellt wurde (es kann höchstens eine Abmachung über den Kauf getroffen werden), es kann in einer Bibliothek kein Buch ausgeliehen werden, bevor nicht eines angekauft wurde. Die große Ausnahme bei dieser gezwungenen zeitlichen Aufeinanderfolge von Zuflüssen und Abflüssen stellen finanzielle Bestände dar. Bei diesen sind auch negative Werte möglich, wodurch Abflüsse (Auszahlungen, Behebungen) auch zeitlich vor dem Zufluss (Einzahlung) passieren können.

#### **Ad. e. Sie sind die einzige Möglichkeit Bestände zu verändern**

Wie bereits in Kap. 4.3.1. erläutert, stellen Flussgrößen die ausschließliche Möglichkeit dar, Bestände in ihrer Größe zu beeinflussen. Nichts außer Flussgrößen kann Bestände verändern und dennoch ihr Wesen als Bestandsgröße aufrechterhalten. Das entscheidende Konzept, das es dabei zu beachten gilt, ist der ebenfalls in Kapitel 4.3.1. eingeführte Nettofluss. Um den Nettofluss in einem System zu berechnen, muss man lediglich die Summe der Abflüsse des betrachteten Zeitraums von der Summe der Zuflüsse des Zeitraums subtrahieren. Ergibt sich ein positiver Wert, wird sich der Bestand erhöhen, ist der Nettofluss negativ, wird er sich verringern.

$$\text{Nettofluss } (t_0-t_1) = \text{Veränderung im Bestand } (t_0-t_1) = \text{Zuflüsse}(t_0-t_1) - \text{Abflüsse}(t_0-t_1)$$

Man kann den Nettofluss aber auch durch den Vergleich der Bestandsgrößen zu den Zeitpunkten  $t_0$  und  $t_1$  bestimmen bzw. überhaupt mathematisch als 1. Ableitung nach der Zeit des Bestandes definieren:

$$\text{Nettofluss } (t_0-t_1) = \text{Bestand } (t_1) - \text{Bestand } (t_0)$$

bzw.

$$\text{Nettofluss} = d(\text{Bestand}) / dt$$

Der Nettofluss kann im Prinzip sieben Formen annehmen – alle haben eine andere Wirkung auf den Bestand (vgl. Abb. 4.4.):

1. *Er ist gleich null:* Die Summe aller Zuflüsse ist gleich groß wie jene der Abflüsse, daher weist der Bestand zum Zeitraum  $t_1$  den gleichen Wert wie zum Zeitpunkt  $t_0$  auf.
2. *Er ist positiv und konstant:* Die Zuflüsse sind gesamt stets um einen konstanten Betrag größer als die Abflüsse, d.h. in jeder Zeiteinheit erhöht sich der Bestand um denselben fixen Betrag. Der Stock wächst daher linear.
3. *Er ist positiv und steigend:* Pro Zeiteinheit wird dem Bestand ein immer größer werdender Betrag zugeführt, dieser wächst daher immer schneller, d.h. parabelförmig (quadratische Funktion). Dieser Typ tritt bspw. beim Bevölkerungswachstum oder der Zinseszinsrechnung auf.
4. *Er ist positiv und fallend:* Ein fallender positiver Nettofluss bedeutet, dass pro Zeiteinheit ein immer kleiner werdender Betrag zu dem Bestand addiert wird. Dieser wird deshalb immer langsamer wachsen, und sich wenn der Nettofluss gleich null wird einer bestimmten Größe asymptotisch annähern. So lange er aber positiv bleibt, wird der Bestand, obwohl der Nettofluss fällt, weiterhin wachsen!
5. *Er ist negativ und konstant:* Durch den stets gleichbleibenden Betrag um den sich die Bestandsgröße verringert, ergibt sich ein lineares Schrumpfen.
6. *Er ist negativ und steigend (er ist größer werdend):* Der negative Nettofluss nimmt immer größere Werte an und der Stock verringert sich pro Zeiteinheit um eine stets wachsende Menge, d.h. er schrumpft mit einer immer größer werdenden Rate.
7. *Er ist negativ und fallend (er ist kleiner werdend):* Analog zum fallenden positiven Nettofluss wird hier der Bestand um einen immer geringer werdenden Betrag sinken. Nähert sich der negative Nettofluss der Zahl Null, wird sich auch der Bestand einem bestimmten Betrag asymptotisch annähern. So lange der Nettofluss aber negativ ist, wird der Bestand - obwohl der Nettofluss immer kleiner wird – weiterhin sinken!

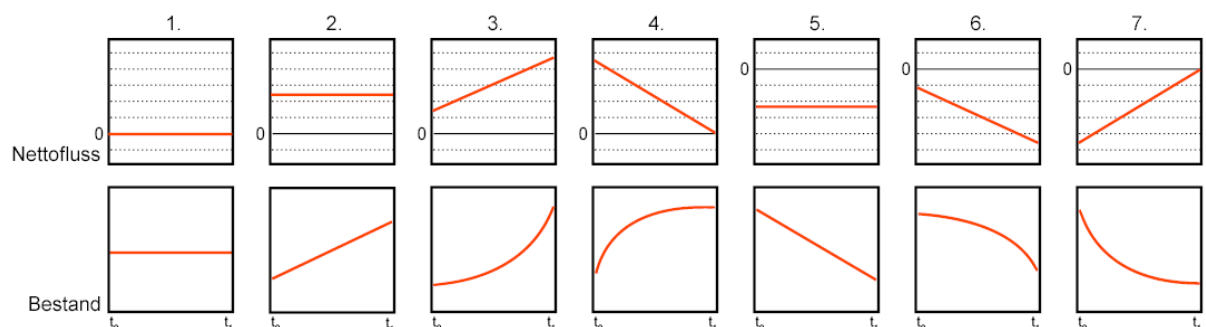


Abb. 4.4.

In all diesen Fällen ist die Größe des Ausgangsbestandes nicht von Bedeutung.<sup>33</sup> Ist der Nettofluss positiv, wird der Bestand wachsen, ist der Nettofluss negativ, wird er kleiner werden und ist er null, wird der Bestand unverändert bleiben. Die Geschwindigkeit mit der sich der Bestand verändert hängt rein von der Größe des Nettoflusses ab, sein Wachstumsverhalten davon, ob der Nettofluss steigend, fallend oder konstant ist.

#### Ad. f. „Biflüsse“ können sowohl positiv als auch negativ sein

In der systemdynamischen Modellierung wird gelegentlich eine spezielle Art von Flussgröße eingesetzt, welche in der Realität nur sehr selten vorkommt – der so genannte „Bifluss“. Ein Bifluss ist eine Flussgröße, die über eine längere Zeitspanne sowohl positive als auch negative Werte annehmen kann und dadurch einmal als Zufluss und dann wieder als Abfluss wirkt. Eine Bestandsgröße wird durch einen Bifluss daher einmal erhöht und dann wieder gesenkt – jedoch beides über die idente Flussgröße. Gleichzeitig kann ein Bifluss aber immer nur auf eine Art und Weise wirken, d.h. er ist entweder positiv oder negativ (bzw. 0) – er kann nicht beides zugleich sein und gleichzeitig auf zwei Arten wirken. Ein Beispiel für eine derartige Flussgröße, die in beide Richtungen wirken kann, ist die Beschleunigung. Als Zufluss (beschleunigen) führt sie zu einer Erhöhung der (Momentan-) Geschwindigkeit, als Abfluss (z.B. bremsen bzw. verzögern = negative Beschleunigung) verringert sie diese.



Abb. 4.5.

Diese Doppelbedeutung von Biflüssen kann man beim Modellieren dadurch umgehen, indem man den Bifluss über den relevanten Zeitraum saldiert und ihn anschließend – je nachdem ob er einen positiven oder einen negativen Nettowert besitzt – als klassischen Zu- oder Abfluss wertet. Dadurch geht natürlich die zeitliche Entwicklung dieser Flussgröße verloren, was insbesondere in Hinblick auf unterschiedliche Auswirkungen kurzfristig positiver und negativer Werte problematisch ist. Eine effektivere Art und Weise mit Biflüssen umzugehen besteht daher darin, dass man die positiven und negativen Werte unterschiedlich bezeichnet und getrennt voneinander modelliert. Dies kann wie im Falle der Beschleunigung durch das Wort „Verzögerung“ oder aber auch durch den Zusatz „positive“ und „negative“ Beschleunigung geschehen (vgl. Abb. 4.6.). Dadurch vermeidet man Probleme, die sich durch die simple Berechnung des Nettoflusses über einen Zeitraum ergeben können.

<sup>33</sup> Es können jedoch nur bestimmte Bestandsgrößen auch negative Werte annehmen (vgl. Kap. 4.3.1.2.).

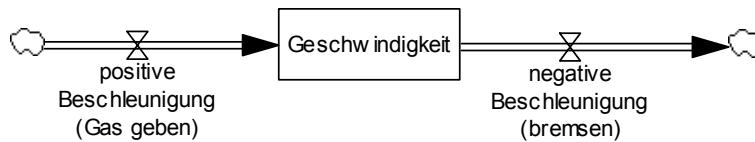


Abb. 4.6.

In der Tat findet sich in der systemwissenschaftlichen Literatur kaum ein Beispiel, bei welchem eine solche Aufteilung eines realen Biflusses in einen positiv und einen negativ wirkenden Teil nicht denkbar wäre. Es scheint sogar, als ob Biflüsse nur genau zu dem umgekehrten Zweck – zur Zusammenfassung eines Zu- und eines Abflusses zu einer einzelnen Flussgröße – eingesetzt werden. Biflüsse dienen dabei der Vereinfachung von Modellteilen, bei welchen eine genaue Simulation nicht notwendig ist und es ausreicht, die Gesamtentwicklung zu modellieren. Ein Beispiel dafür findet sich in Abb. 4.7. Wird die Nettoveränderung der Arbeitslosenzahl ohnehin von außerhalb des Modells bestimmt und spielt es keinerlei Rolle wodurch die Veränderung bewirkt wird, dann ist es nicht unbedingt notwendig, diese Prozesse in das Modell mit aufzunehmen. Es reicht einen Bifluss an die Bestandsgröße anzuhängen, welcher je nach der von außen vorgegebenen Entwicklung als Zu- oder als Abfluss wirkt. Dies bewirkt allerdings eine gewisse Abstraktion, geht doch die die strukturelle Unterscheidung der Flussprozesse vollständig verloren.

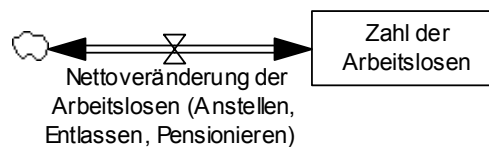


Abb. 4.7.

Meines Erachtens ist es fraglich, ob Biflüsse existieren, welche in der Modellbildung auch unbedingt als solche modelliert werden sollten/müssen. Vielmehr liegt es wie angesprochen nahe, dass Biflüsse überhaupt erst zur Zusammenfassung von Simulationsteilen den Weg in die Modellbildung gefunden haben. Aus diesem Grund ist es wichtig zu beachten, dass es sich bei Biflüssen, neben den Zu- und Abflüssen, nicht um eine dritte Kategorie von Flussgrößen handelt - genauso wie ein zeitlicher Mix von positiven und negativen Temperaturen auch keine dritte Temperaturart darstellt.

#### **4.3.2.1. Die Bedeutung von Flussgrößen für Systeme**

- a. Sie verursachen die Dynamik des Systems
- b. Sie dienen zusammen mit Beständen als Entscheidungsgrundlage
- c. Sie ergeben saldiert den für die Systementwicklung entscheidenden Nettofluss

##### **Ad a. Sie verursachen die Dynamik des Systems**

Erst Flussgrößen verleihen einem System Dynamik. Sie verändern Bestände, bewirken somit einen zeitlichen Verlauf und geben dem System Geschichte. Sie sind die *einzig*e Möglichkeit einen Bestand zu verändern. Ohne sie würde jedes System unverändert bleiben.

##### **Ad b. Sie dienen zusammen mit Beständen als Entscheidungsgrundlage**

Wie schon in 4.2.1. beschrieben, zeigen Flussgrößen den Entwicklungstrend eines Bestandes auf und dienen dadurch zusammen mit den Bestandsgrößen als Grundlage für Entscheidungen. Flussgrößen verleihen den Bestandsgrößen eine entscheidende zusätzliche Bedeutung. Für einen Flugzeugpiloten mag eine Flughöhe von 2.000 Metern durchaus eine wichtige Information sein und als Entscheidungsgrundlage dienen, eine wirkliche Bedeutung bekommt diese Information aber erst, wenn man den Entwicklungstrend der Flughöhe kennt und weiß, ob sie schon lange Zeit 2.000m beträgt, oder ob sich das Flugzeug vor einer Minute noch in 3.000m und davor noch in 4.000m befand.

##### **Ad c. Sie ergeben saldiert den für die Systementwicklung entscheidenden Nettofluss**

Zuflüsse oder Abflüsse für sich alleine zu betrachten, kann grobe Entscheidungsfehler zur Folge haben. Es ist immer von großer Wichtigkeit, die jeweils andere Größe mit zu beachten. Denn auch ein stark steigender Zufluss kann einen sinkenden Bestand bedeuten – nämlich dann, wenn der Abfluss trotzdem noch größer ist. Ein immer kleiner werdender Zufluss kann aber bei einem geringen Abfluss umgekehrt genauso gut einen wachsenden Bestand bewirken. Ähnliches gilt natürlich auch für den Abfluss. Es ist daher nötig diese beiden Größen stets miteinander zu saldieren, um den tatsächlichen Entwicklungstrend des Stocks erkennen zu können.

#### **4.3.2.2. Graubereiche zwischen Bestands- und Flussgrößen**

Die Trennung zwischen Bestands- und Flussgrößen ist keineswegs eindeutig. Es existieren Graubereiche und Spezialfälle, in denen die jeweilige Zuordnung willkürlich ist. Eine Einordnung der gesamten Welt in eine der beiden Kategorien und danach sein Verhalten zu orientieren, ist somit also nicht möglich. Denn in gewissen Fällen kommt es auf die Betrachtung an, ob man eine Größe als Stock oder Flow bezeichnen kann. So können manche Größen in einer Betrachtungsweise durchaus eine Bestandsgröße und in einer

anderen eine Flussgröße sein. Ein Beispiel dafür ist etwa die Geschwindigkeit. Um einen Ort zu verändern (Bestandsgröße) ist eine gewisse Geschwindigkeit (Flussgröße) notwendig. Je größer die Geschwindigkeit, umso stärker wird sich auch der Ort verändern. Die Ortsveränderung ist sozusagen die Akkumulation des Geschwindigkeitszuflusses. Die Geschwindigkeit selbst ist aber keine Konstante, sondern ist von der Beschleunigung abhängig. Da auch diese keine Konstante ist, muss sie als Flussgröße dargestellt werden, welche den Bestand (Momentan-)Geschwindigkeit akkumuliert, beeinflusst und verändert. Mit einem Mal ist die Geschwindigkeit nun sowohl eine Flussgröße als auch eine Bestandsgröße – einmal ist sie die verändernde, einmal die veränderte Größe.

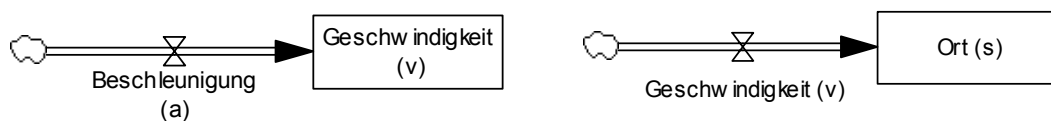


Abb. 4.8.

Das ist kein Widerspruch, vielmehr ist diese Doppelrolle durch die Logik des Stock-Flow-Thinkings vorgegeben und es kommt stets auf den Blickwinkel der Betrachtung an, welche Rolle die Geschwindigkeit einnimmt. Eine Fortsetzung dieser Betrachtungsweise in der Form, dass man auch die Beschleunigung selbst wiederum als Bestand auffasst, als Momentanbeschleunigung sozusagen, welcher durch zusätzliche Beschleunigungsimpulse verstärkt bzw. durch Verkleinerung verringert wird, ergibt jedoch nur begrenzten Sinn. Denn zum einen müssen diese Impulse meist als extern betrachtet werden, zum anderen muss man die Sinnhaftigkeit einer solchen Fortsetzung ad infinitum ernsthaft hinterfragen. Vielmehr ist es hierbei wichtig zu erkennen, dass wie z.B. in Abb. 4.8. ersichtlich, eine Modellierung des Zusammenhangs von Beschleunigung und Ortsveränderung in Stock-Flow-Diagrammen nur über die Zwischenstufe der Bestandsgröße Geschwindigkeit und nicht direkt erfolgen kann.

Auch in dem bekannten Beispiel einer Badewanne mit Zu- und Abfluss ist es durchaus möglich, bspw. den Zufluss in gewissen Betrachtungen als Bestandsgröße zu sehen. Auf diese Weise wäre etwa der Öffnungsgrad des Wasserhahns eine Bestandsgröße, welche durch die Flussgrößen „Auf- und Zudrehen“ verändert wird. Der Öffnungsgrad stellt sozusagen die Akkumulation des Auf- und des Zudrehens dar, wenngleich jedoch das Aufdrehen eines Wasserhahns nicht exakt der weiter unten folgenden Definition einer Flussgröße entspricht. Nichtsdestotrotz kann dies sehr gut verdeutlichen, dass eine bestimmte Größe nicht immer entweder eine Bestands- oder eine Flussgröße ist und das für immer in jeder Betrachtungsweise bleibt. Vielmehr können sehr viele Stocks und Flows unter geeigneten Umständen auch durchaus die jeweilig andere Größe verkörpern.

### 4.3.3. Stocks und Flows – eine Definition

Aus den oben geschilderten Beschreibungen von Bestands- und Flussgrößen lassen sich nun die wesentlichen bereits argumentierten Charakteristika zusammenfassen:

#### Bestandsgrößen...

- ...sind zeitpunktbezogene Größen und repräsentieren den momentanen Zustand eines Systems
- ...stellen Akkumulationen von Flussgrößen dar
- ...können sich (ohne ihr Wesen zu verlieren) ausschließlich durch Flussgrößen (Zu- und Abfluss) verändern
- ...verändern sich über einen Zeitraum genau um den Saldo der Zu- und Abflüsse
- ...besitzen mind. einen Zu- und/oder einen Abfluss (Flussgrößen)

#### Flussgrößen...

- ...können Zu- oder Abflüsse sein
- ...sind zeitraumbezogen
- ...stellen die Veränderung eines Bestandes pro Zeiteinheit dar
- ...sind die einzige Möglichkeit Bestände zu verändern und verursachen die Dynamik eines Systems
- „Biflüsse“ können sowohl positiv als auch negativ sein
- Zu- und Abflüsse sind üblicherweise strukturell verschieden

Das zentrale Kriterium auf das sich alle Bestandsgrößen beschränken lassen und welches die weiteren Eigenschaften notwendigerweise bedingt, ist wohl, dass es sich bei Beständen um Akkumulationen von Flussgrößen handelt und sie sich nur durch diese verändern. Bei den Flussgrößen wiederum scheint das zentrale Kriterium jenes zu sein, dass sie Veränderungen eines Bestandes pro Zeiteinheit darstellen. Gleichzeitig kommt nun die schon im Laufe dieses Kapitels angesprochene enge Verknüpfung von Bestands- und Flussgrößen zum Tragen. Bestands- und Flussgrößen bedingen einander und ergeben nur gemeinsam einen Sinn. Aus diesem Grund möchte ich zu dem eventuell etwas unüblichen Mittel greifen und eine gemeinsame Definition dieser beiden Größen anbieten. Diese systemische Gesamtdefinition von Bestands- und Flussgrößen soll der engen Verbindung zwischen Stocks und Flows, welche stark an die Henne-Ei – Problematik erinnert, gerecht werden:

*Bestandsgrößen sind zu einem Zeitpunkt gemessene (jedoch über einen Zeitraum entstandene) sinnvolle Akkumulationen von Zu- und/oder Abflüssen, welche ohne ihren Charakter zu verlieren ausschließlich durch Zu- und/oder Abflüsse (Flussgrößen) verändert werden können. Flussgrößen hingegen sind Veränderungen pro Zeiteinheit (zeitraumbezogen) und umfassen sämtliche bestandsverändernde Größen, welche Bewegungen von materiellen oder immateriellen Quantitäten von einem Bestand zu einem anderen darstellen.*

Diese gemeinsame Definition von Bestands- und Flussgrößen scheint meiner Meinung nach den Kernunterschied und die enge Beziehung zwischen diesen beiden Größen zu treffen. Das Wichtige dabei ist, dass es ohne Flussgrößen keinen Bestand gibt und jeder Bestand nur durch Flussgrößen beeinflusst und verändert werden kann. Da Flussgrößen aber Bewegungen von Quantitäten von einem zu einem anderen Bestand sind, benötigen sie umgekehrt einen Bestand um überhaupt vorhanden sein zu können. Nur in der Modellbildung entspringen Flows einer durch ein Wolkensymbol dargestellten unendlichen Quelle außerhalb des Systems, in der Natur ist jede Quelle eines Flows selbst ein Bestand. Stocks und Flows bedingen also einander. Die angeführte Definition kann jedoch natürlich nicht allgemein gültig sein, vielmehr handelt es sich um eine erste umfangreichere Definition, welche vielleicht den Ausgangspunkt für zukünftige Betrachtungen darstellt.

## 5. Die Verbindung zwischen Bestands- und Flussgrößen

Eine wesentliche Eigenschaft von Systemen ist ihre zeitliche Entwicklung und Veränderung – ihre Dynamik. Auch für Bestands- und Flussgrößen spielt die Dynamik eine wichtige Rolle, in der Tat ist eine zeitliche Veränderung eine Grundvoraussetzung des Stock-Flow-Konzeptes, genauso wie Stocks und Flows auch eine Grundvoraussetzung für eine zeitliche Veränderung darstellen. Wie Dynamik dabei zustande kommt und welche Rolle Rückkoppelungen (Feedback) spielen, wird in Kapitel 5.3. näher betrachtet. Zuerst soll aber im nun folgenden Teil etwas näher auf die Verbindung zwischen Bestands- und Flussgrößen eingegangen werden und darauf, auf welche Weise sich Rückschlüsse vom Verhalten der einen Größe auf das Verhalten der anderen ziehen lassen. Besitzt man vollständige Information über das Verhalten der Flussgrößen, wie verhält sich dann der zugehörige Bestand? Und umgekehrt – lässt sich bei Wissen um das Verhalten des Bestandes auf das Verhalten der Flussgrößen schließen?<sup>34</sup>

### 5.1. Graphisches Integrieren

Wie in Kapitel 4.3.1. erwähnt, entspricht die Veränderung eines Bestandes dem Integral seiner Flussgrößen in diesem Zeitraum, weshalb die Vorgangsweise – von den Flussgrößen auf das Verhalten des Bestandes zu schließen – auch als „Graphisches Integrieren“ (engl. graphical integration) bekannt ist (vgl. OH 1995, AGATSTEIN/BREIEROVA 1996a, 1996b, STERMAN 2000). Der umgekehrte Schritt – von einem graphisch gegebenem Bestand auf den Nettofluss zu schließen – ist das „Graphische Differenzieren“ (engl. graphical differentiation) (vgl. LAUGHTON 1996). Wir werden nachfolgend sehr einfache graphische Darstellungen von Flussgrößen betrachten und versuchen anhand derer das Verhalten des Bestandes zu ermitteln. In der Realität sind die Zusammenhänge selbstverständlich sehr viel komplexer und eine Vorhersage des Verhaltens eines Bestandes ungemein schwieriger, ein Verständnis des graphischen Integrierens hilft aber, das Verhalten auch vieler komplexer Systeme besser zu verstehen.

Der Schlüssel zum graphischen Integrieren ist stets die Berechnung des Nettoflusses. Zu diesem Zweck muss man die Zuflüsse und Abflüsse in einem Graph darstellen. Nun lässt

---

<sup>34</sup> Die nachfolgenden Unterkapitel „Graphisches Integrieren“ und „Graphisches Differenzieren“ stellen die Methode dar solche Rückschlüsse zu ziehen. Es ist klar, dass im heutigen Computerzeitalter ein Großteil der anfallenden Rechenaufgaben mittels Computern durchgeführt wird und sie auch bei diesen Fragestellungen eine große Hilfe sind. Dennoch ist es für ein Grundverständnis von Systemen notwendig, spontan und intuitiv den qualitativen Verlauf einer Bestandsgröße bei der Betrachtung seiner Flussgrößen bzw. den Nettoflussverlauf bei der Betrachtung eines Bestandsverlaufs vorhersagen zu können. Für die exakte quantitative Berechnung werden Computer herangezogen. Das Wissen um das qualitative Verhalten ist dabei aber oft wichtiger und wertvoller als der exakte quantitative Wert. Ein solches Grundverständnis erlaubt einen Einblick in die Struktur von Systemen und damit konsequentere Einschätzungen über das Systemverhalten.

sich daraus der Nettofluss ableiten. Auch der Bestand lässt sich graphisch darstellen, jedoch am besten in einer separaten Abbildung. In den folgenden trivial anmutenden Beispielen gilt es, den Nettofluss auf den Bestand zu übertragen. Beträgt dieser z.B. über eine Zeiteinheit +20 Einheiten, dann muss auch der Bestand nach dieser Zeiteinheit um 20 Einheiten größer sein als zuvor. Wann immer der Nettofluss 0 ist, bleibt auch der Bestand unverändert. Er bleibt exakt auf jenem Wert, welchen er gerade besitzt.

Stellen wir uns einen äußerst einfachen Bestand mit nur einem Zufluss und nur einem Abfluss vor, z.B. ein Wasserbecken. Zur weiteren Vereinfachung möge der Abfluss konstant 0 sein, wir müssen also um die Veränderung des Bestandes zu erhalten nun nur noch den Zufluss (dieser entspricht zu allen Zeitpunkten exakt dem Nettofluss) betrachten. Der Zufluss möge die in Abb. 5.1. dargestellte Form haben.

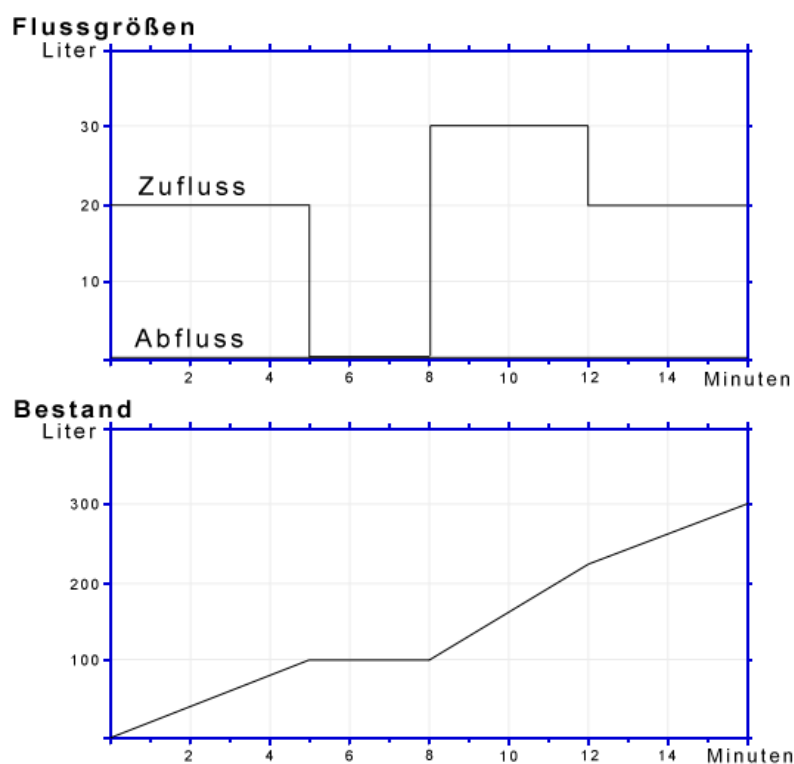


Abb. 5.1.

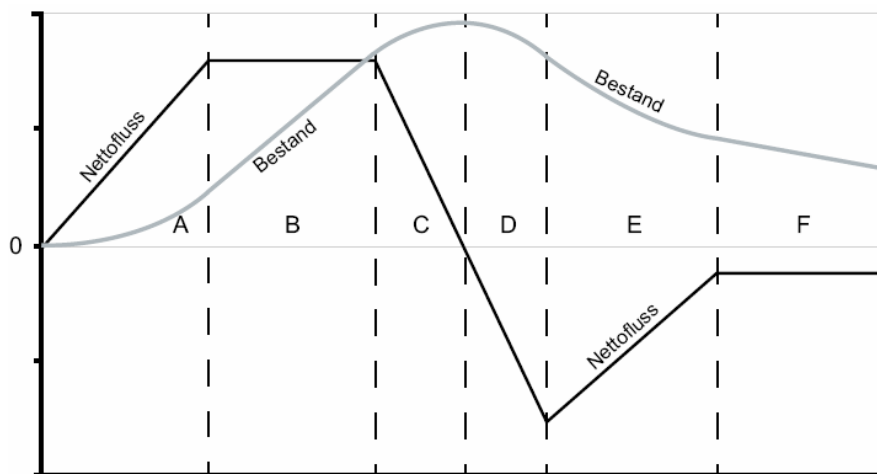
Zwischen Minute 0 und 5 ist der Nettofluss (Zufluss – Abfluss) stets konstant 20 Liter, d.h. der Bestand wird sich pro Minute um 20 Liter erhöhen und in Minute 5 exakt 100 Liter aufweisen. Von Minute 5 bis 8 ist der Nettofluss 0, weshalb der Bestand unverändert bleibt. Erst ab Minute 8 beginnt er wieder zu wachsen, da nun der Nettofluss 30 Liter pro Minute erreicht. Er wird also bis Minute 12 weitere 120 Liter dazubekommen. Anschließend besitzt der Nettofluss wieder dasselbe Niveau wie zu Beginn und erhöht den Bestand in den restlichen 4 Minuten um je 20 Liter, d.h. insgesamt um 80 Liter.

In komplizierten und realitätsnäheren Aufgabenstellungen existieren auch andere Formen des Nettoflusses. Es gilt die bereits in Kapitel 4.3.2. angeführten sieben möglichen Formen zu beachten:

Form des Nettoflusses – Der Nettofluss ist...	Verhalten des Bestandes
gleich Null	Der Bestand bleibt unverändert
positiv und konstant	Der Bestand wächst linear
positiv und steigend	Der Bestand wächst mit immer größer werdender Rate
positiv und fallend	Der Bestand wächst mit immer kleiner werdender Rate
negativ und konstant	Der Bestand sinkt linear
negativ und fallend (größer werdend)	Der Bestand sinkt mit immer größer werdender Rate
negativ und steigend (kleiner werdend)	Der Bestand sinkt mit immer kleiner werdender Rate

Abb. 5.2.

Für die vorliegende Betrachtung werden für die positiven und negativen Formen des Nettoflusses, welche gleichzeitig fallend bzw. steigend sind, aus Vereinfachungsgründen nur der Sonderfall des linearen Steigens bzw. Fallens herangezogen. Der Nettofluss kann in der Realität natürlich auch ungleichmäßig auf beliebige Art und Weise ständig steigen bzw. fallen. Welche Form er auch immer hat, es ist stets am sinnvollsten den Nettofluss-Graphen in Intervalle mit derselben qualitativen Entwicklung zu unterteilen. In all diesen Intervallen wird sich auch der Bestand auf dieselbe Weise verändern (vgl. Abb. 5.3.).



- Segment A: Der Nettofluss ist positiv und steigend – der Bestand wächst schneller und schneller.
- Segment B: Der Nettofluss ist positiv und konstant – der Bestand wächst linear.
- Segment C: Der Nettofluss ist positiv und fallend – der Bestand wächst immer langsamer.
- Segment D: Der Nettofluss ist negativ und fallend – der Bestand sinkt immer schneller.
- Segment E: Der Nettofluss ist negativ und steigend – der Bestand sinkt, aber immer langsamer.
- Segment F: Der Nettofluss ist negativ und konstant – der Bestand sinkt linear.

Abb. 5.3. (nach ZHU/RATHA 1997, verändert)

In Abb. 5.4. sind drei unterschiedliche Intervalle vorhanden. Zwischen Minute 0 und Minute 4 ergibt sich ein Nettofluss von 10 Litern. Solcherart muss der Bestand in Minute 4 genau 40

Liter messen. Anschließend sinkt der Zufluss auf 0 während der Abfluss unverändert bleibt – wodurch der Nettofluss  $-5$  Liter beträgt. Der Stock schrumpft bis Minute 10 auf 10 Liter. In diesem Moment schnellt der Zufluss und damit auch der Nettofluss aus unbestimmtem Grund sehr stark in die Höhe und nimmt danach linear bis zum Ende des Betrachtungszeitraums ab. Die Folge ist ein anfangs starkes und dann abnehmendes Wachstum des Stocks auf rund 70 Liter.

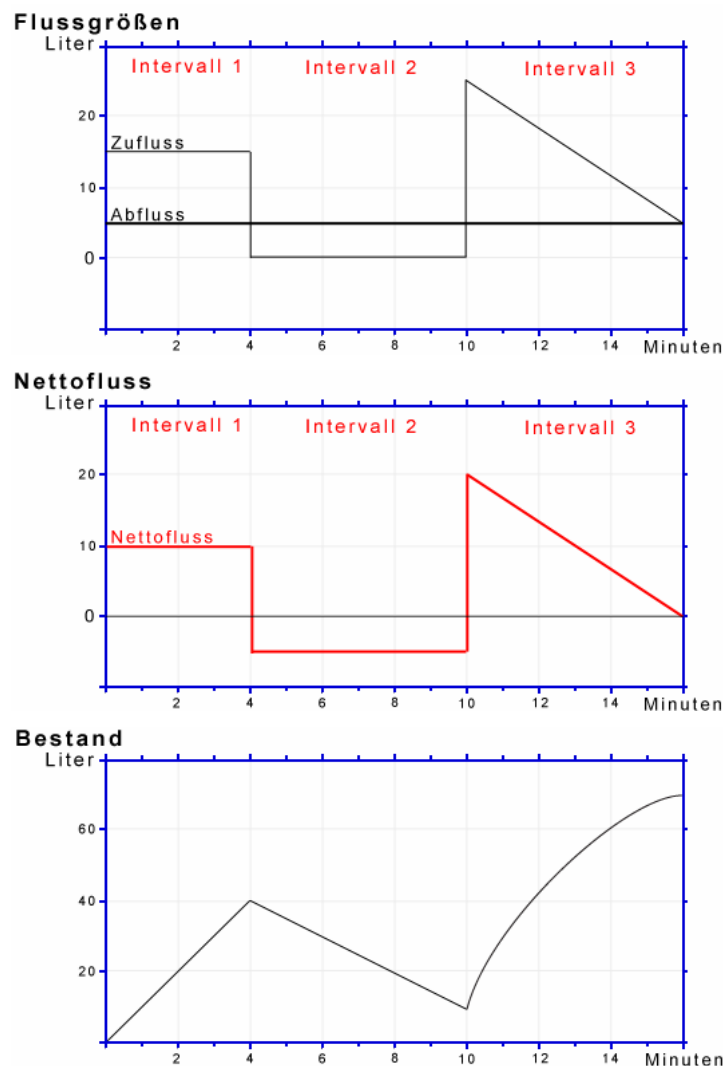


Abb. 5.4.

Anhand dieser Abbildung lässt sich sehr gut erkennen, dass überall dort, wo der Nettofluss vom positiven Bereich in den negativen gelangt, der Bestand ein lokales Maximum aufweist und zu sinken beginnt. Umgekehrt besitzt er überall dort, wo der Nettofluss vom negativen in den positiven Bereich übergeht, ein lokales Minimum und beginnt zu steigen. Genau durch diesen (sehr wichtigen) Zusammenhang kommt es in vielen Systemen zu einer scheinbaren Zeitverzögerung und auch Trägheit, welche in Abb. 5.5. dargestellt ist. Auch wenn der Zufluss (Nettofluss) schon sein Maximum überschritten hat und langsam zu fallen beginnt (weil man etwa durch Erhöhung des Abflusses oder Verkleinerung des Zuflusses bewusst den Bestand senken möchte), wächst der Bestand trotzdem weiter. Dies ist sogar dann noch

der Fall, wenn der Nettofluss nur noch knapp über Null ist. Erst in jenem Moment, in welchem der Nettofluss in den negativen Bereich gelangt, erreicht der Bestand sein Maximum. Wenn man sich nun an das oben elaborierte Verhältnis von Stocks und Flows erinnert, wonach Stocks ausschließlich über Flows steuerbar sind, dann erhält dieser Sachverhalt eine neue Bedeutung. Für die Senkung eines stark wachsenden Bestandes reicht es nicht den Nettofluss auf dem derzeitigen Niveau einzudämmen, es reicht auch nicht ihn leicht zu verringern, die einzige Möglichkeit den Bestand zu senken besteht darin, den Nettofluss in den negativen Bereich zu bringen.

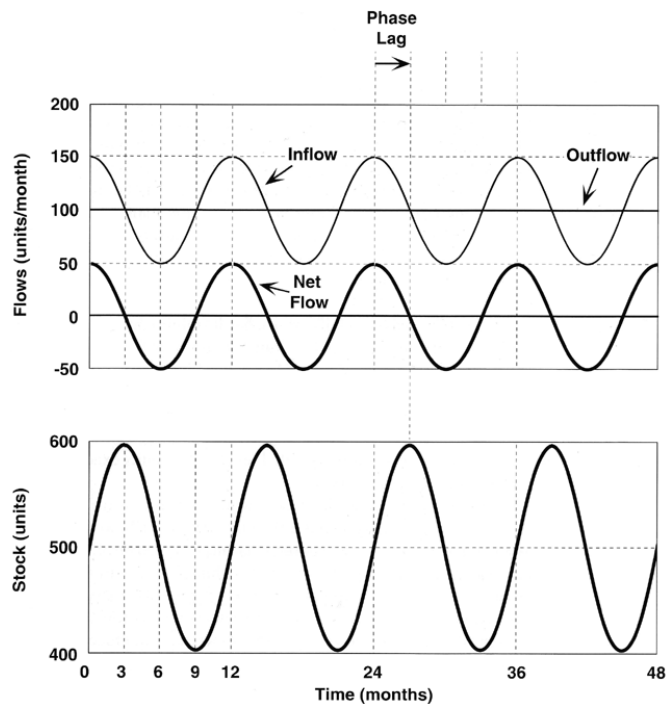


Abb. 5.5. (aus STERMAN 2000, S. 237)

Abschließend sollen basierend auf AGATSTEIN/BREIEROVA (1996a, 1996b) an dieser Stelle die Grundregeln und Schlüsselideen des graphischen Integrierens nochmals kurz zusammengefasst werden:

- Aus den Zu- und Abflüssen muss der Nettofluss berechnet werden, um eine Aussage über die Entwicklung des Stocks treffen zu können.
- Ist der Nettofluss positiv, erhöht sich der Bestand, ist er negativ, wird er verkleinert.
- Die Fläche unter dem Nettoflussgraphen (jene Fläche zur Linie Nettofluss=0 hin) entspricht über einem Zeitintervall exakt der Veränderung des Stocks über dieses Zeitintervall. Dadurch lässt sich bei Bekanntheit des Anfangswertes des Bestandes die exakte Entwicklung des Stocks, bei Unbekanntheit des Anfangswertes die relative Entwicklung über dieses Zeitintervall ermitteln.

- Der Wert des Nettoflusses zu einem Zeitpunkt ergibt die Steigung des Bestandes in diesem Moment.
- Gleichbleibende, konstante Nettoflüsse führen zu einer linearen Veränderung des Bestandes, wobei die Steigung dem Wert des Nettoflusses entspricht.
- Lineare Nettoflüsse verursachen eine parabelförmige Veränderung (gemäß einer quadratischen Funktion) des Stocks, d.h. mit ständig zu- bzw. abnehmender Steigung.
- Eine Aufteilung in Intervalle mit der gleichen qualitativen und quantitativen Entwicklung des Nettoflusses erleichtert das graphische Integrieren.
- An Punkten an den der Nettofluss die Nulllinie kreuzt, besitzt der Bestand lokale Maxima bzw. Minima.

## 5.2. Graphisches Differenzieren

Der Prozess aus einem gegebenem Bestand die Entwicklung des Nettoflusses in diesem Zeitraum abzuleiten, wird – sofern es in graphischer Form vonstatten geht – graphische Differenzierung genannt. Die Information, die dabei über die zugehörigen Flussgrößen gewonnen werden kann, ist allerdings limitiert. Eine Aufspaltung des Nettoflusses in Zufluss und Abfluss ist verständlicherweise nicht möglich und wird speziell dann, wenn ein Bestand mehrere Zu- und Abflüsse besitzt unabschätzbar. Es gibt daher für einen Nettofluss von z.B. +100 Einheiten beliebig viele Möglichkeiten wie dieser Zustand kommen kann. Das Einzige, das sicher ist, ist dass die Summe aller Zuflüsse gesamt um 100 Einheiten höher war als die Summe aller Abflüsse. Ähnliches gilt in dem Fall, dass sich der Stock über ein Zeitintervall nicht verändert. Dies ist nur durch eine Nettoflussrate von Null möglich, bedeutet aber keineswegs, dass auch Zu- und Abflüsse den Wert null aufgewiesen haben. Sie können auch Hunderte Einheiten groß gewesen sein, waren aber jedenfalls exakt gleich groß.

Auch wenn die Graphische Differenzierung auf den ersten Blick ein wenig realitätsfremd scheint und wenig brauchbarer als das Integrieren des Nettoflusses, ist gerade das Gegenteil der Fall. In der Realität bekommen wir den größten Teil unserer Informationen in Form von Bestandsgrößen. Die Einwohnerzahl einer Stadt, Zahl und Menge an natürlichen Ressourcen, die Geschwindigkeit unserer Autos, die gefahrenen Kilometer, Firmenbilanzen, Bevölkerungsdaten, Schulden und Guthaben, Körpertemperatur, Blutzuckergehalt, Niederschlagsmenge, Temperatur, etc. sind allesamt Bestandsgrößen. Wir sind daher ständig ob bewusst oder unbewusst gezwungen, im Kopf graphisch zu differenzieren, wenn wir über die Hintergründe der Bestandsentwicklung etwas erfahren wollen. Diese Fähigkeit von Bestandsverläufen auf die Flussgrößen, genauer auf den Nettofluss zu schließen, ermöglicht einen intuitiveren und informativeren Umgang mit Bestandsgrößen.

Zur Durchführung der graphischen Differenzierung ist eine erneute Betrachtung von Abb. 5.2. sinnvoll, dieses Mal sollte man die Tabelle jedoch von rechts nach links lesen. Generell gilt die äußerst simple Regel: ein wachsender Stock bedingt einen positiven, ein sinkender Stock einen negativen Nettofluss. Die Unterteilung des Bestandsverlaufs in Intervalle gleichen Verhaltens ist auch beim graphischen Differenzieren sinnvoll. Man ermittelt anschließend die Größe, um welche sich der Bestand in diesem Zeitintervall verändert hat, errechnet die Veränderung pro Zeiteinheit und überträgt dies für das Intervall in den Graphen des Nettoflusses. STERMAN (2000) bietet dafür eine sehr anschauliche Abbildung:

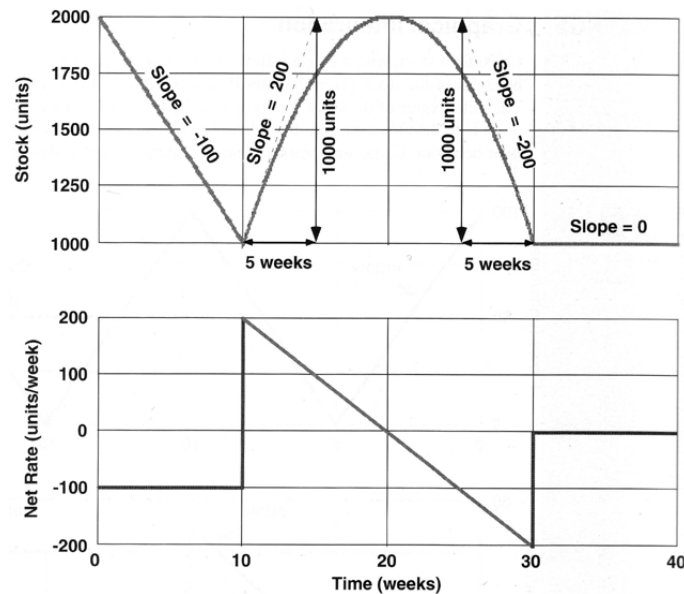


Abb. 5.6. (aus STERMAN 2000, S. 240)

Vom Anfangsbestand von 2000 Einheiten sinkt der Stock innerhalb der ersten zehn Wochen linear auf 1000 Einheiten, d.h. der Nettofluss muss negativ und konstant sein. Es ergibt sich ein Wert von  $-100$  Einheiten pro Woche. Zwischen Woche 10 und 20 wächst der Stock, jedoch mit abnehmender Geschwindigkeit, d.h. der Nettofluss muss positiv und fallend sein. Das Maximum des Bestandes in Woche 20 bedeutet darüber hinaus, dass zu diesem Zeitpunkt der Nettofluss vom positiven in den negativen Bereich gelangt. Das Ziehen einer Tangente an die Bestandskurve in Woche 10 ergibt einen positiven Nettofluss von 200 Einheiten, d.h. in Woche 10 springt der Nettofluss von  $-100$  auf  $+200$  Einheiten, anschließend sinkt er linear bis Woche 20, wo er die Nulllinie kreuzt.

Zwischen Woche 20 und 30 fällt der Bestand, zuerst langsam dann immer schneller. Das bedeutet, dass der Nettofluss negativ sein muss und darüber hinaus fallend. Die Tangente an der Bestandskurve zu Woche 30 ergibt einen negativen Nettofluss von 200 Einheiten, er wird also zwischen Woche 20 und 30 linear von 0 auf  $-200$  Einheiten fallen. Ab Woche 30 bleibt der Bestand konstant, wofür es nur eine mögliche Ursache gibt – der Nettofluss ist Null und konstant (vgl. STERMAN 2000).

### 5.3. Die Dynamik von Bestands- und Flussgrößen – Stocks und Flows vs. Feedback

In Kapitel 3.1. wurde das Konzept von positiven und negativen Wirkungen einer Systemvariable auf eine andere eingeführt. In Wirkungsdiagrammen (CLD's) werden diese Wirkungen kreisförmig fortgesetzt, bis die Ursprungsvariable selbst wieder verändert wird. Diese Veränderung der eigentlich anfangs verändernden Variable wird Rückkoppelung (Feedback) genannt. Analog zu den positiven und negativen Wirkungen existieren positive und negative Rückkoppelungen. Bei einer positiven Rückkoppelung führt eine Erhöhung (bzw. Senkung) der Variable nach einer Verzögerung und dem Durchlauf der Wirkungskette zu einer zusätzlichen Erhöhung (bzw. Senkung) genau dieser Variable, wodurch ein sich selbst verstärkendes exponentielles Wachstum in Gang gesetzt wird.

Negative Rückkoppelungen haben hingegen stabilisierende, ausgleichende Wirkung auf ein System. Eine Erhöhung (bzw. Senkung) einer Variable führt nach Durchlauf der Wirkungskette zu einer Senkung (bzw. Erhöhung) ihrer selbst, d.h. der ursprünglichen Veränderung wird gegengewirkt und das System konstant gehalten. Wie sich noch zeigen wird, ist die Zeit, die der vollständige Durchlauf der Wirkungskette benötigt bzw. die Zeitverzögerung die dadurch entsteht, von großer Bedeutung und führt bei den beiden Typen von Rückkoppelungen zu sehr unterschiedlichen Arten von Systemverhalten.

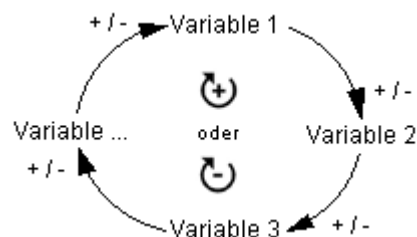


Abb. 5.7.

Dass Flussgrößen die einzige Möglichkeit darstellen, die Bestandsgrößen von Systemen erster und höherer Ordnung überhaupt verändern zu können, wurde an dieser Stelle schon ausführlich erläutert.<sup>35</sup> Bestandsgrößen können ihrerseits jedoch ebenfalls Flussgrößen beeinflussen. Je nachdem auf welche Art (positiv oder negativ) sie sich gegenseitig verändern und wie groß die Zeitverzögerung dazwischen ist, führt dies zu einem unterschiedlichen Systemverhalten und kann u.a. exponentielles Wachstum, logistisches Wachstum, „Goal Seeking Behavior“, Oszillation, „Overshoot-and- Collapse“ – Verhalten oder unterschiedliche Arten von Schrumpfung zur Folge haben. Diese Wachstumsarten sind im Wesentlichen auch die Elemente aus denen sich alle Arten von Dynamik in realen Systemen zusammensetzen.

<sup>35</sup> Systeme erster Ordnung sind Systeme mit genau einer Bestandsgröße. Systeme zweiter bzw. höherer Ordnung besitzen zwei bzw. mehrere Bestandsgrößen (vgl. CORONADO 1997, STERMAN 2000).

### 5.3.1. Positives Feedback – Exponentielles Wachstum

Bestandsgrößen beeinflussen Flussgrößen - so ist es bspw. für die Zahl an Geburten einer Bevölkerung pro Jahr entscheidend, ob die Bevölkerung 1000 Menschen oder aber 100 Millionen Menschen umfasst. Je größer die Bevölkerung, desto größer ist die absolute Zahl an Geburten (der Zufluss) und umso stärker ist auch der Zuwachs der Bevölkerung in absoluten Zahlen. Das Wachstum verstärkt sich selbst und die Bevölkerung wächst (sofern die Sterberate konstant und kleiner als die Geburtenrate ist) exponentiell. Je größer also die Bestandsgröße ist, desto größer ist auch der Nettofluss. Selbiges ist bei einem Sparbuch der Fall:

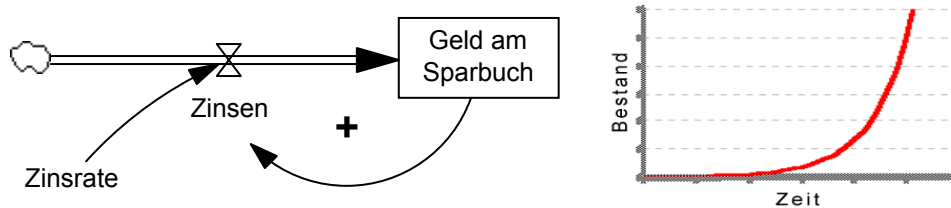


Abb. 5.8.

Vorausgesetzt man tätigt keinerlei Behebungen oder Einzahlungen, wächst ein Anfangskapitalbestand von Jahr zu Jahr durch seine Zinsen. Je größer das Kapital, desto größer ist der absolute Zufluss. In jedem folgenden Jahr ist dadurch das Kapital noch größer und der Zufluss erhöht sich weiter. Es ergibt sich eine konstante Verdopplungszeit, welche für das exponentielle Wachstum kennzeichnend ist. Sie folgt für kleine Wachstumsraten in etwa der Formel:

$$\text{Verdopplungszeit} = 0,7 / \text{Wachstumsrate}$$

Die Wachstumsrate ist im vorliegenden Fall der Zinssatz. Eine 5%ige Verzinsung bedeutet, dass sich das Kapital etwa alle  $0,7 / 0,05 = 14$  Jahre verdoppelt – unabhängig davon, wie groß es ist. Egal ob von 100 Euro auf 200 Euro oder von 20 Millionen Euro auf 40 Millionen Euro – beide Verdoppelungen benötigen 14 Jahre. Bei einer 10%igen Verzinsung verdoppelt sich das Kapital gar alle 7 Jahre!

Die Folge ist ein enormes, sich selbst immer stärker beschleunigendes Wachstum. Die Entwicklung eines exponentiell wachsenden Bestandes richtig einzuschätzen oder vorherzusagen fällt uns Menschen überaus schwer. Wie bereits WAGENAAR/SAGARIA (1975), WAGENAAR (1978) und WAGENAAR/TIMMERS (1979) zeigen konnten, unterschätzen wir exponentielles Wachstum signifikant und tendieren dazu, auch bei exponentiellen Zusammenhängen linear zu extrapolieren. Während das über kurze Zeiträume noch vernachlässigbar geringe Unterschiede bewirkt, ist die Differenz zwischen Einschätzung und tatsächlicher Entwicklung über längere Zeiträume enorm. Denn während wir mit unserem linearen Vorstellungsbild denken, dass der Bestand pro Zeiteinheit immer um denselben

linearen Wert zunimmt, ist es in der Tat so, dass er sich unabhängig von seiner Größe in gleichbleibenden Intervallen verdoppelt. Auch DÖRNER (1989) berichtet von empirischen Untersuchungen zum Thema und bestätigt diese Erkenntnis. Die äußerst beständige Unterschätzung von exponentiellen Zusammenhängen ist dadurch auch eine sehr entscheidende Quelle des falschen menschlichen Verhaltens in komplexen dynamischen Systemen und des Missmanagements von Beständen.

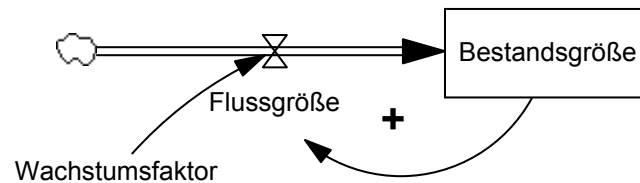


Abb. 5.9.

Die Stock-Flow Grundstruktur von positivem Feedback bzw. exponentiellem Wachstum ist in Abb. 5.9. dargestellt. Die Bestandsgröße entspricht dem oben erwähnten Geld am Spargbuch oder der Bevölkerungsgröße. Exponentielles Wachstum kommt in der Natur in einer unendlich großen Zahl von Systemen vor – eigentlich ist überall dort, wo Wachstumsvorgänge vorhanden sind positives Feedback und exponentielles Wachstum im Spiel. Wir finden es z.B. im Wachstum von Tierpopulationen, Zellen, Bakterien, u.v.a.m. Die dargestellte Flussgröße entspricht jenen Einheiten, die pro Zeiteinheit in den Bestand fließen (Geburten, Zellen, Bakterien, Zinsen, etc.). Diese Flussgröße wird durch den Wachstumsfaktor bestimmt, welcher aussagt, wie viele zusätzliche Einheiten pro schon bestehender Einheit im Bestand und pro Zeiteinheit dem Bestand hinzugefügt werden. Sie ergibt sich demnach gemäß der Formel:

$$\text{Flussgröße} = \text{Bestand} \times \text{Wachstumsfaktor}$$

Durch den konstanten Wachstumsfaktor und den wachsenden Bestand ergeben sich im weiteren Verlauf das immer schneller werdende exponentielle Wachstum und die charakteristische konstante Verdopplungszeit.

Ein dominantes positives Feedback in einer Systemstruktur erlaubt ausschließlich drei Systemverhaltensmöglichkeiten: exponentielles Wachstum (Wachstumsfaktor  $> 0$ ), instabiles Gleichgewicht (Wachstumsfaktor  $= 0$ ) oder aber exponentielle Verkleinerung (Wachstumsfaktor  $< 0$ ) der Bestandsgröße.<sup>36</sup> Exponentielles Wachstum wurde bereits ausführlich erklärt. Unter einem instabilen Gleichgewichtszustand versteht man generell ein

<sup>36</sup> Diese Aussage gilt nur für die hier betrachteten Systeme 1. Ordnung. In Systemen höherer Ordnung kann ein dominantes positives Feedback - wie ASHFORD (1995) ausführlich darstellt - auch Verhalten wie konvergentes periodisches Oszillieren oder stabiles Oszillieren aufweisen.

solches Gleichgewicht, das bereits bei einer geringen Abweichung in einen Wachstumsprozess übergeht. Dieser Zustand ist bei positivem Feedback z.B. bei einem Wachstumsfaktor von Null (und dem Ausschluss anderer Wachstumsprozesse) gegeben. So lange kein Wachstum stattfindet, bleibt der Bestand unverändert. Erst wenn der Wachstumsfaktor geringfügig von Null abweicht (in den positiven oder negativen Bereich), setzt sich sofort ein exponentieller Wachstums- oder Schrumpfungsprozess in Gang. Bildlich gesehen entspricht diese Situation einer Kugel, die ausbalanciert auf der Spitze eines steilen Hügels liegt. Sobald sie sich auch nur ein klein wenig bewegt, ist das Gleichgewicht verloren, sie beginnt zu rollen und wird immer schneller.

Positives Feedback kann aber auch in die gegenteilige – negative – Richtung wirken. So kann sich eine einmalige Verringerung eines Bestandes in manchen Fällen zu einer sich selbst verstärkenden Spirale entwickeln, wodurch der Bestand exponentiell gegen Null strebt. Dies wäre z.B. bei einer absolut tödlichen und zwingend ansteckenden Krankheit der Fall. Zu Beginn würden nur die wenigen Infizierten sterben, bis zu ihrem Tod haben sie aber schon mehrere Leute angesteckt, welche nun ihrerseits weitere anstecken und sterben. Der Bestand würde zuerst langsam, dann immer schneller, d.h. exponentiell gegen Null fallen. Ähnliches gilt bei Schulden. Diese fallen zwar leider nicht gegen Null, sondern gegen unendlich, weisen aber dasselbe Verhaltensmuster auf. Ein Kontostand, der vom instabilen Gleichgewicht Null auch nur leicht in den Minusbereich gelangt, wird exponentiell in den negativen Bereich „wachsen“ und folgende Form aufweisen:

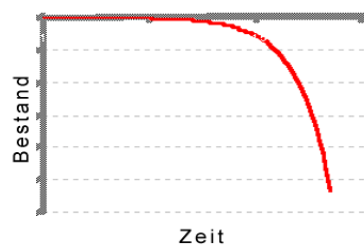


Abb. 5.10.

Exponentielles Wachstum kann in der Natur jedoch niemals auf ewig weitergehen, denn jeder Wachstumsprozess erreicht früher oder später seine Grenzen (vgl. MEADOWS et al. 1972). Keine Bevölkerung, keine Wirtschaft, kein Baum kann auf ewig weiterwachsen, irgendwo liegt eine Ausbreitungsschranke, welche sich dann in Form einer negativen Rückkopplungsschleife bemerkbar macht. So benötigt bspw. jede Bevölkerung oder Tierpopulation Nahrung und Raum, beides ist auf einer begrenzten Erde limitiert. Langfristige Wachstumsvorgänge in der Natur verlaufen daher nur in der Anfangsphase oder über kürzere Zeiträume exponentiell<sup>37</sup>, da auf lange Sicht das Anwachsen eben zunehmend

<sup>37</sup> Lineares Wachstum kann in der Natur selbstverständlich ebenfalls vorkommen, ist jedoch bedeutend seltener. Denn pro Zeiteinheit muss dabei ein Bestand unabhängig von seiner Größe um eine gleichbleibende absolute Menge wachsen oder sinken. Es darf demnach keinerlei Rückkopplung zwischen Bestandsgröße und Zu- oder Abfluss vorhanden sein.

behindert wird. Ist dem anwachsenden Bestand von vornherein eine natürliche Grenze gesetzt (z.B. Ausbreitungsmöglichkeiten), kann man auch von einem „beschränkten Wachstum“ sprechen. Erreicht der Bestand eine für das System gewisse kritische Größe, bestehen lediglich zwei Möglichkeiten: Entweder er wird durch einen limitierenden Faktor im Wachstum eingebremst bzw. gestoppt, oder aber das immer stärkere Wachstum ergibt eine für das System nicht mehr tragbare Belastung und führt damit zu seinem Zusammenbruch (z.B. Krebszellenwachstum). Letztere Möglichkeit ist als das so genannte „Overshoot-and-Collapse“ - Verhalten (siehe unten) bekannt.

Diese ersten Betrachtungen zeigen bereits eindrucksvoll, wie Bestands- und Flussgrößen in einem dynamischen Zusammenspiel stehen und sich ständig gegenseitig beeinflussen. Durch diese gegenseitige Beeinflussung können aber auch noch weitere Systemmuster als die exponentielle Entwicklung verursacht werden.

### **5.3.2. Negatives Feedback – Goal Seeking Behavior**

Bei negativem Feedback wird einer auftretenden Veränderung entgegengewirkt. Dadurch nähert sich der Bestand einem bestimmten Wert – dem Gleichgewichtswert – asymptotisch an. Diese Annäherung an einen bestimmten Wert ist als „Goal-Seeking-Behavior“ bekannt. Ist das System vom angestrebten Gleichgewicht noch sehr weit entfernt, lässt sich dieses Verhalten sehr gut beobachten: Anfangs ist die Eindämmung der Veränderung noch marginal, erst mit zunehmender Nähe zum Gleichgewichtszustand des Systems wird sie so stark, dass schließlich die Veränderung gänzlich zu Erliegen kommt. Denn je näher das System dem Gleichgewichtswert ist, umso geringer wird auch der Nettofluss und ist es dann erst einmal erreicht, liegt in aller Regel ein stabiler, eventuell auftretende Veränderungen selbst ausgleichender Systemzustand vor. Neu aufkommende Störungen werden sofort in die Gegenrichtung verkehrt und somit eingedämmt. Das System nimmt wieder denselben (oder aber bei äußerst starken externen Einflüssen auch einen anderen) Gleichgewichtszustand ein. So wird etwa die Körpertemperatur des Menschen stets konstant auf rund 36,5° C gehalten. Fällt sie darunter oder steigt sie darüber, setzen körpereigene Mechanismen ein (Zittern, Gänsehaut, Schwitzen, Abstrahlung) um dem Vorgang entgegenzuwirken. Die Temperatur nähert sich dadurch wieder dem gewünschten Gleichgewichtswert an. Betreffend der Systemstruktur ist zu sagen, dass scheinbar ständig die Diskrepanz zwischen momentanem und angestrebtem Zustand gemessen wird und ein dynamischer Prozess, mit dem Ziel diese Diskrepanz zu überwinden, in Gang gesetzt wird. Ein gutes Beispiel hierfür ist ein simulierter Lagerstand. Es ist gewünscht, dass der Lagerstand eine bestimmte Zahl an Einheiten aufweist. Der Lagerstand wird durch verkaufte Einheiten (zur Vereinfachung als konstant angenommen) verringert und durch produzierte

Einheiten erhöht. Ist der Lagerstand zu niedrig, führt das zu einer Erhöhung der Produktion, wodurch der Lagerstand wächst. Ist er zu hoch, wird die Produktion verringert und der Bestand sinkt. Hinzu kommt, dass je größer der Unterschied zum gewünschten Lagerstand ist, auch die Produktion umso stärker erhöht oder zurückgeschraubt wird. Die Folge ist ein sich der gewünschten Größe immer wieder asymptotisch annähernder Bestand.

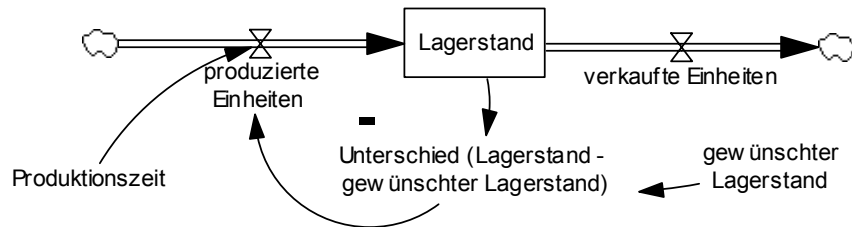


Abb. 5.11.

Selbiges ist auch bei einer Klimaanlage oder einem simplen Heizungsthermostat der Fall. Der Thermostat misst die Raumtemperatur und vergleicht sie ständig mit der gewünschten eingestellten Temperatur. Je weiter die tatsächliche Temperatur von der gewünschten entfernt ist, umso stärker wird die Heizung aufgedreht (bzw. umso stärker wird die Klimaanlage kühlen). Je näher sich diese beiden Temperaturen dadurch annähern, umso weniger wird die Anlage heizen bzw. kühlen. Ist die Zieltemperatur erreicht, werden sich viele Geräte sogar ganz abschalten und erst wieder aktiv, sobald eine Toleranzgrenze um die gewünschte Temperatur wieder über- bzw. unterschritten wird.

Abbildung 5.12. zeigt die allgemeine Struktur eines negativen Feedbacks und somit des Goal-Seeking-Behaviors. Die Flussgröße, welche in beide Richtungen zeigt, soll andeuten, dass es sowohl bei Zuflüssen als auch bei Abflüssen zu negativem Feedback kommen kann. Der gewünschte Bestand ist keineswegs wie im Falle des Lagers von außen vorgegeben, vielmehr handelt es sich dabei meist um den Gleichgewichtswert des Systems. So ist unsere Körpertemperatur oder jene der Erdoberfläche nicht von außen bestimmt, sondern hat sich intern auf einen Gleichgewichtswert eingependelt. Analog zur Verdopplungszeit des exponentiellen Wachstums ist beim Goal-Seeking-Behavior die Halbierungszeit des noch zu überbrückenden Abstandes zum Gleichgewichtswert stets konstant.

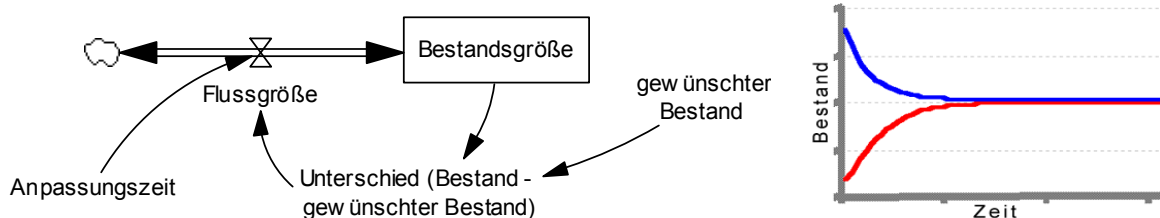


Abb. 5.12.

Ein Sonderfall von negativem Feedback ist z.B. der Zerfall radioaktiven Materials. Dieser führt – trotz negativer Rückkoppelung *nicht* zu einem ausgleichenden Systemzustand,

sondern zu einer asymptotischen exponentiellen Verkleinerung des Bestandes mit dem Zielwert Null.

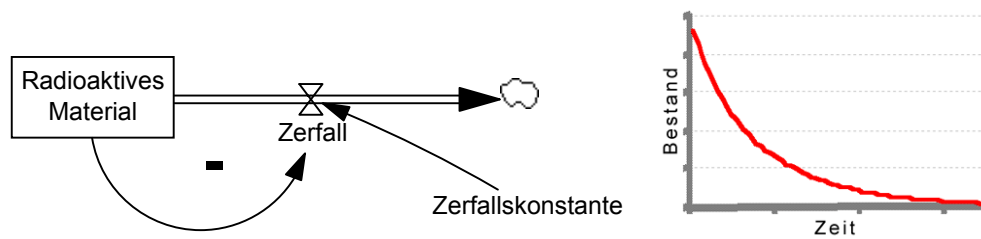


Abb. 5.13.

Radioaktives Material zerfällt je nach seiner typischen Zerfallsrate (Halbwertszeit) unterschiedlich schnell. Diese Zerfallsrate ist jedoch für ein bestimmtes radioaktives Material stets konstant. Anfangs wird pro Zeiteinheit daher eine relativ große absolute Menge des Materials zerfallen, wodurch sich der Bestand verringert. Nach derselben Zeitspanne wird von dem nun kleineren Bestand wieder ein Teil zerfallen sein, allerdings eine kleinere absolute Menge als zuvor. Dadurch wird sich auch der Bestand um eine relativ kleinere Menge verringern und nach der nächsten Zeitspanne wird ein noch kleinerer Teil zerfallen. Die Folge ist ein sich immer langsamer verringender Bestand radioaktiven Materials, welcher sich asymptotisch an Null annähert. Auch hierbei handelt es sich um eine negative Rückkoppelung – jedoch besitzt das System den Gleichgewichtszustand Null. Wäre ein Zufluss zum Bestand vorhanden, würde er sich Letzterer auf einem bestimmten Niveau einpendeln. Anschließend würden auftretende Schwankungen im Zu- oder Abfluss, wie bei negativen Rückkoppelungen üblich, ausgeglichen werden. Hier aber führt das Goal-Seeking-Behavior der negativen Rückkoppelung zur Auflösung des Bestandes.

Negative Rückkoppelung kann drei Arten von Systemverhalten zur Folge haben: asymptotische exponentielle Verkleinerung hin zum Gleichgewichtszustand, asymptotisches Wachstum hin zum Gleichgewichtszustand oder aber Verbleiben im Gleichgewicht. Sowohl asymptotisches Wachstum als auch Verkleinerung verlangen einen Anfangsbestand von  $\neq 0$ .

### 5.3.3. Logistisches Wachstum

Reines exponentielles Wachstum ist (wie auch reines lineares Wachstum) auf Dauer gesehen unrealistisch. Alle Wachstumsprozesse stoßen früher oder später auf ihre Grenzen. Eine der am stärksten verbreiteten Wachstumsformen stellt deshalb eine Mischung aus exponentiellem und asymptotischem Wachstum zu einer Verhaltensform namens „Logistisches Wachstum“ (engl. „S-shaped growth“ – vgl. Abb. 5.14.) dar. Bei diesem Wachstumstyp dominiert anfangs das exponentielle und ab einem Übergangspunkt (entspricht dem Wendepunkt der graphischen Darstellung) das asymptotische Wachstum. Es entspricht in diesem Sinne einem exponentiellen Wachstum, welches durch einen

limitierenden Faktor (wie z.B. Ausbreitungsgebiet, Nahrungsangebot, etc.) eingebremst wird, wodurch der Bestand allmählich seine maximale Größe erreicht. Logistisches Wachstum trägt auch den Beinamen „organisches Wachstum“, da es sehr oft in der Natur anzutreffen ist - wir finden es in beinahe allen biologischen Wachstumsvorgängen, angefangen vom Bakterienwachstum über die Ausbreitung von Epidemien bis hin zur Entwicklung von Menschen- und Tierpopulationen oder Gerüchten.

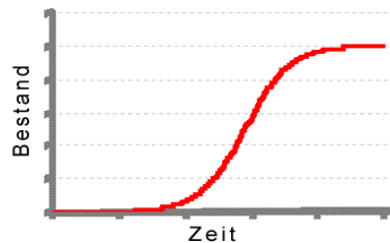


Abb. 5.14.

Geht man nun der Struktur eines solchen logistisch wachsenden Systems auf den Grund, kann man gut erkennen, wie Bestands- und Flussgrößen zusammenspielen und dadurch dieses Verhalten verursachen. Abb. 5.15. führt die Struktur eines Systems erster Ordnung – einer wachsenden Tierpopulation – vor Augen. Als begrenzender Faktor ist ein konstant bleibendes Nahrungsangebot angenommen. Es ist ein gewisses Verhältnis von Nahrungsangebot zu Populationsgröße notwendig, damit jedes Tier noch genügend zu Essen bekommt. Dieses Verhältnis führt bereits bei Annäherung an den Maximalwert des Bestandes zu zusätzlichen Todesfällen, da schwächere und alte Tiere durch das knappe Nahrungsangebot (pro Tier) ein erhöhtes Todesrisiko haben.

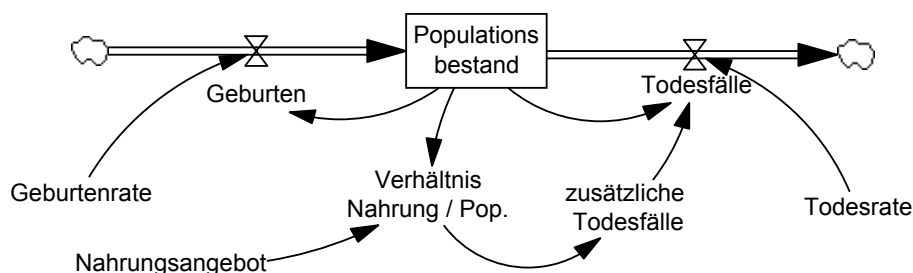


Abb. 5.15.

Im Prinzip enthält das System einen positiven, eskalierenden und einen negativen, stabilisierenden Feedbackkreis. Anfangs ist das positive Feedback dominant, bald jedoch sorgen der dadurch wachsende Bestand und das begrenzte und konstante Nahrungsangebot indirekt für eine „Umgewichtung“ und der negative Rückkoppelungskreis beginnt zu wirken. Die Folge ist ein asymptotisches Wachstum hin zum Maximal- und Gleichgewichtswert des Stocks. Die allgemeine Struktur eines logistischen Populationswachstums mit limitierendem Faktor (z.B. begrenztes Ausbreitungsgebiet) ist in

Abb. 5.16 abgebildet. Das Wachstum der Tierherde lässt sich auf folgende Art mathematisch ausdrücken:

$$\text{Zufluss} = \text{Bestand} \times \text{Wachstumsfaktor} \times \text{Freiraum}$$

Unter dem Freiraum wird dabei der Abstand der momentanen Größe des Bestandes zur Kapazitätsgrenze verstanden ( $\text{Freiraum} = 1 - \text{Populationsgröße} / \text{Gesamtkapazität}$ ). Er kann Werte zwischen 1 (maximaler Abstand) und 0 (max. Kapazität erreicht) annehmen, bremst damit das an sich exponentielle Wachstum und führt es in ein logistisches Wachstum über.

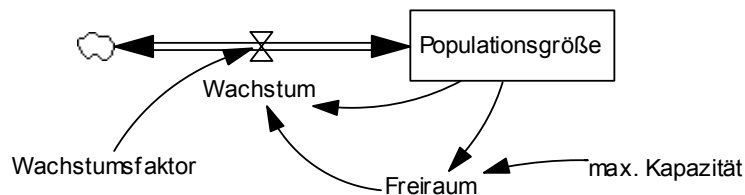


Abb. 5.16.

Das logistische Wachstum verlangt jedoch nicht nach einer typischen Systemstruktur, je nach System kann die Struktur auch vollkommen anders aussehen. Abb. 5.17. zeigt die dynamische Entwicklung des logistischen Wachstums bei dem oben angeführten Beispiel einer Epidemie.

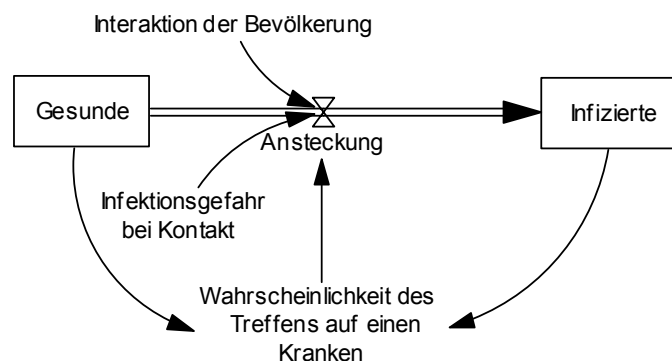


Abb. 5.17.

Es handelt sich hierbei um ein System zweiter Ordnung mit den beiden Beständen der Infizierten und der Gesunden. Die Ansteckung ist die Flussgröße zwischen beiden. Bei Kontakt mit einem Infizierten besteht eine gewisse konstante Ansteckungsgefahr, die Interaktion gibt die Zahl der Kontakte einer Person mit Mitmenschen an und ist vereinfacht ebenfalls als konstant angenommen. Die Wahrscheinlichkeit auf einen Krankheitsträger zu treffen, ist durch die Größe der Bestände der Gesunden und der Kranken bestimmt. Anfangs wird durch die geringe Zahl der Infizierten, die Wahrscheinlichkeit auf einen zu treffen sehr gering sein. Umgekehrt trifft jeder Kranke auf Gesunde, welche er infiziert. Es ergibt sich ein exponentielles Wachstum des Bestands an Infizierten. Zunehmend mit ihrer Zahl steigt zwar die Wahrscheinlichkeit auf einen Kranken zu treffen, gleichzeitig sinkt aber natürlich für die Kranken die Wahrscheinlichkeit auf einen Gesunden zu treffen, der noch infiziert werden

kann. Die Wachstumsrate des Krankenbestandes nimmt ab und das anfangs exponentielle Wachstum schwenkt in ein asymptotisches Wachstum um. Erst allmählich ist die gesamte Bevölkerung vom Virus durchdrungen und die maximale Zahl an Infizierten erreicht. Das Wachstum findet sein Ende.

Dieses Modell ist keinesfalls vollständig. Man könnte es nun um die Geburten und Todesfälle in beiden Beständen erweitern (eventuell höhere Todesrate bei Infizierten), oder aber auch einen Heilungsprozess mit oder ohne dauerhafte Immunität gegen den Virus integrieren.

#### 5.3.4. Overshoot-and-Collapse

Wie beim logistischen Wachstum gesehen, erreicht die Vergrößerung eines jeden Bestandes früher oder später seine Grenze. Im Idealfall stellt sich an dieser Kapazitätsgrenze ein Gleichgewicht ein. Das ist jedoch nicht immer der Fall. Ein Beispiel in welchem diese Kapazitätsgrenze mit schwerwiegenden Folgen für das Gesamtsystem überschritten wird, ist das sogenannte „Overshoot-and-Collapse“ – Verhalten. Wie die Bezeichnung schon vermuten lässt, führt das Überschreiten der Grenze zum Zusammenbruch des Systems. „Overshoot-and-Collapse“ kann zum einen in Systemen mit einer begrenzten nicht- oder nur langsam erneuerbaren Ressource, zum anderen aber auch in Systemen mit größeren Zeitverzögerungen beobachtet werden.

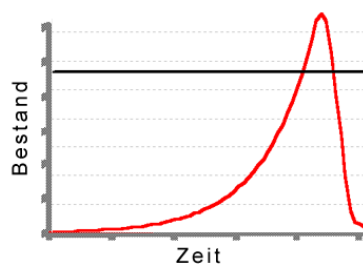


Abb. 5.18.

Ein Beispiel für ein System in welchem dieses Verhalten in Zusammenhang mit begrenzten Ressourcen auftreten kann, stellt die in Abb. 5.15. dargestellte Tierpopulation mit limitiertem Nahrungsangebot dar. Angenommen, es handelt sich bei der Nahrung der Tiere um eine nur sehr langsam nachwachsende Ressource, dann kann eine Überschreitung des maximalen Bestandes – verursacht meist durch anthropogene Eingriffe – dazu führen, dass mit einem Mal ein Großteil der Tiere zu wenig zu fressen findet. Die Herde wird sich bis auf ein paar wenige Exemplare verringern und beinahe aussterben.

Dieses Beispiel scheint weit her geholt, ist in dieser oder einer ähnlichen Form jedoch schon viele Male aufgetreten. So wurde dieser Fehler schon im Rahmen von Entwicklungshilfeprojekten (vgl. DÖRNER 1999, bzw. Kap. 2.5.) begangen. In einigen Fällen wurden in Dritte Welt Ländern bestehende Rinderherden in wenig fruchtbaren Gebieten künstlich (durch Bau von Brunnen und Bewässerung der Weidegebiete) vermehrt, um den Hunger der Bevölkerung zu bekämpfen. Sowohl die Anzahl der Tiere als auch die

Lebensbedingungen und Anzahl der Menschen stiegen daraufhin innerhalb kurzer Zeit. Bis jedoch eines Tages die Rinderherde zu groß wurde und die vorhandenen Weiden die Herde nicht mehr ernähren konnten. Durch die übermäßige Grundwasserentnahme (und oft auch in Kombination mit ausbleibenden Regenfällen) waren zusätzlich die Brunnen trocken gefallen. Die Rinder konnten plötzlich keine Nahrung mehr finden. Sie fraßen, bevor das Massensterben der gesamten Herde einsetzte, in ihrer verzweifelten Suche nach Essbarem sogar noch die Grasnarbe und vernichteten dadurch ihre eigene zukünftige Nahrung. Eine Hungerkatastrophe für die Bevölkerung, welche ohne Eingriff vermutlich nie in diesem Maße stattgefunden hätte, war die Folge. Eine kleinere Anzahl an Tieren hätte trotz des ausbleibenden Regens genügend Nahrung vorgefunden. Das System verkräftete den für die vorhandene Fläche zu großen Bestand also nicht und kollabierte. Man hätte die Herde vor Erreichen dieses Grenzwertes auf eine vernünftige Zahl dezimieren müssen. Auf eine Zahl, bei welcher die Tiere gerade soviel Gras fressen, wie auch nachwächst. So jedoch wurde der limitierende Faktor unterwandert und der Bestand durch zusätzliche Verstärkung des Wachstums jenseits der Kapazitätsgrenze geführt.<sup>38</sup> Die negative Feedbackschleife konnte dadurch erst mit großer Zeitverzögerung – aber dafür mit umso niederschmetternder Intensität – wirken. In der Zwischenzeit hatte der Stock aber bereits den kritischen Grenzwert überschritten, sodass die Rückkoppelung die Vernichtung der Herde zur Folge hatte.

Handelt es sich beim für die Ausbreitung limitierenden Faktor um eine nur sehr langsam erneuerbare Ressource, die essentiell für den Bestand ist, wird das System kollabieren. Dieses Verhaltensmuster ist analog im Falle der Erdölförderung, Luftverschmutzung, den Geisterstädten aus der Goldgräberzeit in den USA oder dem Überfischen von Gewässern beobachtbar. Es existiert aber auch noch eine weitere Möglichkeit bei der Überschreitung einer Kapazitätsgrenze. Erholt sich die Ressource schnell genug – ist also die Zeitverzögerung kleiner – kann das gesamte System ohne zu kollabieren in Schwingung (Oszillation) geraten.

### **5.3.5. Oszillationen**

Oszillierendes Systemverhalten ist von der Struktur mit dem Goal-Seeking-Behavior der negativen Rückkoppelung eng verwandt. Auch hier wird durch negatives Feedback versucht, das System auf einen bestimmten Gleichgewichtswert zu bringen. Der momentane Zustand wird mit diesem verglichen und eine dementsprechende korrigierende Maßnahme ergriffen. Jedoch wird bei Oszillationen der Gleichgewichtswert analog dem Overshoot-and-Collapse - Verhalten überschritten. Sobald dies der Fall ist, beginnt der Bestand zu sinken, dabei

---

<sup>38</sup> Genau genommen wurde durch das angesprochene Fressen der Grasnarbe die Kapazitätsgrenze des Gebietes sogar noch gesenkt, da die Weiden dadurch noch weniger Tiere potentiell ernähren konnten. In manchen Fällen wird demnach das Overshoot-and-Collapse – Verhalten zusätzlich zur bereits zu großen Bestandsgröße durch ein Senken der Kapazitätsgrenze noch verschärft.

übersteuert das System aber erneut. Nun ist er kleiner als der Zielwert (Gleichgewicht) und wird wieder vergrößert. Abermals übersteuert das System, wodurch ein ständig auf- und abschwingender Systemzustand entsteht. Die Ursache für dieses Verhalten ist in vielen Fällen in einer systemimmanenten Zeitverzögerung zu finden. Verzögerungen können bedingt durch den Zeitaufwand zur Messung und Verarbeitung bei der Informationsaufnahme des aktuellen Systemzustandes auftreten, sie können aber auch zwischen Informationsaufnahme und dem Ergreifen einer korrigierenden Handlung oder zwischen dem Ergreifen der Handlung und ihrer tatsächlichen Wirkung entstehen. Eine andere Ursache für oszillierendes Verhalten kann bei diskreter Zustandsberechnung auch ein sehr starker Nettofluss sein. In diesem Fall hat sich der Bestand auch bei nur sehr geringer Zeitverzögerung bis zum wirksam werden der korrigierenden Aktion schon derart stark verändert, dass diese zu schwach oder zu stark ausfällt.

AGATSTEIN (1997, S. 9ff) und STERMAN (2000, S. 290) stellen fest, dass oszillatorisches Systemverhalten erst bei Systemen zweiter und höherer Ordnung auftreten kann (d.h. bei solchen mit zwei oder mehr Bestandsgrößen) und bei Systemen erster Ordnung (unter der Voraussetzung kontinuierlicher Einflussnahme) unmöglich ist. Sie betonen, dass es für eine Oszillation unbedingt zweier relevanter Bestände bedarf, zwischen welchen Quantitäten hin und wieder zurück transferiert werden, wodurch das System dann in Schwingung geraten kann. In der Tat sind Systeme zweiter Ordnung das Paradebeispiel, um das Prinzip des oszillierenden Systemzustandes näher zu betrachten, jedoch können auch Systeme erster Ordnung oszillieren – wenngleich auch nur unter der Annahme zeitlicher Diskretheit. Zuerst aber zu jenen zweiter Ordnung: jeder der beiden Bestände beeinflusst den anderen. Die dadurch entstehenden Flussgrößen sind solcherart, dass das System niemals zur Ruhe kommt. Wann immer ein Bestand zu groß wird, bewirkt dies eine negative Rückkoppelung und ein Wachstum des anderen bei gleichzeitiger Verkleinerung des ersten Bestandes. In Abb. 5.19. ist die Struktur eines solchen Systems allgemein dargestellt.

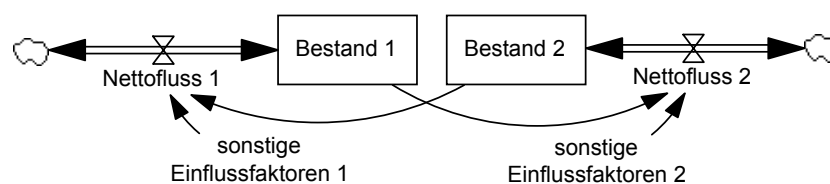


Abb. 5.19.

Ein Beispiel für ein derartiges System stellt die Räuber – Beute – Beziehung zweier Tierarten dar (vgl. Kap. 2.5.). Die Beutepopulation hat nur einen Feind – die Räuberpopulation – welche sich selbst wiederum rein von der Beutepopulation ernährt. Ist für die Größe der Räuberpopulation eine relativ große Zahl an Beutetieren vorhanden, dann findet sie optimale Ernährungsbedingungen vor. Ihre Population beginnt exponentiell zu wachsen. Durch ihre größere Zahl wird es aber für den Einzelnen immer schwieriger genügend Beutetiere zu

fangen um überleben zu können, denn mit zunehmender Zahl der Räuber hat sich die Größe der Beutepopulation drastisch verringert. Die Räuber finden nicht mehr genügend Nahrung, ihre Population schrumpft. Nun aber herrschen optimale Lebensbedingungen für die Beutepopulation – es gibt ja nur noch wenige Feinde, sie kann nun exponentiell wachsen, bis eines Tages...

Ursache für die Oszillation ist in diesem Beispiel die Zeitverzögerung beim Wachsen der einzelnen Populationen. Könnte bei einem größeren Nahrungsangebot die Räuberpopulation von einem Moment auf den anderen wachsen, wäre innerhalb kürzester Zeit ein Gleichgewichtswert betreffend der Populationsgrößen der beiden Tierarten gefunden. Von nun an könnte sich kaum noch etwas ändern, da sich bei einer eventuellen Schwankung die andere Tierart blitzartig an die neuen Bedingungen anpassen und den Gleichgewichtszustand wieder herstellen würde. Durch die Zeitverzögerung ist das System aber ungleich träger und gerät bei solchen Schwankungen seinerseits in Schwingung.

Dass aber auch Systeme erster Ordnung oszillieren können, zeigt die Betrachtung eines einfachen logistischen Systems mit einem limitierenden Faktor, wie es z.B. in Abb. 5.16. modelliert ist. Wie u.a. BRIGGS/PEAT (1990) und darauf aufbauend WAGNER (2002) zeigten, kann man dieses System erster Ordnung sehr leicht durch eine reine Erhöhung des Wachstumsfaktors (oder eine Erhöhung der Zeitverzögerung) zuerst in eine asymptotische, durch weitere Erhöhung in eine gleichbleibende Oszillation und bei noch stärkerer Erhöhung sogar in einen chaotischen Systemzustand (vgl. Abb. 5.20.) oder in ein Overshoot-and-Collapse - Verhalten führen.

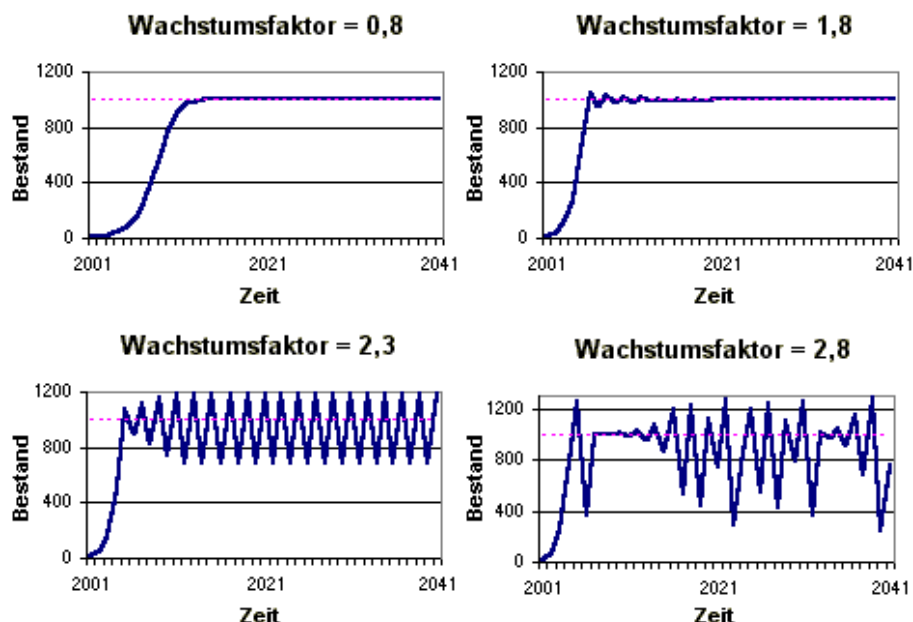


Abb. 5.20. (aus WAGNER 2002, S. 58/59)

Die Verstärkung des Wachstumsfaktors zeigt bei diesem System deshalb den beschriebenen Effekt, da die Berechnung der Flussgröße gemäß der oben angeführten

Formel weiterhin zu den gleich bleibenden Zeitschritten und damit in gleich bleibendem Zeitabstand, d.h. zeitlich diskret und nicht permanent, d.h. kontinuierlich erfolgt. Der Bestand kann sich durch den starken Wachstumsfaktor in der Zeit zwischen zwei diskreten Berechnungszeitpunkten derart stark verändern, dass auch die Korrekturberechnung wieder übersteuert. Dass eine zeitlich diskrete Berechnung aber nicht unbedingt eine unrealistische Annahme ist, sondern in vielen Fällen auch in der Natur anzutreffen ist, zeigt die nähere Betrachtung einiger Insektenarten. So sichern etwa gewisse Schmetterlingsarten das Überleben ihrer Art in der Form, dass sie im Herbst – bevor sie auf Grund des kalten Winters sterben – Eier legen, aus welchen dann im Frühjahr die nächste Generation ihrer Art schlüpft (bzw. schlüpfen einige Arten auch schon vor Beginn des Winters und überwintern als Larven oder auch Puppen). Je nach Nahrungsangebot in diesem Jahr gibt es unterschiedlich viele Schmetterlinge, die ihre Eier hinterlassen. Sind es wenige, finden ihre Nachkommen im Jahr darauf optimale Verhältnisse vor und werden sich nahezu exponentiell vermehren. Diese werden darauf hin eine sehr viel größere Zahl an Eiern legen, aus welchen im Jahr darauf wiederum deren Nachkommen schlüpfen. Diese sind allerdings dann derart zahlreich, dass sie an Nahrungsmangel leiden und sich die Population stark verkleinert. Der Zyklus beginnt von vorne. Die „Berechnung“ des Zuflusses erfolgt also auch hier wie im Modell in einem konstanten Zeitabstand (von Jahr zu Jahr) und in der Tat lässt sich in der Entwicklung der Population von Jahr zu Jahr ein chaotisches Wachstum beobachten.

Exakt denselben Effekt wie eine Erhöhung des Wachstumsfaktors bewirkt in dem beschriebenen System wie kurz angesprochen eine Zeitverzögerung des negativen Feedbacks. Diese Zeitverzögerung wäre im vorliegenden Falle nichts anderes, als dass bei unverändertem Wachstum die Berechnung des Zuflusses in noch größeren Intervallen erfolgt – wodurch sich eine relative Wachstumserhöhung ergibt. Die Folge ist eine ebenfalls sehr starke Veränderung des Bestandes zwischen zwei Berechnungen, wodurch auch hier die Korrektur übersteuert und das System oszilliert. Ist die Zeitverzögerung der negativen Rückkoppelung nur klein, wird der Bestand nur kurzzeitig über den Gleichgewichtszustand hinauswachsen und in kurze Schwingung geraten, sich aber schnell beruhigen und den Gleichgewichtszustand erreichen. Ist die Zeitverzögerung hingegen größer, ergibt sich das oszillierende und in weiterer Folge ein chaotisches und ein Overshoot-and-Collapse - Verhalten. Systeme erster Ordnung können also ebenfalls relativ leicht (wenngleich nur bei zeitlicher Diskretheit), entweder durch eine zeitliche Verzögerung oder einen sehr starken Nettofluss oszillieren. Anhand dieses Beispiels lässt sich gut erkennen, dass zwischen Oszillationen in Systemen erster und jenen höherer Ordnung zwar ein großer struktureller Unterschied besteht, das qualitative Verhalten jedoch identisch ist.

Oszillierende Systeme spielen in der Realität eine größere Rolle als man auf den ersten Blick annehmen würde. Vor allem natürliche Systeme sind derart stark miteinander verbunden und ineinander verwebt, dass ein absolut stabiler Gleichgewichtszustand kaum möglich ist oder erreicht werden kann. Vielmehr schwingen die meisten natürlichen Systeme um ihren Gleichgewichtswert und sind dabei erstaunlich stabil. Erst wenn eine überkritische Änderung stattfindet, wie sie oftmals auch von Menschenhand ausgelöst wird, beginnen die einzelnen Systeme sich stark zu verändern und versuchen ein neues, anderes Gleichgewicht zu erreichen. Das ist aber insbesondere dann problematisch, wenn es sich um solch gigantische Systeme wie etwa das Klimasystem handelt, kann aber auch schon bei weit kleinräumigeren wie etwa einem lokalen Grundwasserbestand schwere Folgen haben. Der Mensch sollte daher in der Lage sein, Bestände richtig zu „managen“. Dazu ist ein Verständnis der Struktur von Systemen und dem Zusammenspiel zwischen deren Bestands- und Flussgrößen unumgänglich. Ein erster Schritt dazu ist das Wissen um die grundlegenden Möglichkeiten dynamischer Entwicklung. Von ihnen lässt sich auch bedingt auf die Systemstruktur schließen. So kann man sich bei einem exponentiellen Wachstumsvorgang sicher sein, dass eine (zumindest im Moment) dominante positive Rückkoppelung im System besteht. Umgekehrt bedeutet etwa ein oszillierender Zustand eine dominante negative Rückkoppelung mit signifikanter Zeitverzögerung. Ähnliches gilt für die weiteren möglichen Verhaltenstypen von Systemen. Dadurch lässt sich vom Verhalten des Systems zumindest auf die momentan dominierende Struktur schließen und eventuelle Eingriffe sind dementsprechend gestaltbar. Dennoch ist es auch wichtig zu untersuchen, welche anderen Teilstrukturen im System vorhanden sind und im Hintergrund schlummern. Diese können bei einer Zustandsänderung, wie dem Überschreiten eines internen Grenzwertes, mit einem Schlag aktiv werden und das Verhalten des Systems völlig verändern. Qualifizierte Entscheidungsträger sollten nicht nur über solche Möglichkeiten Bescheid wissen, sondern auch die Struktur und das Verhalten des Systems bei Veränderungen und Eingriffen möglichst gut qualitativ antizipieren können.

### **5.3.6. Andere Formen von Dynamik**

Über die beschriebenen Verhaltensformen hinaus existieren in der Realität auch noch andere Formen, zu den wichtigsten zählt das Gleichgewicht. Es gibt zwei Arten von Gleichgewicht: Die erste ist jener Zustand, in welchem Zu- und Abflüsse eines jeden Bestandes gleich Null sind – dieses Gleichgewicht wird statisch genannt. Es verändert sich nichts, keine Quantitäten werden verschoben und der Zustand bleibt unverändert. Von außen beobachtet ist dies meist auch bei der zweiten Art von Gleichgewicht – dem dynamischen – der Fall. Intern handelt es sich bei diesem Systemverhalten jedoch keineswegs um einen Ruhezustand. Es sind lediglich alle Zuflüsse gleich groß wie die

Abflüsse – der Nettofluss ist gleich Null, die einzelnen Flussgrößen aber keineswegs. Dieser Zustand wäre beispielsweise in einer Bevölkerung vorhanden, in welcher sich Geburten und Zuwanderungen mit den Todesfällen und Abwanderungen exakt die Waage halten. Obwohl intern eine starke Umstrukturierung stattfindet, ändert sich nach außen an der Größe des Bestandes nichts.

Eine gesonderte Art der Dynamik sind auch die Mischformen der einzelnen dynamischen Strukturen. Sehr oft wird eine Bestandsvariable nicht von einer, sondern von mehreren Flussgrößen beeinflusst. Während eine Variable eventuell ein exponentielles Wachstum des Bestandes bewirkt, bremst die andere dieses Wachstum. Das Ergebnis ist ein Verhalten, das weder der einen noch der anderen Struktur exakt zugeschrieben werden kann. Dennoch wird in den meisten Fällen eine Struktur dominant sein und die dynamische Entwicklung der Bestandsgröße dadurch antizipierbar.

Ein anderer sehr interessanter Verhaltenszustand von Systemen ist in diesem Kapitel schon kurz angesprochen, jedoch nicht näher erklärt worden – das chaotische Verhalten. Chaos bezeichnet in einem System einen Zustand, in welchem es nicht möglich ist, das zukünftige Verhalten über einen längeren Zeitraum vorherzusagen. Der Zustand hängt derart empfindlich von den Anfangsbedingungen (dem Ausgangspunkt der Berechnungen) ab, dass man nur über einen sehr kurzen Zeithorizont Prognosen über den weiteren Systemzustand treffen kann. Denn weichen die tatsächlichen Anfangsbedingungen auch nur minimal von den für die Berechnung verwendeten ab, wird der tatsächliche Zustand nach kurzer Zeit ein vollkommen anderer als der prognostizierte sein. Chaos tritt nur in komplexen, dynamischen nichtlinearen Systemen auf. Das wohl anschaulichste Beispiel für ein chaotisches Verhalten ist zugleich auch jenes System, in welchem es in den 1960er Jahren am MIT durch Edward LORENZ entdeckt wurde – das Wettersystem. LORENZ stieß beim Versuch computergestützte Wetterprognosen zu erstellen auf das Phänomen, dass bereits eine äußerst geringfügige Änderung der Eingabewerte zu gänzlich unterschiedlichen Prognosen führte. Die Ursache für die auch heute noch von der Realität abweichenden Ergebnisse bei Wettervorhersagen liegt in der Unschärfe aller Messwerte. Für eine exakte längerfristige Prognose wäre es notwendig, den momentanen Systemzustand, d.h. die präzise Größe und Ausprägung sämtlicher relevanter Variablen absolut realitätsgetreu zu erfassen. Das ist auch heute noch unmöglich und wird es zumindest im Falle des Wetters auch noch sehr lange bleiben. Weicht die Messung auch nur minimal vom tatsächlichen Wert ab, schaukeln sich interne Rückkoppelungen und nichtlineare Zusammenhänge innerhalb kurzer Zeit derart stark auf, dass der Zustand des Modells mit jenem der Realität nichts mehr gemein hat. Chaotische Systeme sollen im Rahmen der vorliegenden Arbeit aber keine weitere Rolle spielen.

#### 5.4. Managing a Stock

Eine sehr große Zahl an menschlichen Aktivitäten kann man bei genauerer Betrachtung als Versuch, eine Bestandsgröße zu regulieren und sie nahe einem gewissen Niveau zu halten, charakterisieren (vgl. DIEHL/STERMAN 1995, STERMAN 1989). Der Mensch reguliert bspw. den Bestand an Flüssigkeit im Körper, die körpernahe Umgebungstemperatur durch das An- und Ausziehen von Kleidung, den Bestand an Geld am Konto, die Geschwindigkeit beim Autofahren, die Nahrungsvorräte im Kühlschrank, die Wassertemperatur beim Duschen, etc. Firmen wiederum regulieren ihre Lagerbestände, die Größe ihrer Belegschaft oder auch den Bestand an notwendigen Arbeitsgeräten und Rohmaterialien. Bei all diesen Aktivitäten wird der Versuch unternommen, einen Bestand zu managen – d.h. die durch Abnutzung, Verkauf, Verbrauch oder Störungen von außen auftretenden Einflüsse werden ausgeglichen, um die Bestandsgröße auf einem gewissen Niveau (Soll-Wert) zu halten. Zu diesem Zweck wird der Ist-Wert mit dem Soll-Wert verglichen und ein korrigierender Prozess in Gang gesetzt. Man beachte, dass man dabei nur einen Einfluss auf die den Bestand ändernde Flussgröße hat. Niemals kann man eine Bestandsgröße direkt beeinflussen, die Korrektur kann also nur über eine Veränderung eines Zu- oder eines Abflusses erfolgen.

Typisch für alle diese Regulierungsmaßnahmen ist auch eine Zeitverzögerung zwischen Maßnahme und Effekt. Diese ist von Fall zu Fall unterschiedlich groß, aber doch stets vorhanden. So wird die Verzögerung beim Regulieren der passenden Wassertemperatur für eine Dusche klein, die für das Einstellen neuer Belegschaft für eine Firma deutlich größer sein. Bekommt eine Firma einen Lieferauftrag, der die derzeitige Produktionskapazität übersteigt, dann wird sie diese entweder erhöhen müssen (was möglicherweise den Kauf zusätzlicher Maschinen und/oder das Einstellen zusätzlicher Arbeiter bedeutet), oder aber wenn es sich um eine einmalige Bestellung handelt, den Auftrag langsam abarbeiten. Ist es ein permanenter Auftrag (z.B. Lieferung einer fixen Stückzahl pro Monat an eine Handelskette), wird man die Produktion (den Zufluss) auf mindestens das Niveau der Auslieferungen (des Abflusses) erhöhen müssen. Fällt dieser Auftrag irgendwann weg, ist damit die Produktion zu hoch und man wird sie zurückschrauben müssen, um nicht permanent Überkapazitäten zu schaffen. Es handelt sich hierbei in gewisser Weise um einen homöostatischen Zustand, wobei der Mensch durch Anpassung der Produktion die negative, stabilisierende Rückkoppelung schafft.

Zusätzlich kommt es aber wie erwähnt stets zu zeitlichen Verzögerungen zwischen der Absicht zu handeln, der Handlung selbst und dem gewünschten Effekt, d.h. es ist eine negative Rückkoppelung mit Zeitverzögerung vorhanden. Wie in Kapitel 5.3.4. und 5.3.5. dargestellt, ist eine solche Struktur für ein System in einem gewissen Maß gefährlich. Sie kann oszillatorisches Verhalten zur Folge haben, aber auch das systembedrohende Overshoot-and-Collapse - Verhalten bewirken. Diese beiden Verhaltensweisen sind auch

jene, denen man in Zusammenhang mit Ressourcenmanagement oder Supply Chain Management des Öfteren begegnet.

Der Begriff Supply Chain beschreibt die Logistik- oder Wertschöpfungskette eines Produktes vom Abbau seines Rohstoffes bis zum Verkauf an den Endkunden. Es sind damit also nicht nur die Material- und Informationsflüsse innerhalb *eines* Unternehmens gemeint (auch wenn der Begriff oft so verstanden wird), sondern auch jene zwischen den einzelnen Beteiligten. Supply Chain Management ist der Versuch, die Material- und Informationsflüsse entlang dieser Wertschöpfungskette zu optimieren. Es lässt sich sehr oft beobachten, dass eine Supply Chain, d.h. die Produktion oder auch die Lagerstände von Produkten, ein oszillatorisches Verhalten aufweist – was für viele Unternehmen nicht unbedingt den kosteneffizientesten Betrieb darstellt.

Besonders anschaulich wird für Außenstehende das Problem des Supply Chain Managements im Rahmen des so genannten „Beer Games“ vermittelt (vgl. SENGE 1990, STERMAN 2000). Es handelt sich dabei um ein in den 1960er Jahren am MIT entstandenes Simulationsspiel eines einfachen Produktions-Distributionssystems. Es zählt zu den bekanntesten Unternehmensplanspielen weltweit. Anhand von Produzenten, Großhändlern, Zwischenhändlern und Einzelhändlern wird die Produktion und Distribution von Bier in verteilten Rollen simuliert. Der Endkunde kauft sein Bier beim Einzelhändler. Jede Woche gibt dieser Einzelhändler eine Bestellung beim Zwischenhändler auf. Der Zwischenhändler bestellt seinerseits sein Bier beim Großhändler, welcher es direkt vom Produzenten bezieht. Zwischen den Bestellungen und den Auslieferungen besteht eine Zeitverzögerung, sodass man das bestellte Bier erst mit einiger Verzögerung bekommt.

Jede dieser Gruppen ist verständlicherweise darum bemüht, ihre Kosten zu optimieren. Da der Output ihres Bereiches (Bestellungen von Unterhändlern bzw. Endnachfrage) fluktuiert und daher auf Dauer nicht mit ihrem Input (Bierlieferungen von übergeordneten Händlern bzw. der Brauerei) übereinstimmt, besitzt jede Gruppe auch einen Pufferbestand. Dieser soll zum einen so gering wie nur möglich sein (um Lagerkosten und vorgestrecktes Kapital zu minimieren), zum anderen aber auch stets konstant auf einem gewissen Level sein, um für eventuelle Nachfrageschwankungen vorbereitet zu sein und genügend Bier auf Lager zu haben. Aus diesem Grund versucht jede Gruppe Nachfrageentwicklungen vorherzusehen und passt ihr Bestellverhalten an den vorgeordneten Lieferanten an diese Einschätzungen an. Dadurch soll der Vorratsbestand möglichst konstant gehalten werden (= negative Rückkoppelung) – die Gruppe versucht ihn zu managen. Es zeigt sich jedoch, dass obwohl jede Gruppe für sich schlüssig und vernünftig handelt, das gesamte System in Oszillation gerät und dadurch für alle Beteiligten höhere Kosten als bei insgesamt optimalem Verhalten verursacht werden. Im Speziellen ist es die systemimmanente Zeitverzögerung zwischen Bestellungen und Produktion bzw. Lieferungen, die dieses Verhalten verursacht. Bereits sehr

einfache dynamische Systeme mit nur wenigen Agierenden können dadurch eine Eigendynamik entwickeln, die den individuellen Zielen aller Beteiligten entgegengerichtet sind. Auch das Prinzip des so genannten „Schweinezyklus“ beschreibt eine Situation in welcher ein einfaches System durch eine negative Rückkoppelung mit Zeitverzögerung in einen schwingenden Systemzustand gerät. Es leitet sich vom dynamischen Verhalten des Schweinefleischmarktes ab. Der Preis für Schweinefleisch wird über Angebot und Nachfrage geregelt. Dies führt dazu, dass ein hoher Preis vielen Bauern Anreiz bietet, verstärkt in die Schweinezucht zu investieren, um den persönlichen Profit zu maximieren. Die Verzögerung zwischen dieser Entscheidung und dem Erreichen des schlachtreifen Alters der Ferkel bewirkt, dass erst nach dieser Zeit ersichtlich wird, dass sehr viele Bauern denselben Gedankengang hatten und verstärkt auf Schweinezucht gesetzt haben. Das Angebot ist dadurch auf einmal sehr groß, die Nachfrage aber gleichgeblieben - der Preis ist im Keller, die Profite minimal und die Bauern wenden sich von der Schweinezucht ab und einem anderen landwirtschaftlichen Produkt zu, welches höhere Profite verspricht. Nach einiger Zeit ist dadurch das Angebot an Schweinefleisch geringer und der Preis steigt wieder...

Dieses Prinzip des Schweinezyklus ist auch bei der beruflichen oder universitären Ausbildung zu beobachten. Wann immer es durch einen Boom eines Wirtschaftsbereiches oder aus anderen Gründen zu einem Mangel an Fachleuten in einem Bereich kommt (z.B. der New Economy Boom), sind nicht nur die Arbeitsplatzaussichten gut, sondern es wird auf der Suche nach geeigneten Arbeitskräften auch intensiv Werbung für diesen Bereich gemacht. Übermäßig viele Menschen absolvieren daraufhin die (meist mehrjährige) Ausbildung für diesen Fachbereich. Inzwischen ist aber der Mangel durch die ersten Absolventen längst nicht mehr derart stark (wenn überhaupt noch vorhanden) und sind die meisten einmal mit ihrer Ausbildung fertig, ist der Markt schon übersättigt. Die Absolventen finden keinen Job, aber dafür boomt jetzt auch schon der nächste Wirtschaftsbereich und ist intensiv auf der Suche nach geeigneten Arbeitskräften...<sup>39</sup>

Die Probleme, welche in Zusammenhang mit Ressourcenmanagement auftreten, wurden schon in Kap. 2.5. angesprochen. Wie MOXNES (1998/2000) zeigen konnte, tendieren wir selbst unter Ausschluss des Gemeingüterprinzips dazu, sich erneuernde Ressourcen, wie z.B. Tierherden, Fischgebiete, Wälder, etc. zu übernutzen. So führte MOXNES (1998/2000) mehrere von ihm durchgeführte empirische Untersuchungen an, in welchen die Vpn einen sich erneuernden Bestand auf ein nachhaltiges Niveau bringen mussten, d.h. die Nutzung

---

<sup>39</sup> Dieses Prinzip funktioniert auch auf einen bestimmten Bestand bezogen, wie z.B. den Lehrbereich: Es gibt viel zu viele Lehrer → lange Wartezeiten für eine Lehranstellung → weniger Menschen wollen Lehrer werden → dadurch entsteht nach einiger Zeit ein Mangel an Lehrern → die Attraktivität des Berufs steigt wieder →...

Sowohl hier als auch im Falle des Schweinezyklus scheint das einzige vernünftige Verhalten zu sein, antizyklisch zu handeln. D.h. gerade dann in die Schweinezucht investieren, wenn der Preis im Keller ist, oder gerade dann eine bestimmte Berufsausbildung beginnen, wenn der Arbeitsmarkt in diesem Bereich übersättigt ist. Natürlich sollten das jedoch nicht alle tun...

sollte durch das Nachwachsen wieder aufgewogen werden. Im konkreten Fall handelte es sich um eine Rentierherde in einem begrenzten Gebiet, welche mit dem Bestand an Flechten – ihrer Nahrungsgrundlage – in einen Gleichgewichtszustand gebracht werden sollte. Es galt daher die Rentierherde auf ein solches Niveau zu verkleinern, auf dem die Flechten nicht zu stark dezimiert werden und die Verluste, die sich durch das Fressen von Flechten durch die Rentiere ergeben, durch Nachwachsen wieder gutgemacht werden. Erreicht man diesen Zustand, kann man auch die „Ressource Rentier“ nutzen und auch sie wird durch das vorhandene Nahrungsangebot immer wieder nachwachsen.

Die Ergebnisse offenbarten eine Unfähigkeit der Testpersonen derlei Bestände zu managen – MOXNES führt dafür eine interessante Erklärung an. Er kommt zu dem Schluss, dass sehr viele Probanden ein statisches mentales Modell benutzten, wodurch die eigentlich beabsichtigte negative Rückkoppelung und das Heranführen der Bestandsgröße an den Gleichgewichtswert scheiterte. Ein statisches mentales Modell ist im vorliegenden Fall ein Modell folgender Art: je mehr Rentiere, umso weniger Flechten bzw. je weniger Rentiere, umso mehr Flechten. Dieser Gedankengang ist jedoch nur dann richtig, wenn sich das System schon im Gleichgewicht befindet. Ist es vom Gleichgewicht noch sehr weit entfernt (vgl. Abb. 5.21), dann ändert auch eine kleine Reduktion der Rentierherde nichts am Schrumpfen der Flechten – es sind ja noch immer zu viele Rentiere vorhanden. Allerdings geht dann dieses Schrumpfen etwas langsamer vor sich – vgl. dazu in Abb. 5.21. das unterschiedliche Flechtenniveau zum Zeitpunkt  $t_1$  für eine unveränderte Rentierzahl ( $N_0$ ) und eine verkleinerte Rentierherde ( $N_1$ ). Gerade diese Verlangsamung des Schrumpfens kann aber leicht unbemerkt bleiben. Als nun die Testpersonen merkten, dass die Herde für den derzeitigen Flechtenbestand zu groß war, reduzierten sie die Herde – mit der (durch das statische Modell hervorgerufenen) Erwartung, der Flechtenbestand würde sich dadurch vergrößern. Stattdessen verkleinerte er sich trotz dieser Maßnahme (da die Reduktion der Herde zu gering war) weiterhin, allerdings etwas langsamer als zuvor. MOXNES berichtet, dass einige der Testpersonen durch dieses scheinbar widersinnige Verhalten derart verwirrt wurden, dass sie ein alternatives statisches Modell annahmen. In diesem führt eine Vergrößerung der Rentierherde zu einer Vermehrung der Flechten...

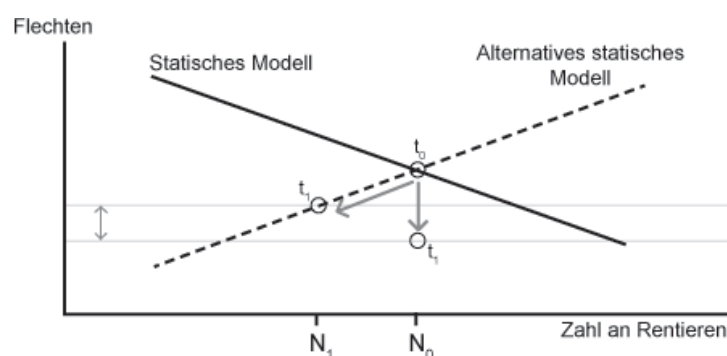


Abb. 5.21. (nach MOXNES 1998, verändert)

Für ein richtiges Ressourcenmanagement benötigt man hingegen ein dynamisches mentales Modell, welches das Zusammenspiel der beiden Bestandsgrößen berücksichtigt (vgl. Abb. 5.22.). Ein solches sieht nicht den Bestand an Flechten als entscheidende Variable, sondern deren Nettoveränderung, d.h. den Nettofluss der Flechten. Wann immer die Rentierpopulation größer als der Gleichgewichtswert ( $N_E$ ) ist, ist der Verlust an Flechten durch Fressen größer als der Nachwuchs an Flechten und der Nettofluss somit negativ. Verkleinert man nun die Herde ein wenig (z.B. von  $N_0$  auf  $N_1$ ), dann bleibt der Nettofluss zwar negativ, wird jedoch auch etwas kleiner. Daran erkennt man, dass die Herde nach wie vor zu groß und eine weitere Reduktion notwendig ist. Bei der Herdengröße  $N_2$  hingegen, ist der Nettofluss positiv – es werden weniger Flechten gefressen, als nachwachsen. Man kann die Rentierherde daher sich gefahrlos etwas vergrößern lassen. In Abb. 5.23. ist die resultierende Bestandsentwicklung der Flechten für die einzelnen Szenarien dargestellt.

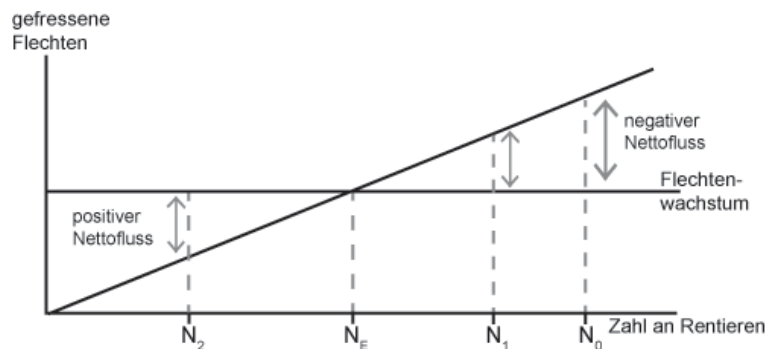


Abb. 5.22. (nach MOXNES 1998, verändert)

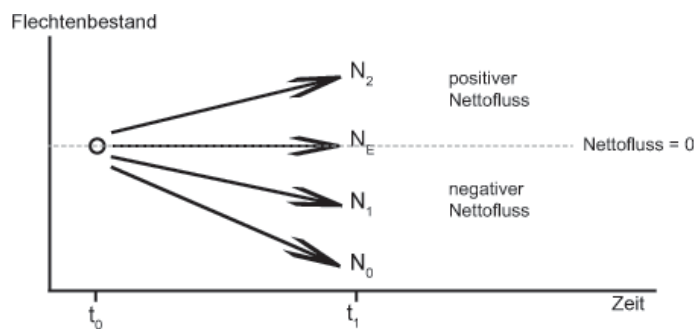


Abb. 5.23.

Das Management eines Bestandes ist daher, obwohl wir es ständig bewusst oder unbewusst vollführen, keine triviale Aufgabe. Speziell im wirtschaftlichen Kontext des Supply Chain Managements kann die große Vernetztheit des Systems und/oder eine strukturelle Zeitverzögerung auch bei rationalem und kostenoptimierendem Verhalten der Beteiligten eine Situation schaffen, welche für alle Involvierten relativ hohe Kosten verursacht. Für sich genommen scheint es banal, einen Bestand auf einem bestimmten Level zu halten und wenn er davon abweicht eine korrigierende Maßnahme zu treffen. Wie gesehen ist dem aber nicht so. Sogar wenn man selbst die *einzig*e in das System aktiv eingreifende Person ist und es sich beim Bestand um einen von selbst nachwachsenden Rohstoff handelt, kann eine

falsche Auffassung des Zusammenhangs zwischen Bestands- und Flussgrößen für ein Scheitern des Vorhabens sorgen. Ein gutes Management eines solchen Bestandes setzt daher unbedingt ein Verständnis dieser beiden Größen voraus. Es gilt die Flussgrößen und den Nettofluss eines Bestandes zu betrachten, will man die Wirkung zweier Bestandsgrößen aufeinander voraussagen.

Im nun folgenden Kapitel wird ersichtlich werden, dass wir davon noch sehr weit entfernt sind. Die beschriebenen Untersuchungen werden u.a. zeigen, dass bereits bei einem einzigen Bestand und nur einem einzigen Zufluss die Fähigkeit von Menschen den Verlauf dieses einen Bestandes vorherzusagen sehr beschränkt ist. Unter diesem Hintergrund scheint es verständlich, dass im Falle des Ressourcenmanagements mit seinen mindestens zwei (in der Realität noch sehr viel mehr) Variablen selbst professionellen Entscheidungsträgern des Öfteren Handlungsfehler und Missmanagement unterlaufen.

Ich hoffe jedoch, dass durch die umfassende theoretische Betrachtung von Stocks und Flows in diesem und dem vorangegangenen Kapitel, der Leser für die Sachverhalte des Stock-Flow-Thinkings sensibilisiert wurde und dadurch eventuell schon jetzt auch verbesserte mentale Modelle von solchen Situationen besitzt. Der beste Indikator dafür wäre, wenn der Leser bei der Lektüre der im nun folgenden Kapitel teilweise sehr detailliert beschriebenen Aufgabenstellungen spontan selbst auf die richtigen Lösungen kommen würde.

## 6. Untersuchungen zu Stock-Flow-Thinking

In diesem Kapitel sollen einige Untersuchungen beschrieben und vorgestellt werden, welche sich bewusst mit dem Thema bzw. der Problematik von Bestands- und Flussgrößen, d.h. unterschiedlichen Aspekten des Stock-Flow-Thinkings beschäftigen. Speziell die Untersuchung von BOOTH-SWEENEY/STERMAN (2000) war dabei richtungsweisend und wird daher auch etwas genauer beschrieben als es vielleicht notwendig wäre. Da es jedoch ein Teilziel der vorliegenden Arbeit ist, einen umfassenden Überblick über den aktuellen Stand des Forschungsbereiches des Stock-Flow-Thinkings zu geben, sodass man nicht mehr unbedingt auf andere Veröffentlichungen zurückgreifen muss, um über das Gebiet informiert zu sein, werden auch die restlichen Untersuchungen relativ ausführlich beschrieben.

Abgesehen von den hier beschriebenen Publikationen, existieren auch andere wissenschaftliche Arbeiten in denen das Stock-Flow-Thinking eine (mehr oder weniger wichtige) Rolle spielt. Da diese sich aber nicht vorrangig mit dieser Thematik beschäftigen, werden sie in diesem Kapitel nicht näher behandelt und nur an geeigneter Stelle in den Überblick bzw. die Gesamtarbeit eingeflochten.

### 6.1. BOOTH-SWEENEY/STERMAN (2000): Bathtub Dynamics

Es war im Jahr 2000 als Linda BOOTH-SWEENEY, Doktorandin an der Harvard Graduate School of Education und John D. STERMAN, Standish Professor of Management und Direktor der System Dynamics Group an der MIT Sloan School of Management, eine Untersuchung über das Verständnis von allgemeinen systemwissenschaftlichen Konzepten, wie Rückkoppelungen (Feedback), Zeitverzögerungen und Bestands- und Flussgrößen durchführten. Sie hatten zuvor bemerkt, dass selbst Abgänger einer Eliteuniversität wie dem MIT nur ein geringes Verständnis dieser relativ einfachen Grundkonzepte aufweisen und gingen daran, dies empirisch zu überprüfen. Mit dieser Untersuchung, welche im Rahmen der jährlichen Konferenz der System Dynamics Society im Jahr 2000 in Bergen, Norwegen dem verblüfften Publikum erstmals vorgestellt wurde, legten sie nicht nur den Grundstein für diverse Nachfolgeuntersuchungen, sondern auch jenen für die vorliegende Arbeit.

BOOTH-SWEENEY und STERMAN überprüften das Verständnis grundlegender Systemkonzepte an hoch ausgebildeten Probanden, welche allerdings zuvor eher nur am Rande mit Systemdenken und Systemdynamik konfrontiert waren. Die 150 Testpersonen, allesamt Studenten an der MIT Sloan School of Management, verfügten über weit überdurchschnittliches mathematisches Wissen und eine ausgezeichnete Allgemeinbildung. BOOTH-SWEENEY und STERMAN hatten schon vor ihrer Untersuchung den Verdacht auf

starke Defizite im Verständnis der Probanden für systemwissenschaftliche Sachverhalte, die schlechten Ergebnisse der Untersuchung überraschten jedoch selbst sie.

Im Rahmen der Untersuchung stellten die Autoren die Probanden vor zwei Problemstellungen. Die erste, genannt Bath Tub / Cash Flow (BT/CF) Task, zielte auf das allgemeine Verständnis von Bestands- und Flussgrößen ab, indem man den zeitlichen Verlauf eines Bestandes bei gegebenem Zu- und Abfluss bestimmen musste. Die zweite Problemstellung, genannt Manufacturing Case (MC), versuchte die Kenntnis von Beständen und Flüssen in Zusammenhang mit Zeitverzögerungen und Rückkoppelung zu untersuchen.

### 6.1.1. Bath Tub / Cash Flow (BT/CF)

Diese Aufgabenstellung wurde in zwei unterschiedlichen Formen und auch mit zwei alternativen Deckgeschichten verwendet: Bath Tub (BT): zu- und abfließendes Wasser in einer Badewanne bzw. Cash Flow (CF): zu- und abfließendes Geld eines Bargeldguthabens einer Firma. Diese Deckgeschichten sollten den Aufgaben einen gewissen Realitätsbezug geben. In beiden Fällen waren der Zu- und Abfluss des Bestandes (= Menge an Wasser in der Badewanne bzw. Geld am Firmenkonto) graphisch gegeben. Es galt daraus den zeitlichen Verlauf des Bestandes zu ermitteln – d.h. die Probanden mussten dazu graphisch integrieren (vgl. Kap. 5.1.):

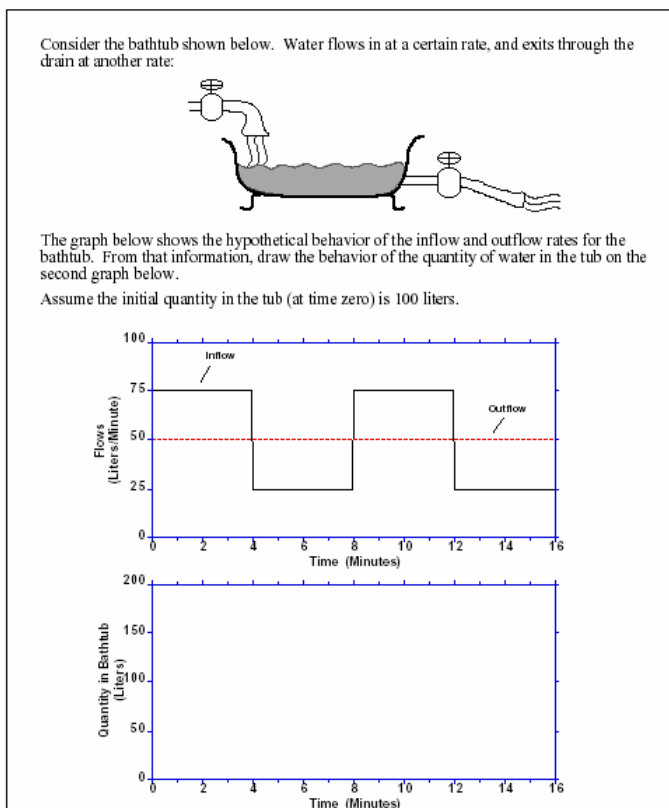


Abb. 6.1. (aus BOOTH-SWEENEY/STERMAN 2000)

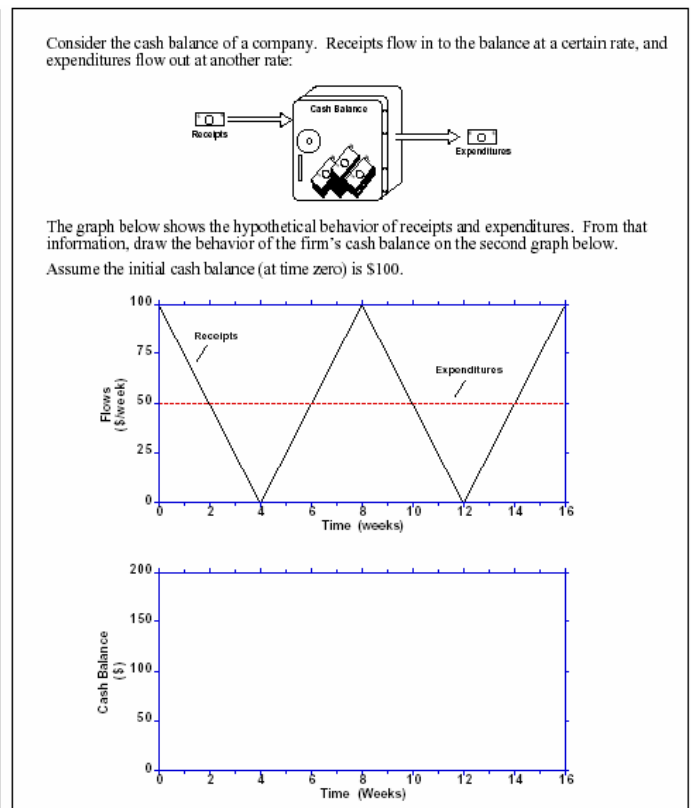


Abb. 6.2. (aus BOOTH-SWEENEY/STERMAN 2000)

BOOTH-SWEENEY/STERMAN testeten zwei unterschiedliche Arten von Zuflüssen, eine quadratisch geformte „Welle“ (vgl. Abb. 6.1.) und eine sägezahnförmige Welle (Abb. 6.2.). In beiden Fällen wiederholt sich die Form des Zuflusses nach einer Auf- und einer Abwärtsbewegung, sodass sich die Lösung der Gesamtaufgabe bereits nach der Hälfte ergibt.<sup>40</sup> Es ist solcherart eine äußerst einfach gestaltete Aufgabenstellung. Keinerlei Rückkoppelungen oder komplizierte Zusammenhänge sind enthalten, und gewählte Zahlen sollen die Handhabung erleichtern und nur eine einzige sich verändernde Größe ist vorhanden. Die Auswirkung dieser Veränderung soll dargestellt werden.

Im Falle der quadratisch geformten Welle (in der Folge als „Aufgabe A“ bezeichnet) sind Zu- und Abfluss in jedem Teilsegment konstant, der Bestand muss demnach in diesem Teilsegment linear zu- oder abnehmen. In Teilsegment 1 ( $0 < t \leq 4$ ) fließen in jeder Minute 25 Liter Wasser in die Badewanne ( $75-50=25$ ). Innerhalb von 4 Minuten ergibt dies  $25 \times 4 = 100$  Liter Wasser, welche dem Anfangsbestand von 100 Litern hinzugefügt werden, die Wassermenge steigt daher bis zu Minute 4 auf 200 Liter. Durch den konstanten Nettofluss ergibt sich eine lineare Änderung des Bestandes, demnach eine gerade Linie.

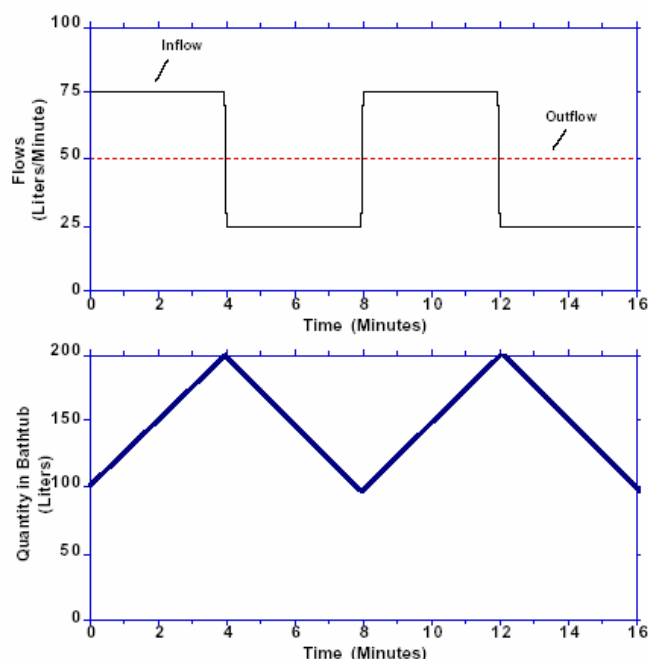


Abb. 6.3. (aus BOOTH-SWEENEY/STERMAN, 2000; verändert)

In Teilsegment 2 ( $4 < t \leq 8$ ) verkehrt sich der Nettofluss ins Negative: 25 Liter Zufluss und 50 Liter Abfluss bedeuten pro Minute netto einen Abfluss von 25 Litern, was wiederum innerhalb von 4 Minuten 100 Liter an Nettoabfluss ergibt. Der Wasserbestand erreicht nach acht Minuten also wieder sein ursprüngliches Niveau von 100 Litern. Der Rest der

<sup>40</sup> BOOTH-SWEENEY/STERMAN haben im Rahmen ihrer Erhebung beide Wellenformen mit beiden Coverstories (BT und CF) kombiniert. Der Einfachheit wegen bleibe ich bei der Beschreibung beider Wellenarten bei der Coverstory Badewanne, auch wenn in Abb. 6.2. der Text der Coverstory Firmenkonto dargestellt ist. Außerdem scheint im Falle eines Geldkontos ein sich stetig und nicht diskret ändernder Zufluss nur schwer vorstellbar und realitätsfremd, was bei einer Badewanne nicht der Fall ist.

Aufgabenstellung ist durch die Symmetrie des Zuflusses eine Wiederholung dieses ersten Teiles. Es ergibt sich die Abbildung 6.3. abgebildete richtige Lösung. Sehr schön kann man darin auch erkennen, wie sich an jenen Stellen, an denen der Nettofluss vom positiven in den negativen Bereich bzw. umgekehrt übertritt, lokale Extremwerte im Bestand ausbilden.

Die sägezahnförmige Welle (Abb. 6.2. und in der Folge als „Aufgabe B“ bezeichnet) stellt an die Testperson eine höhere Anforderung. Sie muss erkennen, dass sich bereits der Zufluss linear ändert und der Bestand sich demnach in Form eines quadratischen Wachstums (parabelförmig) entwickeln muss. Im ersten Segment ( $0 < t \leq 2$ ) entspricht dem Nettofluss die Fläche von 50 Einheiten, welche sich mit Hilfe der einfachen Flächenformel eines Dreiecks bestimmen lässt ( $50 \times 2 \times 0,5 = 50$ ). Der Bestand nimmt also (trotz sinkendem Zufluss!) bis zu Minute 2 um 50 Liter zu, er beträgt dann 150 Liter. In Segment 2 ( $2 < t \leq 6$ ) lässt sich der Nettofluss ebenfalls sehr leicht berechnen. Er beträgt  $50 \times 4 \times 0,5 = 100$  Liter. In diesem Zeitraum müssen demnach 100 Liter Wasser aus der Badewanne abfließen, wodurch sich zu Minute 6 ein Bestand von 50 Litern ergibt. Ab diesem Punkt lässt sich der weitere Verlauf des Bestandes durch dieselbe eben dargestellte Vorgangsweise bestimmen. Durch den sich linear ändernden Zufluss müssen die errechneten Extrempunkte nun parabelförmig (gemäß einer quadratischen Funktion) und nicht etwa linear miteinander verbunden werden und man erhält folgende richtige Lösung:

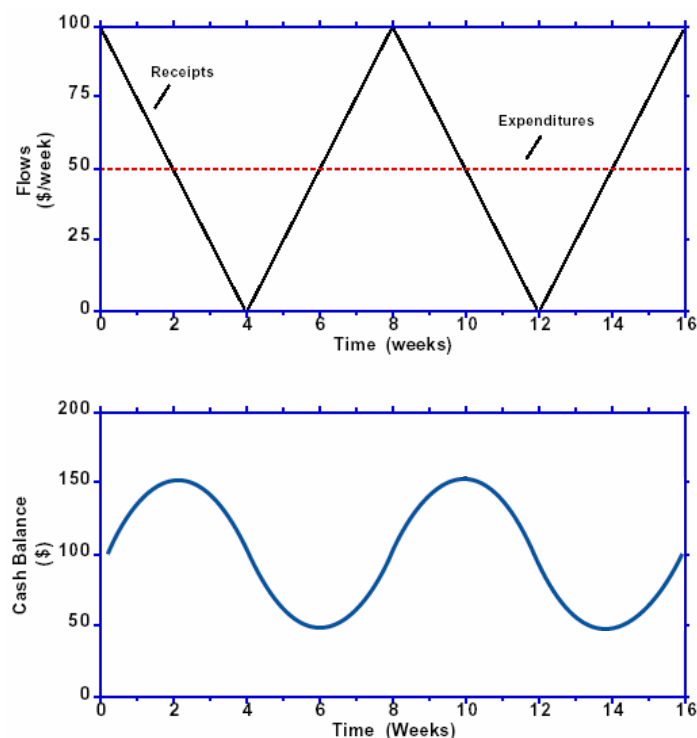


Abb. 6.4. (aus BOOTH-SWEENEY/STERMAN, 2000; verändert)

Erneut lässt sich sehr schön beobachten, wie sich überall dort, wo der Nettofluss den Wert Null überschreitet, lokale Extremwerte im Bestand ausbilden. Solange dieser Wert aber noch

nicht erreicht ist, muss der Bestand natürlich auch noch weiterwachsen bzw. schrumpfen, ganz egal ob der Nettofluss steigt oder fällt. Durch dieses Steigen oder Fallen, das durch die lineare Veränderung hervorgerufen wird, ergibt sich notwendigerweise ein asymptotisches Wachstum hin zu den lokalen Extremwerten.

Diese Fragestellung besitzt ohne Zweifel einen höheren Schwierigkeitsgrad als Aufgabe A, ist aber dennoch ebenfalls relativ simpel zu lösen. Man benötigt lediglich das Wissen, wie man die Fläche eines Dreiecks berechnet (mathematisches Grundwissen) und man muss verstehen, dass ein abnehmender Nettozufluss einen langsamer zunehmenden Bestand zur Folge hat, genauso wie ein sich beschleunigender Nettozufluss einen schneller zunehmenden bewirken muss. Der Stock ändert sich also gemäß einer quadratischen Funktion. Mit diesem „Wissen“ oder besser gesagt Verständnis ausgestattet sollte auch Aufgabe B nur geringe Probleme bereiten. So zumindest die Annahme.

Die Ergebnisse jedoch widerlegten diese Annahme deutlich. Man beachte nochmals die weit überdurchschnittliche (Aus-)Bildung der Testpersonen: Größtenteils handelte es sich um MBA-Studenten des MIT, aber auch um Studierende anderer Studienrichtungen, Doktoranden und einige Mitinskribenten anderer Universitäten, in erster Linie der Universität Harvard. Zur Beurteilung kreierten BOOTH-SWEENEY/STERMAN einige Kriterien, anhand deren sie die jeweiligen Antworten auswerten konnten. In Abb. 6.5. sind die genauen Kriterien für Aufgabe A aufgelistet. Die erste Spalte neben den Kriterien gibt den Durchschnittswert der Testpersonen an, Spalte zwei (BT) und drei (CF) stehen für die jeweiligen Coverstories. Man kann schnell erkennen, dass die Coverstory „Badewanne“ (BT) zu durchgehend besseren Erfolgsergebnissen (signifikant bei  $t=2,94$ ;  $p<0,004$ ) führte. Meiner Meinung nach liegt der Grund dafür in der größeren Realitätsnähe und Nachvollziehbarkeit der Deckgeschichte. Der Durchschnittswert aller Kriterien und beider Coverstories liegt bei 77%. Dies bedeutet jedoch nicht, dass 77% aller Studenten die Aufgaben richtig lösen konnten,<sup>41</sup> leider führen BOOTH-SWEENEY/STERMAN diese Anzahl der vollkommen richtigen Lösungen nicht an. Bei der relativen Einfachheit der Fragestellungen wäre aber genau diese Zahl interessant, da man – speziell von den hier teilgenommenen Probanden – eine vollkommen richtige Lösung erwarten könnte. Bereits leichte Fehler deuten auf ein gewisses Unverständnis des Sachverhaltes hin.

---

<sup>41</sup> So ist es etwa theoretisch möglich, dass von 100 Testpersonen alle eine leicht falsche Lösung finden, bspw. einen Graphen mit diskontinuierlichen Sprüngen, was eine Nichterfüllung des Kriteriums 4 bedeuten würde. Bei den sieben hier verwendeten Kriterien und bei ansonsten einwandfreien Graphen ergäbe sich somit ein Durchschnittswert von 0,86 (=86 %) obwohl keine einzige Testperson die richtige Lösung gefunden hat. Der angegebene Wert von 77% lässt also darauf schließen, dass weit weniger als 77% der Probanden die Aufgaben vollkommen richtig lösen konnten.

	<b>Criterion</b>	<b>Ave</b>	<b>BT</b>	<b>CF</b>	<b><math>\chi^2</math></b>	<b>p</b>
1	When the inflow exceeds the outflow, the stock is rising.	0.80	0.87	0.72	0.05	0.83
2	When the outflow exceeds the inflow, the stock is falling.	0.80	0.86	0.73	0.83	0.36
3	The peaks and troughs of the stock occur when the net flow crosses zero (i.e., at t = 4, 8, 12, 16).	0.86	0.89	0.81	0.41	0.52
4	The stock should not show any discontinuous jumps (it is continuous)	0.89	0.96	0.82	0.02	0.89
5	During each segment the net flow is constant so the stock must be rising (falling) linearly.	0.78	0.84	0.72	1.61	0.21
6	The slope of the stock during each segment is the net rate (i.e., $\pm 25$ units/time period)	0.66	0.73	0.58	1.57	0.21
7	The quantity added to (removed from) the stock during each segment is the area enclosed by the net rate (i.e., 25 units/time period * 4 time periods = 100 units, so the stock peaks at 200 units and falls to a minimum of 100 units).	0.63	0.68	0.56	0.71	0.40
	Mean for all items	0.77	0.83	0.69	$t = 2.94$	0.004

Abb. 6.5. (aus BOOTH-SWEENEY/STERMAN, 2000)

Nichtsdestotrotz zeigen die einzelnen Kriterien erstaunliche Sachverhalte auf. Nicht weniger als ein Fünftel der Teilnehmer glaubte, dass der Bestand nicht steigt, wenn der Zufluss größer als der Abfluss war bzw. nicht sinkt, wenn er kleiner war als der Abfluss. Beinahe zwei Fünftel (37%) waren nicht in der Lage zu erkennen, dass die Veränderung des Bestandes in jedem Segment genau der Größe des Nettoflusses in diesem Segment entspricht/entsprechen muss, ein Sachverhalt der mit etwas Abstand betrachtet vollkommen selbstverständlich erscheint. Bei diesen beiden eben erwähnten Gegebenheiten handelt es sich jedoch um die wohl grundlegendsten Konzepte von Akkumulation, welche jedem bekannt sein sollten: Wenn ein Zufluss größer ist als ein Abfluss, dann steigt der Bestand und ist der Abfluss größer als der Zufluss, fällt er – ganz gleich ob es sich bei dem Bestand um Wasser in einer Badewanne, Packungen Milch in einem Kühlschrank oder Kleiderstücke in einem Kleiderkasten handelt. Denn wenn jemand jede Woche fünf Packungen Milch kauft, aber stets nur drei Packungen pro Woche verbraucht, dann wird niemand bestreiten, dass sich der Kühlschrank jede Woche um genau eine dem Nettofluss entsprechende Menge an Packungen (2 Stück pro Woche) erhöht. Die Frage ist also, warum bei den vorliegenden Aufgabenstellungen, deren Schwierigkeitsgrad nicht viel höher als jener der Geschichte der Milchpackungen ist, nur sehr mangelhafte Ergebnisse zu Tage treten. In Anhang 1 finden sich dazu für Aufgabe A einige der Lösungen der Testpersonen.

Wie auf Grund des höheren Schwierigkeitsgrades zu erwarten war, führte Aufgabe B (sägezahnförmiger Zufluss) zu schlechteren Ergebnissen als Aufgabe A. Auch für die Auswertung dieser Aufgabenstellung wählten die Autoren eine Reihe von Kriterien, um die Graphen bewerten bzw. interpretieren zu können und die genauen Defizite oder Denkfehler zu lokalisieren. Abbildung 6.6. stellt die Originaltabelle der Autoren dar. Der signifikante Unterschied aus Aufgabe A zwischen den beiden Coverstories ist in Aufgabe B nicht mehr nachweisbar. Die Durchschnittsleistung der Testpersonen betrug bei dieser Fragestellung

48%,<sup>42</sup> wobei es auffällig ist, dass bei den zu Aufgabe A vergleichbaren Kriterien die Leistung deutlich abfällt. Ein größerer (kleinerer) Zu- als Abfluss ergab nur noch bei 47% (44%) auch einen steigenden (fallenden) Bestand, verglichen mit immerhin 80% in Aufgabe A. Auch während 63% in Aufgabe A noch die Größe der Veränderung des Bestandes als jene des Nettoflusses erkannten, waren hier nur noch 37% dazu in der Lage. Einzig betreffend der Diskontinuität der Graphen (Kriterium 4) ist bei Aufgabe B eine Verbesserung zu bemerken (99% zu 89%). Auffällig ist jedoch, dass genau hier auch der Zufluss keine diskontinuierlichen Sprünge enthält, während das bei der quadratischen Welle sehr wohl der Fall war. Einige Probanden unterlagen demnach vermutlich dem Irrtum, der Bestand müsse denselben qualitativen Verlauf besitzen wie der Zufluss. Ein Verdacht welcher sich in Nachfolgeuntersuchungen noch bestätigen sollte. In Anhang 2 sind einige Lösungen der Vpn ersichtlich.

	Criterion	Ave	BT	CF	$\chi^2$	p
1	When the inflow exceeds the outflow, the stock is rising.	0.47	0.46	0.48	0.05	0.83
2	When the outflow exceeds the inflow, the stock is falling.	0.44	0.41	0.48	0.83	0.36
3	The peaks and troughs of the stock occur when the net flow crosses zero (i.e., at $t = 2, 6, 10, 14$ ).	0.40	0.41	0.39	0.02	0.89
4	The stock should not show any discontinuous jumps (it is continuous)	0.99	0.99	0.99	0.00	1.00
5	The slope of the stock at any time is the net rate. Therefore	0.28	0.25	0.30	0.41	0.52
	a. When the net flow is positive and falling, the stock is rising at a diminishing rate ( $0 < t \leq 2$ ; $8 < t \leq 10$ ).					
	b. When the net flow is negative and falling, the stock is falling at an increasing rate ( $2 < t \leq 4$ ; $10 < t \leq 12$ ).					
	c. When the net flow is negative and rising, the stock is falling at a decreasing rate ( $4 < t \leq 6$ ; $12 < t \leq 14$ ).					
	d. When the net flow is positive and rising, the stock is rising at an increasing rate ( $6 < t \leq 8$ ; $14 < t \leq 16$ ).					
6	The slope of the stock when the net rate is at its maximum is 50 units/period ( $t = 0, 8, 16$ ).	0.47	0.42	0.52	1.60	0.21
7	The slope of the stock when the net rate is at its minimum is -50 units/period ( $t = 4, 12$ ).	0.45	0.41	0.51	1.60	0.21
8	The quantity added to (removed from) the stock during each segment of 2 periods is the area enclosed by the net rate (i.e., a triangle with area $\pm(1/2) * 50$ units/period * 2 periods = $\pm 50$ units). The stock therefore peaks at 150 units and reaches a minimum of 50 units.	0.37	0.34	0.41	0.71	0.40
	Mean for all items	0.48	0.46	0.51	$t = 0.86$	0.39

Abb. 6.6. (aus BOOTH-SWEENEY/STERMAN, 2000)

### 6.1.2. The Manufacturing Case (MC)

Diese Aufgabenstellung unterscheidet sich von den vorangegangenen deutlich. Während in den BT/CF Fragestellungen in erster Linie die Grundprinzipien von Akkumulation abgetestet wurden, begehen hier die Autoren den Versuch, auch eine einfache negative Rückkoppelung und eine Zeitverzögerung in den Test mit einzubeziehen und das Verständnis von Bestands-

<sup>42</sup> Wiederum dürfte die Zahl der vollkommen richtigen Lösungen weit unter 48% liegen, unter allen Umständen beträgt sie maximal 28%, da wie in Abb. 5.6. ersichtlich, Kriterium 5 nur von 28% der Testpersonen erfüllt wurde.

und Flussgrößen unter diesen Aspekten zu überprüfen. Negative Rückkoppelungen mit Zeitverzögerung stellen in Systemen oftmals eine Quelle von Instabilität und Oszillation dar (vgl. Kap. 5.3.4. und 5.3.5.). Man denke nur an das viel zitierte Beispiel einer alten Dusche, bei der man versucht eine bestimmte Temperatur einzustellen oder an das Beispiel einer Räuber- und einer Beutepopulation, deren Bestände durch die Zeitverzögerung beim Wachstum in eine beständige Oszillation geraten. Eine große Zahl von Autoren hat zu diesem Thema bereits empirische Untersuchungen durchgeführt, u.a. etwa das Kühlhaus- oder das Schmetterlingsexperiment Dietrich DÖRNER (1989) oder die Untersuchung einer simulierten Fuchs- und Hasenpopulation von Eva JENSEN (JENSEN 2003). Dennoch sollte das in der vorliegenden MC – Aufgabenstellung geschilderte System keinesfalls in Oszillation geraten.

Es handelt sich dabei um eine äußerst einfache „Stock Management“ – Aufgabe (vgl. Kap. 5.4.). Damit ist der auch in der Wirklichkeit sehr oft verlangte Auftrag gemeint, einen Bestand auf einem bestimmten Niveau zu halten – ihn bzw. seine Größe zu managen. Der Bestand verringert sich durch Verlust, Verkauf oder Verbrauch und muss über die Regulierung des Zuflusses auf einem gewissen Level gehalten werden: Lagerleiter müssen bspw. tagtäglich dafür sorgen, dass sie eine bestimmte Anzahl von Artikeln vorrätig haben, Tankstellenbetreiber benötigen immer eine bestimmte Treibstoffmenge auf Lager und Personalchefs sind dafür verantwortlich, die Zahl der Beschäftigten in ihrem Unternehmen auf jenem Level zu halten, das für die Absolvierung aller Tätigkeiten notwendig ist. Meist besteht eine zeitliche Verzögerung zwischen Aktion und dem darauf folgenden Effekt: So kommt der Tankwagenlaster mit dem bestellten Treibstoff nicht in dem Moment in dem er bestellt wird, sondern eben erst einige Tage später. Auch die Produktion oder die Bestellung der Artikel des Lagerleiters kann nicht in Nullzeit durchgeführt werden, sondern benötigt natürlich einige Zeit, genauso wie die Einstellung neuer Mitarbeiter Zeit benötigt. Dennoch handelt es sich auch beim Konstanthalten eines Bestandes - wie auch beim Füllen der Badewanne - um eine durchaus alltägliche und bekannte Tätigkeit.

Die MC - Aufgabenstellung ist in Abb. 6.7. dargestellt. Sie handelt von einer beliebigen Produktionsfirma, welche zur Erfüllung aller eingehenden Bestellungen stets einen Bestand von 50.000 Produkten vorrätig haben möchte. Die wöchentlichen Bestellungen ihrer Kunden und auch die Produktionsrate betragen seit jeher 10.000 Stück, Erstere steigen nun aber plötzlich um 10% auf 11.000 Stück und werden auch auf lange Sicht dort bleiben. Die Produktion hingegen bleibt vorerst bei 10.000 Stück, die Firma möchte aber weiterhin einen Bestand von 50.000 Stück auf Lager haben. Eine Anpassung der Produktion (Erhöhung bzw. Senkung) benötigt jedoch vier Wochen Vorlaufzeit. Die Vpn sollten nun durch eine Veränderung der Produktion den gewünschten Vorrat von 50.000 Stück wieder herstellen

und ihre Lösung graphisch festhalten. Zu diesem Zweck mussten sie in Graphik 1 (siehe Abb. 6.7.), in welcher die Bestellungen (order rate) schon eingezeichnet waren, die Produktionsrate skizzieren. Nur ein Teil der Probanden bekam zusätzlich Graphik 2 präsentiert und musste dort den Verlauf des Lagerbestandes einzeichnen.

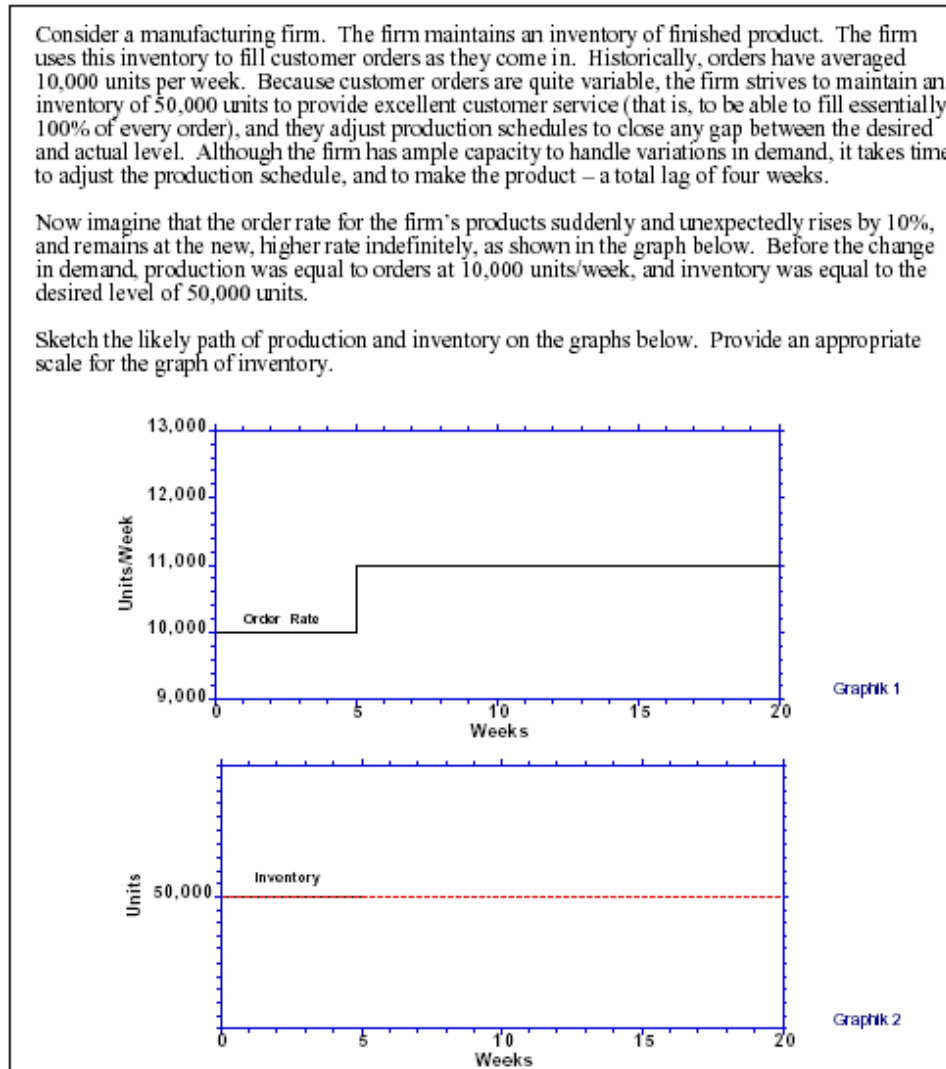


Abb. 6.7. (aus BOOTH-SWEENEY/STERMAN, 2000)

Zu dieser Aufgabe existiert nicht *eine* richtige Lösung, sondern vielmehr *mehrere* mögliche richtige Lösungen, allen ist jedoch Folgendes gemeinsam: Das Unternehmen muss die Produktionsrate steigern, um erstens der höheren Nachfrage gerecht zu werden und zweitens das Lager wieder auf die gewünschten 50.000 Einheiten aufzufüllen. Dazu muss die Produktion verständlicherweise die Zahl der Bestellungen sogar noch übersteigen, denn anders ist ein Auffüllen des Lagers nicht möglich. Eine Steigerung ist durch die 4-wöchige Verzögerung jedoch frühestens in Woche 9 bewerkstelligbar, in der Zwischenzeit werden jede Woche um 1.000 Einheiten mehr ausgeliefert als produziert – der Bestand schrumpft. Die Produktion muss also ab Woche 9 über einen (selbst wählbaren) Zeitraum genau so viel höher sein, dass der Verlust der Zwischenzeit (4 Wochen lang jeweils 1.000 Stück = 4.000

Stück) wieder aufgeholt wird. Sie kann also entweder 4 Wochen lang 12.000 Stück betragen, 2 Wochen lang 13.000 Stück, eine Woche lang 15.000 Stück sein, etc. In jedem Fall muss, wie in Abb. 6.8. dargestellt, die Überschussfläche der Produktionsrate jener des Verlustes zwischen Woche 5 und 9 entsprechen. Anschließend muss sich die Produktionsrate auf das Level der Bestellungen, d.h. 11.000 Stück begeben, damit keine weiteren Überschüsse oder Verluste mehr vorkommen.

Jene Gruppe der Probanden, welche zusätzlich den Verlauf des Bestandes in Graphik 2 zu skizzieren hatte, musste lediglich erkennen, dass der Lagerstand von 50.000 Stück zwischen Woche 5 und Woche 9 um die eben erwähnten 1.000 Stück pro Woche sinkt und dies in Graphik 2 einzeichnen. Je nach Art der eigenen Lösung musste sich der Lagerstand anschließend unterschiedlich schnell wieder dem Betrag von 50.000 Stück nähern. Die richtige Antwort ist also denkbar einfach, eine mögliche Lösung ist in Abb. 6.8. dargestellt.

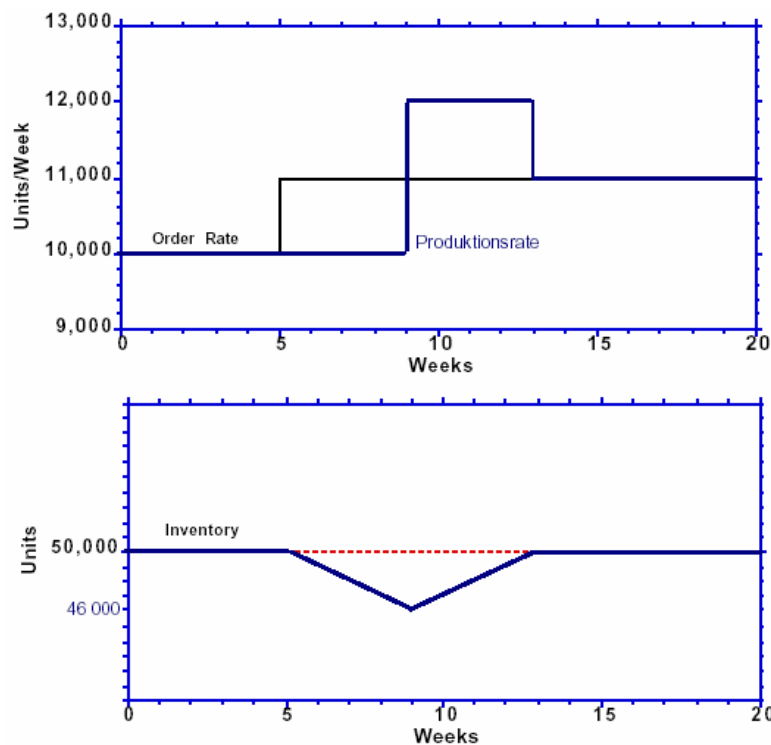


Abb. 6.8. (aus BOOTH-SWEENEY/STERMAN, 2000; verändert)

Für die Auswertung dieser Aufgabe erstellten die Autoren wie schon für die BT/CF Fragestellungen eine kleinere Anzahl von Kriterien. Diese müssen an dieser Stelle jedoch nicht ausführlich behandelt werden, ich beschränke mich daher darauf, die wesentlichen Ergebnisse aufzuzählen:

- Durchschnittswert aller Kriterien: 41%<sup>43</sup>

<sup>43</sup> Erneut bedeutet dies nicht, dass 41% der Testpersonen die Aufgabe lösen konnten. Die tatsächliche Zahl lässt sich indirekt aus dem Text als jedenfalls  $\leq 11\%$  beziffern.

- 56% der Testpersonen zeigten keine überschüssige Produktionsrate. Sie ließen den Lagerstand also nicht wieder auf das gewünschte Maß steigen und scheinen die Aufgabenstellung nicht verstanden zu haben.
- Insgesamt 89% (!) skizzierten Produktionsraten, die entweder nie über die Bestellungen stiegen (siehe voriger Absatz) oder deren Überschuss nicht dem zwischenzeitlichen Verlust von 4.000 Stück entsprach.
- 40% zeichneten eine oszillierende Produktionsrate.
- Bei 47% (!) der Testpersonen startete, trotz genauer Erwähnung in der Angabe, die Produktionsrate nicht im Gleichgewicht mit den Bestellungen, d.h. bei 10.000 Stück.
- Von jenen Testpersonen, welche zusätzlich den Lagerbestand in Graphik 2 einzeichnen hatten, skizzierten lediglich 68% zwischen Woche 5 und 9 einen fallenden Bestand (da Bestellungen > Produktionsrate), nur 56% ließen den Bestand wie gefordert wieder auf 50.000 Stück steigen und 90% (!) zeichneten Bestandsverläufe, welche nicht mit den von ihnen skizzierten Produktionsraten übereinstimmten.
- Die Ergebnisse der Probanden dieser Gruppe (welche also zusätzlich Graphik 2 erhielten und darin den Lagerbestand zeichnen mussten) waren zur Überraschung der Autoren, welche das Gegenteil vermutet hatten, signifikant schlechter als jener, die das nicht zu tun hatten. BOOTH-SWEENEY/STERMAN sehen einen möglichen Grund dafür darin, dass diese Gruppe in derselben Zeit mehr zu tun hatte. Andererseits bietet die Betrachtung des Bestandes deutlich mehr Einblick in das System und sollte daher die Lösung der Aufgabe eigentlich vereinfachen.

Bei der Beurteilung der Bedeutung dieser Ergebnisse muss man sich vor Augen halten, dass es sich erstens um eine ohne Zweifel relativ simple Fragestellung handelt, zweitens um ein elementares Element des Supply Chain Management oder von Produktionen im Allgemeinen und drittens der Großteil der Testpersonen weitreichende Erfahrungen mit realen Systemen dieser Art hatte. Vor diesem Hintergrund erscheinen die Resultate der Untersuchung alarmierend.

### **6.1.3. Signifikante Zusammenhänge und Ergebnisse**

BOOTH-SWEENEY und STERMAN versuchten im Rahmen der Untersuchung auch herauszufinden, ob das schlechte Abschneiden ihrer Testpersonen mit Variablen wie Alter, Geschlecht, Ausbildung, demographischer Herkunft, Englisch als Muttersprache, etc. zusammenhing. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass eine höhere Ausbildung in Mathematik oder in Ingenieurwissenschaften nur teilweise leicht signifikant bessere Resultate bedingt. Alter und Englisch als Muttersprache spielten keine Rolle, sehr wohl hingegen das

Geschlecht. Männliche Probanden schnitten in allen Aufgaben besser ab als weibliche, ein Phänomen das uns später noch beschäftigen wird.

Im Falle des MC – Tests eröffnete sich darüber hinaus noch ein weiterer Zusammenhang: Testpersonen, welche Beer-Game – Erfahrung (vgl. Kap. 5.4.) hatten, neigten signifikant öfter dazu, einen (falschen) oszillierenden Graphen zu zeichnen als ihre nicht Beer-Game erfahrenen Kollegen (48% im Vergleich zu 35%). Dennoch schienen die restlichen 52% der Probanden mit Beer-Game – Erfahrung, welche also nicht eine falsche oszillierende Produktionsrate zeichneten, die Aufgabe sehr gut zu bewältigen, denn gesamt gesehen erreichte diese Gruppe bei dieser Aufgabe einen Durchschnittskriterienwert von 46%, wohingegen ihre Kollegen ohne Beer-Game – Erfahrung nur einen Wert von 33% zustande brachten.

BOOTH-SWEENEY/STERMAN konnten durch ihre Untersuchung zeigen, dass selbst hoch ausgebildete Menschen mit starkem mathematischem und technischem Hintergrundwissen über ein ungeahnt geringes Verständnis der grundlegendsten Prinzipien der SD verfügen. Im Besonderen bereiteten Bestands- und Flussgrößen an sich, aber auch in Kombination mit einer Zeitverzögerung und Rückkoppelung den Testpersonen erhebliche Schwierigkeiten. Wenn man bedenkt, dass Stocks und Flows ein absolut notwendiger und elementarer Teil der SD und aller systemdynamischer Modelle sind, aber auch in ganz alltäglichen Situationen sowie auch im Berufsleben der Testpersonen ständig vorkommen, muss man sich wohl dringend überlegen, woher diese Defizite kommen und wie man sie beseitigen kann. Denn in realen Situationen können Fehler wie sie hier von den Probanden begangen wurden, schwere und weitreichende Folgen haben.

Die Untersuchung konnte aufzeigen, dass

- fundamentale Beziehungen zwischen Bestands- und Flussgrößen nicht verstanden werden,
- v.a. eine Unterscheidung dieser Größen vielen Testpersonen äußerst schwer fällt,
- viele Testpersonen denken, dass ein Bestand denselben qualitativen Verlauf haben muss wie sein Zufluss,
- viele Testpersonen nicht erkennen, dass die Veränderung eines Bestandes stets exakt dem dazugehörigen Nettofluss entspricht
- selbst einfachste graphisch dargestellte Aufgabenstellungen hoch ausgebildeten Personen enorme Schwierigkeiten bereiten.

## **6.2. ZAHN/KAPMEIER (2001)**

Die beiden an der Universität Stuttgart tätigen Autoren Erich ZAHN und Florian KAPMEIER beschlossen nach dieser ersten Studie von BOOTH-SWEENEY/STERMAN (2000) die Stichprobe der Untersuchung zu erweitern und damit auf eine größere Zahl von Probanden auszudehnen. Sie wiederholten die Originalstudie 1:1 an Studierenden an der Universität Stuttgart (ZAHN/KAPMEIER 2001) und ermöglichten damit auch einen ersten Vergleich zwischen den (größtenteils) MIT-Studenten von BOOTH-SWEENEY/STERMAN und Studenten eines anderen Landes, im konkreten Fall Deutschland.

Betreffend der Aussagekraft der Ergebnisse der Untersuchung von ZAHN/KAPMEIER (2001) muss jedoch einschränkend die für eine empirische Untersuchung doch recht geringe Probandenzahl von nur 28 Personen (BT / CF Task) bzw. 32 Personen (MC Task) erwähnt werden. Die ursprüngliche Stichprobe von 150 Personen (BOOTH-SWEENEY/STERMAN) wurde damit nur sehr geringfügig erhöht, auch sind durch die geringe Teilnehmerzahl direkte Vergleiche zwischen den Ergebnissen der beiden Untersuchungen mit Vorsicht zu betrachten, da die richtige oder falsche Antwort einer einzelnen Testperson bei ZAHN/KAPMEIER bereits einen Unterschied von 3,1–3,57% ausmacht.

Bei den Probanden handelte es sich überwiegend (zu ca. 90%) um Wirtschafts- bzw. Managementstudenten die sich im dritten bis fünften Jahr ihres Studiums befanden. Darüber hinaus war mit 79% (BT/CF) bzw. 67% (MC) ein Überhang an männlichen Testpersonen vorhanden, was insbesondere in Hinblick auf das von BOOTH-SWEENEY/STERMAN (2000) beobachtete bessere Abschneiden von männlichen Probanden eine Rolle spielt. Alle Probanden waren Teilnehmer einer einführenden System Dynamics Lehrveranstaltung, im Rahmen derer die Untersuchung auch durchgeführt wurde.

### **6.2.1. Bath Tub / Cash Flow (BT/CF)**

Auch bei der Auswertung der einzelnen Aufgabenstellungen hielten sich ZAHN/KAPMEIER an das Design von BOOTH-SWEENEY/STERMAN (2000) und verwendeten daher die von ihnen kreierten Kriterien. Wie Abb. 6.9. zeigt, schnitten die Probanden in Unteraufgabe A („quadratische Welle“, vgl. Abb. 6.1.) gegenüber der Originaluntersuchung sowohl im Gesamtschnitt aller Kriterien (68% vs. 83%) als auch bei jedem einzelnen Kriterium deutlich schlechter ab als die Testpersonen der Originaluntersuchung.

Die besten Ergebnisse erreichten die Testpersonen noch bei jenem Kriterium das überprüft, ob die Graphen diskontinuierliche Sprünge aufweisen, 82% der Graphen taten dies richtigerweise nicht (verglichen mit 96% der Graphen der MIT-Studenten). Die Kriterien 6 und 7 zielten auf das Verständnis des Konzeptes des Nettoflusses ab. Zu jedem Zeitpunkt entspricht die Veränderung im Bestand dem Nettofluss der Flussgrößen – nur rund 50% der

Studenten waren sich bei dieser Aufgabenstellung dessen bewusst bzw. berücksichtigten diesen Sachverhalt bei ihrer Lösung der Aufgabe (MIT: ca. 70%).

Criterion	Performance on the Bathtub task - Universität Stuttgart	Performance on the Bathtub task - MIT
1. When the inflow exceeds the outflow, the stock is rising.	0,75	0,87
2. When the outflow exceeds the inflow, the stocks is falling.	0,75	0,86
3. The stock should not show any discontinuous jumps (it is continuous).	0,82	0,96
4. The peaks and troughs of the stock occur when the net flow crosses zero (i.e., at $t = 4, 8, 12, 16$ )	0,75	0,89
5. During each segment the net flow is constant so the stock must be rising (falling) linearly.	0,68	0,84
6. The slope of the stock during each segment is the net rate (i.e., +/-25 units/time period).	0,54	0,73
7. The quantity added to (removed from) the stock during each segment is 100 units, so the stock peaks at 200 units and falls to a minimum of 100.	0,46	0,68
Means of all items	0,68	0,83

Abb. 6.9. (aus ZAHN/KAPMEIER 2001)

Wie schon bei BOOTH-SWEENEY/STERMAN zeigte sich auch bei ZAHN/KAPMEIER, dass das Abschneiden der Testpersonen in Aufgabe B („sägezahnförmige Welle“, vgl. Abb. 6.2.), vermutlich auf Grund des höheren Schwierigkeitsgrades, deutlich schlechter war. Abb. 6.10. zeigt die Auswertung der Autoren.

Criterion	Performance on the Cash Flow task - Universität Stuttgart	Performance on the Cash Flow task - MIT
1. When the inflow exceeds the outflow, the stock is rising.	0,47	0,48
2. When the outflow exceeds the inflow, the stock is falling.	0,47	0,48
3. The stock should not show any discontinuous jumps (it is continuous).	0,93	0,99
4. The peaks and troughs of the stock occur when the net flow crosses zero (i.e., $t = 2, 6, 10, 14$ ).	0,35	0,39
5. The slope of the stock at any time is the net rate. Therefore: a. when the net flow is positive and falling, the stock is rising at a diminishing rate ( $0 < t^*2; 8 < t^*10$ ). b. when the net flow is negative and falling, the stock is falling at an increasing rate ( $2 < t^*4; 10 < t^*12$ ). c. when the net flow is negative and rising, the stock is falling at a decreasing rate ( $4 < t^*6; 12 < t^*14$ ). d. when the net flow is positive and rising, the stock is rising at an increasing rate ( $6 < t^*8; 14 < t^*16$ ).	0,29	0,30
6. The slope of the stock when the net rate is at its maximum is 50 units/period ( $t = 0, 8, 16$ ).	0,32	0,52
7. The slope of the stock when the net rate is at its minimum is -50 units/period ( $t = 4, 12$ ).	0,32	0,51
8. The quantity added to (removed from) the stock during each segment of 2 periods is the area of the triangle bounded by the net rate, or $\pm (1/2) * 50 \text{ units/period} * 2 \text{ periods} = 50 \text{ units}$ . The stock therefore peaks at 150 units and reaches a minimum of 50 units.	0,46	0,41
Means of all items	0,45	0,51

Abb. 6.10. (aus ZAHN/KAPMEIER 2001)

Der Gesamtschnitt liegt bei 45% (51% bei BOOTH-SWEENEY/STERMAN), die einzelnen Kriterien weisen, mit der Ausnahme von Kriterium 8, allesamt ein leicht schlechteres Ergebnis verglichen mit der Originaluntersuchung auf. Mehr als die Hälfte der Testpersonen (53%) zeichnete „Lösungen“ bei denen der Bestand nicht stieg, wenn der Zufluss größer war als der Abfluss bzw. bei denen der Bestand nicht sank, wenn der Abfluss größer war als der Zufluss (vgl. Kriterium 1 und 2 in Abb. 6.10.) und ignorierten damit das wohl grundlegendste Konzept des Stock-Flow-Thinkings.

### 6.2.2. The Manufacturing Case (MC)

ZAHN/KAPMEIER legten ihren Probanden auch die dritte Aufgabenstellung von BOOTH-SWEENEY/STERMAN vor (vgl. Abb. 6.7. und 6.8.)<sup>44</sup>. Da die Untersuchung im Rahmen einer Lehrveranstaltung an der Universität Stuttgart stattfand und diese Aufgabenstellung einige Wochen später als die ersten beiden untersucht wurde, differiert die Zahl der Probanden von obiger dahingehend, dass 4 Personen mehr, d.h. 32, an dieser Aufgabenstellung teilnahmen. Die Ergebnisse waren deutlich besser als bei den beiden in 6.2.1. beschriebenen Aufgabenstellungen (Gesamtschnitt aller Kriterien 73% verglichen mit 68% bzw. 45%). Davon abgesehen waren die Ergebnisse auch besser als jene der MIT-Studenten, welche hier nur eine Overall-Performance von 41% (bzw. 32% in jener Teilgruppe, die wie bei ZAHN/KAPMEIER zusätzlich den Bestandsverlauf zu bestimmen hatte) erreichten. Der Grund für das gute Abschneiden der Stuttgarter Studenten mag – wie die Autoren hinweisen – eventuell darin liegen, dass sie zu diesem Zeitpunkt im Rahmen der Lehrveranstaltung schon mit systemwissenschaftlichen Inhalten wie Causal-Loop-Diagrammen (CLD's) oder Systemarchetypen konfrontiert wurden, Zeitverzögerungen und Stock-Flow-Diagrammen waren zu diesem Zeitpunkt allerdings noch nicht Unterrichtsstoff. Zusätzlich könnte eine Ursache darin liegen, dass sämtliche Teilnehmer in ihrem Vordiplom eine Lehrveranstaltung betreffend Produktionsmanagement zu absolvieren hatten, sie also mit der vorliegenden Aufgabenstellung ein gewisses Maß an Erfahrung aufwiesen.

Alle Probanden zeichneten korrekterweise Graphen, bei denen sich die Produktion zu Beginn im Gleichgewicht mit den Bestellungen befand – dies war nur bei 53% (bzw. 33%) der Testpersonen von BOOTH-SWEENEY und STERMAN der Fall gewesen. 69% (verglichen mit 44% bzw. 23% der MIT-Studenten) erkannten, dass die Produktionsrate zu irgendeinem Zeitpunkt die Zahl der Bestellungen übersteigen muss, um das Lager wieder aufzufüllen und zeichneten dementsprechende Lösungen. Sämtliche Stuttgarter Probanden konstruierten richtigerweise auch einen anfangs fallenden Bestand, als die Bestellungen die Produktion überstiegen, verglichen mit nur 68% der MIT-Probanden. Dennoch stimmten bei rund 60% der Stuttgarter Testpersonen die Bestandsverläufe nicht mit den von ihnen gezeichneten Produktionsraten überein.

ZAHN/KAPMEIER stellten fest, dass jene Testpersonen, welche zuvor das Beer-Game gespielt hatten (vgl. Kap. 5.4.), bei dieser Fragestellung besser abschnitten als ihre nicht Beer-Game erfahrenen Kollegen. Dies zeigte sich zwar ebenfalls schon in der Originaluntersuchung, überraschend war hingegen, dass nur eine einzelne Stuttgarter Testperson mit Beer-Game - Erfahrung (=3%) einen oszillierenden Bestandsgraphen zeichnete, während dies bei BOOTH-

---

<sup>44</sup> BOOTH-SWEENEY/STERMAN unterteilten die Aufgabenstellung in zwei Gruppen: Eine musste zusätzlich in eine zweite Graphik den zeitlichen Verlauf des Bestandes einzeichnen, die andere nicht. ZAHN/KAPMEIER verwendeten nur die erste Version der Aufgabe, in welcher die Probanden den Bestandsverlauf mitbetrachten mussten.

SWEENEY/STERMAN noch bei 48% der Fall war. Den Stuttgarter Probanden unterlief also hierbei nicht der Fehler, die Aufgabe mit dem Beer-Game zu verwechseln.

### **6.2.3. Erkenntnisse**

Alles in allem konnte die Untersuchung von ZAHN/KAPMEIER die Erstergebnisse von BOOTH-SWEENEY/STERMAN (2000) in so gut wie allen Belangen bestätigen. Am plakativsten ist die Erkenntnis, dass hoch qualifizierte Personen in der überwiegenden Mehrheit kein Verständnis einiger der fundamentalsten Konzepte der SD und der Systemwissenschaften, darunter Bestands- und Flussgrößen sowie Zeitverzögerungen haben.

Die Testpersonen schnitten dabei in der BT/CF- Aufgabenstellung in beiden Unteraufgaben deutlich schlechter ab als die MIT-Studenten. Wie schon ihre amerikanischen Kollegen, glaubten viele der Stuttgarter Probanden, dass ein Bestand denselben qualitativen zeitlichen Verlauf haben müsse wie sein Nettofluss. Darüber hinaus erkannten viele nicht, dass der Nettofluss in einem Zeitraum stets der Veränderung des Bestandes über diesen Zeitraum entsprechen muss.

In der MC – Fragestellung erreichten die Testpersonen von ZAHN/KAPMEIER entschieden bessere Ergebnisse. Die Ursachen dafür dürften, so räumen die Autoren ein, in der angesprochenen Vorbildung der Probanden liegen.

Zusammenfassend konnten ZAHN/KAPMEIER damit die Ersterkenntnisse mit ihrer Nachfolgeuntersuchung bestätigen, wenngleich sich vermutlich durch die sehr geringe Zahl an Testpersonen nicht unbedingt repräsentative Vergleichszahlen ergaben und die Gesamtstichprobe nur geringfügig erweitert werden konnte.

### **6.3. OSSIMITZ (2001a / 2001b)**

Der Zufall wollte es, dass auf jener System Dynamics Konferenz im Jahr 2000 in Bergen, auf welcher BOOTH-SWEENEY und STERMAN die Resultate ihrer Untersuchung erstmals präsentierten, auch Günther OSSIMITZ, Professor für Mathematik an der Universität Klagenfurt und einer der Vorreiter des systemwissenschaftlichen Ansatzes im deutschsprachigen Raum, dem Vortrag beiwohnte. Erstaunt über das schlechte Abschneiden und die nicht geahnten Defizite in bereits derart grundlegenden Sachverhalten, beschloss er die Untersuchung mit einigen Modifikationen zu wiederholen und damit zu überprüfen, wie wohl österreichische Studenten bei solchen Aufgaben abschneiden würden. Zu diesem Zweck übernahm er zwei der Aufgaben von BOOTH-SWEENEY/STERMAN (2000) direkt (die BT – Aufgabenstellung mit den Unteraufgaben A und B aus 6.1.1.) und kreierte vier weitere Aufgabenstellungen selbst. Diese hatten vor allem den Zweck zu überprüfen, ob eine Ursache für die schlechten Ergebnisse nicht etwa einfach an einer Schwäche im Lesen

von Graphen liegen könnte, waren doch sämtliche Aufgaben von BOOTH-SWEENEY/STERMAN (2000) in Graphenform gegeben. OSSIMITZ führte seine Untersuchung an 154 Studenten, aufgeteilt auf die Universitäten Graz, Wien und Klagenfurt durch. Verglichen mit den Testpersonen von BOOTH-SWEENEY/STERMAN, waren sie deutlich jünger und durchwegs ohne vorherigen Abschluss eines Studiums. Hier die wichtigsten Aufgabenstellungen bzw. Ergebnisse der Untersuchung:

### 6.3.1. Staatsschulden vs. Budgetdefizit

Diese Aufgabenstellung hatte den Zweck herauszufinden, inwiefern die Probanden in der Lage waren zwischen einem Budgetdefizit (als Flussgröße) und Staatsschulden (als deren zugehörige Bestandsgröße) zu unterscheiden. Es waren keine Graphen enthalten, hingegen mussten passend auf die in Textform gegebene Angabe sechs Fragen im Multiple-Choice-Format beantwortet werden.

In Fantasien nennt man den Betrag, um den die Staatsausgaben in einem Jahr höher sind als die Staatseinnahmen, „öffentliches Budgetdefizit“. Im Jahr 1998 betrug das öffentliche Budgetdefizit in Fantasien 60 Mrd. Taler. Ein Jahr später lag es bei 40 Mrd. Taler. Kreuzen Sie an, welche der folgenden Aussagen "richtig" bzw. "falsch" bzw. "nicht beantwortbar" sind! Falls Sie nicht sicher sind, kreuzen Sie bitte "weiss nicht" an!

		richtig	falsch	nicht beantwortbar	weiss nicht
10	Im Jahr 1999 wurden 20 Mrd. Taler Schulden zurückbezahlt.	28%	68% (m: 76% / f: 56%)		3%
11	Der Finanzminister konnte die Staatsschulden von 1998 auf 1999 um ein Drittel senken.	53%	36% (45% / 24%)	8%	3%
12	Wenn es dem fantasischen Finanzminister gelingt, das öffentliche Budgetdefizit auf 0 Taler zu senken (ausgeglichen zu budgetieren) dann hat Fantasien keine Schulden mehr.	19%	62% (70% / 52%)	13%	6%
13	Die Schulden in Fantasien sind sowohl 1998 als auch 1999 gewachsen.	44% (60% / 21%)	29%	19%	6%
14	Wenn es dem fantasischen Finanzminister gelingt, das öffentliche Budgetdefizit auf 0 Taler zu senken, dann hat Fantasien seinen bis dahin höchsten Schuldenstand erreicht.	17% (24% / 6%)	52%	21%	9%
15	Ein geringeres Budgetdefizit bedeutet eine sinkende Staatsverschuldung.	44%	42% (55% / 23%)	7%	6%

Abb. 6.11. (nach OSSIMITZ 2001a, S.9)

Abbildung 6.11. zeigt die Angabe, die Fragen und die prozentuelle Verteilung der Antworten. Die richtigen Lösungen wurden hierbei grau schattiert.<sup>45</sup> Bereits auf den ersten Blick ist der niedrige Prozentsatz von richtigen Antworten auffällig - insgesamt wurde nur ein Schnitt von 45% erreicht. Außerdem verwundert das stark unterschiedliche Abschneiden von Frauen und Männern: Bei sämtlichen sechs Fragen schnitten Männer trotz gleichwertiger (oder leicht schlechterer) Mathematikvorbildung deutlich besser ab als Frauen, ein Umstand, welcher schon bei BOOTH-SWEENEY/STERMAN (wenngleich auch nicht in dieser starken Form) zu Tage trat und welcher sich wie ein roter Faden durch sämtliche Aufgabenstellungen der Untersuchung von OSSIMITZ ziehen sollte. Der Grund dafür erscheint selbst dem Autor schleierhaft:

<sup>45</sup> Ad Frage 14 in Abb. 5.11.: Es wäre denkbar, dass Fantasien zu einem weit früheren Zeitpunkt bereits einen höheren Schuldenstand aufwies. Genau genommen müsste man also auch zusätzlich die Antwort „nicht beantwortbar“ gelten lassen.

“Although I have considerable experience in empirical studies in a broad variety of educational issues, this is actually the very first time that some significant difference in the performance between the sexes appeared.” OSSIMITZ 2001a, S. 10;

“One of the very clear findings of this survey is the massive gender-bias of the results. I sincerely must admit that I have no explanation and not even a serious hypothesis about the reasons for this finding.” OSSIMITZ 2001a, S. 16/17;

Wenngleich diese Aufgabenstellung eine kleine Schwäche im Angabentext besitzt (der Begriff der Staatsschulden wird im Gegensatz zu jenem des Budgetdefizits nicht erklärt), konnte sie doch jedenfalls deutlich die Defizite in der Unterscheidung zwischen Stocks und Flows, welche bei BOOTH-SWEENEY/STERMAN entdeckt wurden bestätigen und die Unterschiede im Abschneiden zwischen Frauen und Männern aufzeigen.

### 6.3.2. Das Alpenhotel

Im Rahmen dieser Aufgabe wurde den Probanden eine Graphik (vgl. Abb. 6.12.) vorgelegt, welche die Zahl der pro Tag ankommenden und abreisenden Gäste eines Hotels wiedergab.

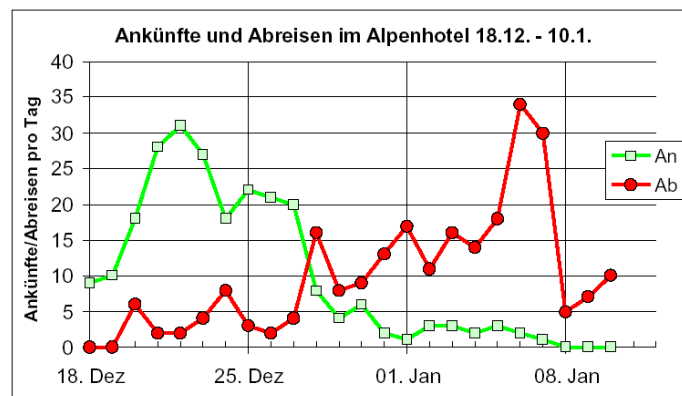


Abb. 6.12. (aus OSSIMITZ 2001a, S.7)

Es handelt sich demnach bei den beiden dargestellten Größen um Flussgrößen, welche gegeneinander aufgerechnet den zeitlichen Verlauf eines Bestandes, nämlich der Zahl der Gäste im Hotel, ergeben. Die Kurven bzw. Zahlen waren dabei so gewählt, dass bis in etwa der Mitte des dargestellten Zeitraums (27.12.) jeden Tag mehr Gäste ankamen als abreisten. Für den restlichen Zeitraum (ab 28.12.) reisten jeden einzelnen Tag mehr Gäste ab als ankamen. Wenn also bis zur Nacht vom 27. auf den 28.12. die Zahl der Gäste jeden Tag steigt und sie danach jeden Tag sinkt, dann muss wohl - wie niemand bestreiten wird – in dieser Nacht die Zahl der Gäste im Hotel maximal sein. Die Antworten auf die Frage nach dem Datum der maximalen Gästezahl zeigten jedoch deutliche Verständnisdefizite auf.<sup>46</sup>

„The results were disastrous.“ OSSIMITZ 2001a, S. 10;

Gerade 24% (m: 34%, w: 10%) der Testpersonen waren in der Lage, die richtige Antwort zu finden. Gefragt nach einer Erklärung für ihre Antwort, wann die maximale Zahl erreicht sei,

<sup>46</sup> Der Autor ging bei der Auswertung sehr großzügig vor und wertete sowohl den 27.12. als auch den 28.12. als korrekt.

konnten nur 16% den Zeitpunkt des Schnittpunkts der beiden Linien als entscheidendes Kriterium identifizieren. Nur erschreckend wenige - 27% - meinten, dass der Unterschied zwischen den beiden Kurven für die Zahl der Gäste überhaupt irgendwie relevant sein könnte. Der überwiegende Großteil der Vpn (60%) wählte als Tag mit der höchsten Zahl an Gästen im Hotel den 22.12. ( $\pm 1$  Tag), also jenen Tag, an welchem die meisten Gäste ankamen. 9% meinten es müsse der Tag sein, an welchem die meisten Gäste abreisten (6.1.  $\pm 1$  Tag). Sie alle verwechselten scheinbar die dargestellte Flussgröße mit einer Bestandsgröße.<sup>47</sup>

### 6.3.3. Bath Tub / Cash Flow (BT/CF)

Wie bereits erwähnt, waren zwei der OSSIMITZ'schen Aufgabenstellungen der Untersuchung von BOOTH-SWEENEY/STERMAN (2000) entnommen. Es handelte sich um die beiden Teilaufgaben der BT/CF – Aufgabenstellung (quadratische Welle – vgl. Abb. 6.1. und sägezahnförmige Welle – vgl. Abb. 6.2., beide mit der Coverstory Badewanne). Ziel war es, die Ergebnisse der österreichischen Studenten mit jenen der amerikanischen vergleichbar zu machen. Die Ergebnisse sind in den Abb. 6.13. (quadratische Welle) und 6.14. (sägezahnförmige Welle) für die beiden Aufgabenstellungen dargestellt. Das Abschneiden der Probanden von OSSIMITZ, somit der österreichischen Studenten, liegt teilweise bei weit unter 50% von den (schon als bedenklich schlecht bezeichneten) Ergebnissen der Vorgängeruntersuchung. Gemittelt über alle Kriterien erreichten sie gerade die 50% Hürde (in Aufgabe A - quadratische Welle - 42% verglichen mit 83% bei BOOTH-SWEENEY/STERMAN und in Aufgabe B - sägezahnförmige Welle - 28% verglichen mit 48%). Ein Grund für dieses doch deutlich schlechtere Abschneiden der österreichischen Studenten dürfte zweifelsohne das unterschiedliche Ausbildungsniveau der jeweiligen Vpn sein.

	Swweeney/ Sterman	Ossimitz
31 When the inflow exceeds the outflow, the stock is rising	0,87	0,42 (m: 0,53 / f:0,24)
32 When the outflow exceeds the inflow, the stock is falling	0,86	0,43 (m: 0,55 / f:0,24)
33 The stock should not show any discontinuous jumps (it is piecewise continuous)	0,96	0,64 (m: 0,72 / f:0,53)
34 The peaks and troughs of the stock occur when the net flow crosses zero.	0,89	0,56 (m: 0,66 / f:0,40)
35 During each segment the net flow is constant so the stock must rise (fall) linearly.	0,84	0,38 (m: 0,52 / f:0,18)
36 The slope of the stock during each segment is +/- 25 units/time period.	0,73	0,26 (m: 0,37 / f:0,10)
37 The quantity added to (removed from) the stock during each segment is 100 units, so the stock peaks at 200 units and falls to a minimum of 100 units.	0,68	0,27 (m: 0,37 / f:0,11)
Mean for all items	0,83	0,42 (m: 0,53 / f:0,26)

Abb. 6.13. (aus OSSIMITZ 2001a, S.12)

<sup>47</sup> Inspiriert von dieser Aufgabenstellung kreierte John D. STERMAN eine idente Version mit anderer Deckgeschichte (Department Store – DS), überprüfte sie anhand von MIT- Studenten und berichtet von den Ergebnissen am Rande in STERMAN 2002. Auf die Frage des Moments des größten Bestandes konnten 42% der Probanden die richtige Antwort geben.

	Swweeney/ Sternan N=79	Ossimitz N=154
41 When the inflow exceeds the outflow, the stock is rising	0,46	0,25 (m: 0,38 / f:0,06)
42 When the outflow exceeds the inflow, the stock is falling	0,41	0,23 (m: 0,36 / f:0,03)
43 The stock should not show any discontinuous jumps (it is piecewise continuous)	0,99	0,71 (m: 0,74 / f:0,66)
44 The peaks and troughs of the stock occur when the net flow crosses zero.	0,41	0,23 (m: 0,36 / f:0,03)
45 The slope of the stock at any time is the net rate.	0,25	0,10 (m: 0,13 / f:0,06)
46 The quantity added to (removed from) the stock during each segment of 2 time units is 50 units. The stock therefore peaks at 150 units and reaches a minimum of 50 units.	0,34	0,14 (m: 0,37 / f:0,10)
Mean for all items	0,48	0,28 (m: 0,39 / f:0,16)

Abb. 6.14. (aus OSSIMITZ 2001a, S.13)

Darüber hinaus ist erneut der Unterschied zwischen Männern und Frauen nicht zu übersehen. In Aufgabe B ist er teilweise sogar derart stark, dass, wie in Abb. 6.14. ersichtlich, bei einzelnen Kriterien beinahe alle richtigen Antworten von Männern kamen. OSSIMITZ versuchte anhand der verwendeten Aufgabenstellungen und Auswertungsmethoden Basiskriterien herauszuarbeiten. Damit sind solche Kriterien gemeint, welche bei Nicht-Erfüllung ziemlich sicher auch die Nicht-Erfüllung anderer nach sich ziehen. Er kam zu dem Schluss, dass in einem System mit einem Zu- und Abfluss das Verständnis davon, dass der Bestand steigt, wenn der Zufluss größer ist als der Abfluss (und sinkt, wenn der Abfluss größer ist als der Zufluss), das wohl grundlegendste Kriterium darstellt (vgl. OSSIMITZ 2001a, S. 12 und 17).

#### 6.3.4. Restliche Aufgabenstellungen

Von den verbleibenden zwei Fragestellungen der Untersuchung möchte ich nur auf eine etwas genauer eingehen. Im Rahmen der so genannten FEB-Aufgabe (Filling and emptying of a bathtub) mussten die Versuchspersonen passend zu einer schriftlich geschilderten Situation, in welcher der Zu- und Abfluss einer Badewanne pro Minute geschildert wurde, den Graphen des Bestandes zeichnen. Es handelte sich hierbei also um das auf Textebene basierende Gegenstück der gerade beschriebenen Aufgabenstellungen. Erneut waren die Flussgrößen der Badewanne gegeben, diesmal aber nicht in Form eines Graphen, sondern mit Wörtern beschrieben. Auf diese Weise kann man überprüfen, ob der Grund für die Defizite in einer Unfähigkeit des Lesens und Interpretierens von Graphen liegt. Die Ergebnisse zeigten aber, dass dem vermutlich nicht so ist. Trotz sehr einfach formulierter Fragestellung und rund gewählten Zahlen konnten nur 29% (m: 38%, w: 14,5%) eine vollkommen richtige Lösung finden. Weitere 25% erreichten eine beinahe richtige Lösung. Es ergaben sich also hier in etwa dieselben bzw. leicht bessere Prozentzahlen richtiger Lösungen als in den auf Graphen basierenden Aufgabenstellungen. Der Schwierigkeitsgrad dieser Aufgabe dürfte jedoch deutlich niedriger sein als jener der anderen – eine genauere Überprüfung mit Aufgabenstellungen gleichen Schwierigkeitsgrades war also notwendig, um

diesen Punkt ausreichend untersuchen zu können. Dies versuchte der Autor in einer Nachfolgeuntersuchung (siehe unten).

### 6.3.5. Erkenntnisse

- *Österreichische Studenten schnitten im Vergleich deutlich schlechter ab als die Vpn von BOOTH-SWEENEY/STERMAN*

Die Ergebnisse der Probanden von BOOTH-SWEENEY/STERMAN wurden von den Autoren als sehr schwach („very poor“) bezeichnet. Die österreichischen Studenten erreichten rund 50% der Leistung dieser Probanden – es stellt sich daher die Frage, wie man diese Ergebnisse bewerten oder bezeichnen soll. Selbstverständlich dürfte das doch sehr unterschiedliche Ausbildungsniveau zwischen diesen beiden Testgruppen (Post-graduate-Studenten einer amerikanischen Eliteuniversität vs. Österreichische Studenten in ihrem ersten Studienabschnitt) eine große Rolle gespielt haben. Dennoch stimmt es mehr als nachdenklich, wenn lediglich 24% angehender österreichischer Akademiker das Maximum eines Bestandes aus einer Graphik mit einem einzelnen Zu- und einem einzelnen Abfluss ablesen können, oder wie in den Badewannenbeispielen nur 28% den Verlauf eines Bestandes bei einfachst möglichem Zufluss und konstantem Abfluss bestimmen können.

- *Hoch signifikante Unterschiede zwischen Frauen und Männern*

Wie bereits mehrfach angeführt, traten insbesondere bei der Untersuchung von OSSIMITZ (2001), aber auch bei der Originaluntersuchung von BOOTH-SWEENEY/STERMAN (2000) starke und teilweise hoch signifikante Unterschiede in den Leistungen von Frauen und Männern zu Tage, wobei die Männer die besseren Ergebnisse erzielten.

- Die Auswertung der Studie ließ darauf schließen, dass die Ursache für die Probleme im Umgang mit Bestands- und Flussgrößen vermutlich nicht in einer Unfähigkeit Graphen lesen und interpretieren zu können zu finden ist. Dennoch war eine Überprüfung dieses Aspektes mit genauer aufeinander abgestimmten Aufgabenstellungen empfehlenswert (vgl. dazu KAINZ/OSSIMITZ 2002 und OSSIMITZ et al. 2001 – Kap. 6.4.).
- Eine Basisfähigkeit des Stock-Flow-Thinkings dürfte ein Verstehen des Sachverhalts positiver Nettofluss → Bestandszunahme und negativer Nettofluss → Bestandsabnahme sein. Ohne diese Fähigkeit ist es wohl nicht möglich in Bestands- und Flussgrößen zu denken und somit dynamische Entwicklungen richtig ein- und abzuschätzen.

#### 6.4. KAINZ/OSSIMITZ (2002) bzw. OSSIMITZ et al. (2001)

Die Erhebung von OSSIMITZ (2001) ließ einige Fragen offen. Durch teilweise nicht vorhersehbare zweifache Auffassungsweisen von Fragen, wie sie in jeder komplexen empirischen Untersuchung auftreten können, konnten gewisse Teilaspekte nicht genau untersucht werden. Speziell inwieweit eine Unfähigkeit oder Schwäche des Lesens von Graphen das schlechte Abschneiden der Vpn bedingt, und ob österreichische Studenten tatsächlich nur 50% der (ohnehin mageren) Leistung ihrer amerikanischen Kollegen erreichen. Ob dies nur ein wie auch immer gearteter Zufall war, und auch ob sich die Fähigkeit des Stock-Flow-Thinkings durch eine Art „Crash-Kurs“ verbessern bzw. erlernen ließe, das versuchte OSSIMITZ in einer umfangreichen Nachfolgeuntersuchung festzustellen. Das dreistufige Projekt (Pretest – Crash-Kurs – Posttest) wurde von einem Team von Studierenden der Universität Klagenfurt unter seiner Leitung durchgeführt. Testpersonen waren 94 Studenten der Betriebswirtschaftslehre, größtenteils am Beginn ihres Studiums.<sup>48</sup> Im Anschluss erschienen zwei Projektberichte: zum einen jener der Studierenden (OSSIMITZ et al. 2001), zum anderen ein ausführlicher englischer Bericht von OSSIMITZ in Zusammenarbeit mit Daniel KAINZ (KAINZ/OSSIMITZ 2002).

Sowohl der Vortest (Pretest) als auch der Nachtest (Posttest) bestanden aus fünf unterschiedlichen Kategorien von Aufgabenstellungen, wobei um notwendige Vergleiche zu ermöglichen für jede Aufgabenstellung des Pretests eine sehr ähnliche mit gleicher Struktur aber unterschiedlicher Deckgeschichte im Posttest Verwendung fand. Ein Teil von ihnen entstammte den bereits beschriebenen Untersuchungen. Es würde den Rahmen dieser Übersicht sprengen, sämtliche Aufgabenstellungen ausführlich zu beschreiben und auf deren Detailergebnisse genau einzugehen. Ich werde mich daher darauf beschränken, die unterschiedlichen Typen von Aufgaben kurz darzustellen und im Anschluss die wichtigsten Erkenntnisse und Ergebnisse der Untersuchung wiederzugeben. Leser, welche an den Detailergebnissen interessiert sind, möchte ich auf die Ausarbeitung von KAINZ/OSSIMITZ (2002) verweisen.

Zwischen den beiden Tests, welche im Abstand von drei Monaten stattfanden, bekamen die Testpersonen in einem 90 Minuten dauernden Crash-Kurs die Grundlagen von Bestands- und Flussgrößen vermittelt. Ob dieser Einführungskurs in der Lage war die Defizite der Studenten zu beseitigen, sollte dann im Nachtest herausgefunden werden.<sup>49</sup> Abb. 6.15. gibt einen Überblick über die Ergebnisse.

---

<sup>48</sup> Die Zahl der Testpersonen sank im Posttest auf 64. Alle im Folgenden erwähnten Prozentzahlen beziehen sich nur auf diese 64 Studenten, welche beide Tests absolviert haben.

<sup>49</sup> KAINZ/OSSIMITZ (2002) enthält im Anhang sowohl die den Teilnehmern vorgelegten Tests als auch jene Unterlagen, welche im Crash-Kurs verwendet wurden.

	gegeben	Form	verlangt	vollständig richtige Antworten Pretest	vollständig richtige Antworten Posttest
<b>Kategorie A</b>	Flussgrößen	Text	Zu- und Abfluss jeweils in eine Graphik einzeichnen	3% (Zufluss) bzw. 11% (Abfluss)	31% (Zufluss) bzw. 34% (Abfluss)
<b>Kategorie B</b>	Flussgrößen	Tabelle	Zeitpunkt max. Bestand (1); Zeitpunkt max. Abfluss (2) und max. neg. Nettofluss (3) bestimmen	56% (1) bzw. 95% (2) bzw. 39% (3)	80% (1) bzw. 95% (2) bzw. k.A. (3)
<b>Kategorie C</b>	Flussgrößen	Graphen	Zeitpunkt max. Bestand (1); Zeitpunkt max. Abfluss (2) und max. neg. Nettofluss (3) bestimmen	14% (1) bzw. 95% (2) bzw. k.A. (3)	67% (1) bzw. 97% (2) bzw. 47% (3)
<b>Kategorie D</b>	Flussgrößen	Graphen	zeitlichen Verlauf des Bestandes in Graphik einzeichnen	36% <sup>50</sup>	54%
<b>Kategorie E</b>	Flussgrößen	Text	zeitlichen Verlauf des Bestandes in Graphik einzeichnen	59% <sup>51</sup>	86%

Abb. 6.15.

### 6.4.1. Aufgabe A

In dieser Aufgabenkategorie war von den Testpersonen verlangt, ausgehend von einer schriftlichen Angabe den Zu- und Abfluss in jeweils eine Graphik einzuzichnen. Als Coverstory diente im Pretest dazu eine Regentonne die sich füllt und überläuft (vgl. Abb. 6.16.), im Posttest die aus 6.3.4. bekannte Geschichte einer Badewanne die gefüllt und nach einem Bad ausgelassen wird.

Eine Regentonne mit 100 l Fassungsvermögen ist um 12:00 Uhr leer. Um exakt 14:00 Uhr beginnt es leicht zu regnen und aus der Dachrinne füllt sich die Tonne mit 25l/Stunde Zufluss bis Mitternacht. Die Tonne besitzt keinen Abfluss, sondern wird so lange gefüllt, bis sie übergeht. Das übergehende Wasser wird als Abfluss gewertet. Zeichnen Sie den Zufluss und den Abfluss zwischen 12:00 Uhr und 00:00 Uhr in die Diagramme unten ein!

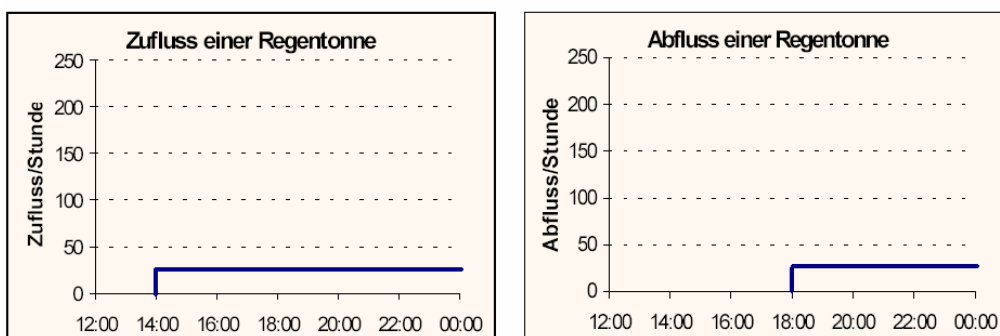


Abb. 6.16. (aus KAINZ/OSSIMITZ 2001, S.26, verändert)

Sowohl Zufluss als auch Abfluss blieben dank des immer gleich starken Regens stets bei einem Wert von 25 l/h. Dennoch waren im Vortest nur 3% dazu in der Lage, den Zufluss und 11% den Abfluss richtig zu darzustellen. Ganze 82% zeichneten im Falle des Zuflusses fälschlicherweise den akkumulierten Bestand an Wasser, nur die Hälfte dieser

<sup>50</sup> Wie schon in den Vorgängeruntersuchungen wurde zur Auswertung der Durchschnittswert von sieben Kriterien berechnet. Die Zahlen bedeuten nicht, dass 36% bzw. 54% aller Testpersonen die richtige Lösung fanden.

<sup>51</sup> KAINZ/OSSIMITZ (2002) weisen hier darauf hin, dass die Ergebnisse des Pretests nur eingeschränkt mit jenen des Posttests vergleichbar sind, da bei letzterem die Aufgabenstellung einen etwas niedrigeren Schwierigkeitsgrad aufwies.

Bestandsgraphen war jedoch auch fehlerfrei. Im Posttest stieg die Zahl der richtigen Zuflüsse auf 31%, jene der Abflüsse auf 34% - in beiden Fällen eine signifikante Verbesserung.

#### 6.4.2. Aufgabe B

Hier musste analog dem „Alpenhotel“ aus 6.3.2. aus gegebenen Flussgrößen der Moment des maximalen Bestandes und zur Kontrolle auch der Moment des maximalen Abflusses bestimmt werden. Ein wesentlicher Unterschied zu dem oben beschriebenen Alpenhotel war, dass Zu- und Abfluss in Tabellen- und nicht in Graphenform gegeben waren. Als Deckgeschichte diente im Pretest ein Spital, welches über einen Zeitraum von 2 Wochen Patienten aufnimmt und entlässt und im Nachtest ein Parkplatz, mit ankommenden und abfahrenden Fahrzeugen innerhalb eines Tages.

Erneut sollte hier also das Grundverständnis der Probanden von Akkumulation überprüft werden. Die Flussgrößen waren dazu in der bewährten Form gewählt: Bis in etwa zur Mitte der Zeitspanne war der Zufluss größer als der Abfluss, danach war das umgekehrte der Fall. Der Bestand wuchs also bis genau zu diesem Zeitpunkt und nahm danach wieder ab. Verglichen mit den 56%, die dies bereits im Vortest erkannten, stellten 80% richtige Lösungen beim Posttest erneut eine signifikante Verbesserung dar.

In der Schi-Saison werden viele Verletzte aus der Umgebung in das Krankenhaus Schwarzach-St. Veit eingeliefert. An den Hauptschitagen müssen die meisten neuen Patienten aufgenommen werden. Entlassungen finden hauptsächlich an Wochentagen statt. Durchschnittlich bleiben die Patienten 5-12 Tage in stationärer Behandlung. Die folgende Statistik zeigt für zwei Wochen für jeden Tag die Zahl der neu aufgenommenen und entlassenen Patienten:

	Datum	Aufnahmen	Entlassungen	Datum	Aufnahmen	Entlassungen
So	31.12.2000	13	0	07.01.2001	19	3
Mo	01.01.2001	18	0	08.01.2001	11	9
Di	02.01.2001	10	4	09.01.2001	12	15
Mi	03.01.2001	7	5	10.01.2001	8	17
Do	04.01.2001	10	7	11.01.2001	10	25
Fr	05.01.2001	10	8	12.01.2001	8	28
Sa	06.01.2001	12	0	13.01.2001	14	30

Abb.6.17. (aus OSSIMITZ et al. 2001, verändert)

Um zu überprüfen, ob die Vpn generell Schwierigkeiten beim Lesen von Graphen bzw. Tabellen haben, wurde als zweite Frage nach dem Zeitpunkt des Maximums des Abflusses (entlassene Patienten bzw. abfahrende Autos) gefragt – die Antwort war einfach aus der Angabe abzulesen. Dies bereitete so gut wie keiner der Vpn Probleme, wodurch in beiden Tests 95% von ihnen die richtige Antwort finden konnten. Zusätzlich wurde im Pretest nach dem Zeitpunkt des größten negativen Saldos (= Moment des größten negativen Nettoflusses, d.h. jener Zeitpunkt an dem der Unterschied zwischen abfahrenden und ankommenden Autos bzw. entlassenen und ankommenden Patienten maximal ist) gefragt. 39% konnten sie richtig beantworten. Ein beinahe ebenso großer Teil hielt diese Frage jedoch überraschenderweise für dieselbe wie die Frage nach dem Maximum des Abflusses.

### 6.4.3. Aufgabe C

Diese Aufgabenkategorie war mit der soeben beschriebenen ident, jedoch wurden hier nun wie im ursprünglichen Alpenhotel die Flussgrößen in Graphenform gegeben (vgl. Abb. 6.12). Die Deckgeschichten waren dieselben wie in Kategorie B, allerdings in vertauschter Reihenfolge.

Die kleine Änderung der Darstellungsform führte dazu, dass nur noch 14% (Pretest) bzw. 67% (Posttest) die Aufgabe lösen konnten (verglichen mit immerhin 56% bzw. 80% richtiger Antworten bei derselben Aufgabenstellung in Tabellenform). Die Verbesserung von Pretest zu Posttest stellt dennoch eine hoch signifikante Verbesserung dar. Der Großteil der Vpn die falsch antworteten, verwechselte den Moment des größten Bestandes mit jenem des größten Nettoflusses (also jenem Tag an dem verglichen mit den Abreisen/Entlassungen am meisten Gäste/Patienten ankamen).

Auch in dieser Aufgabenstellung wurde nach dem Moment des größten Abflusses gefragt, was 95% (Pretest) bzw. 97% (Posttest) richtig beantworten konnten. Die Frage nach dem größten negativen Nettofluss kam nur im Posttest vor, 47% lösten sie richtig, 31% hielten sie aber erneut fälschlicherweise für dieselbe Frage wie die nach dem größten Abfluss.

### 6.4.4. Aufgabe D

Diese Aufgabenkategorie war der Untersuchung von BOOTH-SWEENEY/STERMAN (2000) entnommen. Es handelte sich um das Badewannenbeispiel mit der „quadratischen Welle“ als Zufluss (vgl. Abb. 6.1.). Sowohl im Pretest als auch im Posttest wurde dieselbe Fragestellung verwendet, um einen direkten Wiedererkennungseffekt zu vermeiden wurde die Coverstory jedoch im Pretest durch die Geschichte eines mit Pumpen arbeitenden Wasserausgleichbehälters ersetzt. Es galt also den zeitlichen Verlauf eines Bestandes bei graphisch gegebenen Zu- und Abfluss zu bestimmen. Die Auswertung erfolgte wie schon in der Originaluntersuchung über die Bewertung von sieben Kriterien. Es ergab sich ein Durchschnittswert von 36% im Vortest und eine signifikante Verbesserung auf 54% im Nachtest. Abb. 6.18 zeigt die Ergebnisse aufgeschlüsselt nach den einzelnen Kriterien und weist zum Vergleich auch die Werte von BOOTH-SWEENEY/STERMAN (2000) und OSSIMITZ (2001a) aus. Es zeigt sich, dass die Teilnehmer dieser Untersuchung die schlechten Ergebnisse ihrer Vorgänger sogar noch ein klein wenig unterboten konnten.<sup>52</sup>

---

<sup>52</sup> Allerdings kam hier im Vortest die zuvor erwähnte, abgeänderte Deckgeschichte zu Verwendung. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass dies die Ergebnisse nicht beeinflusste. Sollte dies doch der Fall gewesen sein, dann bewirkte es durch die höhere Plausibilität der Deckgeschichte höchstens eine Veränderung zum Positiven.

Criterion	Pretest Ave	Ossimitz	Sweeney &Serman
1 When the inflow exceeds the outflow, the stock is rising.	0.38	0.42	0.87
2 When the outflow exceeds the inflow, the stock is falling.	0.36	0.43	0.86
3 The peaks and troughs of the stock occur when the net flow crosses zero.	0.39	0.56	0.89
4 The stock should not show any discontinuous jumps.	0.75	0.64	0.96
5 During each segment the net flow is constant so the stock must be rising (falling) linearly.	0.34	0.38	0.84
6 The slope of the stock during each segment is the net rate	0.16	0.26	0.73
7 The quantity added to (removed from) the stock during each segment is the area enclosed by the net rate.	0.16	0.27	0.68
<b>Mean for all items</b>	<b>0.36</b>	<b>0.42</b>	<b>0.83</b>

N = 64      N = 154

Abb. 6.18. (aus KAINZ/OSSIMITZ 2001, S.19)

### 6.4.5. Aufgabe E

In dieser letzten Aufgabenkategorie fanden die Deckgeschichten aus Kategorie A, allerdings in vertauschter Reihenfolge, Anwendung. Die Probanden mussten aus der in Textform angeführten Angabe nun aber nicht die Flussgrößen, sondern den Verlauf des Bestandes in eine Graphik eintragen. Dies fiel ihnen auch deutlich (und statistisch signifikant) leichter: So konnten im Vortest 59% und im Nachtest 86% die Aufgabe richtig lösen, während sich die richtigen Lösungen im Falle der Flussgrößen ja nur auf 3% und 11% (Vortest) bzw. 31% und 34% (Nachtest) beliefen.

Was die Vergleichbarkeit der Ergebnisse des Pretests und Posttests dieser Kategorie untereinander betrifft, weisen KAINZ/OSSIMITZ (2002) darauf hin, dass dies nur eingeschränkt möglich ist, da bei letzterem die Aufgabenstellung einen etwas niedrigeren Schwierigkeitsgrad aufwies.

### 6.4.6 Ergebnisse und Erkenntnisse

#### - Erlernen von Stock-Flow-Thinking

Die Autoren konnten zeigen, dass bereits ein 90 Minuten langer Crash-Kurs, welcher nur die fundamentalen Unterschiede zwischen Bestands- und Flussgrößen aufzeigt, dazu in der Lage ist, die Leistung der Testpersonen signifikant zu verbessern. Dies war in allen fünf Aufgabenkategorien der Fall, ausgenommen lediglich einige Teilfragen. Die Fähigkeit zum Stock-Flow-Thinking und das Interpretieren von Graphen kann also mit großer Wahrscheinlichkeit in relativ kurzer Zeit verbessert und Defizite beseitigt werden. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass zum entgeltigen Beweis dieses Sachverhaltes wohl eine Untersuchung mit einer Kontrollgruppe, welche den zweiten Test ohne zwischenzeitlichen Crash-Kurs absolviert, nötig wäre um auszuschließen, dass es sich bei der Verbesserung der Ergebnisse nicht um eine Art Trainingseffekt handelt. Des Weiteren müsste man einem

Teil der Probanden zuerst die Aufgaben des Posttest und danach erst jene des Pretest vorlegen, um die Gleichwertigkeit des Schwierigkeitsgrades der Aufgaben zu belegen. Auch wenn dies in der vorliegenden Untersuchung nicht der Fall war, kann doch davon ausgegangen werden, dass das Stock-Flow-Verständnis von Menschen erlernt und verbessert werden kann.

- *Tabellendarstellung vs. Graphen*

Aus dem Vergleich der Aufgabenkategorien B und C konnte festgestellt werden, dass es deutlich leichter fällt, den Zeitpunkt des maximalen Bestandes bei tabellarisch gegebenen Flussgrößen als bei graphisch gegebenen zu erkennen (56% vs. 14 % im Pretest und 80% vs. 67% im Posttest). Dem ist jedoch entgegen zu halten, dass es die tabellarische Darstellungsform ermöglicht, über ein mechanisches Saldieren (Zuflüsse minus Abflüsse) die korrekte Antwort auszurechnen und somit die Aufgabe zu lösen, ohne unbedingt ein Verständnis von Bestands- und Flussgrößen haben zu müssen. Die graphische Darstellung ist gemäß den Autoren in diesem Fall daher nicht als Ursache der schlechten Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen zu sehen, viel mehr zeigt sie die Defizite nur in ihrem vollem Maße auf, während die tabellarische Darstellung (über die Möglichkeit des Ausrechnens) sie ein wenig zu verschleiern mag.

- *Graphen vs. Text*

Ähnliches ist bei einer Gegenüberstellung der Aufgabenkategorien D und E feststellbar. In beiden Kategorien galt es die Entwicklung eines Bestandes graphisch festzuhalten. Während die korrespondierenden Flussgrößen in Kategorie D jedoch in Graphenform dargestellt waren, waren sie es in Kategorie E in Textform. Die Textdarstellung lieferte deutlich bessere Ergebnisse (59% vs. 36% im Pretest und 86% vs. 54% im Posttest).

- *Frauen vs. Männer und demographische Zusammenhänge*

Wenig überraschend, da in den Vorgängeruntersuchungen bereits entdeckt, zeigte sich auch in dieser Untersuchung ein Unterschied in den Leistungen zwischen Frauen und Männern – auch wenn die extrem starken Unterschiede aus OSSIMITZ (2001a) hier nicht mehr in dieser Ausprägung auftraten. Dennoch erreichten Männer in gleich mehreren Teilfragen signifikant bessere Ergebnisse als ihre Kolleginnen, wobei das Umgekehrte nie der Fall war. Aufgrund der relativ niedrigen Zahl an Vpn mussten etwaige Unterschiede schon in sehr starker Ausprägung vorhanden sein um signifikante Ergebnisse zu liefern. Vermutlich ist das auch der Grund dafür, dass die Autoren keinen signifikanten Zusammenhang zwischen dem Abschneiden der Vpn, ihrem Alter, ihrer Selbsteinschätzung bezüglich der Fähigkeit Graphen zu lesen und ihrer Mathematiknote im Maturazeugnis feststellen konnten.

- *Bestand vs. Fluss zeichnen*

Es fällt leichter den zeitlichen Verlauf von Beständen als jenen von Flüssen zu zeichnen. Darauf lassen nicht nur die höheren Prozentzahlen an korrekten Antworten bei den

jeweiligen Aufgaben schließen (59% vs. 3% bzw. 11%), sondern auch die überaus große Neigung der Probanden, Bestände selbst dann zu zeichnen, wenn Flussgrößen gefragt sind. Damit konnte auch erneut die Tendenz vieler Menschen bestätigt werden, in Beständen zu denken und nicht zwischen Bestands- und Flussgrößen zu unterscheiden.

Überraschenderweise fiel es den Vpn leichter, einen korrekten Abfluss als einen korrekten Zufluss darzustellen (11% vs. 3%). Es macht den Eindruck, als ob es im Falle des Zuflusses plausibler scheint sich eine akkumulierende Menge vorzustellen als einen gleichbleibenden Fluss.

#### - *Abschneiden im Vergleich*

Aufgabenkategorie D ermöglichte einen direkten Vergleich der Probanden dieser Untersuchung mit jenen der Untersuchung von BOOTH-SWEENEY/STERMAN (2000), ZAHN/KAPMEIER (2001) und OSSIMITZ (2001a). Es zeigte sich, dass die Teilnehmer dieser Erhebung noch schlechtere Resultate erreichten als alle ihre Vorgänger. Wie mager ihre Leistungen insgesamt gesehen beim ersten Test waren, erkennt man, wenn man sich folgende Zahlen zu Gemüte führt: Von den 94 Studenten, welche den ersten Test absolvierten, konnten 82% keine einzige der fünf Aufgaben vollständig richtig lösen. 2% konnten eine, 14% konnten zwei und jeweils 1% konnten drei und vier Aufgaben lösen.

### **6.5. STERMAN/BOOTH-SWEENEY (2002): Cloudy Skies**

John STERMAN und Linda BOOTH-SWEENEY beschlossen in der Folge ihre Untersuchungen zum Thema Stock-Flow-Thinking in einem realeren Zusammenhang als es die zwar durchaus ebenfalls realitätsnahen, aber doch ein wenig konstruiert wirkenden Beispiele ihrer ersten Erhebung waren, fortzusetzen. Für diesen Zweck wählten sie die globale Erwärmung des Weltklimas aus.

„Treibhausgase“ – v.a. Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), Methan ( $\text{CH}_4$ ), Stickstoffdioxid ( $\text{N}_2\text{O}$ ), aber auch Wasserdampf und andere Gase – bewirken eine Verringerung der langwelligen Wärmeabstrahlung der Erde zurück in den Weltraum. Sie reflektieren diese Abstrahlung und bewirken damit denselben Effekt, der auch in einem Treibhaus auftritt, in welchem das Glas die Wärmeabstrahlung verhindert. Es kommt zu einer Erwärmung der Atmosphäre – dem so genannten Treibhauseffekt. Dieser macht genau genommen das Leben auf der Erde überhaupt erst möglich. Ohne ihn wäre die Nettowärmeausstrahlung der Erde so groß, dass auf der Oberfläche anstatt der derzeit vorhandenen Durchschnittstemperatur von  $15^\circ\text{C}$ , eine Temperatur von  $-18^\circ\text{C}$  herrschen würde. Dennoch bewirkt ein zusätzlicher Treibhauseffekt auch eine zusätzliche Erwärmung der Erdoberfläche, was große klimatische Auswirkungen nach sich zieht. Vor allem durch Verbrennung von fossilen Brennstoffen wie in den meisten Motoren und beim Hausbrand, im Zuge deren große Mengen an  $\text{CO}_2$  und andere Gase

entstehen, trägt der Mensch zu einer massiven Anreicherung an Treibhausgasen, v.a. von CO<sub>2</sub>, in der Atmosphäre bei. Dadurch wird der Treibhauseffekt verstärkt und das Weltklima erwärmt sich. Die Konzentration an CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre ist dabei heute höher als jemals in den letzten 420.000 Jahren und ihre Wachstumsrate höher als in den letzten 20.000 Jahren (vgl. IPCC 2001, S.7).

Die anthropogenen CO<sub>2</sub> - Emissionen sind heute ungefähr doppelt so hoch wie ihre natürliche Abbaurrate (Aufnahme in Meerwasser, Pflanzen etc.). Es gibt also nur zwei Wege, den stark wachsenden Bestand an CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre unter Kontrolle zu bekommen: Entweder man erhöht den Abfluss (die Abbaurrate) um das Doppelte, was sich wohl als nicht durchführbar erweisen wird, oder aber man senkt den Zufluss (die Ausstoßrate) auf das Niveau des Abflusses (d.h. um 50%). Wenn man das erreicht, bleibt der Bestand konstant. Will man die Menge an CO<sub>2</sub> gar verringern, so muss verständlicherweise die Ausstoßrate unter die Abbaurrate gesenkt werden – d.h. die derzeitigen Emissionen müssten um mehr als 50% gesenkt werden, um den Rekordstand an CO<sub>2</sub> zu verringern und der globalen Erwärmung Einhalt zu gebieten!

Zum Vergleich: In den Kyoto – Protokollen legten im Jahr 1997 38 Industrienationen fest, ihre CO<sub>2</sub> - Emissionen bis zum Jahr 2012 auf 95% jener des Jahres 1990 zu senken. Von diesem Ziel sind wir heute weiter entfernt denn je, da die Emissionsraten der meisten Staaten noch immer stark im Wachsen begriffen sind. Aber selbst wenn dieses Ziel erreicht werden würde, bliebe die Emissionsrate an CO<sub>2</sub> nach wie vor weit über der Abbaurrate, die globale Erwärmung würde also ungehindert fortschreiten – nur eben etwas langsamer.

“The policy debate has become a fight over whether to stabilize the emission *rate*, not the *stocks* of greenhouse gases that drive the climate. [...] The fight over implementation of the Kyoto Protocol, therefore, has become a debate about how much more GHG (*Anm.: Greenhouse Gases = Treibhausgase*) concentrations in the atmosphere will rise, and how much faster the global climate will warm. Halting warming, much less reversing it, is not even on the table.” STERMAN/BOOTH-SWEENEY 2002, S. 23;

Die Staaten dieser Welt müssten sich demnach wohl auf die Einhaltung eines *Bestandes* an CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre einigen und nicht auf die Reduktion der *Emissionsrate* auf ein Niveau, das den Treibhauseffekt nur etwas verlangsamt. Das dies bis heute noch nicht geschehen ist, liegt wohl daran, dass das Bewusstsein der Bevölkerung und damit der Druck auf die Entscheidungsträger noch nicht groß genug ist und es sich beim Weltklima bzw. der Luftverschmutzung wohl um ein klassisches Beispiel des systemischen Archetyps der „Tragödie der Gemeingüter“ handelt (vgl. GORDON 1954, HARDIN 1968, bzw. Kap. 2.5.).

STERMAN/BOOTH-SWEENEY (2002) versuchten das intuitive Verständnis über diesen Sachverhalt zu überprüfen und konfrontierten erneut hoch ausgebildete MIT - Studenten mit einer Beschreibung des Treibhauseffekts und fragten nach dem wahrscheinlichen Verhalten des Klimas bei zwei unterschiedlichen Szenarien der CO<sub>2</sub> - Emissionen. Szenario 1 war ein

plötzliches Verschwinden sämtlicher CO<sub>2</sub> - Emissionen im Jahr 2000 (Zero Emission Task = ZE), Szenario 2 ein Einfrieren des Emissionsniveaus auf einem Level nahe dem heutigen, wie es auch in den Kyoto Protokollen gefordert wird (Stable CO<sub>2</sub> Concentration Task = SC). Beide Aufgaben verlangten keinerlei besonderes mathematisches Wissen und waren bereits mit einem Verständnis von Bestands- und Flussgrößen zu lösen. Die Ergebnisse waren ernüchternd.

### 6.5.1. Das Null-Emissions – Szenario (ZE)

Wie in Abb. 6.19. zu sehen, bekamen die Probanden neben einer generellen Information über das Klimasystem auch einen Graphen des bisherigen CO<sub>2</sub> - Bestandes in der Atmosphäre und einen der bisherigen Entwicklung der Oberflächentemperatur der Erde vorgelegt.<sup>53</sup> Es galt nun das qualitative Verhalten des CO<sub>2</sub> - Bestandes und der Oberflächentemperatur für die nächsten 50 Jahre in die Graphiken einzuzeichnen (Abb. 6.19. enthält bereits mögliche Lösungen). Natürlich kennt niemand das genaue Verhalten der Temperatur in einem solchen Fall, die Stock-Flow - Struktur verrät aber, dass auch bei plötzlich null anthropogenen Emissionen der aktuelle Bestand an CO<sub>2</sub> so groß wäre, dass sich die Temperatur anfangs weiter erhöhen würde und der Bestand durch den langsamen Abbau erst in einigen Dekaden ein Niveau erreicht haben würde, welcher ein Sinken der Temperatur ermöglicht. STERMAN/BOOTH-SWEENEY überprüften ein solches Null-Emissionen Szenario in einer Modellberechnung unter zu Hilfenahme eines systemdynamischen Klimamodells das von FIDDAMAN (1997) entwickelt wurde und kamen zu dem Schluss, dass die Oberflächentemperatur in diesem Fall noch etwa 30 Jahre weiter steigen und erst dann leicht sinken würde.

Betreffend des CO<sub>2</sub> - Bestandes wäre die richtige Antwort also ein Graph gewesen, welcher um das Jahr 2000 seinen Höhepunkt erreicht und danach absinkt. Im Falle der Oberflächentemperatur jedoch ein Graph, welcher weiter steigt, frühestens in einigen Jahren seinen Höhepunkt erreicht und erst dann langsam zu sinken beginnt. Trotz sehr großzügiger Bewertungskriterien konnten nur 22% einen als im Großen und Ganzen richtig zu bewertenden CO<sub>2</sub> – Bestandsgraphen zeichnen. Der häufigste Fehler war, dass die Vpn einen konstant bleibenden Bestand wählten – dies wäre aber nur dann der Fall, wenn der Ausstoß nicht gänzlich aufgehört hätte, sondern sich auf das Niveau des Abbaus (ca. –50%) begeben hätte. Dadurch, dass die Ausstoßrate bei einem plötzlichen Verschwinden ja weit unter dem Niveau der Abbaurrate zu liegen kommt, muss sich der Bestand zwangsläufig mit der Zeit verringern.

---

<sup>53</sup> STERMAN/BOOTH-SWEENEY unterteilten die Vpn in zwei Gruppen. Eine musste ohne die Graphik des geschichtlichen CO<sub>2</sub> Bestandes auskommen, die andere hatte diese Informationsquelle. Die Autoren gingen davon aus, dass jene Gruppe mit der Graphik besser abschneiden würde, da sie auch den Verlauf des Bestandes und nicht nur jenen der Emissionsrate vor Augen hatte. Jedoch war genau das Gegenteil der Fall (46% vs. 28%).

Consider the problem of global warming. Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) is a greenhouse gas that traps heat and contributes to warming. CO<sub>2</sub> emissions from combustion of fossil fuels like oil, gas, and coal have been increasing since the start of the industrial revolution. The curve labelled "Anthropogenic CO<sub>2</sub> Emissions" in Figure 1 shows the worldwide emission rate of CO<sub>2</sub> from fossil fuel combustion since 1950. Figure 2 shows the stock of carbon dioxide in the atmosphere, along with a trend line generated by a global climate simulation model. Figure 3 shows data on average global temperatures since 1950, along with a trend line.

In 1995, a UN scientific panel concluded that these emissions were contributing to global warming, stating that "The balance of evidence suggests a discernible human influence on climate." In 1997 the industrialized nations agreed to stabilize their CO<sub>2</sub> emissions near mid 1990 rates. Implementation, however, remains elusive.

Now let's do a mental exercise we call an extreme conditions test. What do you think would happen to the average global temperature if anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions suddenly stopped completely, so that annual emissions were zero? This imaginary scenario is shown in Figure 1. In the year 2000 anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions drop instantaneously to zero and remain there forever.

Assume anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions follow this scenario. Sketch the likely path (the continuation of the simulation) for atmospheric CO<sub>2</sub> for the next 50 years using the space provided in the right half of Figure 2. Then sketch the likely path (the continuation of the simulation) for the average global temperature for the next 50 years using the space provided in the right half of Figure 3.

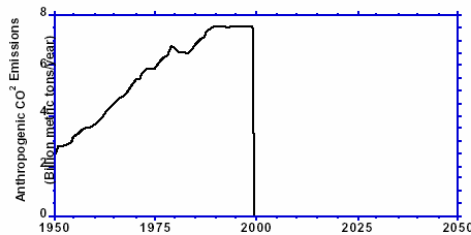


Figure 1: Anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions

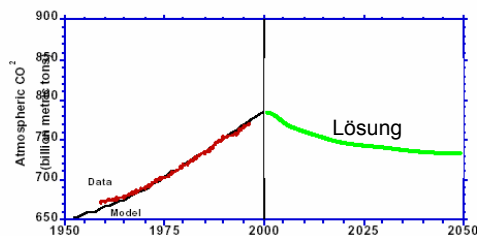


Figure 2: Carbon dioxide in the atmosphere

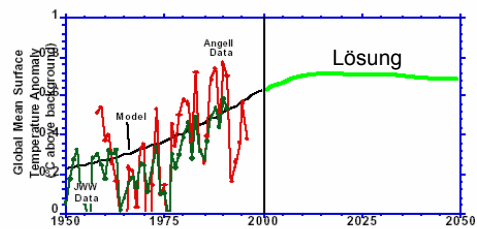


Figure 3: Global mean surface temperature

Abb. 6.19. (aus STERMAN/BOOTH-SWEENEY 2002, S.32; verändert)

Nur 36% der Probanden konnten eine qualitativ richtige Oberflächentemperatur darstellen. Hier war der häufigste Fehler ein sofortiges Reagieren der Temperatur auf die gesunkenen Emissionen, d.h. entweder ein sofortiges Stabilisieren und Gleichbleiben der Temperatur, oder aber ein Höhepunkt im Jahr 2000 mit einem direkt danach eintretenden Sinken.

### 6.5.2. Das stabile CO<sub>2</sub> Emissions – Szenario

Das zweite gewählte Szenario – in welchem sich die CO<sub>2</sub> - Emissionen auf einem gewissen Level nahe dem heutigen stabilisieren und auch über die nächsten Jahrzehnte gleich bleiben – entspricht vom Prinzip jenem, das im Rahmen der Kyoto - Protokolle festgelegt wurde. Die Vpn bekamen neben der schriftlichen Information drei Graphen vorgelegt: die Entwicklung der CO<sub>2</sub> - Emissionen, die Entwicklung des CO<sub>2</sub> - Bestandes und jene der Oberflächentemperatur (vgl. Abb 6.20.). Danach sollten sie sich vorstellen, dass sich der derzeitige CO<sub>2</sub> - Bestand von etwa 370ppm auf einem Level von – je nach Gruppe –

entweder 400ppm oder 340ppm einpendelt. Nun mussten die Probanden eine von jeweils sieben Möglichkeiten wählen, wie sich zum einen die Emissionen verändern müssen, damit diese Stabilisation eintreten kann und zum anderen, wie sich die globale Temperatur in einem solchen Fall entwickeln würde.

Es erscheint nur logisch dass sich, damit sich der Bestand auf gleich welchem Niveau stabilisieren kann, der Zufluss auf das Niveau des Abflusses begeben muss. In beiden Fällen müssen die Emissionen also um rund 50% bzw. mehr sinken, da ja wie erwähnt die derzeitigen Ausstöße doppelt so hoch sind wie die Abbaurate.<sup>54</sup> D.h. auch damit sich der Bestand auf einem höheren Niveau einpendeln kann und nicht ewig weiter steigt, müssen die Emissionen sinken. Dieser scheinbare Widerspruch bereitete den Testpersonen große Schwierigkeiten. Die sieben Antwortmöglichkeiten waren derartig gewählt, dass man keine Schwierigkeiten haben sollte die richtige zu identifizieren, wenn man den oben beschriebenen Sachverhalt der notwendigen Emissionsreduktion von rund 50% verstanden hat. Im Falle des 400ppm Szenarios konnten nur 18% die richtige Antwort identifizieren, 47% dachten die Emissionen müssten auch weiter steigen, damit sich der Bestand von 370ppm auf 400ppm erhöhen kann. Im 340ppm Szenario antworteten hingegen ganze 44% richtig (wenngleich auch 44% richtige Antworten kein gutes Ergebnis darstellen), was einmal mehr bestätigt, dass die falsche Auffassung besteht, der Output eines Systems müsse dieselbe Form wie sein Input aufweisen.

Hinsichtlich der Entwicklung der globalen Temperatur in diesen beiden Szenarien der Stabilisation ist zu sagen, dass die Konzentration von CO<sub>2</sub> in beiden Fällen weit über dem präindustriellen Level von 280ppm bleibt, der Treibhauseffekt also vermutlich selbst dann bestehen bleibt und sich die Temperaturen weiter erhöhen. Eine erhöhte Erdtemperatur könnte durch ihre ebenfalls stärkere Ausstrahlung in den Weltraum (wärmere Körper strahlen stärker) frühestens in einigen Jahrzehnten zu einem Ende der Temperaturerhöhung führen. Als korrekt wurden jedoch von den Autoren beide Antwortmöglichkeiten einer stets steigenden bzw. einer weiterhin steigenden und sich stabilisierenden Erdtemperatur anerkannt. Während im 400ppm Fall 69% eine der beiden richtigen Antworten wählten, waren es im 340ppm Fall nur 23%. Mehr als drei Viertel der Probanden wählten in letzterem Fall eine sinkende Temperaturentwicklung.

---

<sup>54</sup> Genau genommen müssen die Emissionen für eine Stabilisierung der CO<sub>2</sub> – Konzentration sogar unter die derzeitige Abbaurate fallen (mehr als 50%), da sich die natürlichen CO<sub>2</sub> – Senken erschöpfen bzw. ihr absorbiertes CO<sub>2</sub> bei einem Sinken der Konzentration in der Luft wieder abgeben (vgl. IPCC 2001b).

Consider the issue of global warming. In 2001, the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), a scientific panel organized by the United Nations, concluded that carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and other greenhouse gas emissions were contributing to global warming. The panel stated that "most of the warming observed over the last 50 years is attributable to human activities."

The amount of CO<sub>2</sub> in the atmosphere is affected by natural processes and by human activity. Anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions (emissions resulting from human activity, including combustion of fossil fuels and changes in land use, especially deforestation), have been growing since the start of the industrial revolution (Figure 1). Natural processes gradually remove CO<sub>2</sub> from the atmosphere (for example, as it is used by plant life and dissolves in the ocean). Currently, the net removal of atmospheric CO<sub>2</sub> by natural processes is about half of the anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions. As a result, concentrations of CO<sub>2</sub> in the atmosphere have increased, from preindustrial levels of about 280 parts per million (ppm) to about 370 ppm today (Figure 2). Increases in the concentrations of greenhouse gases reduce the efficiency with which the Earth's surface radiates energy to space. This results in a positive radiative forcing that tends to warm the lower atmosphere and surface. As shown in Figure 3, global average surface temperatures have increased since the start of the industrial revolution.

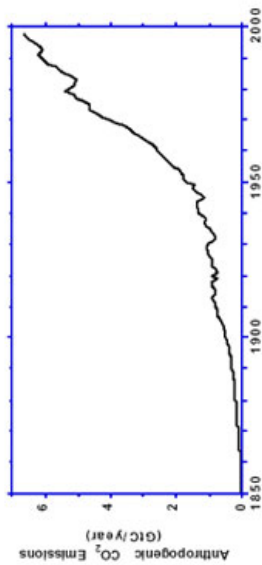


Figure 1. Global CO<sub>2</sub> emissions resulting from human activity (billion tons of carbon per year)

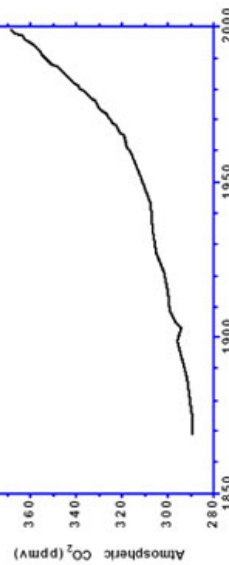


Figure 2. Atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations, parts per million.

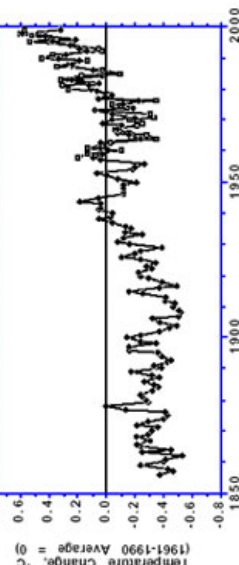
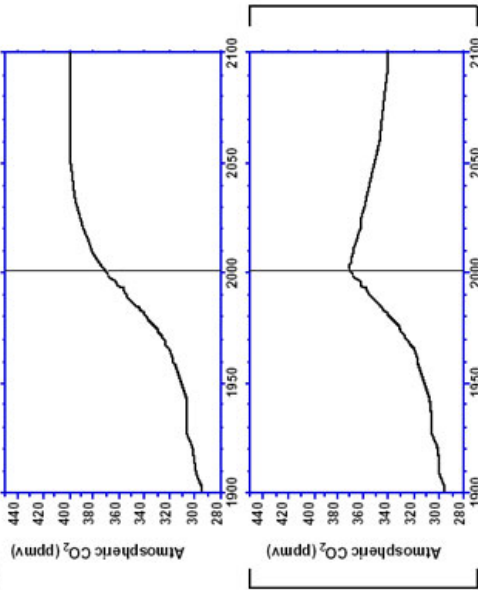


Figure 3. Average global surface temperatures, °C. The zero line is set to the average for the period 1961-1990.

Now consider a scenario in which the concentration of CO<sub>2</sub> in the atmosphere gradually rises [falls] to 400 ppm [340 ppm], about 8% higher [lower] than the level today, then stabilizes by the year 2100, as shown here:



- For this to occur, CO<sub>2</sub> emissions resulting from human activity would have to:
  - Continue to rise through the year 2100.
  - Gradually rise about 8% and then stabilize by the year 2100.
  - Gradually rise less than 8% and then stabilize by the year 2100.
  - Stabilize now at current rates.
  - Gradually fall about 8% and then stabilize by the year 2100.
  - Gradually fall more than 8% and then stabilize by the year 2100.
  - Immediately drop more than 8% and then stabilize by the year 2100.
- Assuming CO<sub>2</sub> concentrations follow the scenario above, the average global temperature would most likely:
  - Continue to rise through the year 2100.
  - Continue to rise, then stabilize by the year 2100.
  - Rise for a few more years, then peak, gradually fall and stabilize above current levels.
  - Stabilize now at current levels.
  - Rise for a few more years, then peak, gradually fall and stabilize below current levels.
  - Rise for a few more years, then peak and continue to fall through the year 2100.
  - Immediately drop, then stabilize by the year 2100 below current levels.

3. Why? Explain your choices (*briefly*):

### 6.5.3. Erkenntnisse

- Selbst hoch qualifizierte Personen haben nur ein geringes Verständnis des Klimasystems. Ein großer Teil der Probanden glaubte, dass die globale Temperatur unmittelbar und direkt auf Veränderungen der CO<sub>2</sub> - Emissionen bzw. Konzentration reagiere.
- Noch mehr glaubten, dass eine Stabilisierung der anthropogenen Emissionen nahe dem derzeitigen Niveau die Klimaerwärmung stoppen würde. Sie dachten, dass die Entwicklung der Erdtemperatur denselben Verlauf wie die CO<sub>2</sub> - Konzentration aufweisen müsse, d.h. wärmer wird, wenn CO<sub>2</sub> - Emissionen steigen und kühler wird, wenn die Emissionen sinken. In Wirklichkeit kann das Weltklima, d.h. die Erdoberflächentemperatur aber auch wärmer werden, obwohl die CO<sub>2</sub> - Emissionen sinken.
- Der Zusammenhang zwischen Zufluss und Abfluss wird nicht beachtet. Verringert sich der Zufluss (Emissionen), so glauben viele Vpn, auch wenn er weiterhin größer als der Abfluss (Abbau von CO<sub>2</sub>) bleibt, dass auch die Konzentration an CO<sub>2</sub> sinken müsse.
- Eine Veränderung der CO<sub>2</sub> - Emissionen (Zufluss) wird mit der Veränderung der Konzentration (Bestand) gleichgesetzt. Viele glaubten, diese müssten die gleiche qualitative Form aufweisen. In Wirklichkeit ist aber das Zusammenspiel aus Zu- und Abfluss entscheidend, um überhaupt irgendeine Aussage über die Bestandsentwicklung treffen zu können.
- Auch die Kyoto – Protokolle sind langfristig nicht zielführend. Sie bewirken nur eine Reduktion der Geschwindigkeit des Treibhauseffekts und sind bei weitem nicht in der Lage ihn zu stoppen. Die öffentliche Diskussion sollte über den *Bestand* an CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre geführt werden und nicht über die *Ausstoßraten*.
- Selbst einfach beschriebene Klimazusammenhänge werden von hoch ausgebildeten Personen nicht richtig interpretiert. Das erlaubt darauf zu schließen, dass auch Politiker und Entscheidungsträger, die in Realität noch viel komplexeren Zusammenhänge im Klima nicht richtig verstehen und einzuschätzen vermögen.

### 6.6. Weitere Untersuchungen in den USA und Kanada

Aufbauend auf der Erstuntersuchung von BOOTH-SWEENEY/STERMAN (2000) entstanden in der Folge auch einige Nachfolgeerhebungen mit denselben Aufgabenstellungen an amerikanischen und kanadischen High-Schools (vgl. FISHER 2003, HEINBOKEL/POTASH 2003, KUBANEK 2003, QUADEN/TICOTSKY 2003 UND ZARAZA 2003) sowie eine weitere an amerikanischen Studenten (LYNEIS/LYNEIS 2003). Der Aufbau der Untersuchungen war aufeinander abgestimmt, die beiden Fragestellungen mit jenen der BOOTH-

SWEENEY/STERMAN Studie ident: das Badewannenbeispiel (BT) mit quadratisch geformtem Zufluss sowie die CF-Fragestellung (sägezahnförmiger Zufluss). LYNEIS/LYNEIS (2003) und QUADEN/TICOTSKY (2003) verwendeten noch eine dritte Aufgabenstellung: die von OSSIMITZ (2001a) und KAINZ/OSSIMITZ (2002) bekannte Alpenhotel-Aufgabe mit ankommenden und abreisenden Gästen (vgl. Abb. 6.12.). Sie benutzten jedoch die von STERMAN (2002) adaptierte Version der Aufgabe mit einer anderen Deckgeschichte („Department-Store“ mit ein- und ausgehenden Kunden). ZARAZA (2003) schließlichielt sich an die Originalstudie von BOOTH-SWEENEY/STERMAN (2000) und verwendete als dritte Fragestellung den MC – Task (vgl. Kap. 6.1.2.).

Die Autoren referierten auf der System Dynamics Conference 2003 in New York gemeinsam von ihren Ergebnissen. Diese bestätigten in erster Linie die Ergebnisse aller Voruntersuchungen, brachten jedoch den Aspekt einer neuen Altersgruppe an Versuchspersonen mit niedrigerem Ausbildungsniveau mit ein. Generell ist einschränkend zu sagen, dass die Resultate dieser Studien teilweise nur bedingt, teilweise nur mit großer Vorsicht miteinander und mit den Vorgängeruntersuchungen vergleichbar sind, da zwar die Aufgabenstellungen an sich ident waren, die Rahmenbedingungen jedoch stark unterschiedlich. So wählten etwa QUADEN/TICOTSKY (2003) als Testpersonen für die BT und CF- Aufgabe nur die besten 50% ihrer Mathematikschüler aus. HEINBOKEL/POTASH (2003) erweiterten die BT-Aufgabe um ein STELLA Stock-Flow-Diagramm der dargestellten Situation und gaben zusätzlich zwei ihrer vier Testgruppen ausgiebige verbale Information zu den Aufgabenstellungen (was zu deutlich besseren Ergebnissen in diesen Gruppen führte). Die Probanden von FISHER (2003) und ZARAZA (2003) verfügten teilweise über nicht vernachlässigbare Vorerfahrung mit SD und jene von FISHER (2003) bekamen ebenfalls zusätzlich verbale Erläuterungen. Darüber hinaus unterschied FISHER (2003) bei der Auswertung und Beurteilung der Antworten nach den üblichen Kriterien nicht nur zwischen richtig und falsch (0 und 1), sondern bewertete auch halbrichtige Lösungen (=0,5) und beinahe richtige Lösungen (=0,75) – was selbstverständlich eine starke Verbesserung und Verzerrung sämtlicher Ergebnisse nach sich zieht.<sup>55</sup> Damit verglichen dürfte sich zwar die stark unterschiedliche Stichprobengröße der einzelnen Untersuchungen nur marginal auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse untereinander auswirken, auf sie sei aber dennoch hingewiesen. Die nachfolgenden Erkenntnisse sind aus diesen Gründen eher tendenziell und nicht als absolut fundierte Resultate zu verstehen.

---

<sup>55</sup> FISHER, ZARAZA, HEINBOKEL und POTASH waren Vertreter jener Bewegung, welche in den 1980er Jahren versuchte, SD auf breiter Ebene in Schulen zu etablieren (vgl. Kap. 2.4.). Von daher ist es verständlich, dass sie, um den Erfolg ihrer Lehrmethoden zu bestätigen, auch ein Interesse an einem guten Abschneiden der von ihnen unterrichteten Schüler hatten und auf diese unterschiedlichen Weisen bewusst oder unbewusst Einfluss auf das Abschneiden ihrer Probanden nahmen.

### 6.6.1. Bath Tub / Cash Flow (BT/CF)

Es wäre zu erwarten, dass High School Schüler gegenüber Studenten bzw. Absolventen vom MIT bei gleichen Aufgabenstellungen deutlich schlechter abschneiden. Dies war aber bei den einzelnen Erhebungen nicht immer der Fall. QUADEN/TICOTSKY (2003) beobachteten in Aufgabe A (BT, quadratisch geformter Zufluss, vgl. Abb. 6.1.) einen durchschnittlichen Kriterienwert von 77%, KUBANEK (2003) sowie HEINBOKEL/POTASH (2003) führten kein numerisches Ergebnis gemäß den Auswertungskriterien an, FISHER (2003) erhielt für vier unterschiedliche Gruppen von Schülern Ergebnisse von 69% - 98%<sup>56</sup>, ZARAZA (2003) 80% und schließlich LYNEIS/LYNEIS, welche ihre Studie an 18-22-jährigen College-Studenten durchführten, einen Wert von 79%. Zum Vergleich: BOOTH-SWEENEY/STERMAN (2000) 83%, OSSIMITZ (2001a) 42%, ZAHN/KAPMEIER (2001) 68% und KAINZ/OSSIMITZ (2002) 36%.

Für Aufgabe B wurde von den meisten Autoren die in Abb. 6.2. ersichtliche Deckgeschichte CF benutzt, teilweise jedoch auch die BT - Deckgeschichte. QUADEN/TICOTSKY (2003) erhielten einen durchschnittlichen Kriterienwert von 47%, KUBANEK (2003) sowie HEINBOKEL/POTASH (2003) legen auch hier kein numerisches Ergebnis gemäß den Auswertungskriterien dar, FISHER (2003) erhielt für die vier unterschiedlichen Gruppen von Schülern Ergebnisse von 39% - 91%<sup>57</sup>, ZARAZA (2003) 57% und LYNEIS/LYNEIS einen Wert von 48% bzw. 76% in einer Gruppe von Studenten einer Einführungsvorlesung in SD. Zum Vergleich: BOOTH-SWEENEY/STERMAN (2000) 48%, OSSIMITZ (2001a) 28%, und ZAHN/KAPMEIER (2001) 45%.

### 6.6.2. The Department Store

Die graphisch gegebene Fragestellung entsprach wie bereits hingewiesen, stark der Alpenhotel-Aufgabe von OSSIMITZ (2001a). Auch hier war der Graph der ankommenden Kunden bis etwa zur Mitte der Abbildung stets höher als jener der Kunden, die das Kaufhaus verließen. Gefragt nach dem Moment des maximalen Bestandes (Schnittpunkt) antworteten in der Untersuchung von QUADEN/TICOTSKY (2003) 13% jener mit guter und 5% jener mit schlechterer Mathematiknote richtig. In der an (überwiegend männlichen) Studenten durchgeführten Studie von LYNEIS/LYNEIS konnten 32% der Gruppe einer betriebswirtschaftlichen Lehrveranstaltung und 50% der Gruppe einer in die SD einführenden Lehrveranstaltung die korrekte Antwort finden. Zum Vergleich: KAINZ/OSSIMITZ (2002) 14% (Pretest) bzw. 67% (Posttest), OSSIMITZ (2001a) 24%, STERMAN (2002) 42%.

---

<sup>56</sup> FISHER (2003) wendete bei der Beurteilung die in 6.6. beschriebene verzerrende Auswertungsmethode an, wodurch die Ergebnisse nicht mit den anderen vergleichbar sind.

<sup>57</sup> (Ebenda)

### 6.6.3. The Manufacturing Case (MC)

ZARAZA (2003) führte seine Untersuchung an 82 High School Schülern durch. Diese hatten bereits eine mind. halbjährige, jedoch meist noch längere Erfahrung mit SD. Diese Tatsache scheint einen großen Einfluss auf das Abschneiden der Testpersonen gehabt zu haben, schnitt doch jene Untergruppe mit mehr als 1,5-jähriger SD-Erfahrung bei allen Aufgabenkategorien äußerst gut ab. Auch bei der MC - Fragestellung erreichten die Vpn ZARAZAS gesamt gesehen ein deutlich besseres Ergebnis als die MIT-Studenten der Originaluntersuchung (rund doppelt so hoch) – und das obwohl die Coverstory für High School Schüler ein unbekanntes Terrain darstellte.<sup>58</sup>

### 6.6.4. Erkenntnisse

- Viele Schüler hatten mit der Terminologie der CF bzw. der MC – Fragestellung Probleme. Es wurde vielen von ihnen daher teils durch verbale, teils durch graphische Zusatzinformation Hilfestellung geboten.
- Viele der Ergebnisse der High School Schüler lagen über jenen der MIT-Studenten von BOOTH-SWEENEY/STERMAN (2000), die anderen meist nur wenig darunter. Hierbei gilt es aber insbesondere die Hilfestellungen und die teilweise differierenden Auswertungsmethoden zu beachten. Die Ergebnisse jener wenigen, welche keinerlei Hilfestellung bekamen, liegen erwartungsgemäß deutlich unter den Resultaten der Originaluntersuchung (vgl. HEINBOKEL/POTASH 2003).
- Erfahrung mit SD führt zu besseren Ergebnissen, je größer diese Erfahrung ist, desto besser die Ergebnisse (vgl. FISHER 2003, ZARAZA 2003).

Die Untersuchungen machten wohl unbeabsichtigt auch auf einen äußerst wichtigen Aspekt aller empirischer Studien aufmerksam: Durch die Vielzahl an unterschiedlichen Untersuchungsleitern ist eine Vergleichbarkeit der einzelnen Studien untereinander nur noch schwer möglich. Neben den beabsichtigten unterschiedlichen Probandengruppen sind es insbesondere die Rahmenbedingungen der Studien, die zu diesem Umstand führen. Denn ganz generell versorgen – ohne damit unbedingt die Autoren der vorliegenden Untersuchungen zu meinen – einzelne Studienleiter ihre Testpersonen mit unterschiedlichen Informationen, bringen ihnen in den Unterrichtseinheiten vor der Erhebung noch entscheidende Erkenntnisse bei, oder aber benutzen ungleiche Auswertungskriterien. Dennoch – auch wenn es sich bei den vorliegenden Ergebnissen um in manchen Details ins positive verzerrte Resultate handelt – konnten auch diese empirischen Untersuchungen den Mangel an intuitivem Verständnis von Bestands- und

---

<sup>58</sup> Die genauen Prozentzahlen sind, bedingt durch ein Auswertungsproblem bei einem Kriterium und die dadurch nur indirekte Vergleichsmöglichkeit, an dieser Stelle nicht angeführt.

Flussgrößen sowie anderer fundamentaler Sachverhalte, wie etwa dem Lesen und Interpretieren von Graphen oder auch dem Umgehen mit Zeitverzögerungen, und damit den dringenden Bedarf an (Lehr-)Methoden, die diesen Defiziten entgegenwirken, nur bestätigen.

## **6.7. KAPMEIER (2004)**

Florian KAPMEIER von der Universität Stuttgart, der schon Mitautor der in Kapitel 6.2. geschilderten Studie „Bath Tub Dynamics. Results of a Systems Thinking Inventory at the Universität Stuttgart, Germany“ war (ZAHN/KAPMEIER 2001), wiederholte die schon bekannten Beispiele der Originaluntersuchung von BOOTH-SWEENEY und STERMAN noch einmal und fasste die Ergebnisse in KAPMEIER (2004) zusammen. Alles in allem konnte er die Erkenntnisse der Vorgängeruntersuchungen nur erneut bestätigen. Die Probanden waren Studierende der Universität Stuttgart, eine zweite Gruppe stellten Studenten internationaler Herkunft des „Stuttgart Institute of Management of Technology“ (SIMT) dar. Zusätzlich zu den Aufgabenstellungen Bath Tub (BT), Cash Flow (CF) und Manufacturing Case (MC) verwendete KAPMEIER auch die Department Store (DS) – Aufgabe (vgl. Kap. 6.6.2.).

Leider umfasste auch diese Studie KAPMEIERS, wie schon andere auch, eine nur relativ kleine Probandenzahl – zwischen 19 und 34 Personen nahmen pro Gruppe an der Untersuchung teil, was bedeutet, dass bereits *eine* richtige oder falsche Antwort zwischen 2,9% und 5,3% der gesamten Stichprobe ausmacht. Sämtliche Teilnehmer der SIMT-Gruppe sammelten zwischen den (mit mehreren Wochen Abstand durchgeführten) BT/CF und den MC/DS Aufgaben Erfahrungen mit dem Beer-Game. Von der anderen Gruppe an Probanden der Universität Stuttgart hatte niemand Erfahrung mit diesem Simulationsspiel. Je nach Gruppe und Aufgabenstellung waren 79% - 91% der teilnehmenden Testpersonen männlich, der überwiegende Großteil der Studenten befand sich in einer fortgeschrittenen Phase des Studiums. Alle Vpn waren Teilnehmer einer einführenden SD-Lehrveranstaltung.

### **6.7.1. Bath Tub / Cash Flow (BT/CF)**

In der BT-Aufgabe (Zufluss in quadratischer Wellenform – Aufgabe A, vgl. Abb. 6.1.) erreichten die Testpersonen der Universität Stuttgart mit 83% Durchschnittswert der zur Auswertung herangezogenen Kriterien, denselben Wert wie die MIT-Studenten der Originaluntersuchung von BOOTH-SWEENEY/STERMAN (2000). Die SIMT-Studenten hingegen erlangten einen Durchschnittswert von nur 65%. Alle Studenten schnitten, wie auch schon in anderen Studien beobachtet, bei jenem Kriterium das überprüft, ob der Graph diskontinuierliche Sprünge aufweist, am besten ab (91% Uni Stuttgart, 82% SIMT). Interessanterweise ergibt sich bei dem Kriterium, das auf die Übereinstimmung des Graphen

mit dem Nettofluss abzielt, ein deutlicher Unterschied von 78% vs. 50% (MIT 73%). In der Tat scheint es sich dabei um ein Schlüsselkriterium bzw. um eine Schlüsselfähigkeit zu handeln, welche bei Erfüllung mit großer Wahrscheinlichkeit zu einer korrekten Antwort führt. 23% der SIMT-Probanden unterlief der Fehler einen Bestandsgraphen mit derselben qualitativen Form, wie sie der Zufluss in der Aufgabe aufweist, zu zeichnen.

Die etwas schwierigere CF-Aufgabe (sägezahnförmiger Zufluss – Aufgabe B, vgl. Abb. 6.2.) lieferte, wie zu erwarten war, deutlich schlechtere Ergebnisse. Der Kriteriendurchschnittswert betrug bei der Gruppe der Uni Stuttgart 52%, bei der SIMT-Gruppe 34%. Zum Vergleich: BOOTH-SWEENEY/STERMAN (2000) 51%, OSSIMITZ (2001a) 48%, ZAHN/KAPMEIER (2001) 45%.

Auffallend ist hierbei, das schon in Aufgabe A beobachtete deutlich unterschiedliche Abschneiden der beiden Testgruppen. Die Probanden der SIMT-Gruppe hatten mit den Aufgabenstellungen durchwegs deutlich massivere Schwierigkeiten als die Universität Stuttgart – Gruppe. Magere 59% der Stuttgart – Gruppe zeichneten in Aufgabe B einen steigenden/fallenden Bestand, wenn der Zufluss größer/kleiner als der Abfluss war. Bei der SIMT-Gruppe schafften dies gar nur 30% (!). Besonders drastisch offenbarte sich das Unverständnis der Vpn in jenem Kriterium, welches das korrekte Maximum und Minimum des Bestandes überprüft. Um diese Werte zu erhalten, muss man lediglich die Fläche des Dreiecks zwischen Zufluss und Abfluss zum Startwert des Bestandes addieren. Nur 34% (Uni Stuttgart) bzw. 32% (SIMT) errechneten die richtigen Werte, d.h. rund 70% scheiterten.

### **6.7.2. The Manufacturing Case (MC)**

Sämtliche Teilnehmer der SIMT-Gruppe hatten vor Erhalt der MC- Aufgabenstellung (vgl. Abb. 6.7.) das Beer-Game gespielt, in der Untersuchungsgruppe der Uni Stuttgart hatte hingegen kein einziger Proband Erfahrung mit diesem Simulationsspiel. Wie in den anderen schon betrachteten Studien entdeckt, tendiert ein nicht unwesentlicher Teil der Vpn mit Beer-Game-Erfahrung dazu, die Aufgabenstellung mit dem Beer-Game zu verwechseln und einen oszillierenden Bestand vorherzusagen. Der Rest dieser Vpn erreicht hingegen in der Regel überdurchschnittlich gute Ergebnisse.

Die Versuchsgruppe der Universität Stuttgart erreichte bei dieser Aufgabenstellung einen durchschnittlichen Kriterienwert von 62% (vergleichbare Untergruppen anderer Studien: 33% BOOTH-SWEENEY/STERMAN 2000, 73% ZAHN/KAPMEIER 2001). Die deutlich bessere Leistung im Vergleich zu den MIT-Probanden dürfte wie schon bei ZAHN/KAPMEIER (2001) mit der großen Vorerfahrung der Testpersonen durch verpflichtende Lehrveranstaltungen im Zuge ihres Vordiploms zusammenhängen. Dennoch hatten auch sie beträchtliche Probleme im Detail: Bei nur 76% starteten (wie in der Angabe der Aufgabenstellung hingewiesen)

Produktion und Bestellungen bei 10.000 Einheiten. Rund die Hälfte der Vpn lies in der Folge richtigerweise die Produktionsrate über jene der Bestellungen steigen (notwendig um das Lager wieder aufzufüllen), nur 32% zeichneten jedoch auch einen korrekten Produktionsüberschuss. Mehr als 70% skizzierten einen zeitlichen Verlauf des Lagerbestandes, welcher nicht mit der von ihnen dargestellten Produktionsrate übereinstimmte.

Die SIMT-Gruppe (mit Beer-Game-Erfahrung) schnitt bei dieser Aufgabenstellung deutlich schlechter ab und erreichte nur einen Durchschnittskriterienwert von 31%, wobei beinahe 40% der 19 Testpersonen überhaupt keinen oder nur einen halbfertigen Produktionsgraphen zeichneten. Dementsprechend schlecht sind die Werte der einzelnen Kriterien. So skizzierten nur 45% der Vpn einen anfänglichen Gleichgewichtszustand, nur 23% eine die Bestellungen übersteigende Produktionsrate, nur 9% (2 Personen) einen Überschuss korrekter Größe und nur 18% einen Bestandsgraphen, der mit der von ihnen gewählten Entwicklung der Produktionsrate übereinstimmte.

### **6.7.3. Department Store (DS)**

Während in den ersten drei Untersuchungsbeispielen das Abschneiden der beiden Gruppen stark unterschiedlich war, war das in dieser letzten Aufgabenstellung (DS - vgl. Kap. 6.6.2.) nicht der Fall. Die entscheidende Frage nach dem Moment des maximalen Bestandes konnten 44% bzw. 42% richtig beantworten. Zum Vergleich: KAINZ/OSSIMITZ (2002) 14% (Pretest) bzw. 67% (Posttest), OSSIMITZ (2001a) 24%, STERMAN (2002) 42%. Rund ein Viertel der Vpn vermerkte, dass die Frage nicht beantwortbar sei. 27% wählte als Antwort den Moment des maximalen positiven Nettoflusses.

Die Kontrollfragen nach den Momenten der Maximalwerte der Flussgrößen, welche einfach nur abzulesen waren, bereiteten den Vpn keinerlei Probleme. Die Aufgabe war im Unterschied zur originalen Alpenhotel-Aufgabe von OSSIMITZ (2001) (Abb. 6.12) solcherart konstruiert, dass ab dem Schnittpunkt der negative Nettofluss deutlich größer war als es der positive Nettofluss vor dem Schnittpunkt war. Das bedeutet, dass sich dadurch am Ende des Betrachtungszeitraumes auf jeden Fall weniger Leute im Geschäft befinden als zu jedem anderen Zeitpunkt. Genau diese Frage nach dem minimalen Bestand konnten nur noch 26% richtig lösen während 38% (Uni Stuttgart) bzw. 21% (SIMT) meinten, die Frage sei nicht beantwortbar. Bei den restlichen Vpn war der häufigste Fehler, dass sie den Moment des größten negativen Nettoflusses wählten.

### **6.7.4. Erkenntnisse**

Auf Grund der geringen Probandenzahl konnte KAPMEIER nur wenige aussagekräftige signifikante Zusammenhänge betreffend das Abschneiden und die demographischen Daten

der Vpn finden. Er entdeckte jedoch, dass zunehmendes Alter bessere Ergebnisse zur Folge hatte und dass in der SIMT-Gruppe europäische Studenten bei den ersten drei Aufgabenstellungen besser abschnitten, wohingegen Studenten aus Nord- und Lateinamerika bei der DS-Aufgabe bessere Ergebnisse erzielten.

Alles in allem stimmten die Ergebnisse der Untersuchung, wenngleich die beiden Versuchsgruppen stark unterschiedliche Resultate lieferten, mit jenen der Vorgängeruntersuchungen, im Speziellen mit jenen der Originaluntersuchung von BOOTH-SWEENEY/STERMAN (2000) überein. In der abschließenden Diskussion der Ergebnisse spricht KAPMEIER einen überaus interessanten Aspekt der Stock-Flow-Thinking – Forschung an. Er weist auf eine große Ähnlichkeit in den Untersuchungsbeispielen zu jenen der so genannten PISA-Studie (Programme for International Student Assessment) hin. Im Rahmen dieser Studie wurden/werden in den Jahren 2000, 2003 und 2006 rund 200.000 Jugendliche in mehr als 30 Ländern einheitlichen Tests unterzogen, mit der Absicht vergleichbare Daten über die Ausbildungssysteme und –qualität in den einzelnen teilnehmenden Staaten zu erhalten. KAPMEIER entdeckt, dass einige der Prüfungsbeispiele der PISA-Studie den in diesem Kapitel beschriebenen Aufgabenstellungen nicht nur ähnlich sind, sondern dass auch in deren Rahmen oft direkt nach dem Verhalten von Bestands- und Flussgrößen in einem geschilderten System gefragt wird. Der Autor weist daher auf einen möglicherweise sehr lohnenden Gegenstand einer zukünftigen Untersuchung zum Thema Bestands- und Flussgrößen hin:

„According to the PISA findings, US American or German high school students are ranked much lower than their counterparts in Finland or Japan. Hence, it would be interesting to investigate whether subjects who perform poorly in the ‘Bathtub Dynamics’ tasks originate from countries that are ranked lower in the PISA study than the countries of high-performers.” KAPMEIER 2004, S. 30.

### **6.8. ARMENIA/ORNORI/BERTINI (2004)**

Die momentan letzte Untersuchung in der Reihe der Bathtub-Dynamics – Untersuchungen stellt eine Studie von Stefano ARMENIA, Riccardo ONORI und Adriano BERTINI von der italienischen Tor Vergata Universität in Rom dar (ARMENIA/ORNORI/BERTINI 2004). Sie unternahmen den Versuch herauszufinden, inwieweit ein SD-Kurs in der Lage ist, die Ergebnisse der Testpersonen zu verbessern. In gewissem Maße ähnelt diese Studie daher jener von KAINZ/OSSIMITZ (2002), wenngleich die Autoren auf diese Studie keinerlei Bezug nehmen. Die Probanden waren 21-23-jährige Studenten im letzten Jahr ihres Studiums der Management- Logistik- oder Produktionswissenschaften. Keiner der Studenten hatte Erfahrungen mit SD oder dem Beer-Game. Die Untersuchung war wie folgt aufgebaut: Im Pretest bekamen 66 Studenten die Aufgabenstellungen BT (Aufgabe A) und CF (Aufgabe B) (vgl. Abb. 6.1. und 6.2.) vorgelegt. Es folgte ein einführender SD-Kurs, bestehend aus vier

Unterrichtseinheiten, im abschließenden Posttest wurden die Aufgabenstellungen DS (vgl. Kap. 6.6.2.) und MC (vgl. Abb. 6.7) an 81 Studenten verteilt.

Zusätzlich zu den originalen Fragestellungen wurde durch drei Zusatzfragen versucht, die Gedankengänge der Vpn zu ergründen. Die Vpn sollten zu diesem Zweck ihre Interpretation der Aufgabenstellung, ihren Lösungsweg, eventuell aufgetretene Probleme, und auch ihre Meinung darüber, ob sie glaubten, dass ihnen der SD-Kurs oder eine andere Lehrveranstaltung bei der Lösungsfindung hilfreich war, beschreiben.

### **6.8.1. Pretest - Bath Tub / Cash Flow (BT/CF)**

Auf Grund der eben beschriebenen Zusatzfragen gaben die Autoren den Vpn im Vergleich zu anderen Studien deutlich mehr Zeit (30 anstatt meist ca. 10 Minuten). Die Ergebnisse waren die Üblichen: der Glaube, der Bestand müsse dieselbe qualitative Struktur haben wie der Zufluss, grobe Missachtung der Beziehung zwischen Bestands- und Flussgrößen und im Falle der BT (Aufgabe A) – Fragestellung ein Durchschnittskriterienwert von 65%. Zum Vergleich: BOOTH-SWEENEY/STERMAN (2000) 83%, KAPMEIER (2004) 83% bzw. 65%, KAINZ/OSSIMITZ (2002) 36% bzw. 54%, OSSIMITZ (2001a) 42%, ZAHN/KAPMEIER (2001) 68%. Die Testgruppe lag somit im Mittelfeld der Ergebnisse.

Aufgabe B – Deckgeschichte CF – lieferte wie bei den anderen Studien schlechtere Ergebnisse. Der Durchschnittswert der Kriterien lag bei 41%. Zum Vergleich: Booth-SWEENEY/STERMAN (2000) 51%, KAPMEIER (2004) 52% bzw. 34%, OSSIMITZ (2001a) 48%, ZAHN/KAPMEIER (2001) 45%, etc).

### **6.8.2. Posttest - The Manufacturing Case / The Department Store (MC/DS)**

Im Falle der DS-Aufgabenstellung erreichten die Vpn bei der Frage nach dem Moment des maximalen Bestandes 33%, bei jener nach dem Moment des minimalen Bestandes 23%. Zum Vergleich: KAPMEIER (2004) 44%/42% bzw. 26%, STERMAN (2002) 42% bzw. 30%, OSSIMITZ (2001a) 24% bzw. nicht durchgeführt, KAINZ/OSSIMITZ (2002) 14%/67% bzw. nicht durchgeführt. Es scheint, als ob bei dieser Aufgabenstellung der zwischenzeitliche SD-Kurs nicht unbedingt eine große positive Auswirkung auf das Abschneiden der Vpn gehabt habe.

Die MC – Fragestellung führte hingegen zu vergleichsweise guten Ergebnissen. Der Durchschnittswert der Kriterien lag bei 57% (BOOTH-SWEENEY/STERMAN 2000: 41%, KAPMEIER 2004: 62%, ZAHN/KAPMEIER 2001: 73%). Es gilt jedoch zu berücksichtigen, dass die Vpn – genauso wie jene von ZAHN/KAPMEIER (2001) und KAPMEIER (2004) – größere Vorerfahrung mit Produktionsmanagement hatten. Vermutlich war die Vorerfahrung bei den hier betreffenden Probanden sogar noch größer. Dennoch sind die Autoren der Meinung,

dass nicht die Vorerfahrung, sondern der absolvierte SD-Kurs die verglichen mit der Originaluntersuchung relativ guten Ergebnisse bewirkt habe.

### **6.8.3. Erkenntnisse**

Die Autoren der Studie kamen zu dem Schluss, dass der SD-Kurs durchwegs dazu beitrug, die Ergebnisse der Studenten zu verbessern. Sie argumentieren dies mit dem Umstand, dass jene Studenten, die SD-Konzepte bei der Lösung der Aufgabenstellungen anwandten oder aber vermerkten, dass sie glauben der SD-Kurs sei für sie hilfreich gewesen, durchwegs bessere Ergebnisse erzielten als jene, die die Konzepte nicht offensichtlich anwandten oder aber der Meinung waren, der Kurs habe keinen positiven Effekt gehabt.

Diese Erkenntnis der Autoren erscheint jedoch aus mehreren Gründen hinterfragenswert. Zum einen sind die Resultate der Vpn im Posttest keineswegs sonderlich gut, sie bleiben sogar hinter jenen der Untersuchungen von ZAHN/KAPMEIER (2001) und KAPMEIER (2004) zurück. Zum anderen hatten sie nicht zu vernachlässigende Vorerfahrung bei genau jener einzigen Fragestellung (MC), welche relativ gute Ergebnisse ergab. Generell erscheint es meines Erachtens nicht aussagekräftig, im Pretest und Posttest unterschiedliche Aufgabenstellungen, welche keinen direkten Vergleich untereinander ermöglichen, zu verwenden, um Erkenntnisse über eine mögliche Veränderung ziehen zu können. Wenn zugleich die Probanden bei genau jener Fragestellung, die im Posttest als Beweis für den positiven Effekt des zwischenzeitlichen SD-Kurses herangezogen wird, große Vorerfahrung aufweisen, dann gilt es, die Ergebnisse der Studie wohl eher vorsichtig zu interpretieren. Nichtsdestotrotz griffen die Autoren einen interessanten Aspekt der Untersuchungen neu auf, nämlich auf welche Art Verbesserungen erreichbar sind. Sie verließen dadurch das Terrain des reinen Aufzeigens der schon bestätigten Mängel und versuchten auch durch die Zusatzfragen den Gedankengängen der Vpn bei der Lösung der Aufgaben auf den Grund zu gehen. Leider führen sie dazu keine näheren Ergebnisse an. Die Autoren planen auch den Test in naher Zukunft an mehreren Gruppen, teilweise mit, teilweise ohne SD-Erfahrung, zu wiederholen und dadurch zu überprüfen, inwieweit ein Crashkurs in SD tatsächlich die Leistungen in den betreffenden Aufgabenstellungen in der Lage ist zu verbessern. Darüber hinaus möchten sie sich auch mit der Korrelation zwischen Leistung in den Aufgabenstellungen und jenen bei unterschiedlichen Lehrveranstaltungen im Rahmen des Studiums beschäftigen.

## 6.9. Zusammenfassung und Bedeutung der Ergebnisse

Die wichtigsten Ergebnisse dieser Untersuchungen und damit der aktuelle Stand der Forschung auf diesem Gebiet wurden in diesem Kapitel bereits mehrfach angesprochen und sollen daher an dieser Stelle nur kurz zusammengefasst werden.

Hoch ausgebildete Personen (und damit zukünftige Politiker und Entscheidungsträger) sind zu einem erschreckend hohen Prozentsatz nicht dazu in der Lage, aus äußerst einfachen graphisch (oder tabellarisch bzw. in Textform) dargestellten dynamischen Situationen richtige Schlüsse zu ziehen. Das Überführen der Information des zeitlichen Verhaltens bereits eines einzelnen Zuflusses auf das Verhalten des korrespondierenden Bestandes bereitet selbst dann große Schwierigkeiten, wenn der einzige Abfluss konstant (!) ist. Viele Personen unterliegen dabei der falschen Annahme, der Bestand müsse denselben qualitativen dynamischen Verlauf besitzen wie sein Zufluss. Ein Grundverständnis von Akkumulation sowie ein intuitives Verständnis von Bestandsgrößen und deren Flussgrößen sind bei vielen der Vpn nicht beobachtbar gewesen. So erkannten viele der Vpn die absolut fundamentalsten Regeln von Stocks und Flows nicht: Ist der Zufluss größer als der Abfluss, wächst der Bestand, ist das Umgekehrte der Fall, verkleinert er sich. Die Größe der Veränderung entspricht dabei exakt dem Nettofluss der Flussgrößen. Es ist nur schwer vorzustellen, dass die Probanden diese beinahe selbstverständlich anmutenden Regeln nicht verstehen oder nicht richtig anwenden können. Worin also die tatsächliche Ursache für ihr bedenkliches Abschneiden in den Studien liegt, ist die entscheidende Frage.

Diese Ergebnisse stellen nun hohe Anforderungen an Lehrer und Ausbilder an Schulen und Universitäten sowie an alle Organisationen, welche die Problemlösungskompetenz von Menschen oder die Fähigkeit zum systemischen Denken fördern wollen. Denn ein Verständnis von Stocks und Flows als Teil von beinahe allen in der Natur vorkommenden Systemen ist auch ein wichtiger Teil des ST. Aber auch abgesehen vom Ansatz des systemischen Denkens, sollten zumindest Studenten und Universitätsabgänger eigentlich in der Lage sein, die dargestellten Aufgabenstellungen ohne größere Probleme zu lösen. In der Realität begegnen wir Situationen, welche verglichen mit den untersuchten Aufgaben ungleich komplexer, dynamischer und teilweise hochgradig gegenüber Störungen und Schwellenwerten empfindlich sind. Sie beinhalten eine Vielzahl von Bestandsgrößen, Flussgrößen, Rückkoppelungen, Zeitverzögerungen, Fernwirkungen und nur selten besitzen wir vollständiges Wissen über die Systemstruktur. Oftmals handelt es sich um so genannte „Black Boxes“ bei denen wir nur eine Veränderung und die daraus resultierende Wirkung beobachten können, ohne genau Kenntnis darüber zu haben, wie es im Systeminneren zu diesem Ergebnis, zu dieser Wirkung kommt. In den meisten Fällen haben wir jedoch ein ungefähres Wissen oder ein genaues Teilwissen über die systeminternen Zusammenhänge

– man könnte als von „Grey Boxes“ sprechen, wenn man so will. Die Ergebnisse der Studien drängen zwingend die Vermutung auf, dass selbst in äußerst einfachen dynamischen Situationen mit vollkommen klarer Struktur das Einschätzungsvermögen vieler hoch ausgebildeter Personen sehr mangelhaft ist (vgl. STERMAN/BOOTH-SWEENEY 2002). Es stellt sich die Frage, wie dieselben Leute als zukünftige Entscheidungsträger in weit komplexeren „Grey Boxes“ - Situationen in der Lage sind, Entwicklungen richtig zu antizipieren, richtige Entscheidungen zu treffen und dementsprechende Maßnahmen zu setzen.

Erfahrungen mit SD führen, wie einige Untersuchungen schließen lassen, zu einer besseren Auffassungsgabe zumindest der untersuchten Aufgabenstellungen und zu besseren Ergebnissen. Die Ursache mag in der bei SD notwendigen präzisen Unterscheidung zwischen Bestands- und Flussgrößen liegen. Wie auch gezeigt werden konnte, kann bereits ein einmaliger Crashkurs in Sachen Stocks und Flows zu besseren – wenngleich auch nicht optimalen – Ergebnissen führen. Erfahrungen mit dem Beer-Game führten gesamt gesehen ebenfalls zu besseren Resultaten, Aufgabenstellungen, welche dem Beer-Game ähnlich sind (z.B. MC), werden aber oft fälschlicherweise mit diesem verwechselt. Trotz dieser Verwechslung scheint es, als ob eine in Richtung SD oder ST gehende Vorbildung ein Ansatz- und Hebelpunkt für die Behebung der gravierenden Defizite ist. Praktisch in allen Untersuchungen, in denen eine relevante Gruppe größere Vorerfahrung auf einem der Gebiete des SD oder ST hatte, schnitt diese auch besser als ihre Vergleichsgruppe ab (vgl. ZAHN/KAPMEIER 2001, KAINZ/OSSIMITZ 2002, FISHER 2003, ZARAZA 2003).

Die in einigen Untersuchungen (vgl. BOOTH-SWEENEY/STERMAN 2000, OSSIMITZ 2001a, KAINZ/OSSIMITZ 2002) auftretenden und teilweise hoch signifikanten Diskrepanzen in den Ergebnissen von Frauen und Männern sind mehr als überraschend und schwierig zu erklären. Trotz gleicher Vorbildung und teilweise sogar besseren Mathematikabschlussnoten schnitten Frauen durchwegs schlechter ab als ihre männlichen Kollegen. Die Autoren der betreffenden Studien nahmen davon Abstand, in Form von Mutmaßungen oder sonstigen nicht fundierten Hypothesen Erklärungen für dieses heikle Phänomen zu suchen. In der Tat kann diesen Unterschieden wohl nur durch eine eigens gestaltete Untersuchung auf den Grund gegangen werden.

Die Ergebnisse der Bathtub-Dynamics- und Stock-Flow-Thinking – Forschung wurden in den letzten Jahren in mehreren Ländern von unterschiedlichen Autoren bestätigt. Dadurch konnten eventuelle Zweifel an den so überraschend schlechten Ergebnissen der Erstuntersuchung von BOOTH-SWEENEY/STERMAN (2000) überzeugend ausgeräumt werden. In der Tat schnitt ein Großteil der Testpersonen der Nachfolgeuntersuchungen bei

vergleichbaren Aufgabenstellungen noch deutlich schlechter ab. Durch die zunehmende Zahl an Studien zum Thema, welche zum überwiegenden Teil die Fragestellungen der Erstuntersuchung ident übernehmen, entsteht jedoch eine gewisse Redundanz. Die Erkenntnisse können nur immer wieder von neuem bestätigt werden und nur selten werden neue Aspekte angesprochen. Die Entwicklung neuer Aufgabenstellungen anhand derer man die Ursachen für das beobachtete Unverständnis und die schlechten Ergebnisse erforschen könnte, würde den Forschungszweig aus diesem Grund ungeheuer beleben. Auch könnten Studien, die sich mit dem Erlernen des Stock-Flow-Thinkings und somit der Bekämpfung der Defizite auseinandersetzen, ähnlich jener von KAINZ/OSSIMITZ (2002), einen großen Fortschritt bewirken. Denn das Interesse und der Zweck des Forschungsgebietes darf nicht in einer dauerhaften Wiederholung der Ergebnisse anhand immer neuer Probanden, sondern sollte in der Entdeckung der Ursachen der Defizite und deren Bekämpfung liegen. Vielleicht vermag die vorliegende Arbeit einen wichtigen Impuls in diese Richtung zu geben.

## 7. Erklärungsversuche

Es besteht die Möglichkeit, dass für das schlechte Abschneiden der Probanden in all diesen Untersuchungen alternative Erklärungen bestehen. Es wäre bspw. denkbar, dass die Vpn einfach keine Lust hatten sich anzustrengen, oder aber sie die Aufgabenstellungen zu leicht, zu abstrakt oder zu verwirrend fanden und deshalb bewusst irgendeine beliebige Antwort wählten. Diese Eventualitäten sollen im folgenden Unterkapitel 7.1. „Einwände“ behandelt werden. Man kann vorweg nehmen, dass es sehr unwahrscheinlich ist, dass diese Einwände tatsächlich die Ergebnisse im negativen Sinne beeinflusst haben. Die vermutlich tatsächlich für die schlechten Ergebnisse der Untersuchungen verantwortlichen Ursachen werden anschließend in Kapitel 7.2. näher betrachtet.

### 7.1. Einwände

#### 7.1.1. Motivationsmangel

In allen beschriebenen Untersuchungen wurden die Vpn weder bezahlt, in Form von Noten beurteilt, noch sonst in irgendeiner Weise belohnt oder bestraft. Sie hatten also mit keinerlei Konsequenzen zu rechnen – egal ob sie sich anstrengen und bemühen oder einfach bewusst falsche Antworten wählen würden.

Es ist anzunehmen bzw. möglich, dass sich der Einsatz der Testpersonen und somit die Leistungen bei finanzieller Entschädigung, oder aber Benotung verbessert hätten, im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen war das aber betreffend der Bezahlung meist nicht möglich bzw. wurde im Falle der Benotung bewusst davon Abstand genommen. Andererseits berichten CAMERER/HOGARTH (1999) davon, dass eine Belohnung bzw. Bezahlung in empirischen Untersuchungen in den meisten Fällen keinerlei Auswirkung auf die Ergebnisse hat. Die Autoren haben zu diesem Zweck 74 empirische Untersuchungen aufgearbeitet und anhand derer versucht, die Relevanz von finanziellen Anreizen für eine Untersuchung herauszufinden. Sie kommen zu dem Schluss, dass eine Bezahlung zwar den Aufwand bzw. die Anstrengung der Testpersonen erhöht, dies aber nicht immer auch zu besseren Ergebnissen führt. Nur in einigen Arten von Untersuchungen, in denen es bspw. auf das Urteilsvermögen der Personen ankommt oder man mit höherer Gedächtnisleistung bessere Ergebnisse erzielen kann, oder aber in sehr sehr leichten Aufgaben, kann auch tatsächlich eine Verbesserung beobachtet werden. In einigen anderen Arten von Untersuchungen kann eine Bezahlung sogar kontraproduktiv sein und zu schlechteren(!) Ergebnissen führen (vgl. CAMERER/HOGARTH 1999, S. 1/6). Dabei handelt es sich typischerweise um Beurteilungs- oder Entscheidungsaufgaben. Eine durch die Bezahlung hervorgerufene erhöhte Nervosität, eine Überreaktion auf Feedback vom Untersuchungsleiter oder Übermotivation kann dann die Resultate auch durchaus

verschlechtern. Wie die Autoren berichten, hat eine Bezahlung bzw. Belohnung in den meisten Fällen keinerlei signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse. Eine begrenzte Wirkung dürfte aber durchaus vorhanden sein und so legen die Autoren Wert auf die Feststellung:

„The extreme positions, that incentives make no difference at all, or always eliminate persistent irrationalities, are false.“ CAMERER/HOGARTH 1999, S. 1;

Vor diesem Hintergrund scheint der Einwand, die Probanden hätten deshalb keine besseren Leistungen erbracht, da sie nicht bezahlt wurden oder die Motivation nicht groß genug gewesen wäre, deutlich relativiert. Vor allem da die verwendeten Aufgabenstellung eine gewisse Einsicht bzw. ein Verständnis eines Sachverhaltes verlangten und nicht etwa durch erhöhte Aufmerksamkeit oder größere Bereitschaft zur Merkfähigkeit zu lösen waren.

Was die Eventualität von *bewusst* falsch gewählten Antworten betrifft, bleibt zu sagen, dass dies zwar prinzipiell im Rahmen des Möglichen ist, durch die große Zahl von einander unabhängigen Untersuchungen aber ausgeschlossen werden kann. Dies mag unter gewissen Umständen in einer einzelnen Untersuchung passieren, in gleich mehreren mit gänzlich unterschiedlichen Versuchsgruppen und Versuchsleitern jedoch nicht.

### **7.1.2. Realitätsfremde Aufgabenstellungen**

Es ist natürlich vollkommen richtig, dass kaum jemand in einer realen Situation Probleme hat seine Badewanne richtig zu füllen oder aber zu beobachten, wann sich am meisten Gäste in seinem Hotel befunden haben. Vielleicht versteht also ein Großteil der Menschen sehr wohl die grundlegenden Konzepte des Stock-Flow-Thinkings und Zeitverzögerungen, tut sich aber nur sehr schwer, sie in diesen eher ungewohnten Situationen und der noch dazu ungewohnten Form der Datenaufbereitung (Graphen, Tabellen, etc.) auf die gleiche Weise wie im Alltag anzuwenden? Dem ist entgegen zu halten, dass ein grundlegender Unterschied zwischen den realen Beispielen und jenen der Untersuchung besteht: In der Realität ist es ausreichend, dem Bestand beim Wachsen zuzuschauen und irgendwann den Wasserhahn abzdrehen – es ist nicht nötig darüber nachzudenken, wie sich nun der Zufluss pro Minute im Vergleich zum Abfluss verhält – denn der Abfluss ist ohnehin geschlossen. Man beobachtet und handelt dann dementsprechend – man *reagiert*. Zu diesem Zweck ist man einer ständigen Rückkoppelung mittels der eigenen Wahrnehmung ausgesetzt. Man versucht den Wasserbestand auf ein gewisses Niveau zu bringen und macht dabei nichts anderes, als zu warten bis er das gewünschte Niveau erreicht hat, um dann den Wasserhahn abzdrehen. In den Untersuchungsbeispielen hingegen ging es darum, das Verhalten des Bestandes *vorherzusehen*. Es gibt eine Fülle von Beispielen realer Situationen, in denen es ebenfalls unbedingt notwendig ist den Entwicklungsverlauf zu antizipieren, da ein zu spätes Handeln dann nicht mehr effektiv oder möglich ist. Genau

solche Situationen sollten durch Untersuchungsbeispiele initiiert werden – jedoch auf einfacherem Niveau und deshalb auch im Rahmen trivialer Deckgeschichten. Wir begegnen heute immer öfter – ob im Wirtschaftsbereich, im Naturbereich, oder aber in der Entwicklungshilfe – komplexen Situationen mit einer Vielzahl an unterschiedlichen Variablen, langen Zeitverzögerungen und undurchsichtigen Wirkungszusammenhängen. Das bedeutet nun aber, dass bedingt durch die langen zeitlichen Verzögerungen, ein Lernen durch Beobachten oftmals nicht möglich ist. Die Auswirkungen treten an gänzlich anderer Stelle und oft beträchtlich verzögert auf, sodass wir unser Handeln meist gar nicht mehr mit diesen Auswirkungen in Zusammenhang bringen. Aus diesem Grund haben wir Computermodelle erschaffen, die uns helfen sollen dynamische Situationen richtig zu interpretieren. Diese Computermodelle liefern uns aber keinesfalls die optimale Entscheidung, welche wir dann nur noch ausführen brauchen, sondern sie bieten uns Tabellen, Graphiken oder Textinformation – sie bieten uns eine Entscheidungsgrundlage. Es liegt dann an uns, diese Informationen richtig zu interpretieren und somit genau das zu tun, was in den beschriebenen Untersuchungen der Fall war – mit dem einzigen Unterschied vermutlich, dass die hier getesteten Situationen um einen vielfachen Faktor simpler waren als reale Situationen. Auch die Art der Datendarstellung, meist in Graphen- oder Tabellenform, entspricht der Datendarstellung, welche uns Computer liefern. Wie KAINZ/OSSIMITZ (2002) zeigen konnten, sind die Interpretation und der Umgang mit Graphen nicht die Quelle der schlechten Testergebnisse. Aufgabenstellungen in Tabellen- oder gar Textform liefern weitestgehend dieselben Ergebnisse. Eventuell auftretende bessere Ergebnisse ergeben sich eher durch die Möglichkeit des mathematischen Ermitteln des richtigen Resultats und nicht weil diese Darstellungsformen ein besseres Sachverständnis bewirken. Die Testpersonen waren allesamt Studenten, teilweise bereits Absolventen einer weltweit angesehenen Eliteuniversität. Diese Personen sind es, die in ihrem späteren Berufsleben als Manager, Politiker, Forscher oder Consulter Entscheidungen treffen, von welchen sehr viel Geld, Arbeitsplätze oder gar wie in der Entwicklungshilfe Menschenleben abhängen. Für sie handelte es sich bei der verwendeten Form der Informationsdarstellung sehr wohl um eine vertraute, bekannte und keinesfalls realitätsfremde Situation. Dass der Großteil von ihnen bereits bei derart einfachen Aufgabenstellungen an die Grenze ihrer Leistungsfähigkeit und korrekten Interpretationsfähigkeit stößt, stimmt nicht nur nachdenklich, sondern sollte uns wachrütteln, gegen diese Defizite etwas zu unternehmen.

### 7.1.3. Zeitmangel

Es wäre auch denkbar, dass die Testpersonen für die korrekte Erfüllung der Aufgaben ganz einfach zu wenig Zeit zur Verfügung hatten. Dieser Punkt lässt sich aus den Untersuchungsberichten der Autoren nur teilweise rekonstruieren. Während bspw. in den Erhebungen von FISHER (2003), KAINZ/OSSIMITZ (2002), LYNEIS/LYNEIS (2003) und OSSIMITZ (2001a, 2001b) eher großzügig mit Zeit umgegangen wurde bzw. worden sein dürfte und dieser Einwand daher keine Berechtigung haben sollte, haben bspw. BOOTH-SWEENEY/STERMAN (2000) und STERMAN/BOOTH-SWEENEY (2002) eher strikt auf die limitierte Zeit geachtet. An gleich mehreren Stellen weisen sie auf die den Probanden zur Verfügung stehende Zeit (von meist 10 Minuten) hin und ziehen auch selbst die Möglichkeit eines Zeitmangels in manchen ihrer Aufgabenstellungen in Betracht (vgl. BOOTH-SWEENEY/STERMAN 2000, S.15, 25, 30; STERMAN/BOOTH-SWEENEY 2002, S.9, 12/13, 20). Sie räumen zwar ein, dass mehr Zeit die Leistungen verbessern könnte, sollte Zeitmangel aber in ihren Untersuchungen eine Quelle der Defizite gewesen sein, legen sie dies zu Lasten der Probanden aus:

“Given the importance and ubiquity of stock and flow structures people should be able to infer their dynamics quickly and reliably; their failure to do so even in a relatively short period of time is a further indicator of their poor understanding of these critical concepts.” BOOTH-SWEENEY/STERMAN 2000, S. 30;

Außerdem muss man sich vor Augen halten, dass wohl auch in realen Situationen oftmals Zeitdruck vorhanden ist. Die Vpn waren es also zum einen durchaus gewöhnt unter Zeitdruck zu arbeiten, zum anderen ging es vor allem um Verständnisfragen in äußerst simpel gestalteten Situationen, welche kein übermäßig langes Nachdenken erfordern sollten. Auch vergleichbare Entscheidungen in der Realität müssen oftmals schnell getroffen werden. Zusammenfassend ist zu sagen, dass Zeitmangel aus diesen Gründen, und auch da in jenen Untersuchungen ohne strikte Zeiteinhaltung die Ergebnisse nicht besser waren, keinen entscheidenden Einfluss auf die Resultate gehabt haben sollte.

## 7.2. Stock-Flow-Unverständnis und mentale Modelle

Es deutet vieles darauf hin, dass die Vpn (und somit vermutlich auch ein großer Teil der Allgemeinheit) fehlerhafte mentale Modelle von dynamischen Situationen besitzen. Wir konstruieren mentale Modelle, um die Komplexität von Situationen zu verringern. Für dynamische Systeme sind diese vereinfachten geistigen Vorstellungen von der Struktur des Systems jedoch oftmals falsch. Die Fähigkeit des Menschen das dynamische Verhalten selbst einfachster Systeme vorherzusagen scheint stark begrenzt. Wie MOXNES (1998/2000) erarbeitete, denken wir dabei zu oft in statischen mentalen Modellen (vgl. Kap. 5.4.). Dies dürfte auch auf die hier untersuchten Aufgabenstellungen zutreffen. Denn in so gut wie allen

Fragestellungen der Untersuchungen ist ein dynamisches Vorstellungsvermögen und damit auch ein dynamisches Modell von Nöten. Sehr oft war beobachtbar, dass die Vpn Bestandsgrößen mit ihren Flussgrößen verwechselten. Dies entspricht im übertragenen Sinn auch den statischen Modellen von MOXNES: je höher der Zufluss, desto höher der Bestand – je niedriger der Zufluss, desto niedriger der Bestand. Ist der Zufluss steigend – steigt auch der Bestand, wird er kleiner, dann muss auch der Bestand kleiner werden. Dieses Denken ist selbstverständlich falsch. Denn es ist stets notwendig, den Zufluss mit dem Abfluss zu vergleichen, um überhaupt irgendeine Aussage über das Verhalten des Bestandes treffen zu können. Ein dynamisches mentales Modell macht genau das – es berücksichtigt den Nettofluss. Es scheint, als ob diese Berücksichtigung des Nettoflusses in der Tat einer der Schlüsselpunkte zu einem besseren dynamischen Vorstellungs- und Einschätzungsvermögen sein könnte.

STERMAN hat die Ursache für das menschliche Versagen in komplexen Situationen als „Misperception of Feedback“ (MOF) bezeichnet (vgl. STERMAN 1989 und DIEHL/STERMAN 1995 bzw. Kap. 2.5.). Dies schließt sehr eng an die eben beschriebenen falschen mentalen Modelle an, denn er versteht darunter ein Ignorieren von Rückkoppelungsstrukturen und Zeitverzögerungen sowie ein Unverständnis von Stocks und Flows und nichtlinearen Zusammenhängen, welche allesamt die Stärke unterschiedlicher Rückkoppelungen verändern und beeinflussen. Er vereinigt in seiner MOF-Hypothese sozusagen gleich mehrere Ursachen. Dennoch führt er sie alle auf zwei Fehler in unseren mentalen Modellen zurück: Erstens auf eine – verglichen mit der Komplexität von Systemen an sich – dramatisch vereinfachte Vorstellung von der kausalen Struktur einer Situation und zweitens auf eine Unfähigkeit, selbst aus den einfachsten Modellen die Dynamik eines Systems richtig abzuleiten. Diese beiden Fehler sind für ihn wiederum Folge einer beschränkten Ratio:

„Both are direct consequences of bounded rationality, that is, the many limitations of attention, memory, recall, information processing capability, and time that constrain human decision making.“ STERMAN 2000, S. 27;

Wenngleich eine beschränkte Ratio für die Untersuchungen des Stock-Flow-Thinkings auf Grund des äußerst geringen Schwierigkeitsgrades der Aufgabenstellungen nicht zutreffend sein dürfte, enthält STERMANS MOF-Hypothese einige sehr wichtige Erkenntnisse. In der Tat scheinen auch in der Auffassungsgabe und im Verstehen von Rückkoppelungsstrukturen immense Defizite zu bestehen, diese machen sich jedoch erst in komplexeren als den untersuchten Problemstellungen bemerkbar, was in der Sache selbst begründet ist. Denn in den benutzten Aufgabenstellungen waren kaum Rückkoppelungsstrukturen enthalten. Dennoch scheinen auch für diese Defizite fehlerhafte mentale Modelle verantwortlich zu sein.

In engem Zusammenhang mit den fehlerhaften mentalen Modellen und auch mit der Verwendung von statischen an Stelle von dynamischen Modellen steht das Unverständnis von Bestands- und Flussgrößen an sich. Die Untersuchungen lassen keinen Zweifel daran, dass ein großer Teil von uns Menschen keine korrekte Vorstellung von Beständen und ihrer Veränderung pro Zeiteinheit besitzt. Selbst in grundlegendsten Aufgabenstellungen tritt dieses Unverständnis zu Tage. Ohne korrektes Wissen über diese beiden Bestandteile von allen dynamischen Systemen ist es wohl auch nicht möglich, die mentalen Modelle zu korrigieren. Dazu ist nicht nur die Fähigkeit nötig, Bestands- und Flussgrößen identifizieren zu können, sondern insbesondere ihre Bedeutung innerhalb von Systemen und ihr dynamisches Zusammenspiel richtig einzuschätzen.

Ein erster Schritt dürfte es also sein, diese mentalen Modelle anhand einfachster dynamischer Situationen wie den untersuchten, vom statischen in den dynamischen Zustand überzuführen, d.h. Bestands- und Flussgrößen und ihr Zusammenspiel mittels Nettofluss zu verstehen. Anschließend sollte durch geeignete theoretische und praktische Mittel versucht werden, das Verständnis von Rückkoppelungen, nichtlinearen Zusammenhängen und Zeitverzögerungen ebenso verstärkt in die mentalen Modelle zu integrieren. Gelingt dies, ist ein wichtiges Stück in Richtung eines effizienteren Denkens und Handelns getan.

## 8. Die Bedeutung der Theorie von Stocks und Flows für diese Untersuchungen

In Kapitel 4 und 5 wurde der Versuch unternommen, eine ausführliche theoretische Betrachtung von Bestands- und Flussgrößen vorzunehmen. Genau diese Größen sind nicht nur für die dynamische Entwicklung von Systemen verantwortlich, sondern die Schwierigkeit, sie zu unterscheiden und zu handhaben, ist auch eine der Wurzeln für die äußerst mangelhaften und teilweise beunruhigenden Resultate, der in Kapitel 2.5. angesprochenen Forschung von dynamisch komplexen Situationen. Aus diesem Grund wurde der Umgang von Menschen mit diesen Größen Forschungsgegenstand mehrerer empirischer Untersuchungen, welche in Kapitel 6 dargestellt wurden.

Die theoretische Betrachtung von Bestands- und Flussgrößen bietet die Möglichkeit sich auf einer Metaebene mit diesen Begriffen auseinander zu setzen. Die Studien der Bathtub-Dynamics – Forschung konnten eindrucksvoll zeigen, dass Personen ohne vorherige Erfahrung mit Bestands- und Flussgrößen enorme Schwierigkeiten bei selbst einfachsten Aufgabenstellungen aufweisen. Sie konnten auch zeigen, dass Personen mit Vorerfahrungen in SD und ST vergleichsweise deutlich besser abschnitten, wenngleich auch noch immer weit entfernt von optimalem Verhalten. Während ST die notwendigen Fähigkeiten zu einem besseren Verständnis von Akkumulation und die Unterscheidung und den Umgang mit Stocks und Flows eher indirekt (aber dennoch deutlich) fördert, ist die bei der SD – Methode notwendige Unterteilung in Bestands- und Flussgrößen noch besser dazu geeignet. Man ist gezwungen, exakt zwischen diesen beiden Arten von Systemkomponenten zu unterscheiden. Um mit Hilfe der SD selbst komplexe Systeme entsprechend simulieren zu können, benötigt es jedoch in der Regel ein größeres Maß an Erfahrung. Gerade die in dieser Arbeit präsentierte Theorie von Bestands- und Flussgrößen kann daher behilflich sein, die Defizite auch ohne langwierige Vorerfahrung zu beseitigen. Denn diese liegen mit großer Wahrscheinlichkeit nicht darin begründet, dass die Vpn das Prinzip von Akkumulation und Struktur von Stocks und Flows grundsätzlich nicht verstehen, sondern eher darin, dass sie niemals auf theoretischer Ebene mit diesen Größen konfrontiert wurden. Besitzt eine hoch ausgebildete Person einmal ein theoretisches Grundwissen, ist anzunehmen, dass sie dazu in der Lage sind, dieses Know-how zumindest auf einfache Situationen (wie die hier untersuchten Aufgabenstellungen) zu übertragen und richtig anzuwenden.

Durch den Mangel an theoretischen Aussagen zum Thema ist es für Lehrer und Auszubildende kaum möglich, ihren Schülern und Studenten die Problematik und Wichtigkeit von Bestands- und Flussgrößen didaktisch zu vermitteln. Aus diesem Grund kann der in Kapitel 4 (und 5) erarbeitete Abriss einer Theorie dazu beitragen, die in den diversen Studien beobachteten

Mängel zu bekämpfen. Denn solange man nicht die Möglichkeit besitzt, auf ein Gedankenkonstrukt zum Thema zurückzugreifen, ergeben sich diese Verständnisprobleme in bereits einfachsten Aufgabenstellungen mehr oder weniger zwangsläufig. Eine theoretische Auseinandersetzung bietet die Möglichkeit, die wichtigsten Konzepte vermittel- und auch erlernbar zu machen.

Die in dieser Arbeit vorgestellte Theorie von Bestands- und Flussgrößen erhebt keineswegs den Anspruch auf Vollständigkeit bzw. den Anspruch, den eben angesprochenen Nutzen vollends erfüllen zu können. Vielmehr versteht sie sich als erstmaligen Anstoß sich im Forschungsbereich des Stock-Flow-Thinkings intensiver auf einer theoretischen Ebene mit diesen weitverbreiteten Systemkomponenten und Verursachern von allen dynamischen Prozessen auseinander zu setzen. Der Forschungszweig sollte von der Wiederholung der reinen Beobachtung und dem Aufzeigen der so stark ausgeprägten Verständnismängel einfachster dynamischer Situationen von selbst hoch ausgebildeten Personen, zu einer Entwicklung von wirksamen Verbesserungsmaßnahmen und Lehrmethoden übergehen. Zu diesem Zweck scheint es eine Erfolg versprechende Möglichkeit zu sein, über die Erarbeitung einer Theorie Leitlinien für den Umgang mit Bestands- und Flussgrößen zu erlangen. Gleichzeitig sollten Erkenntnisse und Leitlinien der Theorie keinesfalls zu abstrakt oder wissenschaftlich sein, ist es doch das oberste Ziel, diese Erkenntnisse auch für die breite Bevölkerung vermittelbar zu machen, sodass ein Verständnis von Dynamik in Systemen und deren Bedeutung und Zusammenhängen bereits in Schulen gelehrt werden kann. Dass eine umfassende Erfahrung mit SD das Verständnis von Stocks und Flows erhöht, konnten die empirischen Untersuchungen zeigen. Da sich aber nur ein relativ geringer Teil der Bevölkerung und auch der Entscheidungsträger mit systemischem Denken sowie SD auseinandersetzt, könnten solche einfache Leitlinien und Lehrbeispiele einen großen Effekt zeigen.

Nachfolgend sind einige der wichtigsten Regeln für die Beachtung von Dynamik, welche in Kapitel 4 und 5 erarbeitet wurden, angeführt. So banal einige dieser Aussagen auch klingen mögen, die angeführten Erhebungen konnten zeigen, dass sie in der Praxis missachtet werden. Die Leistung der vorliegenden Arbeit liegt aber nicht so sehr in der Erarbeitung dieser Regeln – denn einige wurden auch schon von anderen Autoren mehr oder weniger genau angesprochen – sondern eher in der ausgedehnten Betrachtung und theoretischen Auseinandersetzung mit Bestands- und Flussgrößen. Die nachfolgend zusammengefassten Regeln und Leitlinien an Testpersonen allerdings in der Hoffnung zu vermitteln, sie würden das Sachverständnis dynamischer Situationen mit einem Schlag erhöhen, wäre jedoch sicherlich zu viel erwartet. Vielmehr sollten die Testpersonen (und in weiterer Folge alle Schüler und Studenten) auf der theoretischen Metaebene mit Stocks und Flows konfrontiert

werden, sodass sie diese Leitlinien auch tatsächlich vollkommen in sich aufnehmen und sich ein neues, korrektes intuitives Verständnis von Bestands- und Flussgrößen, deren Bedeutung und Rolle in Systemen, sowie von dynamischen Prozessen ergibt. Für diese Auseinandersetzung stellt die in Kapitel 4 und 5 vorgestellte Betrachtung einen ersten Abriss und Ausgangspunkt dar. Die Relevanz dieser Arbeit für die Untersuchungen des Stock-Flow-Thinkings besteht also darin, dass die theoretische Betrachtung bei der Bekämpfung der beobachteten Mängel helfen soll und somit zukünftige Ergebnisse derselben Aufgabenstellungen verbessert werden.

### Die wichtigsten aus Kapitel 4 ableitbaren Regeln bzw. Leitlinien für die Einschätzung von dynamischen Prozessen:

Bestandsgrößen sind zeitpunktbezogene Größen. Sie bilden den momentanen Zustand eines Systems ab.

Flussgrößen sind zeitraumbezogen. Sie stellen die Veränderung der Bestandsgrößen dar – Zuflüsse führen zu einer Vergrößerung des Bestandes, Abflüsse zu einer Verkleinerung.

Bestandsgrößen können sich **ausschließlich** über Flussgrößen verändern.

- Eine Steuerung eines Bestandes kann daher nur über die Beeinflussung von Zu- und Abflüssen erfolgen.
- Um überhaupt irgendeine Vorhersage über die Entwicklung des Bestandes treffen zu können, gilt es die **Zu- und Abflüsse miteinander zu vergleichen**. Sie ergeben saldiert den **Nettofluss**, d.h. die tatsächliche Veränderung des Bestandes im beobachteten Zeitraum. Es ist dabei vollkommen egal, ob ein Zufluss oder Abfluss in diesem Zeitraum gewachsen oder kleiner geworden ist – erst die Betrachtung des Saldos aller Flüsse, d.h. der Nettofluss, erlaubt eine Aussage über die Bestandsentwicklung.
- Der Nettofluss ist daher das absolut entscheidende Mittel um dynamische Prozesse einschätzen zu können. Es gilt:
  - Ist die Summe aller Zuflüsse größer als jene der Abflüsse, so ist der Nettofluss positiv – der Bestand nimmt zu.
  - Ist die Summe aller Zuflüsse kleiner als jene der Abflüsse, so ist der Nettofluss negativ – der Bestand nimmt ab.
- Die Geschwindigkeit der Veränderung eines Bestandes ist von der Größe des Nettoflusses abhängig.
  - Ein konstanter Nettofluss ( $\neq 0$ ) ergibt einen sich linear verändernden Bestand. Er wird pro Zeiteinheit immer um denselben gleichbleibenden Betrag vergrößert bzw. verkleinert.
  - Ein ins Positive oder Negative linear wachsender Nettofluss bewirkt einen immer schneller wachsenden bzw. schrumpfenden Bestand, da er pro Zeiteinheit stets um einen immer größer werdenden Teil wächst/schrumpft.
  - Ein positiver oder negativer Nettofluss, der linear abnimmt (in Richtung 0) führt zu einem immer langsamer wachsenden/schrumpfenden Bestand – d.h. zu einem asymptotischen Wachstum. Dieses hört aber erst dann auf, wenn der Nettofluss den Wert Null erreicht.

## 9. Bestands- und Flussgrößen in geographischen Kontexten

Auch in geographischen Kontexten spielen Bestands- und Flussgrößen, genauso wie in vielen anderen Wissenschaftsbereichen eine wichtige, wenngleich oft unbeachtete Rolle. Das folgende Kapitel soll dafür genutzt werden, die Vielschichtigkeit und Wichtigkeit dieser beiden Größen in der Geographie aufzuzeigen, was aufgrund der Allgegenwärtigkeit von Stocks und Flows in geographischen Zusammenhängen einerseits schwierig, andererseits bei Lektüre der vorangegangenen Kapitel an einigen Stellen auch selbsterklärend ist. In gewissem Rahmen war es dennoch sinnvoll, Erkenntnisse aus vorherigen Kapiteln, speziell aus jenem der theoretischen Betrachtung, auf den folgenden Seiten anhand geographischer Beispiele zu wiederholen.

### 9.1. Klima

Eines der wohl allgegenwärtigsten geographischen Systeme ist jenes des Klimas. Das Klimasystem besteht aus einer überdurchschnittlich großen Zahl an Variablen, die sich in einem größtenteils bekannten, teilweise aber auch unbekanntem Wirkungsgefüge untereinander befinden. Die exakten Beziehungen und Rückkoppelungen zwischen den einzelnen Variablen sind noch keineswegs vollständig bekannt. Die empirische Studie „Cloudy Skies: Assessing Public Understanding of Global Warming.“ von STERMAN/BOOTH-SWEENEY (2002) beschäftigte sich mit einem speziellen Bereich des Klimasystems – dem Treibhauseffekt. Dieser wird im Wesentlichen durch eine Erhöhung der Konzentration von mindestens dreiatomigen Spurengasen in der Atmosphäre hervorgerufen, welche in den Strahlungshaushalt der Erde eingreifen, indem sie die Gegenstrahlung (Reflexion von Ausstrahlung der Erde und der reflektierten Strahlung) erhöhen. Die Autoren konnten zeigen, dass bei der Schilderung der Anreicherung des treibhauswirksamen Gases CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre die Grundprinzipien von Akkumulation von einer großen Zahl hoch qualifizierter Personen vollkommen missachtet werden. Obwohl es sich dabei um sehr simple Zusammenhänge handelte, waren die Vpn (Studenten vom MIT und Harvard) nicht in der Lage, zukünftige Entwicklungen des Systems einigermaßen korrekt vorherzusehen. In der Tat ist die derzeitige Emissionsrate an CO<sub>2</sub> mehr als doppelt so groß wie ihre Abbaurrate in der Atmosphäre.<sup>59</sup> So lange sich die Emissionen demnach nicht um mindestens die Hälfte reduzieren, oder aber die Abbaurrate auf das Doppelte gesteigert wird, wird sich die Konzentration an CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre weiterhin erhöhen – vgl. Abb. 9.1. Eine höhere CO<sub>2</sub> – Konzentration bedeutet im Allgemeinen auch einen verstärkten Treibhauseffekt mit

---

<sup>59</sup> Bei CO<sub>2</sub> handelt es sich zwar nicht um das treibhauswirksamste Gas – bspw. hat Methan einen weitaus größeren Wirkungsgrad – durch die vergleichsweise zu den anderen Treibhausgasen übermäßig starke Konzentration an CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre handelt es sich bei CO<sub>2</sub> jedoch um das wichtigste Treibhausgas.

steigenden Temperaturen und gewaltigen Auswirkungen auf das ökologische Gleichgewicht. Zudem ist die derzeitige Konzentration an CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre, d.h. der CO<sub>2</sub> - Bestand größer als jemals in den letzten 420 000 Jahren (und mit relativ großer Wahrscheinlichkeit auch größer als jemals in den letzten 20 Millionen Jahren), die Wachstumsrate des Bestandes größer als jemals in den letzten 20 000 Jahren (vgl. IPCC 2001a, S. 7).

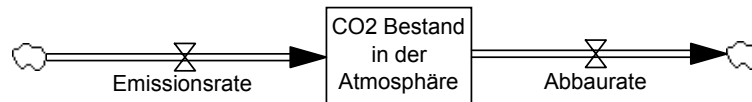


Abb. 9.1.

Die Testpersonen wurden mit einer Beschreibung der Zusammenhänge im Klimasystem konfrontiert und mussten anschließend das Verhalten des Systems in zwei möglichen Szenarien vorhersagen. Ersteres stellte ein vollständiges Verschwinden sämtlicher CO<sub>2</sub> – Emissionen von einem Moment auf den anderen dar. Dies sollte in erster Linie veranschaulichen, dass selbst in diesem äußerst unrealistischen Fall die Welttemperatur durch die hohe Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre und die geringe Abbaurrate anfangs weiterhin steigen würde und erst nach einem relativ langen Zeitraum (nach einer Modellberechnung von STERMAN/BOOTH-SWEENEY (2002) mit einem von FIDDAMAN (1997) entwickelten systemdynamischen Klimamodell erst nach 30 Jahren) zu sinken beginnen würde. Das zweite Szenario umfasste ähnlich der 1997 festgelegten Kyoto-Protokolle ein Einfrieren der CO<sub>2</sub> – Emissionen bis zum Jahr 2012 nahe dem derzeitigen Niveau<sup>60</sup>. In diesem Fall wäre die Ausstoßrate weiterhin deutlich höher als die Abbaurrate – denn wie erwähnt ist die derzeitige Emissionsrate ungefähr doppelt so groß wie die Abbaurrate. Die Konzentration in der Luft und damit der Treibhauseffekt würde sich dadurch ungehindert weiterhin erhöhen – nur eben etwas langsamer. In beiden Szenarien missachteten die Testpersonen diese Zusammenhänge und es offenbarte sich durchwegs der Glaube, das Klima würde unmittelbar auf eine Veränderung der CO<sub>2</sub> – Emissionen reagieren. Es ist anzunehmen, dass auch sehr viele Politiker und Entscheidungsträger diesen falschen Sichtweisen des Klimasystems unterliegen. Wie STERMAN und BOOTH-SWEENEY festhalten, unterstützt der falsche Glaube des unmittelbaren Reagierens des Klimasystems eine passive und abwartende Klimapolitik. Viele Vpn waren auch der Meinung, dass eine Stabilisation des derzeitigen CO<sub>2</sub> – Emissionsniveaus die Klimaerwärmung stoppen, wenn nicht gar rückgängig machen würde – ein fataler Irrglaube. Andere wiederum begingen bei der Vorhersage des Verhaltens des Systems derart sachlogische Fehler, dass angenommen werden kann, dass sie die geschilderten Zusammenhänge nicht verstanden hatten. Andrew

<sup>60</sup> Genauer wurde in den Kyoto – Protokollen die Senkung der CO<sub>2</sub> - Emissionen für die 38 Unterzeichnerstaaten auf 95 % des Niveaus von 1990 beschlossen. Dieses Ziel dürfte aus heutiger Sicht für den Großteil der teilnehmenden Staaten außer Reichweite sein.

JONES und Don SEVILLE (JONES/SEVILLE 2002) bringen die Ergebnisse dieser Untersuchung von STERMAN und BOOTH-SWEENEY mit einigen Aussagen der aktuellen US-amerikanischen Regierung (George W. BUSH) zur Klimapolitik in Verbindung. Sie erkennen gewisse Analogien zwischen den Aussagen der Regierung und den Ergebnissen der Probanden. Es scheint, als ob auch bei wichtigen Entscheidungsträgern der Irrglaube eines unmittelbaren Reagierens des Klimasystems auf kleine Veränderung in den treibhauswirksamen Emissionen sehr tief verankert sei. Dieser Irrglaube kommt durch das Unverständnis von Bestands- und Flussgrößen und in weiterer Folge durch jenes von Akkumulation im Allgemeinen zustande.

Das Prinzip von Bestands- und Flussgrößen tritt im Falle des Klimasystems jedoch auch an gänzlich anderer Stelle zu Tage. Betrachten wir bspw. die Temperatur eines Ortes. Sie ist generell abhängig von der Meereshöhe, der Exposition und der geographischen Breite des Ortes. Genau genommen ist sie aber nur von den gegebenen Strahlungsverhältnissen abhängig - welche eben mit diesen Faktoren variieren. Die kurzwellige und energiestarke Sonnenstrahlung sorgt für Erwärmung, ebenso – wenngleich bei weitem nicht in vergleichbarer Intensität – die langwellige diffuse Himmelsstrahlung. Letztere wird durch die Streuung des direkten Sonnenlichts an Luftmolekülen in der Atmosphäre hervorgerufen, wodurch sie im Gegensatz zur geradlinigen Sonnenstrahlung aus allen Richtungen auf die Erde trifft. Sonnenstrahlung und Himmelsstrahlung können zur so genannten „Globalstrahlung“ zusammengefasst werden. Die teilweise Reflexion dieser beiden Strahlungsarten an der Erdoberfläche (Albedo) vermindert ihren Wirkungsgrad. Durch die Reflexion wird ein Teil der Strahlung in Richtung Weltall reflektiert, welcher in der Atmosphäre jedoch auf Wolken (Wasserdampf -  $H_2O$ ) und andere Treibhausgase wie Kohlendioxid ( $CO_2$ ), Methan ( $CH_4$ ), Distickstoffoxid ( $N_2O$ ), Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) und Ozon ( $O_3$ ) stößt. Sie lenken wiederum einen Teil dieser reflektierten Strahlung zurück zur Erde – dabei handelt es sich um die „Gegenstrahlung“. Selbiges geschieht auch mit der temperaturabhängigen Ausstrahlung der Erde, welche gemäß der Temperatur der Oberfläche und dem Wien'schen Verschiebungsgesetz (je höher die Temperatur eines Körpers, desto kurzwelliger seine Ausstrahlung) im langwelligen Bereich erfolgt. Genau diese langwellige Strahlung wird von Treibhausgasen besonders gut absorbiert und zur Erde zurück gestrahlt.<sup>61</sup> Diese Zusammenhänge lassen sich vereinfacht wie in Abbildung 9.2. in einem Stock-Flow-Diagramm (SFD – vgl. Kap. 3.2.) darstellen. Die durch die Albedo der

---

<sup>61</sup> Exogene Einflussfaktoren wie nahe gelegene Wärmeemittenten oder sonstige Störgrößen werden hierbei nicht berücksichtigt. Sie spielen zwar in konkreten Fällen des Stadt- oder Lokalklimas durchaus eine Rolle, aus klimageographischer Sicht wird die Temperatur eines Ortes jedoch nur durch die Strahlungsverhältnisse bestimmt. Auch die Wärmeleitung von und zu der über der Erdoberfläche liegenden Luftschicht sowie die Wärmeleitung aus dem Erdinneren sind von untergeordneter Wichtigkeit und werden nachfolgend daher nicht berücksichtigt.

Oberfläche und in der Luftschicht reflektierte Strahlung wird nicht angeführt, da es sich dabei im systemdynamischen Sinn nicht um eine Ausgangsgröße der Bestandsgröße Oberflächentemperatur handelt. Ein Teil dieser reflektierten Strahlung gelangt als durch Treibhausgase verursachte Gegenstrahlung wieder zurück zur Erde. Auch ein Teil der temperaturabhängigen Ausstrahlung der Oberfläche wird durch die Treibhausgase zur Erde reflektiert und ist somit ebenfalls in dieser Gegenstrahlung enthalten.

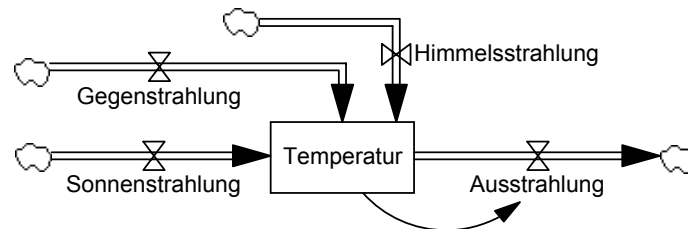


Abb. 9.2.

Der Sachverhalt kann jedoch für den folgenden Gebrauch noch zusätzlich vereinfacht werden und lässt sich gänzlich auf Einstrahlung und Ausstrahlung als Flussgrößen reduzieren, indem man die drei Zuflüsse zusammenfasst (vgl. Abb. 9.3.).

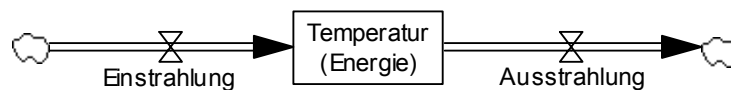


Abb. 9.3.

Sehr schnell wird bei der Betrachtung dieser Abbildung klar, dass sich die Temperatur immer dann erhöhen muss, wenn die Energie der Einstrahlung jene der Ausstrahlung übertrifft, der Nettofluss also positiv ist. Wann immer das Gegenteil der Fall ist, wird sich die Temperatur verkleinern. Dieses Beispiel veranschaulicht einen Effekt, der analog den Untersuchungen von Kapitel 6 von Testpersonen eigentlich als kontraintuitives, unverständliches Verhalten aufgefasst wird. Denn die Temperatur ist im Tagesverlauf keinesfalls dann am größten, wenn die Sonne im Zenit steht, sondern erst einige Zeit – in manchen Fällen mehrere Stunden – später, wenn die Einstrahlung schon bei weitem nicht mehr derart stark ist. Die Ursache dafür liegt darin, dass zwar in dem Moment, in welchem die Sonne am höchsten am Himmel steht, der positive Nettofluss am höchsten ist und die Momentanerwärmung am größten, die Temperatur sich aber eben so lange weiterhin erhöht, so lange der Nettofluss noch positiv ist. Das bedeutet, dass auch bei abnehmender Einstrahlung die Temperatur noch steigen kann bzw. steigt, da eben die Ausstrahlung noch geringer ist. Dasselbe Verhalten lässt sich beobachten, wenn man sich den Verlauf der Oberflächentemperatur im Jahresverlauf ansieht. Die Sonne gelangt am 21. Juni am nördlichen Wendekreis an, wodurch dieser Tag in Mitteleuropa auch der längste Tag des Jahres ist. Des Weiteren ist in der Zeit um den 21. Juni die Einstrahlung auf die Erdoberfläche in Mitteleuropa eigentlich am stärksten. Dennoch ist der wärmste Monat des Jahres in Österreich im Regelfall der Juli. Das Prinzip ist

dasselbe: Der Nettofluss ist auch im Juli noch positiv, wodurch sich die Erwärmung weiter fortsetzen kann und ihren Höhepunkt erreicht. In gewissem Maße ähnelt diese Beschreibung der so genannten Alpenhotel-Aufgabenstellung von OSSIMITZ (2001a). Wobei es sich bei den beiden Flussgrößen um die oben erwähnte Ein- und Ausstrahlung handelt.

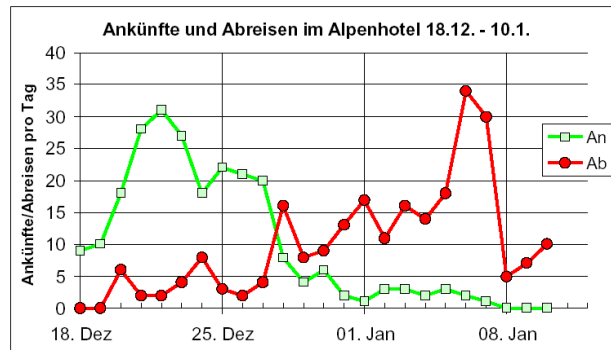


Abb. 9.4. (aus OSSIMITZ 2001a, S.7)

Der maximale Bestand ist eben nicht wie ein große Zahl der Vpn in den diversen Untersuchungen irrtümlicherweise glaubte an der Stelle des größten positiven Nettoflusses erreicht (in der Abb. 22. Dezember), sondern erst dann, wenn der Abfluss den Zufluss zum ersten Mal übersteigt (27/28. Dezember).

Aber auch weitere Beispiele für Bestands- und Flussgrößen im Klimasystem sind wie in allen anderen natürlichen Systemen in großer Zahl vorhanden: So handelt es sich bspw. bei der Luftfeuchtigkeit, der Schadstoffkonzentration, beim Sauerstoff-, Stickstoff-, Edelgas- oder Aerosolgehalt wie auch etwa beim Luftdruck um Bestandsgrößen, welche durch die jeweiligen Flussgrößen beeinflusst und verändert werden.

## 9.2. Management von (nicht) erneuerbaren Ressourcen

Der Umgang mit nicht oder nur langsam erneuerbaren Ressourcen stellt sowohl vom wirtschaftlichen als auch ökologischen Standpunkt ein wichtiges und interessantes Gebiet dar. Der Nutzung von Regenwaldholz, von Meeresfischbeständen, von Luft, von Erdöl oder von anderen Bodenschätzen liegt dabei dasselbe einfache Prinzip zu Grunde: Für eine nachhaltige Nutzung von derlei Ressourcen ist es absolut unumgänglich, dass über einen Zeitraum nur maximal ein solcher Teil des Rohstoffes genutzt wird, wie er in derselben Zeit auch wieder nachgebildet wird. Der Nettofluss der beiden Flussgrößen darf daher nicht auf Dauer negativ sein. In gewissen Fällen, wie etwa der Erdölförderung, ist eine solche nachhaltige Nutzung natürlich nur sehr schwer durchführbar, da es unmöglich ist zu quantifizieren, wie viel Öl pro Jahr im Erdinneren neu entsteht. Durch den Jahrmillionen dauernden Entstehungsprozess kann der jährliche Zuwachs an Erdöl vermutlich sogar als

praktisch Null angenommen werden. Aber auch bei anderen Ressourcen, deren jährlicher Zuwachs sehr wohl messbar ist, tendieren Menschen dazu, sie zu übernutzen. Dies ist sowohl aus ökologischer, als auch aus wirtschaftlicher Sicht alles andere als geschickt. Denn durch die Zerstörung einer eigentlich nachwachsenden Ressource zerstört man auch die wirtschaftliche Grundlage der Nutzung. In der Folge geht damit auch meist eine erzwungene massive Umorientierung einer oder mehrerer Wirtschaftssparten einher. Wenn beispielsweise die Welterdölvorräte irgendwann in Zukunft deutlich schwinden, wird sich deshalb nicht nur die gesamte direkt mit der Förderung des Rohstoffs beschäftigte Sparte umorientieren müssen, sondern auch die Automobilbranche, die Gummibranche oder die Plastikproduzenten. Auch bei der Leerfischung einer Region müssen sich die beteiligten Fischereien inkl. der gesamten Transport- und Verkaufsunternehmen anschließend umorientieren, da sie sich selbst der Grundlage ihres Handelns beraubt haben.

Theoretisch ließen sich durch einen nachhaltigeren Umgang mit der Ressource diese Übergänge und Umorientierungen vermeiden, oder aber zumindest sanfter gestalten. In der Realität jedoch liegt der Übernutzung ein entscheidendes Merkmal zu Grunde: Die Ursache liegt – wie bei sehr vielen anderen Ressourcen auch – darin, dass es sich um allgemein zugängliche Gemeingüter handelt. Die Verwendung solcher Gemeingüter passiert außerdem noch oftmals in direkter Konkurrenz zu anderen Nutzern. Beispielsweise konkurrieren einzelne Fischer um den Fischfang in einem Gebiet, oder aber es versuchen sogar mehrere Länder jeweils maximalen Profit aus einem am offenen Meer liegenden fischreichen Gebiet zu schlagen. Die Folge ist in diesen Fällen eine Übernutzung und Zerstörung der Ressource und somit das Prinzip der Tragödie der Gemeingüter (vgl. GORDON 1954, HARDIN 1968). Nur bei sehr wenigen Rohstoffen ist die Nutzung einigermaßen geregelt, wie etwa bei der Erdölförderung. Bei dieser wurde durch die Gründung der OPEC – der Organisation erdölexportierender Länder – ein Wettfördern verhindert. Dennoch liegt auch hier die Förderung an Erdöl (Abfluss) weit über der natürlichen Nachbildung (Zufluss). Mit anderen Worten – der Nettofluss ist extrem negativ.

Erling MOXNES (1998/2000) konnte anhand mehrerer Untersuchungen die generelle menschliche Tendenz zeigen, auch unter dem Ausschluss des Gemeingüterprinzips sich erneuernde Ressourcen zu übernutzen (vgl. Kap. 2.5.). Dieses Phänomen überrascht. Denn vom Prinzip handelt es sich wie beschrieben bei der Nutzung einer Ressource eigentlich um eine simple Aufgabe, lediglich die konkurrierende Nutzung und somit das Gemeingüterprinzip führen beinahe gezwungenermaßen zu einer Ausbeutung. Fällt diese Konkurrenz weg, könnte man nicht nur das ökologische Gleichgewicht aufrechterhalten, sondern auch durch das Nachwachsen der Ressource auf Ewigkeit Profite schöpfen. MOXNES zeigte, dass zumindest in realitätsnahen Simulationen sowohl normale Probanden

als auch professionelle Entscheidungsträger auch bei alleiniger Nutzung nicht in der Lage waren, einen solchen Zustand herzustellen. Ein grundlegendes Missverständnis des Zusammenhangs zwischen Beständen, Zu- und Abflüssen sowie vor allem des Nettoflusses dürfte für dieses Verhalten verantwortlich sein. In Kap. 5.4. wurde das von MOXNES identifizierte fehlerhafte statische mentale Modell der Vpn angesprochen. Es kann davon ausgegangen werden, dass auch in sehr vielen physiogeographischen Zusammenhängen wie etwa der Luftverschmutzung oder humangeographischen Belangen ähnliche falsche intuitive Auffassungen von Menschen bestehen, welche die grundlegenden Zusammenhänge der Situation missachten.

Einen gänzlich anderen (begrenzt) erneuerbaren Ressourcentyp stellen die Elemente Wasser und Luft dar. Im Falle der Verschmutzung dieser beiden Ressourcen geht es nicht um den Gebrauch – also deren Entnahme – sondern um die Anreicherung der Ressource mit schädlichen Materialien. Auch hier darf der Zufluss, d.h. die Verschmutzung bzw. Anreicherung nicht größer sein als der Abfluss, d.h. die Selbstreinigungskraft bzw. im Falle des Wassers die Reinigung mittels künstlicher Anlagen. Andernfalls kumulieren die Schadstoffe und die Ressource verliert an Qualität oder wird unbrauchbar. In beiden Fällen setzen eine Beeinträchtigung des ökologischen Gleichgewichts und eine zumindest lokale Störung der Ökosysteme schon lange vor der tatsächlichen Gefahr für die Ressource ein und gelten als Alarmzeichen. Im kleinräumigen Rahmen passiert eine überkritische Verschmutzung eines Gewässers dennoch des Öfteren. Seen oder auch Flüsse können sich dann durch die zu starke exogene Belastung nicht mehr erholen, wodurch sie „kippen“ und das empfindliche Gleichgewicht der vielfältigen Lebewesen irreversibel zerstört wird.

### **9.3. Bevölkerungswachstum**

Aus humangeographischer und auch politischer Sicht ist die Zusammensetzung und Entwicklung der Bevölkerung einer Stadt oder einer Region von großem Interesse. Sie bestimmt, welche Einrichtungen für die Bevölkerung in welchem Ausmaß vorhanden sein müssen, sie hat Einfluss auf den persönlichen und öffentlichen Nahverkehr und damit auf Schadstoffemissionen sowie das Stadtklima, auf die Attraktivität des Wirtschaftsstandortes, auf die Art des kulturellen und freizeithlichen Angebots, nicht zuletzt auch auf das Pensionssystem, etc. Ein Verständnis der Wirkungsbeziehungen in einem solchen System ermöglicht eine effiziente Steuerung der internen Prozesse mittels politischer Maßnahmen. Aus diesem Grund handelt es sich bei Bevölkerungs-, Landnutzungs-, Verkehrs- und Stadtentwicklungssimulationen, d.h. bei Simulationen humangeographischer Systeme, auch um einige der bekanntesten Bereiche computergestützter Modellbildung (vgl. FORRESTER 1969, 1971b, PORTUGALI (1999), TORRENS (2001), u.v.a.m.).

An dieser Stelle soll exemplarisch auf die Entwicklung einer Bevölkerungsgruppe eingegangen werden, wobei sich bereits durch die Unterscheidung von Bestands- und Flussgrößen interessante Einblicke in das System ergeben. Die Größe der Bevölkerung stellt eine Bestandsgröße dar, welche über die Flussgrößen Geburten und Zuwanderungen vermehrt und durch Todesfälle und Abwanderungen verringert wird. Generell lässt sich eine Bevölkerung dadurch wie in Abb. 9.5. (vgl. Kap. 5.3.3.) modellieren. Sowohl die (absolute) Zahl der Todesfälle als auch jene der Geburten wird von der Größe der Bevölkerung mit beeinflusst. Zusätzlich sorgt normalerweise ein Freiraumfaktor, welcher für das begrenzte Angebot an Ausbreitungsgebiet, Nahrung, etc. steht, für eine mit zunehmender Bevölkerungsgröße steigende Zahl an Todesfällen. Aus diesem Grund ergibt sich ein immer langsamer werdendes Wachstum, je größer die Bevölkerung ist.

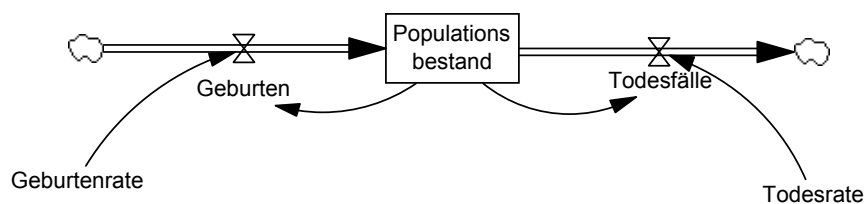


Abb. 9.5.

Bei diesem Modell lässt sich über die interne Struktur und Zusammensetzung der Bevölkerung jedoch keinerlei Aussage treffen – die gesamte Bevölkerung wird als homogen betrachtet. Junge und ältere Menschen verhalten sich jedoch in der Regel deutlich anders. So weisen sie etwa drastisch unterschiedliche Sterberaten auf bzw. kann sich nur ein bestimmter (Alters)Teil der Bevölkerung auch fortpflanzen – um nur zwei Beispiele zu nennen. Eine solche Homogenisierung muss aus diesem Grund als unrealistisch betrachtet werden. Wie sich in Kapitel 10 zeigen wird, liegt in dieser künstlichen Vereinheitlichung von Systemkomponenten eine wichtige Schwäche der SD. In begrenztem Maße ist dieser Schwäche aber beizukommen, indem man die Systemgröße (im vorliegenden Fall die Bevölkerung) in kleinere Gruppen und somit mehrere Bestandsgrößen unterteilt: Erst diese Verfeinerung des Modells durch die Ausweisung unterschiedlicher Altersgruppen ermöglicht einen besseren Einblick. In Abb. 9.6. wurde die Bevölkerung gemäß des Lebensalters in fünf Kategorien unterteilt (vgl. OSSIMITZ 2000a, S. 83). Jede Kategorie umfasst eine Breite von 20 Lebensjahren. Insgesamt kann sich die Bevölkerung – Zu- und Abwanderung wurde der Einfachheit und der geringen Ausmaße wegen weggelassen – nur durch Geburten erhöhen. Diese stellen auch gleichzeitig den einzigen Zufluss der ersten Altersgruppe der 0-19 Jährigen dar. Selbige Altersgruppe besitzt zwei Abflüsse – Sterbefälle und den 20. Geburtstag, wodurch die betreffenden Personen automatisch in die nächste Kategorie wandern. Alle weiteren Gruppen können sich ausschließlich durch Nachrücken der jüngeren Bevölkerung erhöhen und verringern sich selbst ebenfalls durch das Älterwerden bzw.

Todesfälle. Typischerweise besitzt jede Gruppe auch eine eigene Todeswahrscheinlichkeit – die altersgruppenspezifische Sterberate (SR).

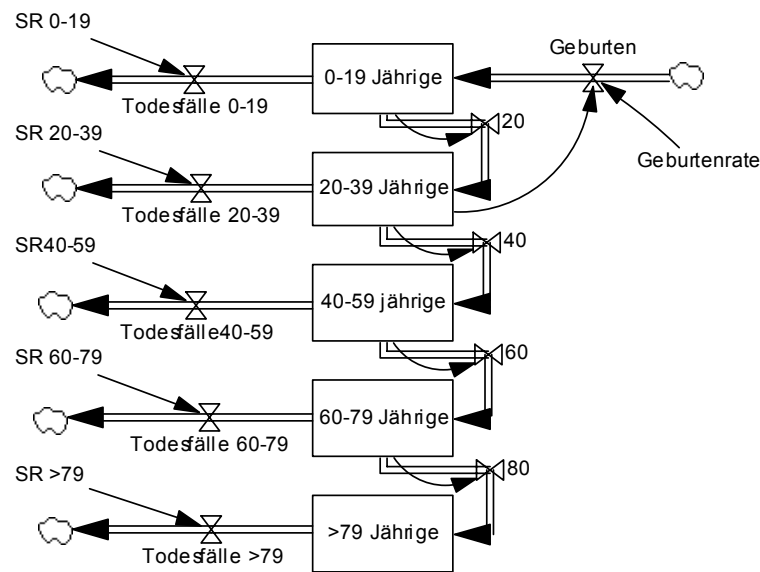


Abb. 9.6. (nach OSSIMITZ 2000a, S. 83)

Gleichverteilung der Jahrgänge innerhalb einer Gruppe vorausgesetzt, wandert jedes Jahr genau ein Zwanzigstel der Gruppe in die nächst höhere Kategorie. Eine Ausnahme stellt lediglich die letzte Gruppe dar, deren einziger Abfluss die Todesfälle darstellen. Das Modell offenbart nun Folgendes: Für den einzigen Zufluss des Gesamtsystems ist jene Altersgruppe relevant, die Kinder bekommen kann und auch bekommt. Der absolute Großteil dieser Menschen befindet sich in diesem Modell in der Gruppe der 20-39 Jährigen. Die Größe dieser Gruppe ist entscheidend für die absolute Zahl an Geburten. Ist die Gruppe relativ klein, wird auch der Zuwachs der Bevölkerung in absoluten Zahlen klein ausfallen. Ist die Geburtenzahl dabei sogar geringer als die Gesamtzahl an Todesfällen der Bevölkerung, droht eine Überalterung. Ist hingegen die Geburtenzahl sehr groß und bleibt die Geburtenrate unverändert, vergrößert sich die Bevölkerung von Jahr zu Jahr immer stärker. Anhand realer Zahlen lässt sich in diesem Modell sehr schön die zukünftige Entwicklung des Systems betrachten. Eine kleinere Breite der Altersgruppen erhöht dabei den Genauigkeitsgrad und die Aussagekraft des Modells. Schnell wird ersichtlich, dass die einzige Möglichkeit einer aktiven Steuerung der Größe einer Altersgruppe alleine über die Beeinflussung der Geburten (Anreize für höhere Kinderanzahl bzw. Abtreibung) und der Todesfälle (Maßnahmen zur Verringerung tödlicher Unfälle von bestimmten Altersgruppen) mit anschließender Zeitverzögerung vonstatten gehen kann. Wenn man nun noch zusätzlich das durchschnittliche Pensionsantrittsalter und den Anteil der arbeitenden Bevölkerung an den potentiell Erwerbstätigen berücksichtigt, lässt sich auch das Verhältnis der Pensionisten zu den Erwerbstätigen eruieren und daraus unterschiedliche Pensionsmodelle modellieren.

Die Unterteilung in Bestands- und Flussgrößen ermöglicht, die dynamische Entwicklung der Bevölkerung zu simulieren. Zusätzlich verleiht die graphische Aufbereitung des SD-Modells dem Betrachter einen großen Grad an Einblick in die Systemstruktur. Geographen betrachten die Zusammensetzung einer Bevölkerung oftmals mittels Bevölkerungspyramiden, welche die Größe der einzelnen Altersgruppen nach Geschlecht geteilt in einer Graphik darstellen. Bevölkerungspyramiden erlauben, sich mit nur einem Blick (eine statische) Übersicht über die Altersstruktur eines Landes zu schaffen. Generell unterscheiden sich dabei die Pyramiden von Entwicklungsländern und Industrieländern deutlich (vgl. Abb. 9.7.). Entwicklungsländer weisen bedingt durch die relativ geringe Lebenserwartung ihrer Bevölkerung und des im Allgemeinen aktuell starken Bevölkerungswachstums Bevölkerungspyramiden mit tatsächlicher Pyramidenform auf (vgl. Abb. 9.7., Nigeria), während jene von Industrieländern bedingt durch hohe Lebenserwartung, stagnierendes Bevölkerungswachstum und geringer Kinderzahl eher Urnenform aufweisen (vgl. Japan). Das Verhältnis von junger zu alter Bevölkerung ist ein grundlegend anderes.

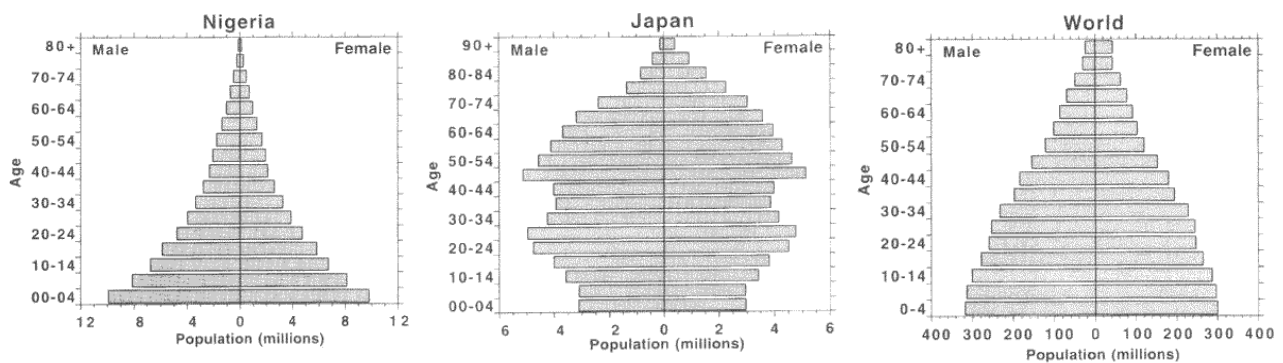


Abb. 9.7. (aus STERMAN 2000, S. 476)

Bei Betrachtung dieser Bevölkerungspyramiden wird auch die ungeheure Trägheit des Systems ersichtlich. Wie in Kap. 4.3.1. angesprochen, ist es eine Eigenschaft von Bestandsgrößen, Systemen eine Geschichte, Trägheit und Erinnerungsvermögen zu verleihen. In Abb. 9.8. zeigt sich sowohl diese Trägheit als auch die Verzögerung zwischen Veränderung und Auswirkung: Eine Beeinflussung des Zuflusses, d.h. der Geburten (wie das bspw. zur Zeit der beiden Weltkriege oder durch die Erfindung der Anti-Baby-Pille der Fall war) wird durch die indirekte Beeinflussung der Größe zukünftiger Generationen sogar über das Aussterben der betreffenden Generation hinaus im System erkenntlich bleiben und ihm somit Geschichte verleihen. Gleichzeitig kann eine absichtliche Beeinflussung einer Altersgruppe (etwa zum Zwecke der Erhöhung des Verhältnisses arbeitende vs. pensionierte Bevölkerung) nur mit sehr großer zeitlicher Verzögerung bis zum gewünschten Effekt vollführt werden (da die neugeborene Generation erst das gewünschte Alter erreichen muss).

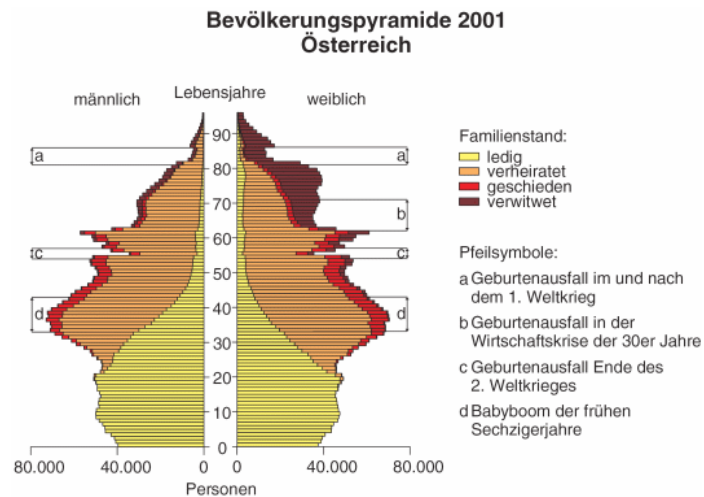


Abb. 9.8. (aus STATISTIK AUSTRIA 2002)

Die enorm langsame Reaktion des Bevölkerungssystems auf Veränderungen offenbart sich außerdem bei der Betrachtung der Weltbevölkerung. Derzeit leben auf der Erde laut Bericht der UNITED NATIONS POPULATION DIVISION (2003) rund 6,3 Milliarden Menschen. Jedes Jahr erhöht sich diese Zahl um rund 77 Millionen. Wenngleich die Diskussionen über eine drohende Überbevölkerung der Erde verglichen mit den 1980er und 1990er Jahren deutlich verebbt sind, ist es trotzdem wahrscheinlich, dass das Erreichen einer zu großen Zahl an Erdenbewohnern schwere wirtschaftliche, humanitäre und soziale Konsequenzen für viele Staaten der Erde haben könnte. Eine weiterhin stark wachsende Weltbevölkerung ist von daher sicherlich nicht unproblematisch und es stellt sich die Frage, wie sich ihre Größe weiterhin entwickeln wird. Wie STERMAN (2000, S. 480) aufzeigt, würde auch im Falle des Szenarios, dass die Weltbevölkerung gerade nur so viele Kinder bekommen würde um sich selbst zu ersetzen, die Gesamtzahl an Erdenbewohnern überraschenderweise nicht unmittelbar aufhören zu wachsen. Der Grund dafür liegt darin, dass es derzeit deutlich mehr junge als alte Menschen gibt, d.h. deutlich mehr von jenen Menschen, die bis dato noch keine Nachkommen haben. Kommen sie ins gebärfähige Alter und zeugen ihre Nachkommen, wächst die Gesamtzahl an Menschen weiter. Ihre Nachkommen wiederum werden ebenfalls gerade soviel Kinder bekommen, um sich selbst zu ersetzen, unterdessen wächst jedoch dann der Anteil an alten Menschen, da nun die heute so zahlreiche junge Generation allmählich altert. Während also die Zahl an jungen Einwohnern dann bereits konstant bleibt (nur so viele Nachkommen um sich selbst zu ersetzen), wächst die Zahl der Älteren durch den natürlichen Alterungsprozess. Dieser Effekt kommt erst nach rund drei bis vier Generationen zum Erliegen.<sup>62</sup>

<sup>62</sup> STERMAN (2000, S. 480) führt das Beispiel Chinas an, wo die Geburtenrate in den späten 1970er Jahren bedingt durch die eingeführte Ein-Kind-Politik und andere Maßnahmen sogar unter jenes Level der Selbstersetzung gefallen ist. Die Einwohnerzahl Chinas ist dennoch von 985 Mio. im Jahr 1980 auf 1,237 Mrd. im Jahr 1998 gewachsen. Man schätzt, dass die Einwohnerzahl bis zum Jahr 2030 rund 1,4 Mrd. Menschen erreichen wird, ehe sie langsam, bedingt durch die weiterhin unter dem Level der Selbstersetzung befindliche Geburtenzahl zurückgehen wird.

#### 9.4. Weitere Beispiele

Wie in diesem Kapitel mehrfach angedeutet, sind die Beispiele für Bestands- und Flussgrößen in geographischen Zusammenhängen mehr als zahlreich. In geographischen Systemen kann man davon ausgehen, dass überall dort, wo eine dynamische Entwicklung vorhanden ist, Bestands- und Flussgrößen beteiligt sind. Der Bereich geht dabei von der Geomorphologie über die Bodenkunde, die Bevölkerungsgeographie, die Siedlungs- und Stadtgeographie, die Landschaftsökologie, die Fernerkundung, die Hydrologie und die Kommunalgeographie bis zur Nebelklimatologie oder Klimageographie. In all diesen Bereichen ist das Konzept von Stocks und Flows grundlegend und gleichzeitig auch Voraussetzung für sämtliche Entwicklungsprozesse. Sei es bspw. die Veränderung von Böden durch Tonverlagerung (Fluss von Tonbestandteilen von oberen Bodenhorizonten auf darunter liegende), Nährstoffauswaschung (Verringerung des Bestandes an Nährstoffen in einer bestimmten Bodenschicht, dafür Anreicherung und Erhöhung des Bestandes in einer anderen) oder sonstige Verwitterung, sei es der Wandel des Verbreitungsgebietes spezieller Vegetation oder sei es die Veränderung einer Stadt im Rahmen stadtgeographischer Entwicklungsprozesse, etc. Diese Allgegenwärtigkeit von Stocks und Flows macht es schwierig, einen entsprechenden Überblick zu geben. Generell finden sich Bestands- und Flussgrößen sowohl in so gut wie allen physiogeographischen als auch humangeographischen Systemen. All diese Systeme lassen sich dadurch auch systemdynamisch modellieren. Inwieweit eine solche systemdynamische Simulation bei geographischen Systemen von Sinn ist, bzw. inwieweit sie in der Lage ist wertvolle Ergebnisse zu liefern, soll im nun folgenden Kapitel näher betrachtet werden.

## 10. System Dynamics und Geographie

Vor einer näheren Betrachtung der Leistungsfähigkeit von Modellierungen im Bereich der Geographie ist es notwendig, das Begriffsverständnis von „Computergestützter geographischer Modellierung“ etwas näher zu beschreiben. Ich möchte mich dabei eng an den von MANDL (2000) vorgestellten Begriff der „Geo-Simulation“ halten. Er versteht darunter eine Dynamisierung von räumlichen Modellen, welche auch zur Erzeugung von Problemlösungsergebnissen dient. Aus diesen Simulationsergebnissen können im Idealfall anschließend Rückschlüsse über das untersuchte System gezogen und eventuell Maßnahmen zu dessen Umgestaltung eruiert werden. Aufbauend auf HARBORDT (1974) und BOSSEL (1994) formuliert MANDL (2000) die Aufgaben der Geo-Simulation: Erkundung des Verhaltens des geographischen Systems, Szenarienbildung („was-wäre-wenn“ - Untersuchungen), Zustandserzeugung (Ermitteln der notwendigen Eingabeparameter zur Erreichung bestimmter Zielzustände), Optimierung von Systemparametern (Eruieren der „besten“ Zustände des Systems mittels bestimmter Gütekriterien) sowie die Aufgabe als Lern- und Entwicklungsansatz (zur Verbesserung und Adaptierung von Modellen). Der Autor sieht in der Geo-Simulation auch durchaus das Potential für eine Basis einer neuen Art der Geographie, welche er als „Computational Geography“ bezeichnet, „in der künstliche und natürliche Welten erschaffen, analysiert, geplant und bewertet werden, damit Fehlentwicklungen schon vorzeitig erkannt und korrigiert werden können“ (vgl. MANDL 2000).

### 10.1. System Dynamics

Wie in Kapitel 2.3. näher beschrieben, stellt System Dynamics (SD) eine derartige computergestützte Modelliermethode von Systemen dar. Mittels der Einteilung in Bestands-, Fluss- und Hilfsgrößen sowie Konstanten lassen sich beinahe alle realen Systeme in Stock-Flow-Diagrammen (vgl. Kap. 3.2.) darstellen. Diese werden in eine geeignete Software übertragen, wobei hinter jeder Größe auch ein quantitativer Wert steckt. Genügend Erfahrung im Modellieren sowie ein Grundmaß an Wissen über das modellierte System vorausgesetzt, lässt sich am Computer eine Vereinfachung (ein Modell) des tatsächlichen Sachverhaltes erstellen, welche dasselbe qualitative und quantitative Verhalten aufweist. Mit diesem Modell lassen sich anschließend Eingriffe und Veränderungen simulieren und ihre Auswirkungen prognostizieren. Auf diese Art und Weise erhöht sich zum einen das Verständnis des Betrachters für das beobachtete System – es wird aufgezeigt aus welchen Komponenten das System besteht und wie diese interagieren – zum anderen lassen sich auch die geeignetsten Steuerungsgrößen und -maßnahmen für das System identifizieren. In gewissem Maße lassen sich die gewonnenen Erkenntnisse anschließend auch auf andere Systeme übertragen, da gewisse Systemstrukturen – so genannte „generische Strukturen“

oder „Systemarchetypen“ (vgl. SENGE 1990) – in unterschiedlichsten Arten von Systemen immer wieder kehren.

Die erste umfangreiche Anwendung der SD-Methode findet sich in dem Werk „Industrial Dynamics“ (FORRESTER 1961). Darin entwickelte Jay W. FORRESTER – zugleich Begründer der SD – ein Simulationsmodell, um die entlang von Distributionsketten auftretenden Lagerbestandsschwankungen sowie Auslastungsschwierigkeiten von Unternehmen, Groß- und Einzelhändlern, zu untersuchen. In „Urban Dynamics“ (FORRESTER 1969) wandte FORRESTER seine Modelliermethode auf das System einer Stadt (im konkreten Fall Boston, USA) an, um den Ursachen städtischer sozialer Probleme auf den Grund zu gehen und lieferte somit eine erste (anthropo)geographische Anwendung der SD. 1971 schließlich veröffentlichte FORRESTER „World Dynamics“ – in einem groß angelegten Projekt wurde ein Weltmodell hinsichtlich globaler Bevölkerungsentwicklung, Verbrauch an Rohstoffen, Umweltverschmutzung, Landnutzung etc. entwickelt (vgl. FORRESTER 1971b). Dieses systemdynamische Weltmodell führte in der Folge auch direkt zu der vielbeachteten Publikation „Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit“ (MEADOWS et al. 1972). Auch hierbei handelt es sich weitestgehend um eine geographische Anwendung der systemdynamischen Modelliermethode. Nachfolgend soll daher zuerst auf „Urban Dynamics“ und anschließend auf „World Dynamics“ bzw. „Die Grenzen des Wachstums“ etwas näher eingegangen werden, ehe weitere geographische Anwendungen sowie die generellen Schwierigkeiten und Möglichkeiten der SD-Methode in der Geographie behandelt werden.

### **10.1.1. Urban Dynamics - Stadtentwicklung**

Im Bereich der Stadtplanung und Stadtentwicklung lieferte das Simulationsmodell FORRESTERS (1969) teilweise erstaunliche Ergebnisse. Ausgangspunkt seiner Arbeit war ein in den 1950er und 1960er Jahren in mehreren amerikanischen Großstädten beobachtbarer Trend des innerstädtischen Niedergangs. Zum Teil hohe Arbeitslosigkeit, zu geringe Qualifikationsstruktur, Bildung von Armenvierteln, hohe Kriminalität, Abwanderung von qualifizierten Arbeitskräften und Abzug von Arbeitsplätzen führten zu einer sich selbst verschlimmernden Abwärtsentwicklung der innerstädtischen Bereiche. Linderungsmaßnahmen wie etwa ein zusätzlicher sozialer Wohnungsbau konnten die Entwicklung nicht aufhalten – sie schritt scheinbar nur noch stärker voran und die sozialen Gegensätze wurden weiterhin verschärft.

Zusammen mit John F. COLLINS, Altbürgermeister von Boston und mehreren Stadtentwicklungsexperten erarbeitete FORRESTER ein umfangreiches systemdynamisches Modell der Stadt Boston, welches im Wesentlichen in drei Teilstrukturen – Bevölkerung, Wohnbau und Industrie – untergliedert war. Diese Bestandsgrößen, welche den Zustand des

städtischen Sozialsystems darstellten, waren zusätzlich weiter untergliedert und mit den notwendigen Flussgrößen untereinander und mit der Systemumwelt verbunden. Durch unterschiedliche Parameter bzw. eine Veränderung der Flussgrößen (jede Beeinflussung oder Steuerung von Beständen kann nur über Flussgrößen passieren – vgl. Kap. 4.3.1. und 4.3.2.) konnte der Autor eine große Zahl an Simulationsläufen für das System starten. Drei Flussgrößen erschienen dabei als besonders sensibel für das Modell: die Ansiedlungsrate neuer Betriebe, die Baurate sozialer (Billig-)Wohnanlagen und die Abrissrate ungeplanten billigen Wohnraums (Slums). FORRESTER kam durch die Testläufe zu mehreren Schlüssen, wovon einer besonders aufsehenerregend war: Das Stadtentwicklungssystem verhielt sich kontraintuitiv (vgl. Kap. 2.1.). Um die Abwärtsspirale des Niedergangs ganzer Viertel mit hoher Arbeitslosigkeit, Armut, Abwanderung, Kriminalität etc. zu stoppen, war es keinesfalls effektiv, durch eine Erhöhung des sozialen Wohnbaus (scheinbar) für das Wohl der Bevölkerung zu sorgen. In der Tat verschlechterte sich dadurch die Situation der ärmeren Schichten und man erreichte genau das Gegenteil des Beabsichtigten. Denn der Bau zusätzlicher Billigwohnungen sorgte für eine Erhöhung des Anteils der ärmeren Bevölkerung. Die reichere, jobschaffende Schicht sowie Betriebe mit dem Bedarf an hoch qualifizierten Arbeitern siedelte ab und die Arbeitslosigkeit und Armut der ansässigen Bevölkerung wurde noch weiter erhöht. Darüber hinaus nahm jeder Bau von Billigwohnungen potentiellen Raum für Betriebe. Anstatt *jobschaffender* Betriebe siedelten sich *jobsuchende*, schlecht ausgebildete Menschen an. In einem späteren Artikel fasste FORRESTER diese Erkenntnis folgendermaßen zusammen:

„More, it argued that the most damaging policy at all was to build low-cost housing. At that time, this policy was thought essential to reviving the inner cities.” FORRESTER 1995, S. 11.

Nichtsdestotrotz war es in der Folge für FORRESTER schwierig, dieses Ergebnis den Entscheidungsträgern zu verinnerlichen. Sehr viele offizielle Vertreter äußersten Skepsis und waren nur schwer zu überzeugen (vgl. FORRESTER 1995). In der Tat muss man bei der Interpretation der Ergebnisse von Computermodellen stets sehr vorsichtig vorgehen. Denn es wäre im vorliegenden Fall bspw. denkbar, dass die Verringerung von Billigwohnungen, wie sie das Modell als beste Lösung vorsah, nur deshalb zu Verbesserungen führte, weil durch die geringere Zahl an Billigwohnungen Arme und Arbeitslose gezwungen werden das Viertel zu verlassen, das Problem also nur verschoben wird. FORRESTER berücksichtigte aber diese Möglichkeiten und kam zu dem Ergebnis, dass der durch die Verringerung des Sozialwohnbaus erhöhte soziale Druck eine Verbesserung der Lebensumstände auch der ärmeren Schichten bewirkt und die insgesamt Verbesserung also nicht dadurch zustande kommt, dass die unteren Schichten zum Abwandern gezwungen werden.

Das beobachtete kontraintuitive Verhalten (“counterintuitive behavior”) von Verbesserungsmaßnahmen, welche nicht nur keinen Effekt zeigen, sondern sogar der

Intention entgegengerichtete Folgen nach sich ziehen, wurde von FORRESTER 1971 in einem Artikel umfassend dargestellt (FORRESTER 1971a, vgl. Kap. 2.1.) und wurde zu einem stehenden Begriff des systemischen Ansatzes. Aber auch die weiteren Rückschlüsse des „Urban Dynamics“ Projekts auf komplexe Systeme im Allgemeinen waren sehr ertragreich. So stellt FORRESTER (1969) fest, dass komplexe Systeme unempfindlich gegenüber der Veränderung einer großen Zahl von Variablen sind und dadurch sehr vielen Beeinflussungsmaßnahmen widerstehen, externen Steuerungsmaßnahmen durch ihre innere Dynamik entgegenwirken, jedoch einige wenige sehr empfindliche Steuerungsgrößen oder Hebelpunkte aufweisen und sich bei erfolgreichen Beeinflussungen im kurzen Zeithorizont entgegengesetzt der langfristigen Wirkung verhalten. Dieser letzte Punkt spricht das bekannte Phänomen an, dass sehr viele Maßnahmen, welche langfristig eine Verbesserung des Systemzustandes nach sich ziehen, kurzfristig eine Verschlechterung bewirken und umgekehrt. Dies ist insbesondere durch die zeitlich relativ knapp begrenzten Amtsperioden von Entscheidungsträgern problematisch.

### **10.1.2. World Dynamics**

Ein Treffen FORRESTERS mit dem Gründer des Club of Rome – Aurelio PECCEI – führte nach der Veröffentlichung von „Urban Dynamics“ zwischen 1970 und 1972 zur Entwicklung eines systemdynamischen Weltmodells. Dieses Weltmodell zielte auf die Untersuchung der Entwicklung der globalen Bevölkerungszahl, des Verbrauchs an Rohstoffen und Ressourcen, der Umweltverschmutzung, der Landnutzung und anderer Kenngrößen der globalen Zukunft ab. Die Ergebnisse des Modells, welche in der Publikation „World Dynamics“ (FORRESTER 1971b) erstmals zusammengefasst wurden, erreichten eine ungeahnt starke Resonanz in den Medien weltweit. Und das obwohl oder vielleicht auch gerade weil die Ergebnisse des Simulationsmodells denkbar einfach waren: Die beinahe exponentiell wachsende globale Bevölkerungszahl und der rasant steigende Verbrauch bzw. die Ausbeutung von Rohstoffen kann nicht auf ewig weiter gehen und würde bei unverändertem Fortschreiten zu einem Zusammenbruch des wirtschaftlichen Weltsystems führen. Auch die Umweltverschmutzung und die Art der Landnutzung dürfen sich nicht unverändert auf dieselbe Weise fortsetzen und sich mit der zunehmenden Bevölkerungszahl intensivieren.

Wie OSSIMITZ (2000b) zusammenfasst, liegt der Grund für den etwaigen Zusammenbruch des Weltsystems darin, dass es sich um ein sehr träge reagierendes System der Art „Overshoot-and-Collapse“ (vgl. Kap. 5.3.4.) handelt. In einem solchen System wächst ein Bestand über die Kapazitätsgrenze des Systems und führt dadurch zum Zusammenbruch. Dieses Wachstum auf ein Niveau jenseits dessen was das System ertragen kann, ist aus systemischer Sicht prinzipiell durch zwei Szenarien möglich: entweder durch ein überaus starkes Wachstum des Bestandes oder aber durch eine relativ große Zeitverzögerung der

bremsenden negativen Rückkoppelung. Im Falle des Weltsystems dürfte wohl eine Mischung aus beidem vorhanden sein.

Der Club of Rome unterstützte auch ein Folgeprojekt dieses Weltmodells, dessen Ergebnisse nur neun Monate nach „World Dynamics“ in Buchform veröffentlicht wurden. Der Name dieses Folgeprojektes lautete „Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit“ (MEADOWS et al. 1972). Das Weltmodell, das dabei Verwendung fand, baute auf jenem von FORRESTER auf, war jedoch etwas differenzierter und präziser. Unter anderem wurden die einzelnen Bestandsgrößen in der Simulation in unterschiedliche Gruppen unterteilt (bspw. die Bevölkerung in drei Altersgruppen) oder die Bodennutzung in Form der Untergruppen Siedlungs- und Industrieland, Agrarland und potentiell Agrarland im Modell simuliert. Das Medienecho dieser vergleichsweise populärwissenschaftlich gehaltenen Publikation übertraf bei weitem noch jenes auf die Veröffentlichung der „World Dynamics“ und verschaffte nicht nur den Autoren, sondern auch der systemdynamischen Modelliermethode weltweite Bekanntheit. Unzählige auf SD gestützte Simulationsprojekte realer Systeme sollten folgen. Ein Großteil konzentriert sich dabei auch heute noch auf den Wirtschaftsbereich wie bspw. das Supply Chain Management.

### **10.1.3. Klimamodelle**

Einen anschaulichen physiogeographischen Bereich systemdynamischer Modellierung stellt jener des Klimas dar. Wie schon in Kapitel 9 eingeführt, weist das Klimasystem eine große Zahl an Bestands- und Flussgrößen und eine Vielzahl an Verbindungen unter diesen Systemkomponenten auf. Der Bereich der Klimamodellierung ist heute aktueller denn je. Der anthropogene Treibhauseffekt ist inzwischen anerkannt und steht weitgehend außer Diskussion. Fraglich ist nun, wie sich das Weltklima in den nächsten Jahrzehnten entwickeln wird. Es ist keineswegs gesichert, in welchem Ausmaß eine unveränderte Anreicherung der Atmosphäre mit CO<sub>2</sub> und anderen Treibhausgasen zu einer weiteren Erwärmung der Globaltemperatur führt. Denn es existieren auch mehrere der Veränderung entgegenwirkende negative Rückkoppelungen. So führt eine Erwärmung der Erdtemperatur bspw. dazu, dass die (temperaturabhängige) Ausstrahlung der Erde energieintensiver und stärker im kurzwelligen Bereich erfolgt (Wien'sches Verschiebungsgesetz). Dadurch wird der Effekt der Treibhausgase herabgesetzt, denn diese wirken am besten im langwelligen Strahlungsbereich. Eine andere negative Rückkoppelung findet sich ganz einfach darin, dass wärmere Temperaturen auch zu verstärkter Verdunstung und damit zu Regen und Gewittertätigkeit führen. Dies wirkt (durch die häufigere Bewölkung) senkend auf die Temperaturen und die Einstrahlung. Ebenfalls senkend könnte sich der durch die künstlichen Verbrennungen erhöhte Aerosolgehalt in der Luft bemerkbar machen, welcher einen Teil der

einkommenden Sonnenstrahlung schon in der Atmosphäre reflektiert. Andererseits besitzt die Luft durch die verstärkte Verdunstung und die höheren Temperaturen (warme Luft kann mehr Feuchtigkeit enthalten als kalte) eine höhere durchschnittliche Luftfeuchtigkeit (Wasserdampf). Wasserdampf selbst wiederum ist ebenfalls ein wirksames Treibhausgas, wodurch die Erwärmung verstärkt wird und sich ein positiver, selbstverstärkender Kreislauf ergibt. Durch die verstärkte Verdunstung ist auch die Landoberfläche im Durchschnitt trockener, die einkommende Sonnenstrahlung erwärmt dadurch die Oberfläche noch stärker, da weniger Energie durch Verdunstung verloren geht. Die durch den Treibhauseffekt hervorgerufenen wärmeren Temperaturen führen zu einem Abschmelzen von Gletschern und den Polkappen sowie verringertem Schneefall. Die Strahlung, die in diesen Gebieten auf die Erde trifft, wird nach dem Abschmelzen statt auf weißes, hoch reflektierendes Eis oder Schnee auf die „normale“ Erdoberfläche treffen, welche eine deutlich geringere Albedo aufweist. Durch die geringere Albedo wird der Boden deutlich stärker erwärmt als zuvor, was natürlich zu weiterer Erwärmung führt – ebenfalls ein sich selbst verstärkender Kreislauf.

Die Zahl an Beziehungen und Wirkungen dieser Art ist im Klimasystem enorm. Das ist auch mit einem Grund, warum exakte und zuverlässige Vorhersagen über die Entwicklung des Globalklimas äußerst schwierig sind. Denn man kann nicht mit Sicherheit sagen, welcher dieser Kreisläufe sich wie stark bemerkbar machen wird und welcher dominant sein wird. Hinzu kommt, dass auch enge Verknüpfungen des Klimasystems mit bspw. den Meeresströmungen gegeben sind: Ein mögliches zukünftiges Szenario der Klimaentwicklung ist etwa jenes, dass durch die Erwärmung das Schmelzen der Polkappen und auch die Niederschlagsmengen in hohen Breiten steigen. Dadurch dürften Meeresströmungen in diesen Gebieten in Zukunft mehr Wasser führen. Der Labradorstrom (eine kalte Gradientströmung entlang der westlichen Grenze der Labrador See) der derzeit südwestlich von Neufundland von Norden her auf den Golfstrom (Nordatlantikstrom) trifft und größtenteils unter ihn hinabsinkt, könnte durch seine stärkere Ausprägung den Golfstrom empfindlich von seinem derzeitigen Kurs ablenken. Da dieser aber durch sein relativ warmes Wasser eine enorme Heizwirkung für ganz Europa bewirkt, hätte eine Ablenkung des Strömungssystems in südliche Richtung gewaltige klimatische Folgen für Europa. Es wäre dadurch denkbar, dass die Erwärmung der Globaltemperatur paradoxerweise eine Eiszeit in Europa bewirkt.<sup>63</sup>

---

<sup>63</sup> Selbiges ist auch durch ein anderes Szenario möglich: Das Nordatlantikstromwasser sinkt derzeit in der Nordpolarregion nach der Abgabe seiner Wärme aufgrund seines hohen Salzgehaltes in die Tiefe ab. Die abgesunkenen Wassermassen strömen als nordatlantisches Tiefenwasser nach Süden und es ergibt sich in großen Tiefen ein gewaltiges thermohalines Zirkulationssystem rund um die Erde durch alle drei Ozeane, dessen Durchlauf 1000 Jahre dauert. Dieses kalte absinkende Meerwasser ist eine der größten CO<sub>2</sub> - Senken der Welt, da es vor dem Absinken noch stark mit CO<sub>2</sub> angereichert wird. Vermehrter Niederschlag in hohen Breiten und ein Abschmelzen der Polkappen könnte für eine Verringerung des Salzgehaltes in der Nordpolarregion sorgen, wodurch das thermohaline Absinken des Nordatlantikstromwassers zum Stillstand kommen würde. Durch das Ausbleiben der Sogwirkung würde der Golfstrom ebenfalls nicht mehr in diese nördlichen Regionen vorstoßen – die

Computergestützte Klimamodelle erlauben in gewissem Maße die Wahrscheinlichkeit der einzelnen möglichen Entwicklungen vorherzuberechnen. Es handelt sich dabei in der Regel um so genannte „Globale Zirkulationsmodelle“ (engl. General Circulation Models – GCM’s). Diese Modelle berechnen auf Grundlage der eingegebenen mathematischen Gleichungen und physikalischen Gesetze die zukünftigen Zustände der einzelnen Bestandsgrößen des Klimasystems (z.B. Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Wolken, etc). Es versteht sich von selbst, dass die Ergebnisse der Modelle nicht unbedingt exakt den zukünftigen Zustand unseres Klimas errechnen, vielmehr handelt es sich um Näherungen. Selbst die kompliziertesten Berechnungsmodelle bleiben Modelle, d.h. vereinfachte Abbildungen der Realität. Die ungeheure Komplexität und das chaotische Verhalten des Klimasystems sowie die Unschärfe bei der Erhebung des Ausgangszustandes verursachen Abweichungen der Berechnungen. Eine große Unbekannte und damit eine entscheidende Quelle für Abweichungen liegt bei globalen Zirkulationsmodellen aber v.a. im tatsächlichen zukünftigen Verhalten von klimabeeinflussenden Faktoren wie z.B. Weltwirtschafts-, Weltbevölkerungs- und Emissionsentwicklung oder der Art und Intensität der Energienutzung. Je nachdem wie sich diese Faktoren entwickeln, hat das auch unterschiedlichen Einfluss auf die Veränderung des Klimas. Derartige Klimamodelle werden aus diesem Grund auch für unterschiedliche Szenarien durchgerechnet, das Ergebnis ist stets an die Voraussetzung des Eintretens dieses Szenarios gebunden.

Je nach Umfang des Modells sind auch Subsysteme des Klimas, wie bspw. der Ozean, in das Computermodell integriert.<sup>64</sup> Wie bereits oben beschrieben, besitzt das Meer einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf das Klima – bspw. beeinflusst die Wassertemperatur die Art und Ausprägung von Winden (auch von Hurrikans) und wirkt ausgleichend auf die Lufttemperatur. Auch Meeresströmungen beeinflussen durch den Transport latenter Wärme die Lufttemperatur bzw. können durch Abkühlung der darüber liegenden Luft sogar vermehrte Niederschläge bewirken. Wie Dieter KASANG (2004) schreibt, gilt es bei der Modellierung der Flussgrößen zwischen Atmosphäre und Meer in solchen gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Modellen zwischen Wasserflüssen (Verdunstung, Niederschlag), Impulsflüssen (Windschub) und Energieflüssen (Strahlung sowie fühlbare und latente Wärmeflüsse) zu unterscheiden. Zu berücksichtigen gilt es, dass diese globalen Zirkulationsmodelle aufgrund begrenzter Computerleistung aber zugleich ungeheurer Vielfalt

---

Heizwirkung für Europa würde erlöschen. Zugleich hätte dies eine Beschleunigung des Treibhauseffektes durch das Ausbleiben der CO<sub>2</sub> – Bindung im Meerwasser zur Folge.

<sup>64</sup> Viele Computermodelle enthalten wie angesprochen auch Wirkungsbeziehungen zur weltweiten Wirtschaftslage und/oder anderen menschlichen Einflussbereichen wie landwirtschaftlich genutztes Land oder potentiell nutzbares Land. Geeignete Computerleistung vorausgesetzt, könnte es in Zukunft Modelle des Gesamtsystems Erde geben, welche dann auch Wirkungen und Rückwirkungen zwischen den einzelnen Subsystemen enthalten und ein annäherndes Abbild des tatsächlichen Systems Erde darstellen (vgl. KASANG 2004).

an Beziehungen zwischen den Systemelementen, den Kompromiss einer räumlichen Zusammenfassung eingehen müssen, d.h. der Auflösungsgrad der Modelle ist relativ niedrig. Die in der Regel verwendeten T21 oder T42 – Modelle besitzen einen Auflösungsgrad von 500x500km bzw. 250x250km. Dementsprechend wenig lässt sich über die *lokale Ausprägung* des zukünftigen Klimazustandes aussagen.

Tom FIDDAMAN (1997) analysierte mehrere der meistverwendeten globalen Zirkulationsmodelle und entwickelte selbst ein SD-Modell des Klimasystems, welches er mit dem Wirtschafts- und Energiesystem verband. Einen zentralen Teil dieses Modells stellt – wie in beinahe allen Klimamodellen – der globale CO<sub>2</sub> - Kreislauf dar. Um eine Idee zu vermitteln, wie ein SD-Modell in diesem Zusammenhang aussieht, stellt Abbildung 10.1. eine von STERMAN (2000) angeführte vereinfachte Version des CO<sub>2</sub> - Kreislaufes (mit Verbindung zur Globaltemperatur) des Modells von FIDDAMAN (1997) dar. Diese Abbildung ist jedoch keinesfalls vollständig, werden doch einige wichtige Beziehungen und Zusammenhänge des CO<sub>2</sub> - Kreislaufes und dem Zustandekommen der Globaltemperatur nicht berücksichtigt. Der linke und der obere Teil der Abbildung stellen den CO<sub>2</sub> - Kreislauf dar, der rechte untere Teil die Globaltemperatur.

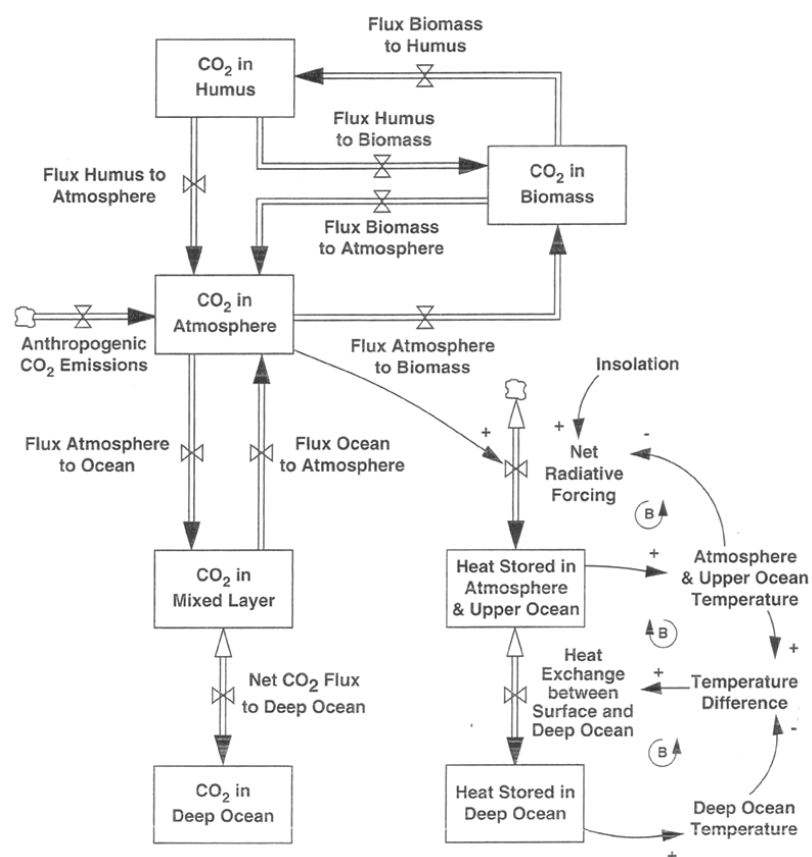


Abb. 10.1. (aus STERMAN 2000)

Es wird schnell ersichtlich, an welcher Stelle der Mensch in das System eingreift – durch Verbrennung von Kohlenstoffreservoirs (Erdöl, Kohle, Erdgas, Holz, etc.) erhöht er die CO<sub>2</sub> -

Konzentration und somit den Bestand an  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre.<sup>65</sup> Natürlich ist der Mensch auch auf andere Art und Weise Teil des Kreislaufes, produzieren wir doch bei jedem Atemzug ebenfalls  $\text{CO}_2$  und auch unser Körper beinhaltet Kohlenstoff, der nach unserem Tod wieder in den Kreislauf übergeht. Der anthropogene Treibhauseffekt kommt aber nicht durch die größer werdende Zahl an Menschen und deren Atmung zustande, sondern durch Verbrennung kohlenstoffhaltiger Ressourcen. Der atmosphärische  $\text{CO}_2$  - Bestand hat nun zwei Abflüsse (vgl. Abb. 10.1.): zum einen jenen in die Biomasse (Gesamtheit der biochemisch synthetisierten Masse, d.h. die Masse aller Lebewesen einschließlich ihrer organischen Stoffwechselprodukte). Denn Pflanzen verwenden  $\text{CO}_2$  als Ausgangsmaterial zur Photosynthese, womit es biochemisch gebunden und aus der Luft entfernt wird. Sekundärproduzenten wie Tiere oder der Mensch nutzen diese Pflanzen, wodurch der Kohlenstoff zum Aufbau tierischer oder menschlicher Masse Gebrauch findet. Die Atmung stellt den Fluss (in der Abb. engl. „flux“) von der Biomasse zurück zum  $\text{CO}_2$  - Bestand dar. Das  $\text{CO}_2$  kann aber auch über den Umweg von Humus zurück in die Atmosphäre gelangen. Der zweite Abfluss transportiert Kohlenstoff in den Ozean – der  $\text{CO}_2$  - Gehalt des Wassers und jener der darüber liegenden Luft gleichen sich aneinander an. Da in der Regel die Luft eine höhere Konzentration aufweist, nimmt das Wasser  $\text{CO}_2$  auf, der Fluss kann aber auch in die andere Richtung gehen.<sup>66</sup> Der  $\text{CO}_2$  - Gehalt der Mischungsschicht des Ozeans, d.h. der oberen ständig durchmischten Schicht des Meeres, gleicht sich selbst wiederum durch Meeresströmungen, Absinkbewegungen und Absterben von Meereslebewesen mit jenem der tieferen Meeresschichten aus. Dieser Austausch geht jedoch sehr langsam vor sich und kann auch in die umgekehrte Richtung wirken. Aus diesem Grund handelt es sich hierbei um einen Bifluss, was durch den in beide Richtungen zeigenden Pfeil kenntlich gemacht ist. Der zweite Teil der Abbildung stellt wie angesprochen die Temperatur von Atmosphäre und oberer Meeresschicht dar, welche im Modell als eine einzige Bestandsgröße zusammengefasst sind. In Realität handelt es sich dabei selbstverständlich um zwei Bestandsgrößen, welche ihre Temperatur ähnlich ihrem  $\text{CO}_2$  - Gehalt aneinander angleichen. Der  $\text{CO}_2$  Bestand in der Atmosphäre beeinflusst nun direkt die Menge an Einstrahlung auf die Erdoberfläche (siehe Wirkungspfeil). Gleichzeitig strahlt die Erdoberfläche aber auch gemäß ihrer Temperatur Strahlung aus, weshalb auch dieser Fluss

---

<sup>65</sup> In Abb. 10.1. wird die Quelle dieses Zuflusses an  $\text{CO}_2$  in die Atmosphäre als außerhalb des Systems und als unbegrenzt groß dargestellt. In der Tat handelt es sich bei der Quelle natürlich um Kohlenstoffreservoirs innerhalb des Systems, d.h. um einen Teil der Bestandsgrößen Biomasse und Humus bzw. des nicht modellierten Bestandes der fossilen Brennstoffe.

<sup>66</sup> Dieser umgekehrte Effekt könnte sich eines Tages als nachteilig erweisen, falls die Emissionen tatsächlich drastisch verringert werden können, um dem Treibhauseffekt Einhalt gebieten zu können. Denn dann besitzt das Wasser einen höheren  $\text{CO}_2$  - Gehalt als die Luft, wodurch die Atmosphäre vom Meer mit  $\text{CO}_2$  angereichert wird. STERMAN (2000) stellte unter Verwendung des Modells von FIDDAMAN (1997) fest, dass bei einem plötzlichen Verschwinden sämtlicher  $\text{CO}_2$  - Emissionen im Jahr 2000 dieser Effekt derart stark wäre, dass erst nach ungefähr 50 Jahren die  $\text{CO}_2$  - Konzentration in der Atmosphäre wieder auf das Niveau von 1990 fallen würde.

vereinfacht als Bifluss dargestellt ist.<sup>67</sup> Die Temperatur zwischen den oberen und den tiefen Bereichen des Meeres gleicht sich ebenfalls, wenngleich äußerst langsam an, was im untersten rechten Teil der Abbildung dargestellt ist.

STERMAN/BOOTH-SWEENEY (2002) verwendeten dieses Modell FIDDAMANS und untersuchten die Auswirkungen auf die Globaltemperatur im Falle des Eintretens möglicher Entwicklungsszenarien des anthropogenen CO<sub>2</sub> - Ausstoßes (vgl. Kap. 6.5.). Zuvor hatte schon STERMAN (2000) ebenfalls Berechnungen mit dem Modell FIDDAMANS angestellt und war zu mehreren Ergebnissen gekommen (vgl. STERMAN 2000, S. 248): Er weist darauf hin, dass die globale Erwärmung keinesfalls durch ein Korrelieren von Treibhausgasemissionen und der Globaltemperatur beschreibbar ist. Die zu Grunde liegenden vielfältigen Beziehungen, Wirkungen, Rückwirkungen und Zeitverzögerungen sind zu komplex um den Erwärmungstrend direkt mit der weiteren Entwicklung der Emissionen vorherberechnen zu können. Weiters haben die Ozeane und andere CO<sub>2</sub> - Senken in der Vergangenheit die Anreicherung des CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre gebremst und die tatsächlichen Ausstoßraten verschleiert. Mit zunehmender Sättigung dieser Quellen dürfte der Treibhauseffekt zukünftiger Emissionen deutlich verstärkt werden. Drittens betont er die enorme Trägheit des Klimasystems. Den Treibhauseffekt bekämpfende Maßnahmen müssen schon mehrere Dekaden bevor sie ihren Effekt zeigen können durchgeführt werden. Eine weitere Erwärmung in naher Zukunft steht somit außer Frage, da die Emissionsrate weiterhin weit über der Abbaurate von CO<sub>2</sub> liegt (in der Tat dürfte die globale Emissionsrate in Zukunft sogar eher stark ansteigen anstatt zu sinken), sich die Konzentration also weiterhin erhöhen wird. Zu guter Letzt erwähnt STERMAN besonders, dass eine Stabilisierung der CO<sub>2</sub> - Emissionen nahe dem derzeitigen Niveau, wie sie auch die Kyoto-Protokolle vorsehen, nicht in der Lage ist, das Klima zu stabilisieren. Zu diesem Zweck müssten die Emissionen vom derzeitigen Stand mehr als halbiert werden (vgl. STERMAN /BOOTH-SWEENEY 2002).

## 10.2. Probleme der SD in der Geographie

Wie diese Anwendungen der SD zeigen, gibt es durchaus mehrere sehr ergiebige geographische Bereiche, in denen die systemdynamische Modelliermethode von Hilfe sein kann. Aber die SD stößt speziell bei geographischen Belangen auch sehr schnell an ihre Grenzen. Denn ein prinzipielles Problem bei der Anwendung systemdynamischer Modelle für geographische Sachverhalte ist die *Raumbezogenheit* der Geographie. SD - Modelle sind dazu konzipiert, das zukünftige *zeitliche* Verhalten der Bestandsgrößen eines Systems ohne

---

<sup>67</sup> An dieser Stelle wäre Potential die Abbildung noch stärker zu verfeinern. Die Temperatur des Meeres beeinflusst die Bindung von CO<sub>2</sub>. Warmes Wasser kann weniger CO<sub>2</sub> binden als kaltes, wodurch bei steigender Temperatur der Fluss von CO<sub>2</sub> von der Atmosphäre zum Meer verringert (linker Teil) und der Treibhauseffekt noch weiter angekurbelt wird.

Berücksichtigung ihrer exakten räumlichen Differenzierung zu simulieren und zu berechnen. Während in systemdynamischen Modellen demnach die Dimension Zeit im Vordergrund steht, ist es in der Geographie die Dimension Raum. So ist es etwa bei Klimaberechnungen meist von besonderem Interesse, wie sich das Klima an einem bestimmten Ort in Zukunft zeigen wird. Diese Aussage ist bei Berechnungen, die mit extrem kleinem Maßstab angelegt sind, wie bspw. globale Zirkulationsmodelle, durch die begrenzte Computerleistung nicht möglich. Bei SD – Modellen ist sie zusätzlich deshalb nicht möglich, weil es sich bei den Bestandsgrößen um (meist sehr stark) aggregierte<sup>68</sup> Größen handelt, was auch die Ursache für den Verlust des Raumbezugs in SD-Modellen darstellt. So finden in den Weltmodellen von FORRESTER (1971b) und MEADOWS et al. (1972) aggregierte Zustandsgrößen wie „Bevölkerung“, „Kapital“, „Ressourcen“, „Umweltbelastung“ etc. Anwendung, welche nicht spezifisch verortet sind. Damit geht ein gewisser Informationsverlust einher. Wie NINCK (1994, S. 30) hinweist, können elementare Entscheidungsgrößen und -mechanismen in SD-Modellen aufgrund des durch die starke Aggregation bedingten Abstraktionsprozesses (und den damit gekoppelten Informationsverlust) nur noch in Form von übergeordneten Gesetzmäßigkeiten repräsentiert werden. Viele wichtige Beziehungen auf Mikroebene, welche für ein Verständnis ebenso wichtig sind – und damit auch der Raumbezug – gehen abhanden bzw. können nicht miteinbezogen werden. Gerade in der Geographie ist aber ein expliziter Raumbezug oft wichtig und auch notwendig. SD-Modelle beschreiben daher meist Zustände auf der übergeordneten summierten Ebene (Makroebene). Bestandsgrößen wie Raum, Bevölkerung, etc. werden als gleichförmig vorausgesetzt, eventuelle Unterschiede werden in der Regel zu einem Durchschnittswert gemittelt:

„Man geht von Beziehungen zwischen *Durchschnittswerten* aus – etwa dem Zusammenhang der durchschnittlichen *weltweiten* Geburtenrate zur *mittleren weltweiten* Umweltverschmutzung. Daher sind diese Modelle [Anm. Makromodelle] zur Abbildung räumlicher und sozialer Systeme nicht gut geeignet.“  
(HESSE/RAUH 2003, S. 70)

Diese künstliche Homogenisierung von inhomogenen räumlichen Gegebenheiten führt dazu, dass eine Realisierung der Dimension Raum nur noch bedingt möglich ist (vgl. NINCK 1994). Eine Möglichkeit diesem Unterschied zwischen Zeit- und Raumbezogenheit zu begegnen besteht selbstverständlich darin, kleinräumigere Modelle zu erstellen. Dies besitzt jedoch den Nachteil, dass dadurch die übergeordneten Zusammenhänge nicht berücksichtigt werden. Gerade sie besitzen aber oftmals entscheidende Bedeutung. So würde es wenig Sinn machen, ein kleinräumiges Klimamodell aufzustellen, welches aber nicht die Entwicklung der

---

<sup>68</sup> Unter Aggregation wird die Bildung einer übergeordneten Größe, wie z.B. einer Summe, eines Mittelwertes, etc. aus einer Menge elementarer Größen verstanden. Die durch Aggregation bedingte Komplexitätsreduktion besitzt sowohl Vorteile (z.B. weniger aufwendige Modellerstellung, Möglichkeit sehr großräumiger Modelle) als auch gewisse Nachteile (Verlust der räumlichen Informationskomponente). Modelle, welche in erster Linie mit aggregierten Größen arbeiten – wie etwa die SD – werden auch „Makroanalytische Modelle“ genannt (vgl. bspw. NINCK 1994, HESSE/RAUH 2003).

Treibhausgase und somit des Treibhauseffekts berücksichtigt. Wie gesehen, kann bspw. auch eine Veränderung von Meeresströmungen dafür sorgen, dass sich das Klima einer Region (oder gar eines Kontinentes) deutlich ändert. Um also aussagekräftige Resultate zu erreichen, muss man die Modelle kleinmaßstabig halten und auf lokale Voraussagen weitgehend verzichten. Wie KASANG (2004) berichtet, hat die Modellentwicklung auf dieses Dilemma mit der so genannten „Downscaling-Methode“ reagiert. Dabei sind prinzipiell zwei unterschiedliche Herangehensweisen möglich – das *dynamische* und das *statistische* Downscaling. Ersteres funktioniert mittels der Einbettung exakter kleinräumiger Modelle in das übergeordnete Modell. Auf gewisse Weise integriert man hierbei ein Subsystem in das Modell, welches autonom funktioniert. Bei globalen Klimaberechnungen kann man auf diese Art ein regionales und in dieses wiederum ein lokales Modell einfügen und aneinander koppeln. Die Ergebnisse des einen Modells sind die Eingabewerte des anderen. Das statistische Downscaling hingegen berücksichtigt bekannte statistische Zusammenhänge zwischen den lokalen und regionalen bzw. den regionalen und überregionalen klimatischen Gegebenheiten. Mittels dieser statistischen Zusammenhänge wird von den Ergebnissen des globalen Modells auf die entsprechende lokale oder regionale Ausprägung des Klimas geschlossen.

Die im Bereich des Stadtklimas und Schadstoffausbreitung angewendeten prognostischen Strömungs- und Ausbreitungsmodelle sind den angesprochenen Klimamodellen sehr ähnlich. Es wird hierbei aufbauend auf der Kenntnis des Strömungsfeldes bzw. dessen räumlicher und zeitlicher Verteilung versucht, die Entwicklung der Ausbreitung von Schadstoffen vorherzusagen (vgl. PODESSER 1996). Bei rein quantitativen Klimamodellen, welche auf das Prognostizieren des Stadtklimas abzielen, findet die eben beschriebene Methode des statistischen Downscalings Anwendung. Das Klima der Stadt wird als eine Art Kubus modelliert und die Ein- und Ausgänge in diesen Kubus quantitativ erfasst. Die internen Abläufe wie Wärmeabstrahlung von Gebäuden, Verschmutzung durch Kraftfahrzeuge sowie lokale Winde durch Häuserschluchten lassen sich ebenfalls erfassen und in das Modell mit aufnehmen. Das Ergebnis hingegen wird keine räumliche Spezifizierung ermöglichen. Aus diesem Grund kann man die bekannten statistischen Beziehungen zwischen den einzelnen Gebieten der Stadt anschließend zur Ermittlung einer lokalen Prognose heranziehen. Die auf die Schadstoffausbreitung konzentrierten Modelle lassen sich prinzipiell in zwei Gruppen unterteilen (vgl. PODESSER 1996): „Gauß-Modelle“ ermitteln zum Zwecke einer Immissionsprognose die wahrscheinliche Ausbreitung von *punktuellen* Schadstoffemittenten. „Box-Modelle“ entsprechen den erwähnten Kubusmodellen und lassen eine Berechnung der Schadstoffkonzentration bei *flächenförmigen* Emittenten (z.B. Hausbrand, Verkehrsabgase) zu. Während bei diesen Box-

Modellen eine systemdynamische Umsetzung durchaus bewerkstelligbar ist, dürfte das bei Gauß-Modellen bedeutend schwieriger sein.

Ein gänzlich anderes Problem vieler (vor allem physio-)geographischer Modellierungen ist – unabhängig von der Modelliermethode – eine gewisse Unschärfe der Messwerte und somit der Anfangsbedingungen. Es lässt sich nicht exakt quantitativ ermitteln und auch nur sehr schwer abschätzen, wie viel Schadstoffe an einem Tag in einer Stadt oder in einem Land emittiert werden oder wie sich der gegenwärtige Zustand des Klimas (exakte räumlich differenzierte Ausprägung von Temperatur, Feuchtigkeit, Luftdruck etc.) in einer Region darstellt. Für ein Modell, das auch über einen etwas längeren Zeithorizont als die in der Wetterprognose üblichen wenigen Tage präzise Vorhersagen liefern soll, wäre eine solche umfassende „scharfe“ Messung aller Klimavariablen an jedem Punkt des beobachteten Gebietes jedoch notwendig. Da sich viele der klimatischen Prozesse nichtlinear verhalten, werden diese Unschärfen in den Messwerten bei der Vorausberechnung derart hochgeschaukelt, dass schon nach einem kurzen Zeithorizont die Abweichungen sehr groß werden können. Seriöse langfristige Prognosen mit räumlicher Differenzierung sind in einem solchen deterministisch chaotischen System nicht mehr möglich. Ein Beispiel für einen derartigen nichtlinearen Zusammenhang stellt die Wolkenbildung dar. Diese kann sehr schnell und kleinräumig veränderlich sein, besitzt aber einen äußerst großen Einfluss auf die Ausprägung der Klimavariablen und somit auf Wetter und Witterung – so werden u.a. die kurzweilige Ein- und die langwellige Ausstrahlung und damit die Temperatur deutlich verändert.

Das Problem der Unschärfe der Messwerte und der nichtlinearen Wirkungen ist im Speziellen bei Modellen mit vergleichsweise kurzem Zeithorizont (wie z.B. Wettervorhersagen) enorm. Modelle mit sehr viel größerem Zeithorizont, wie etwa die globalen Zirkulationsmodelle, werden von beiden Faktoren weniger beeinflusst. Die Unschärfe der Messwerte wird hierbei meist dadurch umgangen, dass man das Modell derart gestaltet, dass es den vergangenen Zeitraum der letzten ca. 100 Jahre, d.h. jene Zeit seit der es einigermaßen zuverlässige klimatische Messungen gibt, korrekt darstellt. Dadurch ist ein Erfassen von bestimmten Anfangsbedingungen nicht notwendig und somit die Unschärfe bei den Messungen unerheblich.<sup>69</sup> Was die nichtlinearen klimatischen Vorgänge betrifft, so sind auch sie bei langfristigen Modellen von untergeordneter Relevanz. Denn sie werden bei weitem nicht derart stark von ihnen beeinflusst wie es kurzfristige Modelle werden, da sich viele dieser Wirkungen über den langen Zeithorizont ausgleichen: Um beim

---

<sup>69</sup> Es ergibt sich in diesem Zusammenhang jedoch ein weiteres Problem: Sowohl die Genauigkeit der Messungen als auch die Standorte der Messstationen haben sich in den vergangenen Jahrzehnten verändert. Man kann nicht davon ausgehen, dass Messungen von vor 90 Jahren die damals tatsächlich vorhandenen Werte präzise erfasst haben. Damit wird natürlich auch die Aussagekraft von Ergebnissen betreffend Klimaveränderungen, welche auf diese Zeit Bezug nehmen, etwas relativiert.

Beispiel der schnellen und kleinräumigen Wolkenbildung zu bleiben, so hat eine plötzliche Veränderung kaum einen relevanten Einfluss auf den Jahresdurchschnitt der Temperatur, sehr wohl aber auf eine kurzfristige Wetterprognose. Bei langfristigen Modellen spielt die Wolkenbildung hingegen auf die Art eine Rolle, ob durch die verstärkte Verdunstung oder den größeren Aerosolgehalt generell die durchschnittliche Wolkenbedeckung in einer Weltregion größer wird, oder aber ob sie durch andere Prozesse vielleicht verringert wird. Dies besitzt nämlich sehr wohl einen großen Einfluss auf die Prognose.

Wie gesehen, kann die Modelliermethode der SD in der Geographie keinen Anspruch auf universelle Einsetzbarkeit erheben. Es gibt durchaus Anwendungsgebiete in denen die SD-Methode an ihre Grenzen stößt bzw. – wie noch angesprochen werden wird – andere Modelliermethoden entscheidende Vorteile aufweisen. Die Hauptkritikpunkte an der systemdynamischen Modellierung betreffen die (meist) extrem starke Aggregation der Systemvariablen, wodurch vor allem räumliche Inhomogenitäten sowie Abläufe auf Mikroebene nicht berücksichtigt werden und die Modelle und Ergebnisse zwar sach- aber nicht raumbezogen sind. Dennoch sind systemdynamische Modelle aber auch in geographischen Kontexten, wie bspw. im Klimabereich oder in der Hydrologie sowie in anthropogeographischen Bereichen wie der Stadt- oder Verkehrsgeographie, der Siedlungs- und Raumplanung oder der Bevölkerungsgeographie, eine gute Möglichkeit um zukünftige Zustände prognostizieren, Einblicke in die Funktion und die Mechanismen der Systeme erlangen, die Auswirkungen von Eingriffen abschätzen und deren bestmögliche Gestaltung ermitteln zu können. Es hängt jedoch von der Art der Fragestellung ab, ob die systemdynamische Modelliermethode tatsächlich für eine Simulation geeignet ist.

### **10.3. Modellbildung in der Geographie**

Im Mittelpunkt geographischer Modellbildung (die Erstellung von Simulationsstudien geographischer Systeme mittels *räumlich expliziter Modelle* wird gemeinhin als „Spatial Analysis“ bezeichnet) steht wie gesehen meist die Modellierung von so genannten Mensch-Umwelt-Systemen. Dabei werden unter „Umwelt“ sämtliche Komponenten (physikalische, ökologische, politische, soziale, ökonomische etc.) des menschlichen Lebensraumes verstanden und unter Mensch-Umwelt-Systemen daher derartige Systeme, welche die Interaktion zwischen Mensch und Umwelt umfassen. Wie bereits an anderen Stellen dieser Arbeit angesprochen, weisen wir Menschen im Umgang mit solchen Systemen – im Speziellen sobald die Vernetzung zwischen einzelnen Komponenten stark dynamisch und/oder komplex wird – erstaunliche Probleme auf. Simulationsmodelle könnten daher besonders im geographischen Bereich einen Beitrag zu einem besseren Verständnis und

dadurch zu effektiveren und besser geeigneten menschlichen Eingriffen in Umweltsysteme beitragen. Doch die Verwendung von Computermodellen zur Simulation und Untersuchung solcher Systeme spielt bis dato in der Geographie bei weitem nicht eine derart wichtige Rolle wie in so manchen anderen Wissenschaftsrichtungen. MANDL (2003) führt für dieses Phänomen drei Gründe an. Seiner Meinung nach besteht bei vorhandenen Simulationsmodellen geographischer Systeme eine

- unzureichende Repräsentationsgenauigkeit,
- eine mangelnde Benutzbarkeit und Benutzerfreundlichkeit wegen fehlender, schwer bedienbarer Programme
- und eine fehlende Interoperabilität der vorhandenen geographischen Software, Daten und Verarbeitungsprozeduren (vgl. MANDL 2003, S. 5).

Auch die in den 1980er Jahren aufgekommenen „Geographischen Informationssysteme“ (GIS)<sup>70</sup> können diese Mängel nicht beheben, da sie zur raumzeitlichen Simulation von Systemen weitestgehend nicht geeignet sind. In erster Linie dienen GIS nämlich der Datenaufbereitung und statischen räumlichen Datendarstellung in einem Koordinatensystem. Die einzelnen geographischen Objekte werden darin als Punkte, Linien, Flächen oder Volumen dargestellt und mit Attributen versehen, welche eine Zuordnung raumbezogener Information (aus den Bereichen Geologie, Hydrogeographie, Topographie, Anthropogeographie, etc.) ermöglichen (vgl. NINCK 1994). GIS beruhen auf dem so genannten „Layer-Prinzip“, in welchem Ebenen mit unterschiedlichen räumlichen Informationen übereinander gelegt werden können, weisen aber keine zeitliche Dimension und somit Dynamik auf. Aus diesem Grund sind GIS – bei aller Wichtigkeit die sie in der Geographie in den letzten Jahren erlangt haben – zur raumzeitlichen Simulation ungeeignet, können aber durchaus als Grundlage für eine datenbasierte Simulation verwendet werden.

Die derzeit verwendeten Modelliermethoden können gemäß ihrer Vorgangsweise in zwei Kategorien unterteilt werden. Modellieransätze welche wie die SD-Methode Beziehungen von Mensch-Umwelt-Systemen auf Basis aggregierter Größen darstellen, werden als „Makroanalytische Modelle“ bezeichnet, „Mikroanalytische Modelle“ hingegen stellen die systeminternen Beziehungen auf Basis von Individuen dar.<sup>71</sup> Beide Modellierkategorien besitzen Vor- aber auch Nachteile, auf welche in der Folge eingegangen werden soll.

---

<sup>70</sup> Ein GIS kann definiert werden als „Software zur Speicherung, Verarbeitung und Darstellung von raumbezogenen Daten oder Information“ (vgl. NINCK 1994, S. 28).

<sup>71</sup> Die Bezeichnungen „makro“ und „mikro“ beziehen sich nicht auf den Gegenstand der Analyse, sondern auf die Herangehensweise des Modellansatzes. Sowohl großräumige Systeme (z.B. makroökonomische) als auch kleinräumige (z.B. mikroökonomische) können prinzipiell sowohl makro- als auch mikroanalytisch simuliert werden.

Während die „top-down“ Methode der makroanalytischen Analyse generell eher für globale Modellierungen Vorzüge besitzt, ist die „bottom-up“ Methode der mikroanalytischen Modellierung eher bei kleinräumigeren Systemen, bei denen der Raumbezug von Wichtigkeit ist, gebräuchlich.

### 10.3.1. Makroanalytische Modelle

Den wohl wichtigsten makroanalytischen Modellansatz stellt jener der SD dar – welcher bereits ausführlich besprochen wurde. NINCK (1994) führt als weitere Modellieransätze die Input-Output Analyse, die lineare Programmierung und das Bilanzverfahren an. Unter der Input-Output Analyse versteht man jedoch ein *statisches* Verfahren zur tabellarischen Darstellung makroökonomischer Zusammenhänge, bei welchem nur durch iterative Anwendung eine dynamische Entwicklung simulierbar ist. Das Instrument der linearen Programmierung wird gemäß NINCK (S. 27) für Optimierungsprobleme in den Bereichen Wirtschaft, Industrie, Verwaltung, Handel oder Verkehr eingesetzt. Es wird das Maximum oder Minimum einer „Zielfunktion“ bestimmt.

„Bei der Verwendung dieses Ansatzes im Zusammenhang mit Mensch-Umwelt-Systemen wird [...] nicht die dynamische Nachbildung einer Region angestrebt, sondern die Optimierung der regionalen sozioökonomischen Struktur unter Vorgabe einer Zielfunktion und bestimmter einzuhaltender Nebenbedingungen.“ Ninck 1994, S. 27.

Das „Bilanzverfahren“ stellt eine gewisse Mischung aus Buchhaltung und der SD – Methode dar. Für unterschiedliche Zeitpunkte werden die Zustände („Stocks“) des betreffenden Systems erfasst und anschließend die Veränderungen („Flows“) zwischen den aufeinander folgenden Zuständen errechnet. Aus diesen Flows werden Buchungsregeln bestimmt, welche die Berechnung eines neuen Zustandes auf Basis eines alten erlauben. Das Bilanzverfahren ist dabei sehr stark datenbasiert und darum bestrebt, statistische Aussagen zu treffen.

Gesamt gesehen stellt, wie schon angesprochen, der SD – Ansatz die wichtigste makroanalytische Modelliermethode von Systemen dar. Die Kritikpunkte ihm gegenüber konzentrieren sich speziell im geographischen Bereich auf die manchmal extreme Aggregation der Systemvariablen und den dadurch verursachten Verlust räumlicher Information. Durch diese Mittelung der Komponenten gehen nicht nur Informationen über Inhomogenitäten auf niedrigeren Ebenen verloren, sondern auch die Prozesse, welche auf diesen Ebenen stattfinden und dadurch oftmals erst den Gesamteffekt im übergeordneten System hervorrufen.

### 10.3.2. Mikroanalytische Modelle

Mikroanalytische Modelle knüpfen direkt an den Hauptkritikpunkt von Makromodellen an und berücksichtigen, wie der Name schon vermuten lässt, in erster Linie Prozesse auf Mikroebene. Wie LOIBL/PETERS-ANDERS (2003) betonen, trifft in Mensch-Umwelt-Systemen nicht eine Population von gleichgeschalteten Individuen eine Entscheidung, sondern es treffen viele unterschiedliche Individuen viele unterschiedliche Entscheidungen. Sie beeinflussen sich gegenseitig und bewirken emergente Zustände – nicht im Detail vorhersagbare neue Situationen. Mikroanalytische Modelle bilden daher die Komponenten des Systems – bspw. Individuen oder Haushalte einer Population – einzeln ab (vgl. HESSE/RAUH 2003, LOIBL/PETERS-ANDERS 2003, MANDL 2000/2003, NINCK 1994, etc). Genau dadurch bleibt auch der Raumbezug der Simulation erhalten, denn es besteht eine direkte Verbindung zwischen Daten des Modells und den modellierten Einheiten – die Daten sind zuordenbar. Mikroanalytische Modelle teilen somit das beobachtete System in die einzelnen interagierenden Komponenten auf - sie werden aus diesem Grund auch „individuenbasiert“ genannt. Umfasst ein mikroanalytisches Modell gleichzeitig mehrere unterschiedliche hierarchische Ebenen, wie z.B. Individuen, Haushalte, Gemeinden, Staaten, etc., so spricht man von einem Mehrebenenmodell (vgl. MANDL 2003, NINCK 1994). Die Verbindung des Handelns der Individuen mit einer übergeordneten Ebene ermöglicht dabei die Beobachtung der oben angesprochenen emergenten Prozesse.

Diese Art der mikroanalytischen Modellierung ist selbstverständlich ungleich aufwändiger als eine Simulation aggregierter Größen, denn die Zustandsveränderungen jeder einzelnen Funktionseinheit müssen der Reihe nach vom Computer gemäß gewisser Regeln und Parameter berechnet werden. Aus diesem Grund wurden mikroanalytische Modelle auch erst mit zunehmender Computerleistung möglich bzw. effizient. Ein Beispiel eines mikroanalytischen Mehrebenenmodells stellt etwa das von STRAUCH (2003) geschilderte groß angelegte interdisziplinäre Verbundprojekt ILUMASS (Integrated Land-Use Modelling Transportation System Simulation) dar. Dieses umfasst ein Modell zur integrierten Flächennutzungs- und Verkehrsplanung, welches anhand des östlichen Ruhrgebiets erprobt wurde. Verkehr und Landnutzung beeinflussen sich gegenseitig – diese Rückkoppelungen wurden in ILUMASS in den Komponenten Wohnungsmarkt, Grundstücksmarkt, Verkehrsnachfrage und Verkehrsfluss in einem einzigen Modell lang-, mittel- und kurzfristig berücksichtigt. Gewiss weisen aber auch mikroanalytische Modelle Schwachpunkte auf: Ein Problem besteht definitiv darin, dass das Wissen über die Entscheidungsmechanismen und entscheidungsrelevanten Größen der modellierten Individuen meist begrenzt ist (vgl. NINCK 1994). Auch ist die Umsetzung von mikroanalytischen Modellen deutlich schwieriger und komplexer, als das bei makroanalytischen Modellen der Fall ist. Auf der anderen Seite besteht hingegen der unbestreitbare Vorteil, dass die Modelle Rücksicht auf räumliche und

systemkomponenteninterne Inhomogenitäten nehmen und somit räumlich differenzierte Ergebnisse liefern.

### 10.3.2.1. Multi-Agenten-Systeme

Die inzwischen wohl bekannteste Art von mikroanalytischen individuenbasierten Modelliermethoden stellen in der Geographie so genannte „Multi-Agenten-Systeme“ (MAS) dar. Sie sind Anfang der 1990er Jahre unter dem Einfluss der Entstehung des computerwissenschaftlichen Bereichs der „Verteilten Künstlichen Intelligenz“ und der Modellierung komplexer Phänomene aufgekommen (vgl. HESSE/RAUH 2003).<sup>72</sup> MAS operieren mit „Agenten“, virtuellen Einheiten bzw. Akteuren, welche einen individuellen Zustand aufweisen und selbstständig agieren, reagieren, planen und wahrnehmen. Hinzu kommen vorgegebene Regeln, wie sich die Zustände der Agenten bei Veränderungen von außen – wie bspw. politischen Maßnahmen oder Umweltveränderungen – wandeln. Diese Regeln können ein breites Spektrum an Verhaltensmöglichkeiten umfassen. HESSE/RAUH (2003, S. 74) definieren Agenten „als ein meist auf Software basierendes, autonomes, reaktives und proaktives Computersystem mit gewissen sozialen Fähigkeiten.“ LOIBL/PETERS-ANDERS (2003) gehen auf die Eigenschaften von Agenten ein und beschreiben sie als reaktiv (sie nehmen wahr, agieren), autonom, proaktiv (zielorientiert, initiativ) sowie mit sozialen Fähigkeiten ausgestattet (sie kommunizieren, kollaborieren). Weiters sind die Agenten *mancher* MAS zeitlich beständig, adaptiv (lernfähig), mobil, flexibel und haben einen Charakter (sie besitzen eine glaubwürdige Persönlichkeit und emotionale Zustände).

Wichtig bei der Betrachtung von MAS ist, dass sich die Agenten auch im Zeitverlauf im Raum bewegen können, was diese Art von Modellen geradezu prädestiniert um Bevölkerungswanderungen, Landnutzungsveränderungen, Verkehrsabläufe und andere humangeographische Sachverhalte zu modellieren. Multi-Agenten-Systeme können auch sehr gut mit GIS gekoppelt werden, wobei letztere die Datengrundlage bilden, passive Elemente darstellen, oder aber auch Zwischen- und Endergebnisse wieder auf gewohnte Weise darstellen. MANDL (2003) unterteilt MAS nach den beiden Dimensionen Zeit und Raum in kurz-, mittel- und langfristige sowie Mikro-, Meso- und Makromodelle. Er führt auch mehrere von Studenten entwickelte Multi-Agenten-Simulationen geographischer Systeme wie bspw. die Simulation eines Kreisverkehrs, eines Waldbrands, einer Almbeweidung (Landnutzung) sowie einer Autobahn an, welche in unterschiedliche Kategorien dieser Einteilung nach Zeit und Raum fallen. Weitere Beispiele sind – auch wenn die Simulation mittels MAS noch relativ jung ist – zahlreich. So wendeten HESSE/RAUH (2003) ein MAS zur

---

<sup>72</sup> MANDL (2003) und KOCH (2003) sehen darüber hinaus auch in der Systemwissenschaft (Systemtheorie Luhmanns) einen für das Aufkommen von MAS entscheidenden Bereich.

Simulation von Konsumentenverhalten und zur Shopping-Center-Planung an. LOIBL/PETERS-ANDERS (2003) entwickelten zwei MAS - Modelle zur Simulation der Landschaftsveränderung von suburbanen Räumen und Agrarlandschaften. Betreffend der Modellierung von Stadtentwicklungen sei bspw. auf PORTUGALI (1999) oder TORRENS (2001) verwiesen. Wie GALANDA/WEIBEL (2003) aufzeigten, könnten MAS aber auch in einem gänzlich anderen Bereich der Geographie eine wichtige Rolle spielen. Die Autoren stellten einen agentenbasierten Ansatz zur vollautomatischen kartographischen Generalisierung (Überführen einer Karte in eine andere mit verkleinertem Maßstab) von Polygonmosaiken vor. Die einzelnen Agenten führen dabei autonom als Kartenobjekt ihre eigene Generalisierung durch, eine Tätigkeit, die derzeit sehr arbeitsintensiv manuell von geschulten Kartographen erledigt werden muss. Durch die große potentielle Vereinfachung dieses Arbeitsschrittes könnten MAS in Zukunft auch in der Kartographie große Bedeutung erlangen.

Zusammenfassend kann man sagen, dass es sich bei Multi-Agenten-Systemen um einen sehr universell einsetzbaren Modellieransatz handelt, welcher durch seine Integration von Zeit und Raum sehr gut geeignet ist geographische Systeme zu simulieren. Inhomogene Zustände innerhalb einer Bevölkerung, einer Gemeinde, eines Raumes werden nicht zu einem Durchschnittszustand aggregiert, sondern als solche modelliert. Auf diese Art und Weise erlauben speziell MAS als eine besondere Art von mikroanalytischen Modellen emergente Prozesse durch Simulation des Verhaltens der Individuen zu beleuchten. Ein Nachteil von MAS liegt aber wie u.a. LOIBL/PETERS-ANDERS (2003) hinweisen darin, dass die Festlegung der Regeln für das Verhalten der Agenten in unterschiedlichen Situationen eines sehr hohen empirischen Analyseaufwands bedarf. Eine weitere Schwäche von MAS sehen dieselben Autoren darin, dass der Modellierer eventuell dazu verleitet wird, die Entscheidungsfindung der Agenten zu vereinfacht zu modellieren (zu geringe Zahl von Einflusskriterien, falsche Gewichtung) – wodurch das Modell unrealistische Ergebnisse liefert. Darüber hinaus gilt für MAS natürlich auch die oben für mikroanalytische Modelle im Allgemeinen angeführte Schwäche der vergleichsweise schwierigen und aufwendigen Erstellung.

Geeignete geographische Simulationsmodelle beruhen laut MANDL (2003) auf räumlichen Ansätzen, sind dynamisch in Konzeption und Ergebnisdarstellung, sind individuenbasiert, und sind auf Experimente und Simulationen ausgerichtet. Derzeit scheint es kaum Modelliermethoden zu geben, welche zumindest diesen Anforderung besser gerecht werden, als dies Multi-Agenten-Systeme tun. Selbstverständlich existieren Aufgabenstellungen, für welche andere Modelliermethoden – auch jene der System Dynamics – besser geeignet sind. Speziell für raum- jedoch nicht globalbezogene Fragestellungen scheinen MAS jedoch ein überaus ertragreiches Werkzeug zu sein.

### 10.3.2.2. Zelluläre Automaten

Auch so genannte „zelluläre Automaten“ (vgl. BATTY et al. 1997, COUCLELIS 1997, TORRENS 2000, WHITE et al. 1997) stellen eine individuenbasierte Modelliermethode dar. Sie besitzen ein n-dimensionales einheitliches Gitter zur Raumdarstellung, wobei jede dadurch entstandene Zelle einen gewissen Zustand aufweist und mit seinen angrenzenden Nachbarzellen kommunizieren kann (vgl. HESSE/RAUH 2003). Der Zustand der Zelle im nächsten Zeitschritt errechnet sich gemäß gewisser Regeln aus dem eigenen Zustand und jenem der Nachbarzellen, wodurch sich gewissermaßen ein selbstorganisierendes System ergibt. Umgelegt auf ein konkretes Beispiel einer Stadt- oder Landnutzungsmodellierung bedeutet dies, dass der Wandel eines Gebietes vor allem durch die Nachbarschaftsstrukturen bestimmt wird. HESSE/RAUH (2003) sprechen mehrere Beispiele anderer Autoren an, in denen bspw. ein Waldbrand oder die ethnische Segregation in Wohngebieten mittels zellulärer Automaten simuliert wurde. Aber auch eine Kombination zellulärer Automaten mit Multi-Agenten-Systemen ist sinnvoll, denn sie können dazu herangezogen werden, die Umgebung der einzelnen Agenten zu modellieren. Genau dies ist in einem von LOIBL/TÖTZER (2002) vorgestellten Modell der Fall (vgl. Abb. 10.2.).

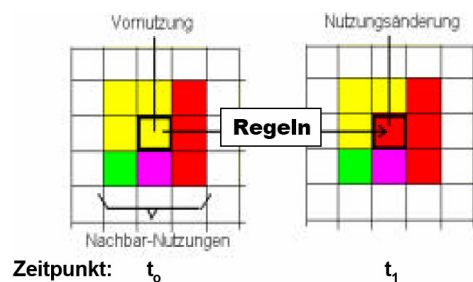


Abb. 10.2. (aus LOIBL/TÖTZER 2002)

Das Modell dient zur Simulation der Siedlungsentwicklung im suburbanen Bereich Wiens. Die einzelnen Agenten stellen wanderungswillige Individuen/Haushalte/Unternehmer dar, deren Verhalten von ihren Wünschen, ihren sozioökonomischen Rahmenbedingungen, ihrem Wissen über die Region und die Möglichkeit der Umsetzung ihrer Wünsche an den verschiedenen Zielorten abhängt (vgl. LOIBL/TÖTZER 2002). Die Entscheidung über die Wanderungsströme wird vereinfacht gesagt über die Attraktivität der Zielorte, Restriktionen wie naturräumliche Beschränkungen und über lokal vorhandene Möglichkeiten für Siedlungserweiterung gesteuert. Ein zellulärer Automat übernimmt dabei die Aufgabe, die Änderung der Landnutzung im Zielgebiet zu modellieren und somit in gewissem Maße darüber zu entscheiden, ob eine Ansiedlung der Agenten überhaupt möglich ist.

#### 10.4. Möglichkeiten der SD in der Geographie

Wenngleich die systemdynamische Modelliermethode wie gesehen in geographischen Bereichen mit einigen Schwierigkeiten zu kämpfen hat, finden sich dennoch sehr viele Anwendungsgebiete in denen die SD von Nutzen ist. Vor allem großräumige bis globale Fragestellungen bzw. solche, die eher auf das Verständnis der Struktur der Abläufe im übergeordneten Rahmen abzielen, kommen der SD entgegen. Je wichtiger der Raumbezug bei der Modellierung ist, desto weniger ist es aber vermutlich generell sinnvoll auf die Modelliermethode der SD zurückzugreifen. Das größte Potential sehe ich persönlich jedoch nicht in der quantitativen Modellierung eines geographischen Systems – wie gesehen sind andere Modelliermethoden wie MAS für viele geographische Belange besser geeignet – sondern vielmehr im didaktischen Bereich. So sind nicht nur Causal-Loop-Diagrammen (CLD's – vgl. Kap. 3.1.) sondern auch die in einem SD-Modell verwendeten Stock-Flow-Diagramme (SFD's) durchaus dazu geeignet, die Zusammenhänge und Wirkungen innerhalb eines Systems zu veranschaulichen. Der große Vorteil von SFD's liegt insbesondere darin, zur exakten Unterscheidung zwischen Bestands- und Flussgrößen zu zwingen, da in SFD's jede Darstellung eines Systems nur in Form von Stocks und Flows möglich ist. Dadurch kann erhofft werden, dass sich auch das Verständnis von dynamischen Prozessen beim Betrachter erhöht. Führt man sich noch einmal die in Kapitel 10.1.3. dargestellte Abbildung 10.1. zu Gemüte, so kann man – geringes Grundwissen über SFD's vorausgesetzt – durchaus die vielfältigen Zusammenhänge im CO<sub>2</sub> - Kreislauf gut erfassen. Vermutlich ist der Lerneffekt dabei sogar noch größer als bei rein verbaler Beschreibung, wie sie im Bereich der Geographie sehr oft anzutreffen ist. Derzeit finden im didaktischen Bereich der Geographie eher Abbildungen der folgenden Art Anwendung (vgl. Abb. 10.3.):

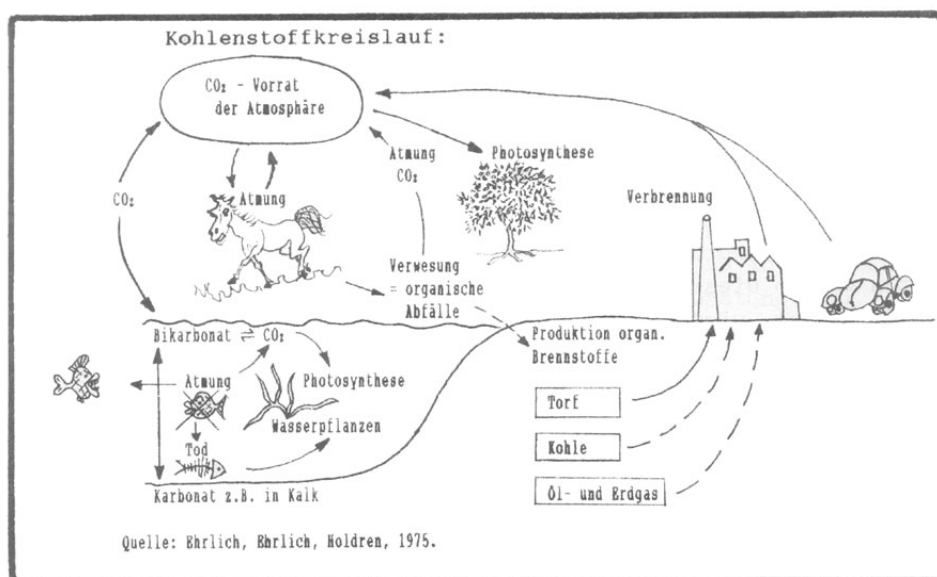


Abb. 10.3. (aus BACHLER/BADER/BRAUN et al. 1990)

Auch diese Abbildung stellt den CO<sub>2</sub> – Kreislaufs dar, ist meines Erachtens (abgesehen von den zusätzlichen Illustrationen) jedoch nicht so lehrreich und anschaulich wie ein mit Erklärungen versehenes SFD der Situation. Speziell in der Geographie, die sich zum großen Teil mit sehr komplexen natürlichen Systemen beschäftigt, kann es von Hilfe sein, wenn sich bei Schülern und Studenten ein Bild dieser vernetzten Struktur aufbaut. CLD's aber auch SFD's sind dafür sehr gut geeignet. Ein weiterer Vorteil von einem SFD liegt ferner darin, dass damit der Schritt zur Konstruktion eines systemdynamischen quantitativen Modells nur noch sehr klein ist. Aus der Erfahrung meines eigenen Studiums der Geographie und der Umweltsystemwissenschaften<sup>73</sup> kann ich sagen, dass sowohl angewandte quantitative Modellierung als auch für die Komplexität der Sachverhalte geeignete Darstellungsmethoden nur sehr selten Anwendung finden. Dabei würde dies nicht nur einen größeren Praxisbezug bewirken, sondern auch das Erreichen eines der wichtigsten Ziele des angesprochenen Studiums – interdisziplinäres und systemisches Denken – deutlich unterstützen.

---

<sup>73</sup> Beim Studium der Umweltsystemwissenschaften handelt es sich um einen europaweit einzigartigen Studienversuch an der Karl-Franzens-Universität Graz, der inzwischen zu einem regulären Studium geworden ist. Ausgehend von einem Fachschwerpunkt (Geographie, BWL, VWL, Chemie, Physik) absolviert man im Sinne des interdisziplinären Denkens nicht nur eine große Zahl an Lehrveranstaltungen anderer Studienrichtungen, sondern erlernt auch die Grundzüge der Systemwissenschaften.

## 11. Reflexion

### 11.1. Was konnte diese Dissertation leisten?

In Kapitel 1 der vorliegenden Arbeit wurden vier Ziele genannt. Zum einen sollte ein einführender Überblick in das Systemdenken, die Systemwissenschaften und die System Dynamics Modelliermethode gegeben werden, zum anderen sollte der Versuch unternommen werden, sich besonders auf einer theoretischen Ebene mit Stocks und Flows auseinander zu setzen. Ziel Nummer drei stellte die Präsentation des aktuellen Forschungsstandes zum Thema dar, das vierte und letzte Ziel war es, Bestands- und Flussgrößen sowie die Möglichkeiten der SD und anderer Modelliermethoden im Bereich der Geographie zu behandeln.

Der einleitende Überblick über die Systemwissenschaften diene auch dem Zweck, das Forschungsgebiet der Bathtub Dynamics bzw. des Stock-Flow-Thinkings in die übergeordneten Forschungsbereiche einordnen zu können. Die anschließende theoretische Betrachtung von Stocks und Flows ist in zwei Teile getrennt worden. Teil eins (Kapitel 4) stellte die vornehmliche Beschreibung der Eigenschaften, Eigenheiten und Kennmerkmale von Bestands- und Flussgrößen dar, während Teil zwei (Kapitel 6) das dynamische Zusammenspiel zwischen diesen Größen (auch unter Berücksichtigung von Rückkoppelungen und Zeitverzögerungen) umfasste. Es ist anhand dieser beiden Kapitel meiner Ansicht nach gelungen, neues Wissen über Stocks und Flows zu generieren und auch bisher stark getrenntes und auf mehrere Autoren verteiltes Wissen in einer einzigen Zusammenschau darzustellen. Das Manko der meisten vorhandenen Arbeiten zum Thema (beinahe ausnahmslos empirische Untersuchungen) ist jenes, dass sie sich zwar ausführlich gewissen Fragestellungen betreffend Bestands- und Flussgrößen widmen, zu sehr jedoch der Frage verhaftet bleiben, wie viele Probanden welche Aufgabenstellung lösen konnten. Mit nur wenigen Ausnahmen beinhalten sie keine Definition oder gar umfangreichere Erklärung dieser Größen und nur wenige Autoren konfrontierten ihre Testpersonen vor oder im Zuge ihrer Erhebung mit dem theoretischen Hintergrund von Stocks und Flows. Der Grund dafür mag darin liegen, dass es bis dato kaum ein umfangreiches zusammengefasstes Wissen darüber gab, oder darin, dass die Autoren in erster Linie darum bemüht waren, den Grad bestehender Verständnismängel aufzuzeigen – insbesondere da sich diese selbst bei der geistigen Elite offenbarten. Auch für die vorliegende Dissertation stand es für mich lange Zeit im Raum, eine eigene empirische Untersuchung, aufbauend auf den vorhandenen durchzuführen. Mit zunehmender Recherche musste ich jedoch feststellen, dass dieselben Ergebnisse mittels meist ähnlicher Fragestellungen bereits mehrere Male bestätigt wurden. Es war daher notwendig, die Ergebnisse in irgendeiner Form zu bereichern. Eine empirische Untersuchung mit gänzlich neuen Untersuchungsaspekten wäre

dazu eine Möglichkeit gewesen, eine zweite war jene, einen Abriss einer Theorie zu Bestands- und Flussgrößen zu erstellen. Der entstandene erstmalige Theorieabriss soll nun dazu dienen, der wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit diesen Größen einen Impuls zu geben und auch eine Voraussetzung für zukünftige empirische Untersuchungen bilden. Denn mit dem in dieser Dissertation erarbeiteten Hintergrundwissen über Stocks und Flows lassen sich bspw. neue Erhebungen gemäß einem Pretest – Posttest Design durchführen. Es gilt nach wie vor zu überprüfen, ob die so vielfach beobachteten schlechten Ergebnisse der Versuchspersonen in den Erhebungen durch ein mangelndes theoretisches Hintergrundwissen bedingt sind und durch die Vermittlung eines solchen Wissens behoben werden können.

Durch den in Teil 4 hergestellten Bezug der Arbeit zum Gebiet der Geographie konnte dem Thema und der Dissertation ein angewandter Bezug gegeben werden. Dieser Teil diene auch dem Zweck, die in den Theoriekapiteln erarbeiteten Erkenntnisse anhand allgemein bekannter geographischer Systeme aufzuzeigen. Zusätzlich wurde darin die Leistungsfähigkeit systemdynamischer Modellbildung und anderer Modelliermethoden besprochen. Es ist meiner Meinung nach wichtig, dass auch die Grenzen eines speziellen wissenschaftlichen Ansatzes, wie etwa der Systemdynamik, nicht unangesprochen bleiben. Keine Modelliermethode, kein Denkansatz und keine Problemlösungsmethode kann Anspruch auf Allgemeingültigkeit erheben. Ich hoffe daher nicht den Eindruck vermittelt zu haben, dass mit einem besseren Verständnis von Bestands- und Flussgrößen mit einem Schlag sämtliche Unzulänglichkeiten des menschlichen Denkens und der menschlichen Problemlösungskompetenz behoben wären. Dem ist zweifellos nicht so. Ein besseres Verständnis dieser Größen trägt aber zu einer Verbesserung dieser Fähigkeiten bei.

Ich hoffe, den eingangs gesteckten Zielen auf den vorangegangenen Seiten gerecht geworden zu sein und auf diese Weise einen kleinen Beitrag dazu geleistet zu haben, die menschliche Auffassungsgabe von Bestands- und Flussgrößen in Zukunft etwas zu erhöhen.

## **11.2. Was habe ich persönlich gelernt?**

Es stellt sich an dieser Stelle einer Reflexion auch die Frage, was ich persönlich im Zuge der Ausarbeitung gelernt habe. Im Laufe des Ausarbeitungsprozesses befand ich mich nicht nur einmal in einem gewissen Zwiespalt. Einerseits ist das Thema der Dissertation ungeheuerlich ergiebig – Bestands- und Flussgrößen sind eben tatsächlich derart allgegenwärtig, dass es manchmal schwierig ist, das Thema überhaupt einzukreisen oder auf den Punkt zu bringen. Andererseits bewegt es sich, wenn man in die Tiefe geht und versucht theoretische Erkenntnisse aus Überlegungen, Diskussionen, bestehenden Untersuchungen und sonstigen Publikationen zu ziehen, auch manches Mal im Kreis. Diese

Zirkularität und Vernetztheit ist an und für sich für die systemische Betrachtungsweise typisch, sie macht es aber auch schwierig in einem in Kapiteln aufgeteilten Text Aspekte aufbauend aufeinander anzusprechen und Wiederholungen auszuschließen. Aus diesem Grund waren Redundanzen im Laufe der einzelnen Kapitel der Arbeit nicht vermeidbar. Das und auch die notwendige oftmalige Benutzung einiger nicht auswechselbarer Begriffe mag die Lektüre zum Teil etwas mühsam gestaltet haben, beides war jedoch nicht zu umgehen. Was die Thematik an sich betrifft, habe ich deutlich mehr neu erfahren und gelernt als ich zuvor vermutet hatte. Wie im Vorwort angesprochen, durfte ich bereits vor einigen Jahren bei der Ausarbeitung einer empirischen Stock-Flow-Untersuchung mitwirken, was gleichzeitig auch meinen ersten Kontakt mit Bestands- und Flussgrößen und ihrer Problematik und Bedeutung darstellte. Umso mehr überraschte es mich, wie viel ich über diese beiden Arten von Systemkomponenten noch nicht wusste und neu erfahren konnte. Die Entwicklung einer Theorie bringt eine intensive gedankliche Auseinandersetzung mit dem Thema mit sich – in diesem Zuge konnte ich eine Vielzahl an Gedankengängen, Annahmen und Hypothesen zu diesen beiden Größen aufstellen. Viele musste ich aus unterschiedlichsten Gründen wieder verwerfen. Andere konnte ich in die vorliegende Arbeit einfließen lassen. Ich glaube aber beim Erstellungsprozess der vorliegenden Arbeit noch mehr gelernt zu haben, als ich in diesem Moment, während ich diese letzten Zeilen tippe, realisiere. Es aber an dieser Stelle noch weiter zu hinterfragen, wäre unangebracht und so halte ich es mit den Worten meines Freundes und Dissertationsbetreuers Günther OSSIMITZ, welcher zu sagen pflegt: „Eine gute wissenschaftliche Arbeit wird auch irgendwann einmal fertig.“ Dann soll dem auch so sein.

# LITERATURVERZEICHNIS

- AGATSTEIN, Kevin / BREIEROVA, Lucia (1996a): Graphical Integration Exercises Part Two: Ramp Functions (D-4571). MIT System Dynamics in Education Project, System Dynamics Group, Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology.  
URL: <http://www.clexchange.org/ftp/documents/system-dynamics/SD1996-08GraphicIntegratio2.pdf>
- AGATSTEIN, Kevin / BREIEROVA, Lucia (1996b): Graphical Integration Exercises Part Three: Combining Flows (D-4596). MIT System Dynamics in Education Project, System Dynamics Group, Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology.  
URL: <http://www.clexchange.org/ftp/documents/system-dynamics/SD1996-08GraphicIntegratio3.pdf>
- AGATSTEIN, Kevin (1997): Oscillating Systems II: Sustained Oscillation (D-4602). MIT System Dynamics in Education Project, System Dynamics Group, Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology.  
URL: <http://www.clexchange.org/ftp/documents/system-dynamics/SD1997-08OscillatngSystems2.pdf>
- ALBIN, Stephanie (1996): Generic Structures: First-Order Negative Feedback (4475-1). MIT System Dynamics in Education Project, System Dynamics Group, Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology.  
URL: <http://www.clexchange.org/ftp/documents/system-dynamics/SD1996-08GenericStructures2.pdf>
- ALBIN, Stephanie / CHOUDHARI, Mark (1996): Generic Structures: First-Order Positive Feedback (D-4474-1). MIT System Dynamics in Education Project, System Dynamics Group, Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology.  
URL: <http://www.clexchange.org/ftp/documents/system-dynamics/SD1996-08GenericStructures1.pdf>
- ARMENIA, Stefano / ONORI, Riccardo / BERTINI, Adriano (2004): Bathtub Dynamics At The "Tor Vergata" University In Rome, Italy. Proceedings of the 2004 International System Dynamics Conference. System Dynamics Society. Albany, New York.
- ASHFORD, Aaron C. (1995): Unexpected Behaviors in Higher-Order Positive Feedback Loops (D-4455-1). MIT System Dynamics in Education Project, System Dynamics Group, Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology.  
URL: <http://www.clexchange.org/ftp/documents/system-dynamics/SD1997-01UnexpectedBehavior.pdf>
- BACHLER, CHRISTIAN / BADER, THOMAS A. / BRAUN, NORBERT et al. (1990): Landschaftsökologie. Skriptum, ÖH - Karl-Franzens-Universität Graz.
- BATTY, Micheal / COUCLELIS, Helen / EICHEN, Marc (1997): Urban systems as cellular automata. Environment and Planning B, Planning and Design 24(2), S. 159-164.
- BERTALANFFY, Ludwig von (1968): General System Theory. Foundations, Development, Applications. New York: George Braziller.
- BOOTH-SWEENEY, Linda / STERMAN, John D. (2000): Bathtub Dynamics: Initial Results of a Systems Thinking Inventory. System Dynamics Review, 16 (4), 249-286.  
URL: <http://web.mit.edu/jsterman/www/Bathtub.pdf>
- BOSSEL, Hartmut (1994): Modellbildung und Simulation. Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme. Vieweg, Braunschweig - Wiesbaden.
- BREHMER, Berndt / ALLARD, Robert (1991): Dynamic Decision Making: The Effects of Task Complexity and Feedback Delay. In: J. RASMUSSEN, B. BREHMER and J. LEPLAT (Hrsg.): Distributed Decision Making: Cognitive Models for Cooperative Work, Chichester, Wiley.
- BREIEROVA, Lucia (1996): Mistakes and Misunderstandings: Use of Generic Structures and Reality of Stocks and Flows (D-4646). MIT System Dynamics in Education Project, System Dynamics Group, Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology.  
URL: <http://www.clexchange.org/ftp/documents/system-dynamics/SD1997-01MistakesStockFlows.pdf>
- BRIGGS, John / PEAT F. David (1990): Die Entdeckung des Chaos. Eine Reise durch die Chaos – Theorie. München, Wien: Carl Hanser Verlag.

- CAMERER, Colin F. / HOGARTH, Robin M. (1999): The effects of financial incentives in experiments: A review and capital-labor-production framework. Social Science Working Paper 1059, Pasadena. Journal of Risk and Uncertainty 19(1-3), S. 7-42.  
URL: <http://www.hss.caltech.edu/SSPapers/wp1059.pdf>
- CAVALERI, Steven / STERMAN, John D. (1997): Towards evaluation of system thinking interventions: a case study. System Dynamics Review 13 (2), S. 171-186.
- CORONADO, Alan E. (1997): Beginner Modeling Exercises Section 4. Mental Simulation: Adding Constant Flows (D-4546). MIT System Dynamics in Education Project, System Dynamics Group, Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology.  
URL: <http://www.clexchange.org/ftp/documents/system-dynamics/SD1996-08BegModelExercises4.pdf>
- COUCLELIS Helen (1997): From cellular automata to urban models: new principles for model development and implementation. Environment and Planning B, Planning and Design 24(2), S. 165-174.
- DIEBNER, Hans H. (Hrsg.) (2001): Studium generale zur Komplexität. Genista. Tübingen.
- DIEHL, Ernst / STERMAN, John D. (1995): Effects of feedback complexity on dynamic decision making. Organizational Behavior and Human Decision Processes 62(2), S. 198-215.
- DÖRNER, Dietrich / REITHER, Franz (1978): Über das Problemlösen in sehr komplexen Realitätsbereichen. Zeitschrift für experimentelle und angewandte Psychologie, 25, Heft 4, S. 527-551.
- DÖRNER, Dietrich (1989): Die Logik des Mislingens. Strategisches Denken in komplexen Situationen. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt.
- DOYLE, James K. (1997): The cognitive psychology of systems thinking. Systems Dynamics Review 13 (3), S. 253-265.
- DOYLE, James K. / FORD, David N. (1998): Mental Models Concepts for Systems Dynamics Research. System Dynamics Review 14, S. 3-29.  
URL: <http://www.wpi.edu/Academics/Depts/SSPS/Faculty/Papers/06.pdf>
- DOYLE, James K. / FORD, David N. (1999): Mental Models concepts revisited: some clarifications and a reply to Lane. System Dynamics Review 15 (4), S. 411-415.
- FIDDAMAN, Thoms S. (1997): Feedback Complexity in Integrated Climate-Economy Models. PhD thesis, MIT Sloan School of Management, Cambridge.  
URL: <http://www.sd3.info/papers/papers.html>
- FISHER, Diana M. (2003): Student Performance on The Bathtub and Cash Flow Problems. Proceedings of the 2003 International System Dynamics Conference. System Dynamics Society. Albany, New York.
- FORRESTER, Jay W. (1961): Industrial Dynamics. Cambridge: MIT Press. neu aufgelegt von Pegasus Communications, Mass. USA.
- FORRESTER, Jay W. (1969): Urban Dynamics. Cambridge, Massachusetts MIT Press.
- FORRESTER, Jay W. (1971a): Counterintuitive Behavior of Social Systems. Technology Review 73(3). Alumni Association of the Massachusetts Institute of Technology.  
URL: <http://sysdyn.clexchange.org/sdep/Roadmaps/RM1/D-4468-2.pdf>
- FORRESTER, Jay W. (1971b): World Dynamics. Cambridge, Massachusetts.
- FORRESTER, Jay W. (1991): System Dynamics and the Lessons of 35 Years. In: De Greene: The Systemic Basis of Policy Making in the 1990s.  
URL: <http://sysdyn.clexchange.org/sdep/papers/D-4224-4.pdf>
- FORRESTER, Jay W. (1994): System dynamics, systems thinking, and soft OR. System Dynamics Review 10 (2), S. 245-256.
- FORRESTER, Jay W. (1995): Learning and Renewal. The McKinsey Quarterly 1995 Nr. 4. S. 2-17.  
URL: [www.uni-klu.ac.at/~gossimit/pap/guest/besy95.pdf](http://www.uni-klu.ac.at/~gossimit/pap/guest/besy95.pdf)

- FUNKE, Joachim (2001): Dynamic systems as tools for analysing human judgement. *Thinking and Reasoning*, 7 (1), S. 69–89.
- GALANDA, Martin / WEIBEL, Robert (2003): Ein Multiagentensystem zur Generalisierung von Polygonmosaiken in thematischen Karten. In: KOCH, Andreas / MANDL, Peter (Hrsg.) (2003): *Multi-Agenten-Systeme in der Geographie*. Universität Klagenfurt. Klagenfurter Geographische Schriften, Heft 23.
- GLASERSFELD, Ernst von (1996): *Radikaler Konstruktivismus: Ideen, Ergebnisse, Probleme*. Suhrkamp. Frankfurt/Main.
- GLICK, Mark / DUHON, Terry (1994): *Generic Structures: S-Shaped Growth I (D-4432)*. MIT System Dynamics in Education Project, System Dynamics Group, Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology.  
URL: <http://www.clexchange.org/ftp/documents/system-dynamics/SD1995-01GenericStructures3.pdf>
- GOMEZ, Peter / PROBST, Gilbert (1987): *Vernetztes Denken im Management. Eine Methodik des ganzheitlichen Problemlösens*. (Die Orientierung Nr. 89) Bern: Schweizerische Volksbank.
- GORDON, H. Scott (1954): The economic theory of a common property resource: The Fishery. *Journal of Political Economy* 62, S. 124-142.
- GREEN, David W. (1997): Explaining and envisaging an ecological phenomenon. *British Journal of Psychology* 88/1997, S. 199-217.
- HARBORDT, Steffen (1974): *Computersimulation in den Sozialwissenschaften 1: Einführung und Anleitung*, Rohwolt, Reinbeck bei Hamburg.
- HARDIN, Garrett (1968): The Tragedy of the Commons. *Science*, 162(1968): S. 1243-1248.  
URL: <http://www.sciencemag.org/cgi/reprint/162/3859/1243.pdf>
- HAYWARD, John (2000): *Introduction to System Dynamics. For those interested in its applications to church growth*. Manuskript, University of Glamorgan.  
URL: [www.glam.ac.uk/sot/doms/ Research/cgrowth/introsystems.pdf](http://www.glam.ac.uk/sot/doms/Research/cgrowth/introsystems.pdf)
- HEINBOKEL, John / POTASH, Jeff (2003): *Bathtub Dynamics at Vermont Commons School*. Proceedings of the 2003 International System Dynamics Conference. System Dynamics Society. Albany, New York.
- HESSE, Roland / RAUH, Jürgen (2003): "Angebot" und "Nachfrage" im Einzelhandel: Multiagentensysteme zur Simulation von Konsumentenverhalten und der Shopping-Center-Planungen. In: KOCH, Andreas / MANDL, Peter (Hrsg.) (2003): *Multi-Agenten-Systeme in der Geographie*. Universität Klagenfurt. Klagenfurter Geographische Schriften, Heft 23.
- HOMER, Jack B. (1993): A system dynamics model of national cocaine prevalence. *System Dynamics Review* 9(1), S. 49-78.
- IPCC (2001a): *Climate Change 2001. The Scientific Basis. Summary for Policymakers. A Report of Working Group 1 of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC Third Assessment Report.  
URL: [http://www.grida.no/climate/ipcc\\_tar/wg1/index.htm](http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/index.htm) bzw. [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)
- IPCC (2001b) *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Technical Summary. A Report of Working Group 1 of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC Third Assessment Report.  
URL: [http://www.grida.no/climate/ipcc\\_tar/wg1/index.htm](http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/index.htm) bzw. [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)
- JENSEN, Eva (2003): *(Mis)understanding and Learning of Feedback Relations in a Simple Dynamic System*. Dissertation. Örebro Studies in Psychology 3. Örebro University.
- JENSEN, Eva / BREHMER, Berndt (2003): Understanding and control of a simple dynamic system. *System Dynamics Review*, 19, S. 119-137.
- JOHNSON-LAIRD, Philip N. (1983): *Mental Models: Towards a Cognitive Science of Language, Inference, and Consciousness*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- JONES, Andrew / SEVILLE, Don (2002): We can't afford to "wait and see" on climate changes. *The Systems Thinker* Vol. 13, No.9. Pegasus Communications Inc.  
URL : [www.sustainer.org/pubs/climateoped.pdf](http://www.sustainer.org/pubs/climateoped.pdf)

- KAINZ, Daniel / OSSIMITZ, Günther (2002): Can Students learn Stock-Flow-Thinking? An empirical Investigation. Submitted for the 2002 Conference of the System Dynamics Society, Palermo, Italy.  
URL: [http://www.uni-klu.ac.at/~gossimit/pap/kainz\\_ossimitz.pdf](http://www.uni-klu.ac.at/~gossimit/pap/kainz_ossimitz.pdf)
- KAMPMANN, Christian / STERMAN, John D. (1998): Feedback complexity, bounded rationality, and market dynamics. Paper.  
URL: [http://web.mit.edu/jsterman/www/SDG/Feedback\\_Complexity.pdf](http://web.mit.edu/jsterman/www/SDG/Feedback_Complexity.pdf)
- KAPMEIER, Florian (1999): Vom Systemischen Denken zur Methode System Dynamics. Diplomarbeit. Universität Stuttgart.  
URL: [http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2003/1591/pdf/Diplomarbeit\\_komplett\\_Florian\\_Kapmeier.pdf](http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2003/1591/pdf/Diplomarbeit_komplett_Florian_Kapmeier.pdf)
- KAPMEIER, Florian (2004): Findings From Four Years of Bathtub Dynamics at Higher Education Institutions in Stuttgart. Proceedings of the 2004 International System Dynamics Conference. System Dynamics Society, Albany, New York.
- KASANG, Dieter (2004): Klimamodelle. Hamburger Bildungsserver. Information für Lehrende und Lernende.  
URL: <http://www.hamburger-bildungsserver.de/klima/klimawandel/klimamodelle/> Zugriff: 10/08/04
- KUBANEK, Gordon (2003): Bathtub Dynamics - Ottawa. Proceedings of the 2003 International System Dynamics Conference. System Dynamics Society. Albany, New York.
- LANE, David C. (1999): Friendly amendment: A commentary on Doyle and Ford's proposed re-definition of "mental model". System Dynamics Review 15(2), S. 185-194.
- LAUGHTON, Stanley (1996): Graphical Integration Exercises Part Four: Reverse Graphical Integration (D-4603). MIT System Dynamics in Education Project, System Dynamics Group, Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology.  
URL: <http://www.clexchange.org/ftp/documents/system-dynamics/SD1997-01GraphicIntegratio4.pdf>
- LOIBL, Wolfgang / TÖTZER, Tanja (2002): Simulation suburbaner Siedlungsentwicklung im Großraum Wien mittels räumlicher Agenten und Zellulärem Automaten. ARC Seibersdorf research GmbH, Systemforschung/Umweltplanung.  
URL: <http://systemforschung.arcs.ac.at/SU/Publications/pdf/Corp2002.pdf>
- LOIBL, Wolfgang / PETERS-ANDERS, Jan (2003): Transition von suburbanen und ländlichen Landschaften und deren Simulation mit Agenten. In: KOCH, Andreas / MANDL, Peter (Hrsg.) (2003): Multi-Agenten-Systeme in der Geographie. Universität Klagenfurt. Klagenfurter Geographische Schriften, Heft 23.
- LYNEIS, James M. / LYNEIS, Debra A. (2003): Bathtub dynamics at WPI. Proceedings of the 2003 International System Dynamics Conference. System Dynamics Society. Albany, New York.
- MANDL, Peter (2000): Geo-Simulation - ein neues Forschungs- und Arbeitsgebiet für Geographen. Universität Klagenfurt. In: F. Palencsar (Hrsg.): Festschrift zum 60. Geburtstag von Martin SEGER. Klagenfurter Geographische Schriften, Heft 18. S. 137-144.  
URL: <http://ifgi.uni-muenster.de/~mandl/SimGeoSys.htm>
- MANDL, Peter (2003): Multi-Agenten-Simulation und Raum – Spielwiese oder tragfähiger Modellierungsansatz in der Geographie? In: KOCH, Andreas / MANDL, Peter (Hrsg.) (2003): Multi-Agenten-Systeme in der Geographie. Universität Klagenfurt. Klagenfurter Geographische Schriften, Heft 23.
- MARTIN, Leslie A. (1996): Exploring S-Shaped Growth (D-4476). MIT System Dynamics in Education Project, System Dynamics Group, Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology.  
URL: <http://www.clexchange.org/ftp/documents/system-dynamics/SD1996-08GenericStructures5.pdf>
- MARTIN, Leslie A. (1997a): Beginner Modeling Exercises (D-4347-6). MIT System Dynamics in Education Project, System Dynamics Group, Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology.  
URL: <http://www.clexchange.org/ftp/documents/system-dynamics/SD1998-02BegModelExercises!.pdf>
- MARTIN, Leslie A. (1997b): An Introduction to Feedback (D-4691). MIT System Dynamics in Education Project, System Dynamics Group, Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology.  
URL: <http://www.clexchange.org/ftp/documents/system-dynamics/SD1998-02IntroToFeedback.pdf>
- MASS, Nathaniel J. (1980): Stock and flow variables and the dynamics of supply and demand. In: Renders, J. (Hrsg.), Elements of the System Dynamics Method. Waltham, MA: Pegasus Communications.

- MATTHIES, Michael (2002): Einführung in die Systemwissenschaft. Vorlesungsskriptum. Institut für Umweltsystemforschung. Universität Osnabrück.  
URL: [www.usf.uos.de/~vberding/syswi/skript10.pdf](http://www.usf.uos.de/~vberding/syswi/skript10.pdf)
- MEADOWS, Dennis / MEADOWS, Donella / ZAHN, Erich / MILLING, Peter (1972): Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit. Stuttgart: DVA.
- MOXNES, Erling (1998): Overexploitation of renewable resources: The role of misperceptions. *Journal of Economic Behavior & Organization* 37, S. 107-127.
- MOXNES, Erling (2000): Not only the tragedy of the commons: Misperceptions of feedback and policies for sustainable development. *System Dynamics Review* 16, 325-348.
- NINCK, Andreas C. (1994): Wissensbasierter und object-orientierter Ansatz zur Simulation von Mensch-Umwelt-Systemen. Theoretische Begründung und praktische Realisierung am Beispiel einer kenyanischen Region. Geographisches Institut der Universität Bern. *Geographica Bernensia* G43.
- OH, Alice (1995): Graphical Integration Exercises Part One: Exogenous Rates (D-4547). MIT System Dynamics in Education Project, System Dynamics Group, Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology.  
URL: <http://www.clexchange.org/ftp/documents/system-dynamics/SD1996-08GraphicIntegratio1.pdf>
- OSSIMITZ, Günther (1998): The development of Systems Thinking Skills. Using System Dynamics Modelling Tools. In: E. COHORS-FRESENBORG et al. (Hg.), *Selected Papers from the Annual Conference of Didactics of Mathematics 1996*.  
URL: <http://www.fmd.uni-osnabrueck.de/ebooks/gdm/PapersPdf1996/Ossimitz.pdf>
- OSSIMITZ, Günther (2000a): Einführung in die Systemwissenschaften. Vorlesungsskriptum, Universität Graz.  
URL: <http://www.uni-klu.ac.at/~gossimit/lv/usw00/skr/start.htm>
- OSSIMITZ, Günther (2000b): Entwicklung systemischen Denkens. Theoretische Konzepte und empirische Untersuchungen. München, Wien: Profil.
- OSSIMITZ, Günther (2001a): Stock-Flow-Thinking and Reading stock-flow-related Graphs: An Empirical Investigation in Dynamic Thinking Abilities. Manuskript, Universität Klagenfurt.  
URL: <http://www.uni-klu.ac.at/~gossimit/pap/sfthink.pdf>
- OSSIMITZ, Günther (2001b): Unterscheidung von Bestands- und Bewegungsmassen: Ergebnisse einer empirischen Untersuchung. Manuskript, Universität Klagenfurt. In: Gabriele Kaiser (Hg.): *Beiträge zum Mathematikunterricht 2001*, S. 468-472.  
URL: <http://www-sci.uni-klu.ac.at/~gossimit/proj/bf/ludwigsburg.pdf>
- OSSIMITZ, Günther (2001c): Bestandsgrößen und Flussgrößen. Manuskript, Universität Klagenfurt.  
URL: <http://www.uni-klu.ac.at/~gossimit/pap/bestflus.pdf>
- OSSIMITZ, Günther / et al. (2001): Endbericht zum Projekt: Unterscheidung von Bestands- und Flussgrößen. Manuskript, Universität Klagenfurt.  
URL: [http://www.uni-klu.ac.at/~gossimit/proj/bf/bf\\_endber.pdf](http://www.uni-klu.ac.at/~gossimit/proj/bf/bf_endber.pdf)
- O'CONNOR, Joseph / McDERMOTT, Ian (1998): Die Lösung lauert überall. Systemisches Denken verstehen und nutzen. Kirchzarten bei Freiburg: VAK Verlags GmbH.
- PODESSER, Alexander (1996): Stadtklima. Skriptum, ÖH - Karl-Franzens-Universität Graz.
- PORTUGALI, Juval (1999): *Self-Organization and the City*. Heidelberg: Springer Verlag.
- QUADEN, Rob / TICOTSKY, Alan (2003): Bathtub dynamics at Carlisle Public Schools. *Proceedings of the 2003 International System Dynamics Conference*. System Dynamics Society. Albany, New York.
- RICHARDSON, George P. (1986): Problems with causal-loop diagrams. *System Dynamics Review* 2 (no. 2, Summer 1986). System Dynamics Society. S. 158-170.  
URL: <http://www.uni-klu.ac.at/~gossimit/pap/sd/D-3312-2.pdf>
- RICHARDSON, George P. (1991): *Feedback Thought in Social Science and Systems Theory*. Philadelphia: University of Pennsylvania Press.

- RICHARDSON, George P. (1997): Problems in causal loop diagrams revisited, *System Dynamics Review* 13(3), S. 247-252.  
URL: <http://www.clexchange.org/ftp/documents/SYSTEM-DYNAMICS/SD1997-09ProblemsInCLDsRevi.pdf>
- RICHMOND, Barry (1993): Systems thinking: critical thinking skills for the 1990s and beyond. *System Dynamics Review*, 9(2), S. 113-133.  
URL: [http://www.clexchange.org/ftp/documents/whyk12sd/Y\\_1993-05STCriticalThinking.pdf](http://www.clexchange.org/ftp/documents/whyk12sd/Y_1993-05STCriticalThinking.pdf)
- RICHMOND, Barry (1994): System Dynamics/Systems Thinking: Let's just Get On With It (Conference Paper ). Lyme, NH: High Performance Systems, Inc.  
URL: [www.iseesystems.com/\(xk1wac3q0ynxxr55q5l4si55\)/resources/Articles/SDSTletsjustgetonwithit.pdf](http://www.iseesystems.com/(xk1wac3q0ynxxr55q5l4si55)/resources/Articles/SDSTletsjustgetonwithit.pdf)
- SENGE, Peter M. (1990): *The fifth discipline: the art and practice of the learning organization*. New York: Doubleday. dt. (1998): *Die Fünfte Disziplin. Kunst und Praxis der lernenden Organisation*. Stuttgart: Klett-Cotta.
- STATISTIK AUSTRIA (2002): Homepage der STATISTIK AUSTRIA, Bundesanstalt für Statistik, Österreich: Volkszählung 2001.  
URL: <http://www.statistik.at/gz/uebersichtsdaten.shtml>      Zugriff: 01/10/04
- STERMAN, John D. (1989): Misperceptions of feedback in dynamic decisions making. *Organizational Behavior and Human Decision Processes* 43(3), S. 301-335.
- STERMAN, John D. (2000): *Business Dynamics: System Thinking and Modeling for a Complex World*. New York: Irwin/McGraw-Hill.
- STERMAN, John D. (2002a): All models are wrong: reflections on becoming a systems scientist. Jay Wright Forrester Prize Lecture 2002. *System Dynamics Review*, 18 (4), S. 501-531.  
URL: [http://web.mit.edu/jsterman/www/All\\_Models\\_Are\\_Wrong\\_\(SDR\).pdf](http://web.mit.edu/jsterman/www/All_Models_Are_Wrong_(SDR).pdf)
- STERMAN, John D. (2002b): *System Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. MIT Engineering Systems Division. Working Paper Series.  
URL: <http://esd.mit.edu/WPS/ESD%20Internal%20Symposium%20Docs/ESD-WP-2003-01.13-ESD%20Internal%20Symposium.pdf>
- STERMAN, John D. / BOOTH-SWEENEY, Linda (2002): Cloudy Skies: Assessing Public Understanding of Global Warming. *System Dynamics Review* 18 (2).  
URL: [http://web.mit.edu/jsterman/www/cloudy\\_skies1.pdf](http://web.mit.edu/jsterman/www/cloudy_skies1.pdf)
- STRAUCH, Dirk (2003): Ein neuer mikroskopisch-dynamischer Modellansatz für eine integrierte Flächennutzungs- und Verkehrsplanung: das Simulationsmodell ILUMASS. In: KOCH, Andreas / MANDL, Peter (Hrsg.) (2003): *Multi-Agenten-Systeme in der Geographie*. Universität Klagenfurt. Klagenfurter Geographische Schriften, Heft 23.
- TORRENS Paul. M. (2000): How cellular models of urban systems work. (1. Theory).  
URL: [www.casa.ucl.ac.uk/how\\_ca\\_work.pdf](http://www.casa.ucl.ac.uk/how_ca_work.pdf)
- TORRENS Paul. M. (2001): Can geocomputation save urban simulation? Throw some agents into the mixture, simmer, and wait...  
URL: <http://www.casa.ucl.ac.uk/paper32.pdf>
- UNITED NATIONS POPULATION DIVISION (2003): *World population prospects: The 2002 Revision. Highlights*. United Nations.  
URL: <http://www.un.org/esa/population/publications/wpp2002/WPP2002-HIGHLIGHTSrev1.PDF>
- VESTER, Frederic (1985): *Neuland des Denkens. Vom technokratischen zum kybernetischen Zeitalter*. München: DTV.
- VESTER, Frederic (1999): *Unsere Welt – ein vernetztes System*. München: DTV.
- VESTER, Frederic (2000): *Die Kunst, vernetzt zu denken. Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität*. Stuttgart: DVA.
- WAGENFÜHR, Rolf (1974): *Statistik leicht gemacht. Bd. I: Einführung in die deskriptive Statistik*. 7. Aufl. Köln.
- WAGENAAR, Willem A. (1978): Intuitive predictions of growth. In: D. F. BURKHARDT & W. H. ITTELSON (Hrsg.), *Environmental Assessment of Socioeconomic Systems*. New York: Plenum.

WAGENAAR, Willem A. / SAGARIA, Sabato D. (1975): Misperception of Exponential Growth. Perception and Psychophysics 18: S. 416-422.

WAGENAAR, Willem A. / TIMMERS, Han (1979): The pond-and-duckweed problem: three experiments on the misperception of exponential growth. Acta Psychologica, 43, S. 239-251.

WAGNER, Reinhard (2002): Vermittlung systemwissenschaftlicher Grundprinzipien. Diplomarbeit. Universität Graz. Berlin.

URL: [www.fraktalwelt.de/systeme/rw\\_diplomarbeit.pdf](http://www.fraktalwelt.de/systeme/rw_diplomarbeit.pdf)

WATZLAWICK, Paul / BEAVIN, Janet H. / JACKSON, Don D. (1969): Menschliche Kommunikation: Formen, Störungen, Paradoxien . Bern: Hans Huber.

WHELAN, Joseph G. (1996): Beginner Modeling Exercises. Section 2. Mental Simulation of Simple Positive Feedback (D-4487). MIT System Dynamics in Education Project, System Dynamics Group, Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology.

URL: <http://www.clexchange.org/ftp/documents/system-dynamics/SD1996-08BegModelExercises2.pdf>

WHITE, Roger / ENGELEN, Guy / ULJEE, Inge (1997): The use of constraint cellular automata for high resolution modelling of urban land-use dynamics. Environment and Planning B, Planning and Design 24(2), S. 323-343.

ZAHN, Erich / KAPMEIER, Florian (2001): Bathtub Dynamics. Results of a Systems Thinking Inventory at the Universität Stuttgart, Germany. Manuskript, Universität Stuttgart.

URL: [http://www.bwi.uni-stuttgart.de/fileadmin/abt4/download/rest/bathtub\\_dynamics\\_analysis\\_universitaet\\_stuttgart.pdf](http://www.bwi.uni-stuttgart.de/fileadmin/abt4/download/rest/bathtub_dynamics_analysis_universitaet_stuttgart.pdf)

ZARAZA, Ron (2003): Bathtub Dynamics in Portland at SyMFEST. Proceedings of the 2003 International System Dynamics Conference. System Dynamics Society. Albany, New York.

ZHU, Helen (1996): Beginner Modeling Exercises Section 3. Mental Simulation of Simple Negative Feedback (D-4675). MIT System Dynamics in Education Project, System Dynamics Group, Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology.

URL: <http://www.clexchange.org/ftp/documents/system-dynamics/SD1996-08BegModelExercises3.pdf>

ZHU, Helen / RATHA, Manas (1997): Graphical Integration Exercises Part Five: Qualitative Graphical Integration (D-4675). MIT System Dynamics in Education Project, System Dynamics Group, Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology.

URL: <http://www.clexchange.org/ftp/documents/system-dynamics/SD1998-02GraphicIntegratio5.pdf>

# ANHANG

**Anhang 1:** ausgewählte fehlerhafte Lösungsbeispiele von Probanden der Studie Booth-SWEENEY/STERMAN (2000) zur Aufgabenstellung BT/CF, Aufgabe A:

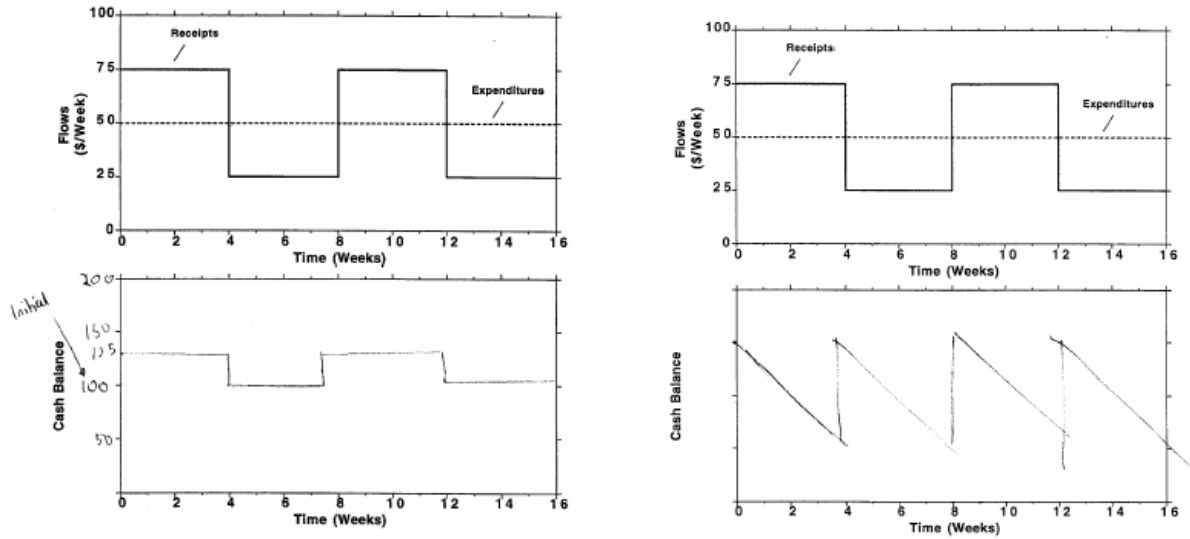


Abb. A1 und A2 (aus BOOTH-SWEENEY/STERMAN 2000)

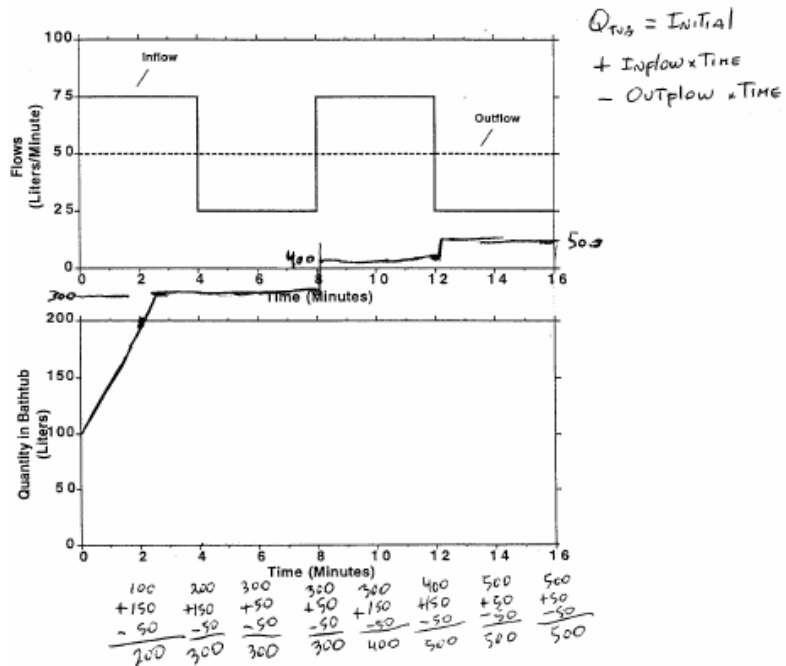


Abb. A3 (aus BOOTH-SWEENEY/STERMAN 2000)

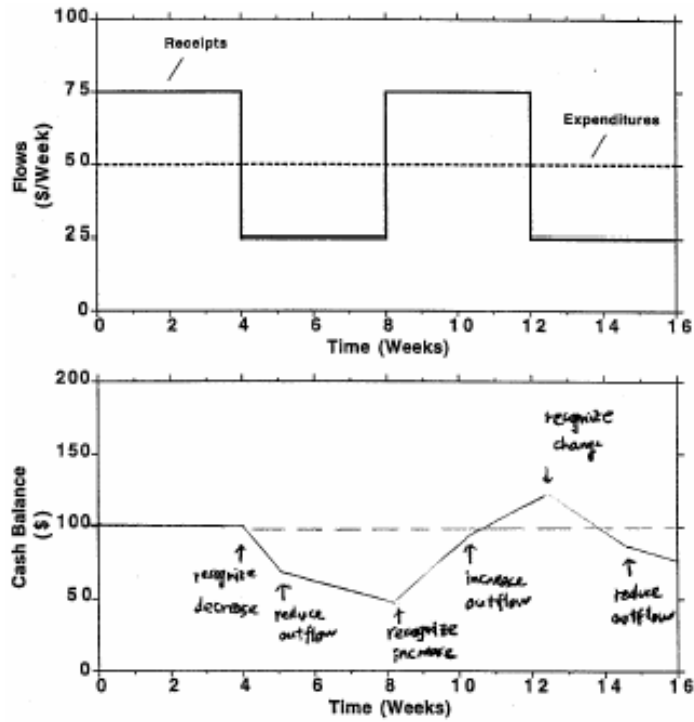


Abb. A4 (aus BOOTH-SWEENEY/STERMAN 2000)

**Anhang 2:** ausgewählte fehlerhafte Lösungsbeispiele von Probanden der Studie Booth-SWEENEY/STERMAN (2000) zur Aufgabenstellung BT/CF, Aufgabe B:

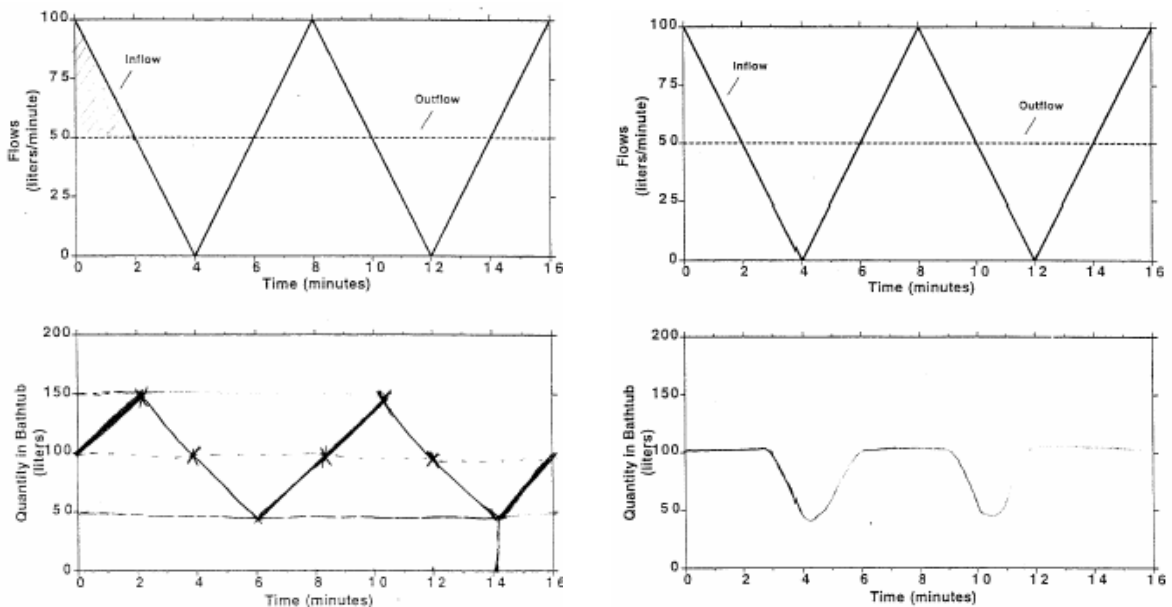


Abb. A5 und A6 (aus BOOTH-SWEENEY/STERMAN 2000)

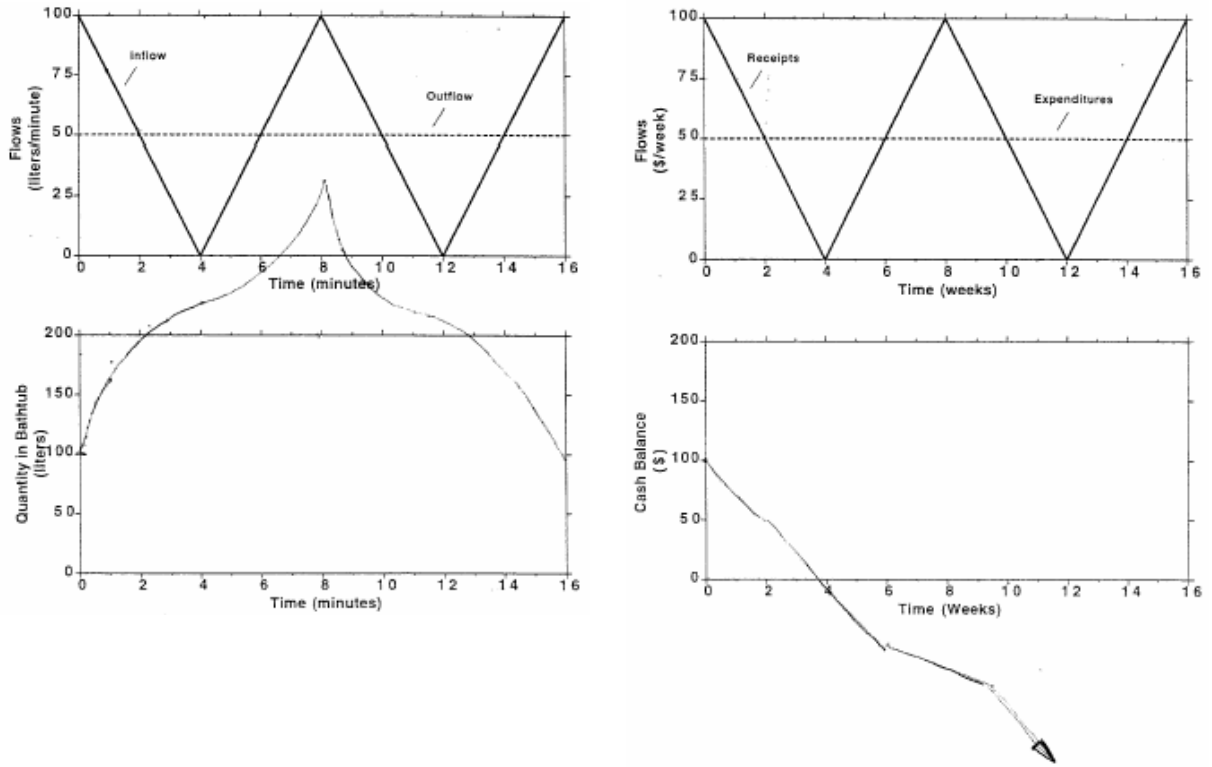


Abb. A7 und A8 (aus BOOTH-SWEENEY/STERMAN 2000)

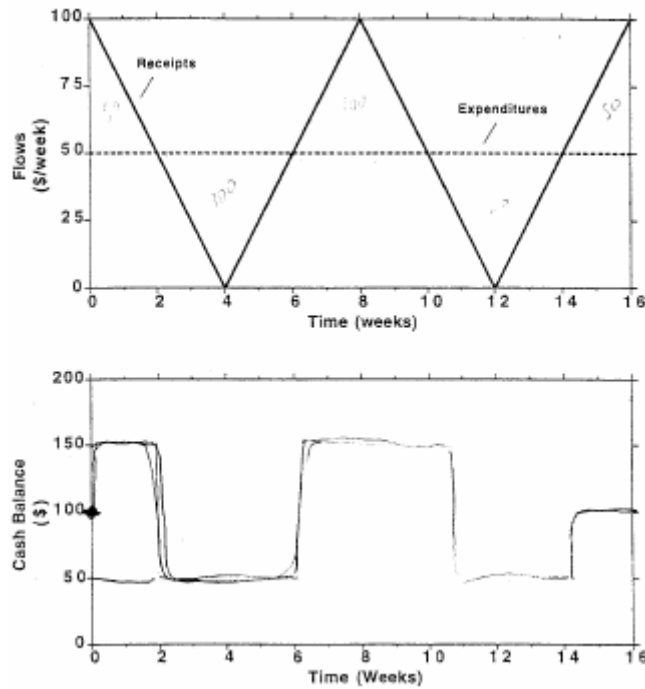


Abb. A9 (aus BOOTH-SWEENEY/STERMAN 2000)

**Anhang 3:** ausgewählte fehlerhafte Lösungsbeispiele von Probanden der Studie Booth-SWEENEY/STERMAN (2000) zur Aufgabenstellung MC:

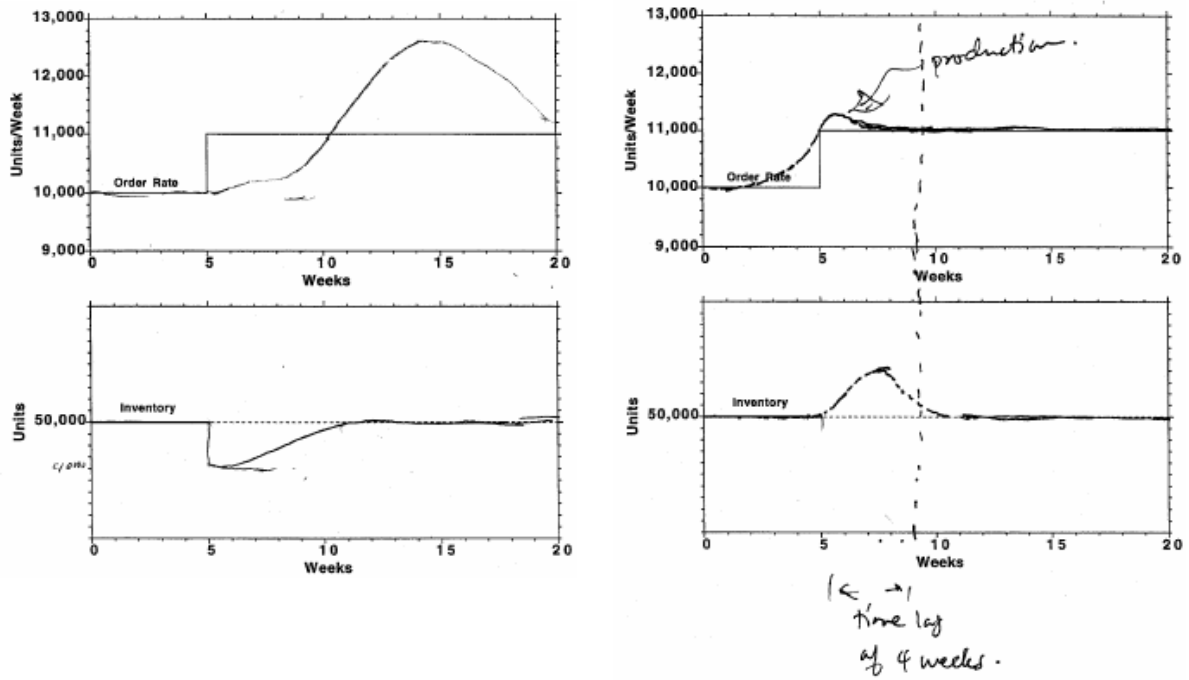


Abb. A10 und A11 (aus BOOTH-SWEENEY/STERMAN 2000)

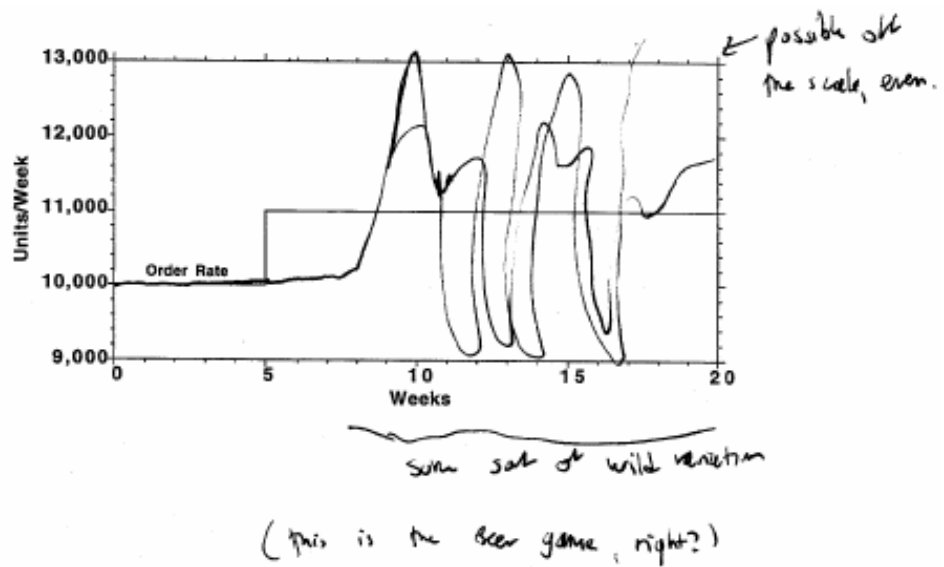


Abb. A12 (aus BOOTH-SWEENEY/STERMAN 2000)