

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Fakultät Wirtschaftswissenschaften

Lehrstuhl für Wirtschaftspolitik und Wirtschaftsforschung

Seminar

Simulation als Verfahren zur Markt- und Risikoanalyse

**Verhaltensanalyse eines autonomen dynamischen Weltmodells
mittels Monte-Carlo-Simulation**

Wintersemester 2005/06

Aleksandar Ivanov (Matr.-Nr. _)

Betreuer: Dipl.-Vw. Martin Bemmam

Abstraktum

In der folgenden Arbeit wird ein einfaches, nach den Prinzipien des System-Dynamics-Ansatzes aufgebautes, Weltmodell von Bossel (2004a) in Excel implementiert und das Verhaltensspektrum in Abhängigkeit von alternativen Spezifikationen des Modells mittels Monte-Carlo-Simulation untersucht. Es sollen keine probabilistische Aussagen getroffen werden, sondern eine hohe Zahl an Modellspezifikationen, also verschiedenen Parameterkonstellationen, getestet werden, um damit eine hohe Robustheit (Validität) von Aussagen über das modellierte Realsystem zu erhalten. Wir halten dabei die funktionale Modellstruktur konstant. Jede Parameterkombination von Umweltparametern stellt eine andere "Welt" dar. Zum Beispiel ist nicht bekannt, ob die Belastungsgrenze der Welt bei 1 oder 2 (dimensionslose Größe) liegt, davon hängt aber ab, welches Niveau die Bevölkerung, Umweltzerstörung und der Konsum maximal erreichen können. Zum Schluss wird untersucht, in welchem Rahmen sich die über die verschiedenen Welten gemittelte Bevölkerung und Konsum bewegen können, um eine nachhaltige und sanfte Entwicklung ohne extreme Bewegungen zu ermöglichen.

Es stellt sich heraus, dass das Modell in fast allen Parameterkonstellationen bestimmte Leitwerte nachhaltiger Entwicklung im Simulationszeitraum 2000 – 2100 nicht erfüllt. Für ein überhöhtes Konsumziel, bricht die Modellwelt sogar zusammen, was sich in katastrophalen Abfällen der Bevölkerung und des Konsums und extremer Umweltbelastung äußert. Die Grenzen die durch Bevölkerung und Konsum erreicht werden können, werden durch die Umweltkapazität bestimmt, die in drei Modellparametern kodiert ist (Schadschwelle d , Erholungsrate e , Belastungsrate p). Für bestimmte nachhaltige Leitwerte zeigt das Modell zwei stabile Verhaltensregime. Regime 1 mit heftigen Bevölkerungsschwankungen und hohem Konsum im Jahr 2100 (vom Typ "Überschießen und Zusammenbruch") und Regime 2 mit sanfter Bevölkerungsentwicklung und geringem Konsum (vom Typ "logistische Annäherung an einen Grenzwert"). Es findet sich keine Modellspezifikation, die gewisse Nachhaltigkeitsleitwerte vollkommen erfüllt.

Die Arbeit ist wie folgt aufgebaut: Kapitel 1 führt in Motivation und Untersuchungsziel ein, Kapitel 2 stellt das dynamische Weltmodell vor und unternimmt erste Untersuchungen daran, Kapitel 3.1 beschreibt die Vorbereitung des Modells für die Monte-Carlo-Analyse, Kapitel 3.2 bzw. 3.3 präsentiert die Untersuchungsstrategie bzw. Simulationsergebnisse und Interpretationen. Kapitel 4 enthält Schlussfolgerungen.

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung und Untersuchungsziel	4
2. Beschreibung des Weltmodells und deterministische Modellläufe	
2.1. Einführung in das Weltmodell “Miniwelt“ (Bossel, 2004a)	5
2.2. Modellimplementierung in <i>Excel</i>	13
2.3. Ergebnisse deterministischer Modellläufe und angezeigte Untersuchungsfragen	15
3. Monte-Carlo-Analyse des Weltmodells mittels Crystal Ball	
3.1. Einführung von Assumption-, Decision- und Forecast-Variablen	18
3.2. Untersuchungsstrategie	19
3.3. Resultate und Interpretation	23
4. Schlussfolgerungen, Handlungsempfehlungen, Problembetrachtung	37
5. Quellenverzeichnis	43

1. Einleitung und Untersuchungsziel

Einleitung

In Anlehnung an die großen Weltmodelle von Meadows et al. (1972, 1992, 2004) wird in dieser Arbeit eine stark vereinfachte Version namens "Miniwelt" von Bossel (2004a) in Excel implementiert und unter Verwendung des Excel-Add-Ins Crystal BallTM im Rahmen von Monte-Carlo-Simulationen (MCS) untersucht. Die oben genannten Weltmodelle gehören zur Klasse der System Dynamics (SD) Modelle (siehe dazu Kap. 2.1 SD Eigenschaften nach Bossel, 2004a) und sind allesamt deterministischer Natur. Sie enthalten einige wenige Zufallsvariablen, die aber nicht die Modellstruktur oder Modellspezifikation, insb. die Parameterwerte, beeinflussen. In Meadows et al. (1972, 1992) und Bossel (2004a) werden einige wenige Parameterkonstellationen ("Welten") eingestellt und simuliert, eine umfassende, systematische Variation findet sich jedoch nicht, da u.a. die frühe System Dynamics Software keine MCS-Fähigkeiten besaß und die Rechnerleistung ausgedehnte MCS-Untersuchungen bei diesen großen Modellen nicht gestattete.

Untersuchungsziel

Das Ziel dieser Arbeit ist ein dichteres Verhaltensspektrum des Weltmodells zu erzeugen, um dadurch robustere Aussagen und eine höhere Konfidenz in die Modellresultate zu erreichen. Methodisch ergeben sich Kongruenzen zu den Methodiken in Brenner & Werker (2004, Kap. 4) und Brenner & Murmann (2003).

Konkret wird der Einfluss von Geburten- und Sterberaten, sowie von drei unbekanntem Umweltparametern (s.u.) auf das Modellverhalten untersucht. Die Analyse wird ergänzt durch eine Variation des Konsumzieles k . Hohe Wert für k werden als Wachstum ohne Beschränkung interpretiert. Zuletzt soll mittels stochastischer Optimierung in OptQuestTM der Versuch unternommen werden, für die Entscheidungsvariablen Konsumziel und Geburtenkontrolle nachhaltige Werte zu ermitteln, um die langfristige Existenz sowie ein Mindestniveau an Wohlfahrt (Konsumniveau, s. u.) im Weltmodell zu sichern und das Aufkommen von katastrophalen Zusammenbrüchen (bspw. Massensterben) zu verhindern. Aus den Ergebnissen werden Politikmaßnahmen unter dem Vorbehalt der Modellgültigkeit abgeleitet.

2. Beschreibung des Weltmodells und deterministische Modellläufe

2.1 Einführung in das Weltmodell “Miniwelt“

Das vorliegende Modell stammt aus Bossel (2004a) und ist eine Vereinfachung von Forrester (Forrester et al., 1974) Weltmodell WORLD3, welches die Grundlage für die in Kap. 1 genannten Weltmodelle darstellt. Wie auch alle bisher zitierten Modelle, handelt sich bei “Miniwelt“ um ein System Dynamics Model. Diese Modelle lassen sich allgemein wie folgt charakterisieren (in Anlehnung an Bossel, 2004a). System Dynamics Modelle sind:

- eine Beschreibung von **aggregiertem Verhalten** (ein hierzu gegensätzlicher Ansatz sind bspw. Multi-Agenten-Systeme),
- **strukturbeschreibend** (nicht verhaltensbeschreibend/-imitierend, wie es bspw. alle statistischen Modelle sind),
- **realparametrisch** (keine Parameteranpassung, wie in statistischen Modellen),
- **deterministisch**, klassische SD-Modelle enthalten i.d.R. keine Zufallsvariablen und die Parameter hängen nicht von der Zeit ab,
- **nichtlinear** (was ihre analytische Behandlung i. d. R. unmöglich macht und sie deshalb numerisch analysiert werden → Computersimulation),
- **zeitkontinuierlich** (nur approximativ wegen des Übergangs zu Differenzgleichungen im Computerprogramm),
- **raumdiskret** (also ohne Raumdimensionen, was durch Einführung von Raumgradienten unter Nutzung partieller Differentialgleichungen überwunden werden kann, für unser einfaches Modell aber nicht angebracht ist),
- **autonom**, m. a. W. zeitinvariant (d.h. unabhängig von der Umwelt, was die Konzentration auf die Eigendynamik des Systems ermöglicht. Führt man die Zeit als weitere Systemvariable ein, kann man auch nicht-autonome Systeme als autonome Systeme formulieren (Bärwolff, 2005), etwa durch zeitveränderliche Parameter.),
- **numerisch** (d.h. nicht-numerische Größen werden nicht beachtet. Dies kann durch Fuzzy-Logik oder Operationalisierung weicher Faktoren überwunden werden, was hier nicht weiter verfolgt werden kann.).

Abgrenzung nichtlinearer dynamischer Modelle & deren Monte-Carlo-Analyse

Unser Modell unterscheidet sich von allen statischen, linearen, statistischen und räumlichen Methoden, sowie von allen Mikroansätzen (Multi-Agenten-Systeme, Teilchenmodelle) und nicht-autonomen Systemen. Obwohl in "Miniwelt" die Zeit keine Systemvariable ist, handelt es sich um ein dynamisches Modell, da das (*strukturkonstante*) System, wie etwa das aus der Physik bekannte Pendel, eine Eigendynamik hat.

Aufgrund der sich ständig wandelnden Umwelt, kann ein System Dynamics Modell mit konstanten Parametern und konstanter Modellstruktur (Autonomie) nur für eine kurze Zeit ab Simulationsbeginn als gültig angesehen werden, denn nicht-dissipative Systeme sind in der Realität selten bzw. nicht zu finden (Leven & Koch, 1984). Dies gilt für alle Modelle, die in einer evolvierenden Umwelt eingebettet sind. Mittels MCS jedoch werden sehr viele Parameterkonstellationen, d.h. Modellspezifikationen, untersucht und die Validität der Resultate kann erhöht werden. Ohne MCS kann man autonome Modelle nur als Annäherung an das Systemverhalten bei nur schwachen Umweltwechselwirkungen oder kurzen Betrachtungszeiträumen nutzen, bzw. für Ceteris-Paribus-Untersuchungen bei denen vielleicht nur die systemimmanente Dynamik herausgestellt werden soll.

Der Unterschied zwischen nichtlinearen dynamischen und statischen bzw. linearen Modellen, wie sie etwa in den Wirtschaftswissenschaften üblich sind, soll hier nochmals betont werden, da sich dadurch in der Monte-Carlo-Analyse andere Untersuchungsschnitte ergeben als in statischen Modellen, die man als zeitlichen „Querschnitt“ durch ein dynamisches System zu einem (Zeit-)Punkt betrachten kann. In statischen Modellen wird durch Einführung einer Zufallsvariable, ein Spektrum an möglichen Resultaten (in Form einer Wahrscheinlichkeitsfunktion/Dichte) für *einen* Zeitpunkt erzeugt. Eine Variation von Anfangsgrößen oder Parametern in dynamischen Modellen dagegen ist eine Untersuchung des Ensembles möglicher Trajektorien der dynamischen Systemstruktur. (Enthält das System auch Zufall, erhält man Ensembles eines stochastischen Prozesses.)

Lineare dynamische Systeme können nur reguläres Verhalten aufweisen (Plaschko & Brod, 1995) und man kann ihre Dynamik sogar durch Faltung der Impulsantwort des linearen Systems mit einem beliebigen Eingangssignal ermitteln (Bronstein, 2005, S. 730 ff.). Nichtlineare dynamische Systeme, wie "Miniwelt" eines ist, sind prinzipiell in der Lage, irreguläres (chaotisches) Verhalten zu zeigen. Die MCS der Parameter wie sie in Kapitel 3 vorgenommen wird, kann im Sinne einer (Pfad-) Sensitivität des Systemverhaltens bezüglich der randomisierten Parameter interpretiert werden (siehe *Crystal Ball* Trend-Charts in Kap. 3.3). Dabei ist es aber wichtig, einen Parameterraum abzugrenzen, in dem das Systemverhalten

“kontinuierlich“ variiert (also kein irreguläres, chaotisches Verhalten vorliegt). Mit anderen Worten: Die randomisierten Parameter sollten nicht in dem Bereich des Parameterraums fallen können, der mehr als einen Fixpunkt hat (s. Plaschko & Brod, 1995), denn sonst sind die Resultate mit Crystal Ball nicht handhabbar. Zur Stabilitätsanalyse s. dieses Kapitel weiter unten.

Modellzweck von „Miniwelt“ (in Anlehnung an Bossel 2004a)

Das Modell soll lediglich qualitative Aussagen (sog. *stylized facts*) über die Dynamik von Bevölkerung, industriellem Output (im Modell gleich dem Konsum) und Umweltbelastung unter Beachtung ihrer wichtigsten Wechselwirkungen liefern. Bei eventuell auftretenden starken Schwankungen im Verlauf sollen im Modell durch exogene Parameter prinzipielle Möglichkeiten der Stabilisierung untersucht werden (dies ist nicht mit Stabilität im Sinne eines Fixpunktes zu verwechseln). Konkrete Handlungsanweisungen werden nicht erwartet. Während der gesamten Untersuchung werden nur dimensionslose Größen verwendet, alle Zustandsgrößen sind am Anfang der Simulationsperiode ($t_0 = \text{Jahr } 2000$) auf Eins normiert. Damit sind alle Ergebnisse als Vielfache der Anfangswerte in t_0 zu interpretieren.

Systemanalyse und Modellentwicklung

In diesem Weltmodell werden nur *Bevölkerung*, *industrieller Output* (als Größe für Konsum und damit letztlich Ressourcenverbrauch) und *Umweltbelastung* als Zustandsgrößen (engl. *stocks, levels*) betrachtet. Der Schritt der Systemanalyse soll hier anhand einer verbalen Auflistung der wichtigsten Zusammenhänge nur angerissen werden, da im Wesentlichen das Modell “Miniwelt“ aus Bossel (2004a) genutzt wird. Die wichtigsten Wirkungsbeziehungen seien:

1. Wachsende Bevölkerung erhöht Umwelt- und Ressourcenbelastung (Konsum).
2. Wachsende Umwelt- und Ressourcenbelastung erhöhen Ressourcenverbrauch (repräsentiert zwei wichtige Effekte: sinkende Grenzerträge in der Produktion und Mehraufwand an industriellem Kapital für notwendigen Umweltschutz).
3. Umgekehrt erhöht wachsender Ressourcenverbrauch auch die Umwelt- und Ressourcenbelastung (2. & 3. sind sich gegenseitig beschleunigende Größen!).
4. Erhöhter Ressourcenverbrauch (Konsum) erhöht die Bevölkerungszahl (verbesserte Versorgung). Aber: in Realität oft gegenteilige Beobachtung – je reicher die Bevölkerung desto geringer die Geburtenraten – kann in diesem einfachen Modell nicht erfasst werden, da Bevölkerung aggregiert betrachtet wird).

5. Erhöhte Umwelt- und Ressourcenbelastung vermindert Bevölkerung (höhere Sterblichkeit)
6. Erhöhte Umwelt- und Ressourcenbelastung führt also insgesamt zu höheren gesellschaftlichen Kosten (siehe 2. und 5.), was über die Zwischengröße „gesellschaftliches Handeln“
- zur Senkung des Bevölkerungswachstums und
 - zur Senkung des Umwelt- und Ressourcenverbrauchs
- führt (entspricht bestimmten Rückkopplungsmechanismus „Regelkreis“ im Modell).

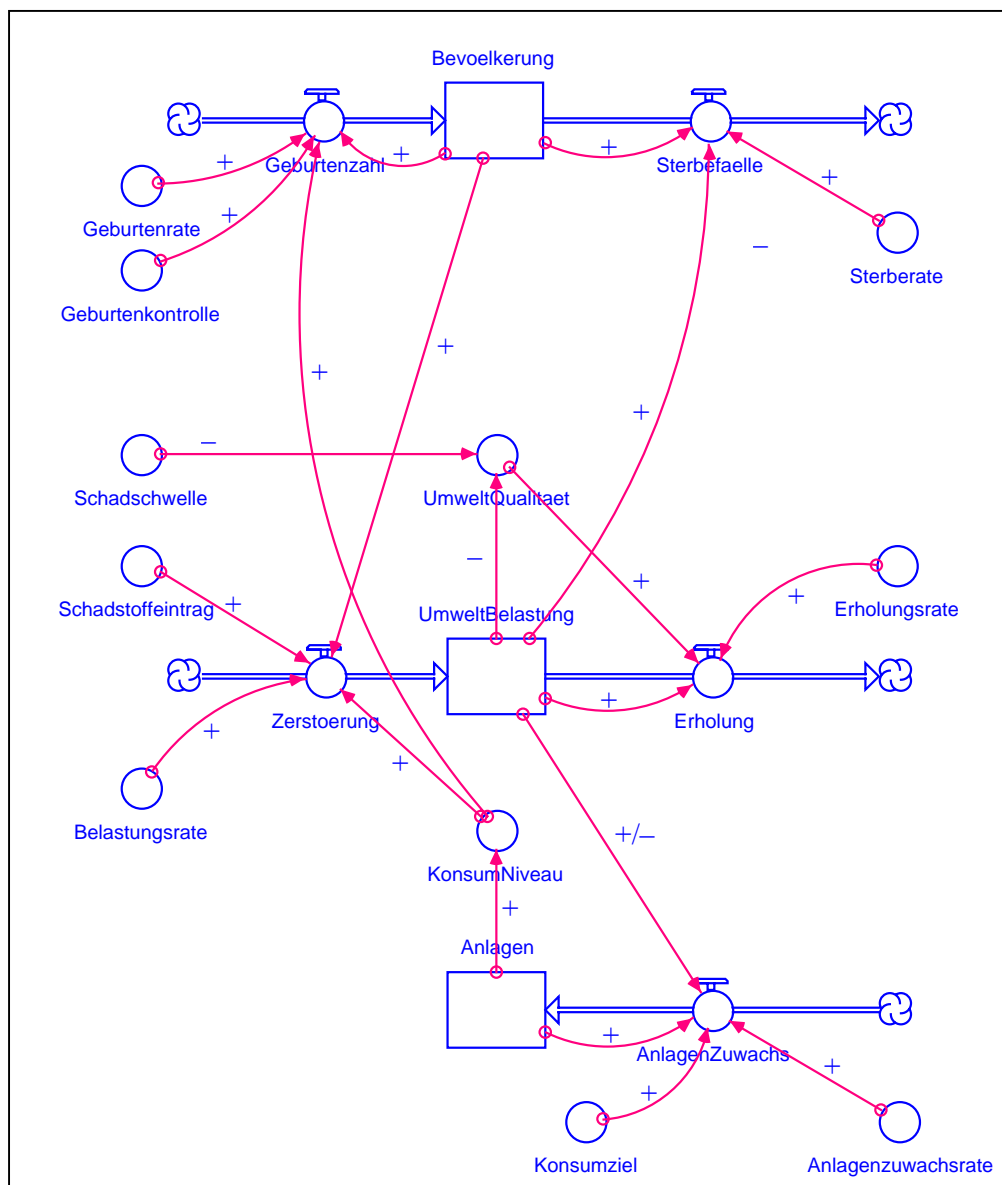


Abbildung 1: : System Dynamics Diagramm des Modells „Miniwelt“ (Quelle: Eigene Darstellung)

Abbildung 1 liefert eine übersichtliche Darstellung aller Zusammenhänge. Das Modell enthält viele komplex gekoppelte (!) Regelkreise und es ist nicht klar, welche Parameter oder Zustandsgrößen den größten Einfluss haben werden. In Kapitel 3.3 werden wir erst mittels MCS erkennen können, dass der wichtigste große Regelkreis (aus Punkten 1 – 6 oben) vom Konsumziel k abhängt und wie folgt lautet: Steigendes Konsumziel ($k+$) erhöht den Konsum ($A+$) und damit den Konsum, was die Bevölkerung ($B+$) und Umweltbelastung ($U+$) erhöht, was die Sterberate erhöht und damit die Bevölkerung senkt ($B-$) - und im Nachgang auch Konsum ($K-$) und die Umweltbelastung ($U-$) sinken.

Weitere Größen und Wechselwirkungen, wie etwa das Bildungsniveau, regionale Differenzierungen oder Detaillierungen vorhandener Zusammenhänge (etwa der Einfluss der durch stärkere Umweltbelastung induzierten Klimaveränderungen auf die Nahrungsmittelproduktion und damit die Bevölkerungsentwicklung) können in unserem engen Rahmen nicht beachtet werden. Wie bereits oben erwähnt, wird mit dimensionslosen relativen Größen gearbeitet, d.h. Änderungsraten sind als Prozentpunkte des Bestandes in t_0 zu interpretieren. Die Simulation beginnt im Jahre 2000 und läuft bis zum Jahre 2100 in Ein-Jahres-Schritten, somit sind alle Raten bzw. Änderungen von Größen, als jährliche Raten bzw. absolute jährliche Änderungen interpretierbar.

Das Modell (kontinuierliches System, ergo Differentialgleichungen) ist aus dem Wissen (Wortmodell) in den Punkten 1. – 6. oben und den folgenden Ausführungen zu konstruieren (ein Punkt über einer Variable ist die Ableitung nach der Zeit):

- Modellparameter und ihre Wirkungen
 - Geburtenrate \tilde{b} , endogener Systemparameter, im Modell aber wegen Komplexitätsreduktion *exogen* modelliert.
 - Sterberate \tilde{s} , endogener Systemparameter (analog Geburtenrate).
 - Geburtenkontrolle \tilde{g} , potentieller Entscheidungsparameter. Je kleiner \tilde{g} desto weniger Geburten, bei $\tilde{g} = 1$ soll Parameter keine Wirkung haben (i.S. eines neutralen algebraischen Elements).
 - Schadschwelle d , unbekannter Umweltparameter. Überschreitet die Umweltbelastung U (s. u.) den Wert von d bleibt die Regeneration der Umwelt konstant, statt mit zunehmender Umweltbelastung auch zuzunehmen.

- Erholungsrate \tilde{e} , unbekannter Umweltparameter. Gibt an, welcher Anteil des *Bestandes* an Umweltbelastung U pro Jahr regeneriert werden kann, solange $U < d$ gilt, steigt jährliche Regeneration \tilde{e} -proportional mit U).
 - Belastungsrate \tilde{p} , unbekannter Umweltparameter. Gibt an, wie stark industrieller Output A (s. u.) die Umwelt pro Jahr belastet, m. a. W. welche Menge zum *Bestand* der Umweltbelastung U durch Abfälle aus industriellem Output A jährlich hinzukommt, hängt vom Parameter \tilde{p} ab.
 - Konsumziel k , Entscheidungsparameter. Gibt den maximalen gewünschten Konsum in Prozentpunkten des heutigen Konsums (gemessen in Anlagen A , s. u.) an. Eins bedeutet, der maximal gewünschte Konsum ist 100% des Konsums im Startzeitpunkt $t_0 = \text{Jahr 2000}$.
 - Zuwachsrate \tilde{a} , Entscheidungsparameter. Gibt den jährlichen Zuwachs in Prozentpunkten des Kapitalstocks (ebenso gemessen in A) an.
- Zustandsgröße Bevölkerungsbestand B

$$\dot{B} = bB \times \tilde{g}Q \times K - \tilde{s} \times B \times U, B_0 = 1 \quad (1.1)$$

Die Bevölkerungszahl hängt von Geburtenrate \tilde{b} , Geburtenkontrolle \tilde{g} , Umweltqualität Q und Konsumniveau K (mit $K = A$, s. u.) positiv und von der Sterberate \tilde{s} sowie Umweltbelastung U negativ ab.

- Zustandsgröße Anlagenbestand A
Kapitalstock; im Modell ein Maß für den industriellen Output und zugleich den Konsum K , es gilt also $K = A$:

$$\dot{A} = \tilde{a} \times A \times U (1 - A \times U / k), A_0 = 1 \quad (1.2)$$

Die Anlagen hängen von der Zuwachsrate des industriellen Kapitalstocks \tilde{a} und der Umweltbelastung U positiv ab. Um das Konsumziel k regulieren zu können, wird bei $A \times U > k$ der Kapitalstock negativ wachsen.

- Zustandsgröße Umweltbelastung U :

$$\dot{U} = \tilde{p} \times K \times B - E, U_0 = 1 \quad (1.3)$$

$$\text{mit } E = \begin{cases} \tilde{e} \times U, & \text{für } U < d \\ \tilde{e} \times d, & \text{sonst} \end{cases}$$

Aus der Größe Anlagen (deren Anzahl und Verbrauch etc.) ließe sich der Ressourcenverbrauch, der letztlich zum Konsum genutzt wird, berechnen. Hier setzt man daher in abkürzender Vereinfachung Anlagen = Konsum und damit $\dot{K} = \dot{A}$. Eine weitere Zwischengröße ist die Umweltqualität, die das Reziproke der Umweltbelastung U multipliziert mit d ist, also $Q = d/U$.

Das gesamte dynamische Modell lautet damit:

$$\begin{aligned} \dot{B} &= bB \times \tilde{g}Q \times K - \tilde{s} \times B \times U, & B_0 &= 1 \\ \dot{A} &= \tilde{a} \times A \times U(1 - A \times U/k), & A_0 &= 1 \\ \dot{U} &= \tilde{p} \times K \times B - E, & U_0 &= 1 \end{aligned} \quad (1.4)$$

Bei (1.4) handelt es sich um ein *dreidimensionales System nichtlinearer gekoppelter Differentialgleichungen 1. Ordnung* (gegenseitige Kopplung der abhängigen Variablen). Ein Beispiel für ein gekoppeltes System verschiedener Größen ist das Dreikörperproblem der Himmelsmechanik, welches, bis auf Spezialfälle, auch heute noch ungelöst ist (Klar, 2005).

Qualitative Analyse des autonomen dynamischen Modells

Eine Angabe von Lösungen für nichtlineare DGL-Systeme ist i. d. R. nicht möglich (Bärwolff, 2005). Bei den Lösungen beschränken wir uns daher auf die numerischen Resultate der folgenden Kapitel. Die Tatsache, dass es sich hier um ein dreidimensionales System handelt, erlaubt es nicht Bifurkationen an nicht-hyperbolischen Fixpunkten (Satz von *Hartman-Grobman*, s. Plaschko & Brod, 1995) ohne größeren Aufwand zu untersuchen. Statt einer analytischen Stabilitätsanalyse um Fixpunkte (= Attraktoren), geben wir daher eine exemplarische, qualitative Aussage über die Größe des Anziehungsbereiches eines Attraktors des Systems. Attraktoren sind Fixpunkte oder Bahnen (Grenzzyklen, Seltsamer Attraktor) in Zustandsräumen des Systems in denen das System verharrt. Je nach Größe und Beschaffenheit des Einzugsbereiches eines Attraktors (eine Art Stabilitätsbegriff für nichtlineare Systeme) können (zufällige) Störungen des Systems einen Phasenübergang, d.h. den Wechsel des Systems in einen anderes Verhaltensregime (Wechsel in den Anziehungsbereich eines anderen Attraktors oder zu einem anderen Flügel desselben Attraktors), herbeiführen. Wir wählen den Standardsatz an Parameterwerten (s. Kap. 2.3) und

simulieren für ein Konsumziel von $k = 5$ damit 250 Zeitschritte ($dt = 1$). Abbildung 2 zeigt die Phasenportraits für verschiedene Anfangswerte der drei Zustandsgrößen (B, U, K).

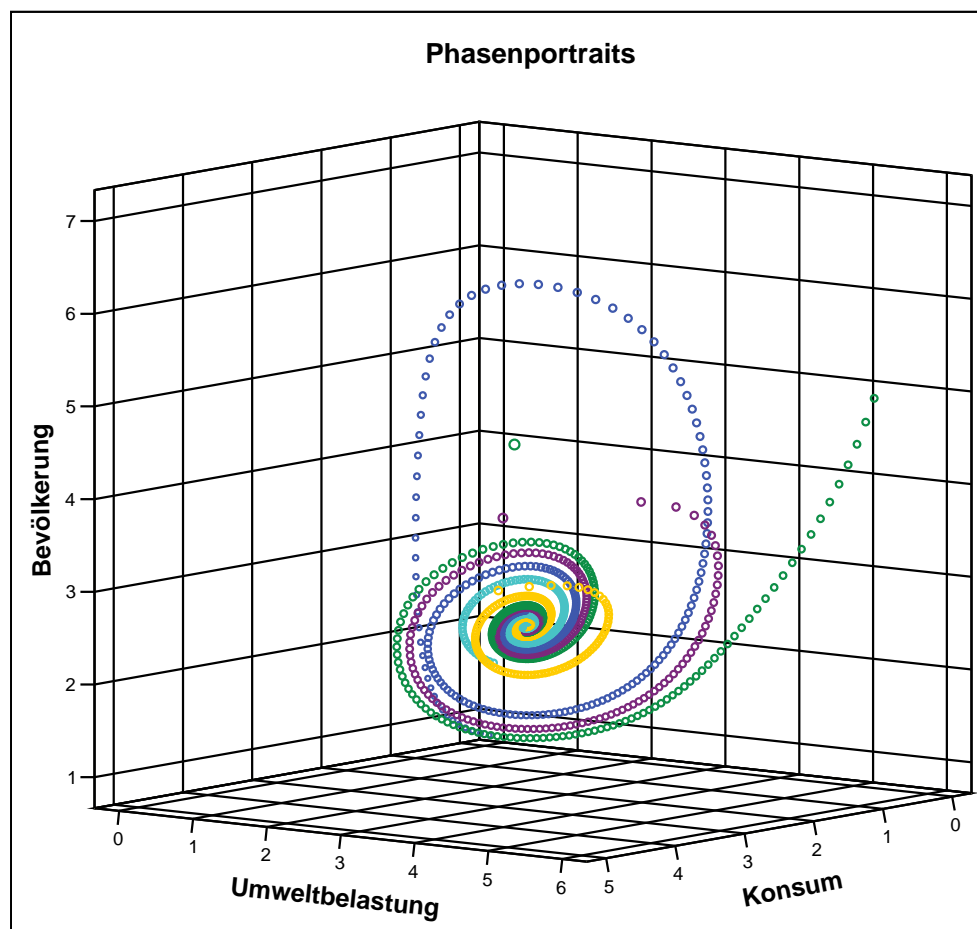


Abbildung 2: Phasenportraits mit einem asymptotisch stabilen Attraktor für einen bestimmten Parametersatz.

Für ein Konsumziel $k = 5$ ergibt sich ein relativ großer Attraktorbereich um einen Fixpunkt bei $(B = 2,6; U = 2,5; K = 2,07)$, der auch stabil zu sein scheint. Man findet auch für $k = 1$ einen stabilen Fixpunkt bei $(B = 7,22; U = 1,44; K = 0,69)$, der aber einen kleineren Attraktorbereich hat. Verändert man Parameterwerte, etwa den Wert des Konsumzieles k von 5 zu 1, ändert sich i. Allg. auch die Art & Lage von Fixpunkten (wie im Beispiel eben gezeigt). Es ist hier nicht bewiesen, dass unser Modell kein chaotisches Verhalten zeigen kann. Gleichung 1.2 bspw. ist eine komplizierte Form der bekannten logistischen Gleichung (s. Herleitung in Canty, 1995, Kap. 1.2 & 1.3), für die bekannt ist, dass sie trotz ihrer deterministischen Funktionsform für bestimmte Werte von \tilde{a} irreguläres, also chaotisches, Verhalten zeigt. Wir begnügen uns mit der Feststellung dass der Standardlauf und ein Standardlauf mit hohem Konsumziel stabile Fixpunkte haben und setzen die Modellbildung und -analyse in *Excel* fort.

2.2 Modellimplementierung in Excel

Excel-Modell

Um ein rechenbares Modell zu gewinnen, gehen wir nun von der Differentialgleichungs- in die Differenzgleichungsdarstellung über, um die Übersichtlichkeit zu erhöhen und die numerische Bearbeitung des Problems mit *Excel* vorzubereiten. Das Modell lautet:

$$\begin{aligned}
 dB_t &= (b \times B_{t-1} \times g \times Q_{t-1} \times A_{t-1}) - (s \times B_{t-1} \times U_{t-1}) \\
 dA_t &= [a \times A_{t-1} \times U_{t-1} (1 - A_{t-1} \times U_{t-1} / k)] \\
 dU_t &= p \times A_{t-1} \times B_{t-1} - E_{t-1} \\
 \text{mit } E_{t-1} &= \begin{cases} e \times U_{t-1}, & \text{für } U_{t-1} < d \\ e \times d, & \text{sonst} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{1.5}$$

Dieses Modell und die Resultate des Kapitels 2.3 finden sich in der Datei “MiniWelt – Original.xls“.

Zur numerischen Berechnung des dynamischen “Miniwelt“-Modells ist eine Integrationsmethode nötig. Die Prüfung auf Steifheit des Differentialgleichungssystems (bzw. Differenzgleichungssystems) erfolgt nicht durch die Eigenwerte der Jacobi-Matrix (Wiedemann 2005), sondern implizit durch einen Probelauf des Modells im Simulationssystem VenSim (Ventana Systems, 2005) mit dem *Runge-Kutte*-Verfahren 4. Ordnung (RK4) und adaptiver Schrittweitensteuerung bei einem absolutem Abbruchfehler von 0,001. Ein fehlerfreier Durchlauf mit diesem Abbruchfehler signalisiert, dass keine steifen DGLs vorliegen (Wiedemann, 2005 und Dateien “Z605 Miniwelt.*“ aus Bossel, 2004b) und herkömmliche Verfahren zur DGL-Integration verwendet werden können. In Excel muss das explizite *Euler-Cauchy*-Verfahren benutzt werden, da eine Implementierung von RK4 praktisch nicht machbar ist. Wir weisen aber darauf hin, dass dies i. d. R. die Validität der Ergebnisse negativ beeinflusst und RK4 zu bevorzugen ist. Für die Bevölkerungsentwicklung sieht das *Euler-Cauchy*-Verfahren wie folgt aus:

$$B_t = B_{t-1} + dB_t$$

Verifizierung und Validierung

Die Verifizierung wird hier einfach anhand des qualitativen Vergleichs der Ergebnisse des Modells mit denen des (auch durch Back-Testing mit Vergangenheitsdaten) gut verifizierten

Weltmodells WORLD3/91 von Meadows et al. (1991) durchgeführt. Aus Abbildung 3 geht hervor, dass „Miniwelt“ zu WORLD3/91 bei ungemindertem Wachstum ein qualitativ identisches Verhalten ($k = 10$ repräsentiert ungemindertem Wachstum) zeigt. Man beachte insbesondere die relative Position der Maxima in beiden Diagrammen (die Größenachsen sind nicht vergleichbar, weil unser Modell mit normierten Größen arbeitet). Damit sei „Miniwelt“ verifiziert.

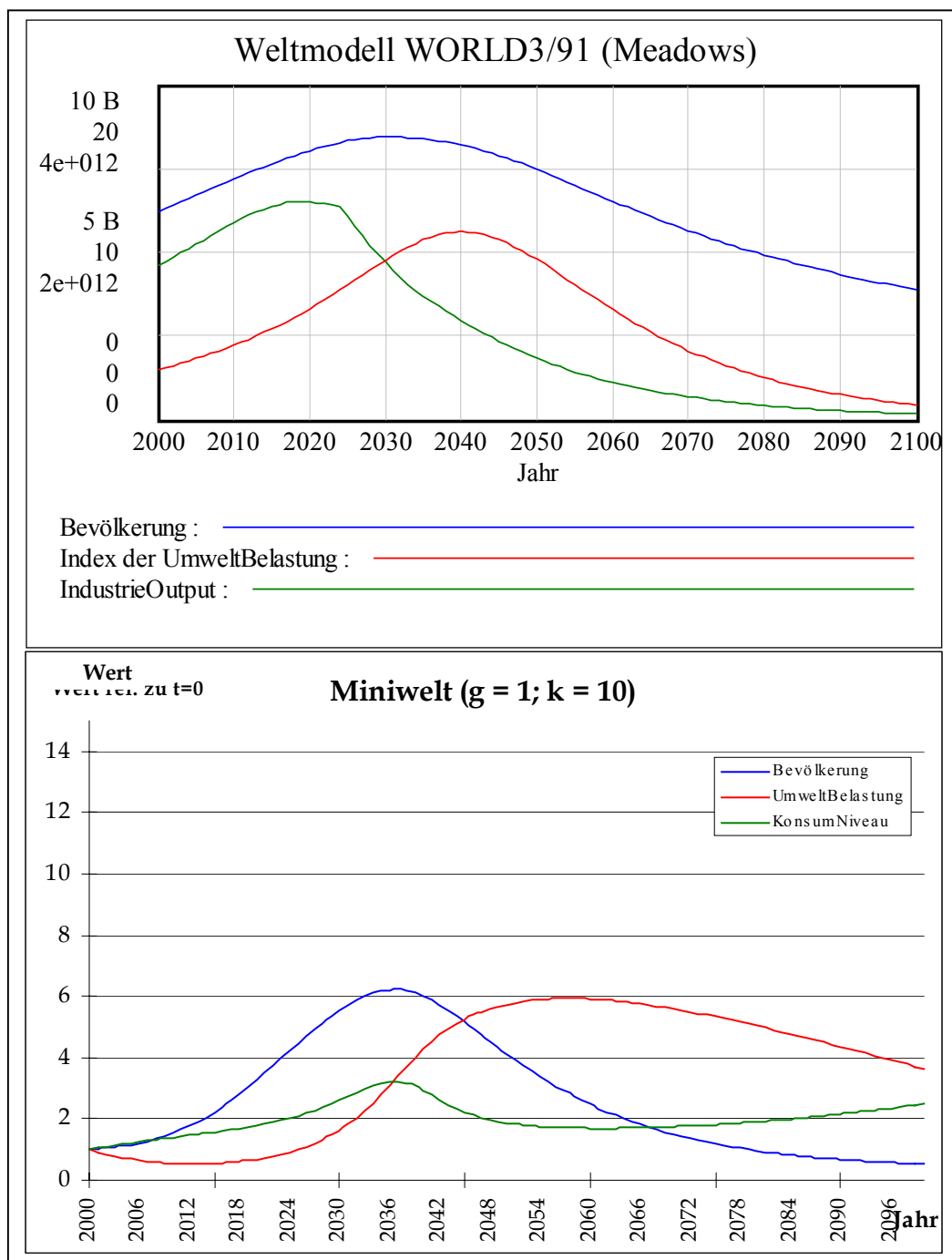


Abbildung 3: Verifizierung durch Vergleich mit verifizierten Weltmodellen (Quellen: "Z612 World3.mdl" aus Bossel (2004b) und Datei "MiniWelt - Original.xls - Verifikation")

Eine Validierung soll in diesem Rahmen nicht erfolgen, da es sich bei den Zuständen nur um relative Größen handelt und eine Validierung auch wenig zur Erfüllbarkeit des Modellzwecks beitragen würde, jedoch umfangreiches Datenmaterial und dessen statistische Bewertung erfordern würde.

2.3 Ergebnisse deterministischer Modellläufe und angezeigte Untersuchungsfragen

Standardlauf als Referenzpunkt

Der Standardlauf des Modells hat folgende Parameterkonstellation und repräsentiert im Gegensatz zum Referenzpunkt bei Meadows et al. (1992) ein Beschränkungsszenario mit $k = 1$, d.h. das *kein* weiteres Konsumwachstum im Vergleich zum Jahre 2000:

$$b = 0,03; s = 0,01; g = 1; d = 1; e = 0,1; p = 0,02; k = 1; a = 0,05; dt = 1, T = 100.$$

Die Anfangswerte der Zustandsvariablen sind bei allen Läufen jeweils auf 1 (Normierung) gesetzt, d.h. die Bevölkerung, die Umweltbelastung und das Konsumniveau in $t_0 = \text{Jahr } 2000$ n. Chr. sind als Basis (100 Prozent) zu interpretieren.

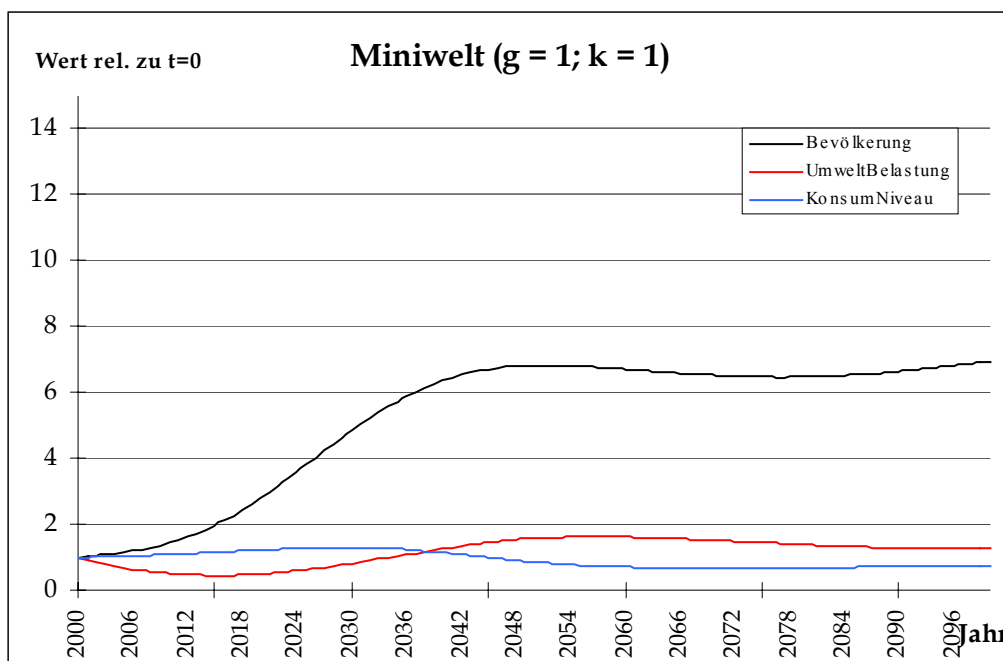


Abbildung 4: Standardlauf von Miniwelt in Excel (Quelle: „MiniWelt - Original.xls“)

Man sieht deutlich, wie sich bei einem Konsumziel von 1 alle Zustandsgrößen mit langen Schwingungen auf einen Fixpunkt-Attraktor bei $B = 7,22$; $U = 1,44$; $K = 0,69$ zu bewegen (s. Kap. 2.1), ein sanftes Erreichen der Grenze ohne Überschießen und Zusammenbruch möglich ist.

Umweltparameter, Entscheidungsvariablen und angezeigte Untersuchungsfragen

Die Phasenportraits aus Kap. 2.2 deuten an, dass Umweltbelastung einen größeren Einfluss auf das Systemverhalten hat als die Bevölkerungsentwicklung. Da aber die wahren **Umweltparameter** Schadschwelle, Erholungsrate und Belastungsrate unbekannt sind, sollen sie in Kap. 3 mittels Monte-Carlo-Simulation systematisch variiert werden.

Weiterhin existieren im Modell drei potentielle **Entscheidungsvariablen**:

- Geburtenkontrolle g ,
- Konsumziel k und
- Zuwachsrate a (der Anlagen, also Wachstumsrate des Kapitalstocks).

Davon sollen nur die ersten zwei näher betrachtet werden, da sie sich bei Modellexperimenten als größte Einflussfaktoren erwiesen haben. Abbildung 5 zeigt weitere Varianten des Standardlaufes mit alternativen Größen für die beiden Entscheidungsparameter k und g . Man erkennt, dass ein überhöhtes Konsumziel den Wert des absoluten Konsumniveaus in höhere Bereiche zwingt, dieses aber mit einem katastrophalen Zusammenbruch der Bevölkerung ab ca. 2035 und starken Schwingungen aller Zustandsgrößen einhergeht. Die Umweltbelastung wird in extreme Höhen gedrängt, was die Bevölkerung zusätzlich senkt. Für niedriges g steigen die Bevölkerung sehr viel langsamer und die anderen zwei Zustandsgrößen sanfter, d.h. mit schwachen Schwingungen, auf ihren Fixpunkt-Wert (der für $k = 1$ bei $U = 1,44$; $K = 0,69$ liegt) zulaufen. Erhöht man bei gesenkter Geburtenkontrolle g (d.h. eine restriktive Geburtenpolitik) das Konsumniveau kommt es wieder zum katastrophalen Zusammenbruch, nur auf etwas geringerem Niveau und mit gewisser Verzögerung (ca. 12 Jahre später, Abb. 5 unten).

Die hohen Werte für das Konsumniveau k bei 10 bzw. 30 können im Modell als Ausdruck eines unbegrenzten Wachstumsstrebens interpretiert werden, wie es derzeit in fast allen Marktwirtschaften als Maxime praktiziert wird. Ein Parameterwert von $k = 1$ stellt dagegen eine (freiwillige oder politisch erzwungene) Begrenzung des Wachstums auf das globale Konsumniveau (nicht pro Kopf) des Modelljahres 2000 dar.

Offensichtlich reagiert das Modell empfindlich auf Änderungen der obigen Entscheidungsparameter. Daher muss das Spektrum des Modellverhaltens und die Sensitivität bzgl. der Umweltparameter systematisch untersucht werden. Weiterhin gilt es Größenordnungen für nachhaltige Werte der obigen Entscheidungsparameter zu ermitteln.

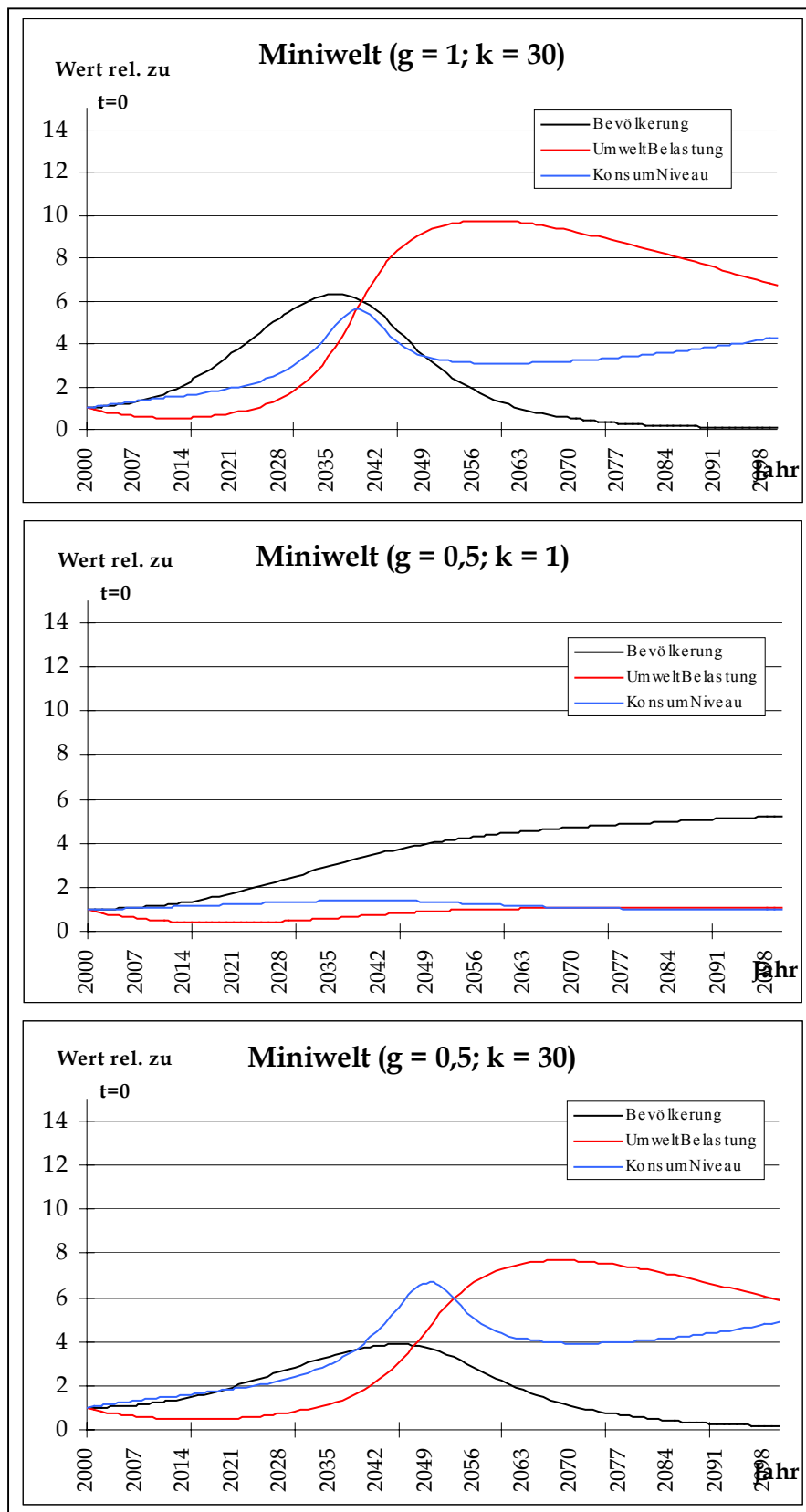


Abbildung 5: Modellverhalten für verschiedene Werte von Geburtenkontrolle und Konsumziel.

3. Monte-Carlo-Analyse des Weltmodells mittels Crystal Ball

3.1 Einführung von Assumption-, Decision- und Forecast-Variablen

Die Monte-Carlo-Studie erfolgt mittels Crystal Ball 7 Professional. Die damit erstellten Excel-Dateien sind i. d. R. nicht zu Crystal Ball 2000 kompatibel. Folgende Änderungen werden im Laufe der Untersuchungen des Kapitels 3.3 je nach Bedarf, d.h. nicht immer alle Änderungen gleichzeitig, am Modell vorgenommen (alle Änderung sichtbar in “MiniWelt Randomized2.xls“):

- Unbekannte Umweltparameter (Assumption):
 - Schadschwelle d :
Die Modellformulierung (siehe Gl. 1.5) impliziert, dass bei $d = 1$ die Regenerationskraft der Umwelt ab einer Umweltbelastung $U > 1$ nicht mehr ausreicht, um das allgemeine Wachstum zu tragen. Ausgehend von $d = 1$ wird die Schadschwelle auf einem diskreten Intervall zwischen der Hälfte und dem Doppelten von Eins mit je 50% Wahrscheinlichkeitsmasse links und rechts von Eins variiert, die Wahrscheinlichkeitsmasse links und rechts von Eins ist je gleichverteilt. Diese Art der Variation nennen wir strukturell-normiert.
 - Erholungsrate e :
Dies ist ein sehr empfindlicher Wert und wir wollen ihn daher wie die Schadschwelle mit diskreter Halbierung und Verdoppelung variieren.
 - Belastungsrate p :
Auch hier wir mit diskreter Halbierung und Verdoppelung gearbeitet, um die Auswirkungen alternativer Umweltparameter zu betrachten.
- Entscheidungsparameter (Decision):
Geburtenkontrolle g und Konsumziel k :
Im Sinne der 1-Kind-Politik der chinesischen Regierung kann g als Entscheidungsparameter betrachtet werden. Insbesondere in Notsituationen könnte die Durchsetzung einer Geburtenkontrolle, falls überlebensnotwendig für die Menschheit, möglich sein. Analog dazu betrachten wir auch das Konsumziel (den erwünschten maximalen Konsum relativ zum Konsum in

2000) als Entscheidungsparameter. Die Optimierung über diese Parameter wird in Kap. 3.3 näher diskutiert.

- Kontrollparameter (Assumption):

Geburten- und Sterberate b und s :

Diese Parameter sind, wie bereits erklärt, endogene Systemparameter aber im vereinfachten Weltmodell „Miniwelt“ wurden sie lediglich als exogene Konstante definiert. Eine Endogenisierung erfolgt hier nicht, aber es werden beide Parameter gemäß einer je aus Vergangenheits- und Prognosedaten der Vereinten Nationen (2003) empirisch geschätzten Verteilung variiert, um die mögliche Bandbreite an Entwicklungspfaden zu erkennen. Weitere Untersuchungen dieser Parameter sind mit der vorliegenden Modellstruktur nicht möglich, sie werden aber zur Erhöhung der Validität der Simulationsergebnisse in allen weiteren Experimenten immer mitvariiert.

- Forecast-Variablen:

Es werden die Werte für Bevölkerung, Umweltbelastung und Konsum (entspricht genau dem Wert von Anlagen) in 10-Jahres-Intervallen als Forecasts überwacht (= 3 x 10 Forecasts).

Für die Optimierung (siehe Kap. 3.2 & 3.3) müssen zum Schluss auch: Geburten, Sterbefälle, Erholung, Zerstörung, Umweltqualität, sowie die Quotienten Erholung/Zerstörung, Sterbefälle/Bevölkerung und Geburten/Sterbefälle überwacht werden (diese Änderungen finden sich in „MiniWelt Randomized2-Punkt5.xls“).

3.2 Untersuchungsstrategie

Durch die Beschränkungen auf zweidimensionale *Excel*-Arbeitsblätter können wir, wie bereits in Kapitel 2.1 angedeutet, für dynamische Systeme nur rudimentäre Monte-Carlo-Simulationen durchführen. Die meisten Crystal Ball Tools erlauben auch nur Analysen für *eine* Forecast-Variablen (Sensitivity, Tornado Chart, 2D Analysis, Scenario Analysis, Decision Table). Lediglich die Werkzeuge Trend Chart (in unserem Zusammenhang als Repräsentation eines Ensembles einer Simulation) und Overlay Chart können mehrere Forecast-Variablen (in einem Diagramm) auswerten.

Leitwerte

Für die weiter unten vorzunehmende Optimierung (s. *Untersuchungsstrategie*, Punkt 5) müssen hier noch einige theoretische Vorbemerkungen gemacht werden. Für eine Optimierung sind Zielvariablen, Entscheidungsvariablen, Orientatoren und Leitwerte von Orientatoren, die als Nebenbedingung der Optimierung fungieren, notwendig. Näheres zur Orientierungstheorie erfährt man in Bossel (2004a, S. 235 ff.). Um die Existenz und Entfaltungsfähigkeit eines Systems zu sichern, muss ein Minimum für jeden Leitwert erfüllt sein, was sich in Optimierungsaufgaben als Nebenbedingung manifestiert. Die Details zu unserem konkreten Optimierungsproblem folgen weiter unten (s. *Untersuchungsstrategie*, Punkt 5).

Laufzeiteinstellungen

Alle Simulationen werden gemäß den Empfehlungen von DecisioneeringTM (2005) mit einem Seed von 999 gestartet. Sofern nicht anders notiert, werden je 10.000 Läufe mit ExtremeSpeedTM und "Monte-Carlo" als Samplingmethode durchgeführt.

Untersuchungsstrategie

Das Vorgehen bei der Verhaltensanalyse ist weitgehend konform mit der Methode der „history-friendly“ Simulation (empirische Kalibrierung der Parameterwerte des Standardlaufes anhand historischer Daten) die Brenner & Murmann (2003, Kap. 2.1) vorstellen und die auch von führenden Simulationsexperten der Sozialwissenschaften wie etwa Malerba, Nelson und Winter (siehe Malerba et al., 1999 und Malerba und Orsenigo, 2002) genutzt wird. Wir haben den zusätzlich Vorteil mit MCS sehr viele Simulation durchführen zu können, weil das Modell wenig rechenintensiv ist. Komplexe Modelle wie sie Malerba et al. und Malerba und Orsenigo konstruieren, sind der MCS mit heutiger Rechenleistung leider noch nicht zugänglich, da dabei bereits ein Modelldurchlauf mehrere Stunden dauert.

Es werden immer mehrere Parameter simultan variiert und die Untersuchungen haben einen qualitativen Charakter; es soll nicht von Wahrscheinlichkeiten gesprochen werden, sondern eher von der relativen Anzahl verschiedener "Welten" die ein *bestimmtes Ergebnis* liefern oder nicht liefern. Der Einfluss einzelner Parameter wird durch Ceteris-Paribus-Simulationen, wie sie den Spider Charts zu Grunde liegen, offengelegt. Das Vorgehen gliedert sich in die folgenden fünf Punkte:

Spektrum des Modellverhaltens - Sensitivitäten & Wirkungsrichtungen

Untersucht wird das Spektrum des Modellverhaltens in Abhängigkeit der Umweltparameter, sowie unter Kontrolle für die Unsicherheit über Geburten- und Sterberaten. Daraufhin wird das Konsumziel als zusätzlicher Faktor variiert.

1. Für das Szenario Standardlauf (s. Kap. 2.3) alle drei Umweltparameter als Zufallsvariablen. Wir extrahieren je ein Trend Chart (entspricht Ensemble der Trajektorien einer Zustandsgröße) und Varianzzerlegung für jede der drei Zustandsgrößen.
2. Wie 1. jedoch zusätzlich mit Variation des Konsumzieles als Assumption mit $k \sim Uni [0,5; 5]$. Hier wird die Bandbreite des Modellverhalten bei Unsicherheit über die Umweltparameter und alternativen Entscheidungen über das Konsumziel sichtbar.

Sensitivitäten & Wirkungsrichtungen im Detail

3. Wie 1. nur zusätzlich mit Variation der Geburten und Sterberaten
 - 3.1. Zunächst nur d, e, p mit s, b - Extraktion dreier Trend Charts und dreier Spider Charts für die Zustandsgrößen im Jahre 2100. Dies gewährt zusätzlich zur Unsicherheit über die Umweltparameter auch Einblick in die Breite des Verhaltens bei alternativer Bevölkerungsentwicklung, also bei alternativen Geburten- und Sterberaten. Ganz besonders wichtig sind die Spider Charts, die nichtlineare kausale Zusammenhänge besser erfassen können als lineare Korrelationskoeffizienten, da sie spezielle Simulationen durchführen wobei alle bis auf den gerade analysierten Parameter konstant gehalten werden (s. Brenner & Murmann, 2003, S. 6). Mit den Spider Charts kommen wir der von Brenner und Murmann (2003) vorgeschlagen Methode der „history-friendly“ Simulation mit Crystal Balls Möglichkeiten am nächsten.
 - 3.2. Wie in 3.1 werden hier nun zusätzlich die Auswirkungen von oben beschriebener Variation des Entscheidungsparameters Konsumziel betrachtet.
4. Zweidimensionale Simulation (2D Analyse) hilft bei der Trennung der Einflüsse von Unsicherheit über die Umweltparameter und Variabilität bei der Bevölkerungsentwicklung (b und s). Für alternative Welten, also Werte von d, e und p wird die Auswirkung von Variabilität in der Bevölkerungsentwicklung auf die drei Zustandsgrößen deutlich.
 - 4.1. 2D Analyse mit Unsicherheit in d, e, p (je 50 bzw. 10 Zufallsziehungen von 3-Tupeln) und Variabilität in b und s (je 2000 bzw. 5000 Simulationsläufe).
 - 4.2. Wie 4.1. aber zusätzlich mit Variabilität des Entscheidungsparameters Konsumziel (wieder mit $k \sim Uni [0,5; 5]$).

Optimierung

5. Der Höhepunkt der Analyse ist die Eingriffsplanung um einen Optimum für das Konsumzieles unter Nebenbedingungen zu bestimmen. Dabei wollen wir OptQuest die unten aufgeführten Nebenbedingungen als *Requirements* für jene auch als Forecasts definierten Variablen übergeben und es nach einem optimalen Wert für die Entscheidungsvariablen Konsumziel und die Geburtenkontrolle suchen lassen. Hierbei handelt es sich um ein Problem der nichtlinearen stochastischen Optimierung unter Nebenbedingungen, was sich von den herkömmlichen Optimierungsansätzen in der Makroökonomie, wie etwa in Barro und Sala-I-Martin (1999), Dixit (1990) oder Romer (2001), fundamental unterscheidet. Die einzig praktikable Methode ist hierbei einen möglichst leistungsstarken numerischen Suchalgorithmus, wie er beispielsweise in OptQuest (Crystal Ball 7 Premium) zum Einsatz kommt, zu nutzen, um möglichst schnell eine Vielzahl von Kombinationen für die Entscheidungsvariablen nach denen optimiert wird, durchzutesten. Die Leitwerte sollen lediglich im Mittel (Mean-Requirement) erfüllt sein und sind aus Bossel (2004a) entnommen:

Existenz	Bevölkerung $> 0,1$ für alle $t \geq 2010$
Handlungsfreiheit	Konsum $> 0,8$ für alle $t \geq 2010$
	Sterbefälle/Bevölkerung $< 0,02$ für alle $t \geq 2010$
Wandlungsfähigkeit (Adaptivität)	Umweltqualität $> 0,5$ für alle $t \geq 2010$
Sicherheit & Wirksamkeit	Erholung/Zerstörung $> 0,95$ für alle $t \geq 2010$
	$0,9 < \text{Geburten/Sterbefälle} < 1,1$ für alle $t \geq 2010$

Die (simplen) Definitionen von Erholung, Zerstörung, Geburten und Sterbefälle finden sich in der Datei "MiniWelt Randomized2-Punkt5.xls". Diejenigen Leitwerte, welche die Bevölkerungsentwicklung betreffen, werden fast immer verletzt sein, den sie implizieren bspw. eine maximale Geburtenrate von 2,2% p.a. und die hohe Nettodifferenz zwischen Geburten- und Sterberaten im Modell verletzt fast immer die Bedingung $0,9 < \text{Geburten/Sterbefälle} < 1,1$ für alle $t \geq 2010$. Die Bedingung Erholung/Zerstörung $> 0,95$ für alle $t \geq 2010$ beschränkt Konsum- und Bevölkerungswachstumsraten strenger als Umweltqualität $> 0,5$ für alle $t \geq 2010$, so dass auch diese Bedingung.

Es bleibt festzuhalten, dass die angegebenen nachhaltigen Leitwerte in den meisten Modellspezifikationen, die aus Daten der realen Welt gewonnen sind (s. Bossel, 2004a, Meadows et al., 1972, 1992, 2004), verletzt sein werden.

3.3 Resultate und Interpretation

Es werden nun die wichtigsten Resultate vorgestellt. Die komplette Serie an Modellläufen befindet sich in der Datei "Crystal Ball Seminararbeit - Alex Ivanov - alle Simulationsgrafiken.doc". Da der Modellzweck lediglich auf die Gewinnung qualitativer Aussagen (*stylized facts*) zielt (s. Kap 2.1), ist es nicht sinnvoll Resultate anhand einzelner Zahlenwerte zu diskutieren. Dementsprechend wird nur qualitativ argumentiert. Alle Aussagen beziehen sich auf das Modell und nicht die reale Welt. Probabilistische Aussagen können kaum oder nur selten gemacht werden. Begriffe wie Varianz und Verteilung müssen hier eher als Maße zur Charakterisierung der Ensembles verstanden werden, die Grenze zur stochastischen Interpretation ist aber fließend und abhängig von der Art der Verteilung der Zufallsgrößen, also ob sie bspw. strukturell-normiert verteilt sind, wie die drei Umweltparameter, oder ob sie wirklichen Zufall symbolisieren sollen, was in dieser Untersuchung eher eine Frage des Standpunktes als der Ratio ist, denn wenn bspw. die Umweltparameter variiert werden, so untersuchen wir damit viele verschiedene mögliche Welten und nicht Zufall in einer Welt. Es gibt auch in der Realität nicht die Möglichkeit mehr als einmal eine Welt zufällig zu "ziehen".

Resultate – Untersuchungspunkt 1: Variation der drei Umweltparameter d, e, p

Die strukturell-normierte Variation der drei Umweltparameter liefert bereits einige interessante Resultate (s. Abb. 6 & 7). Die **Bevölkerungsentwicklung** ist weit aufgefächert und erreicht eine extrem *hohe* "Varianz". In ca. der Hälfte aller Fälle überschreitet die Bevölkerung in 2100 den Gleichgewichtswert von ca. 7,2 des Standardlaufes. Bei günstigen Umweltparameterwerten, kann die Bevölkerung ein *Vielfaches* dieses Wertes erreichen. Die Verteilung der Trajektorien ist aber eindeutig *linkssteil* (lang und dünn besetzte Dichte in Richtung steigender Bevölkerung, s. Abb. 6) und im Intervall von 1,5 bis 7 finden sich ca. 50% der Fälle für das Jahr 2100. Dieses Verhalten der *Bevölkerungs-Trajektorien* wird uns in allen weiteren Experimenten begegnen und es ist charakteristisch für die Bevölkerungsentwicklung, denn die beiden anderen Zustandsgrößen haben relativ enge und symmetrisch verteilte Trajektorien (relativ und auch absolut). Der Grund hierfür wird aus Abbildung 7 ersichtlich. Die drei Umweltparameter haben einen gegensätzlichen Einfluss auf die Bevölkerung, was eine *Varianzerhöhung* verursacht, wenn alle drei Umweltparameter simultan variieren. Die Schiefe entsteht, da die Summe der Varianzen nicht Null ergibt - zwei

der Umweltparameter haben einen positiven Varianzbeitrag und die Verteilung der Bevölkerungs-Trajektorien ist dadurch linkssteil.

Wir kommen gleich auf die Dynamik zwischen der Bevölkerung und den anderen Zustandgrößen zu sprechen. Zuvor gilt es jedoch darauf hinzuweisen, dass die

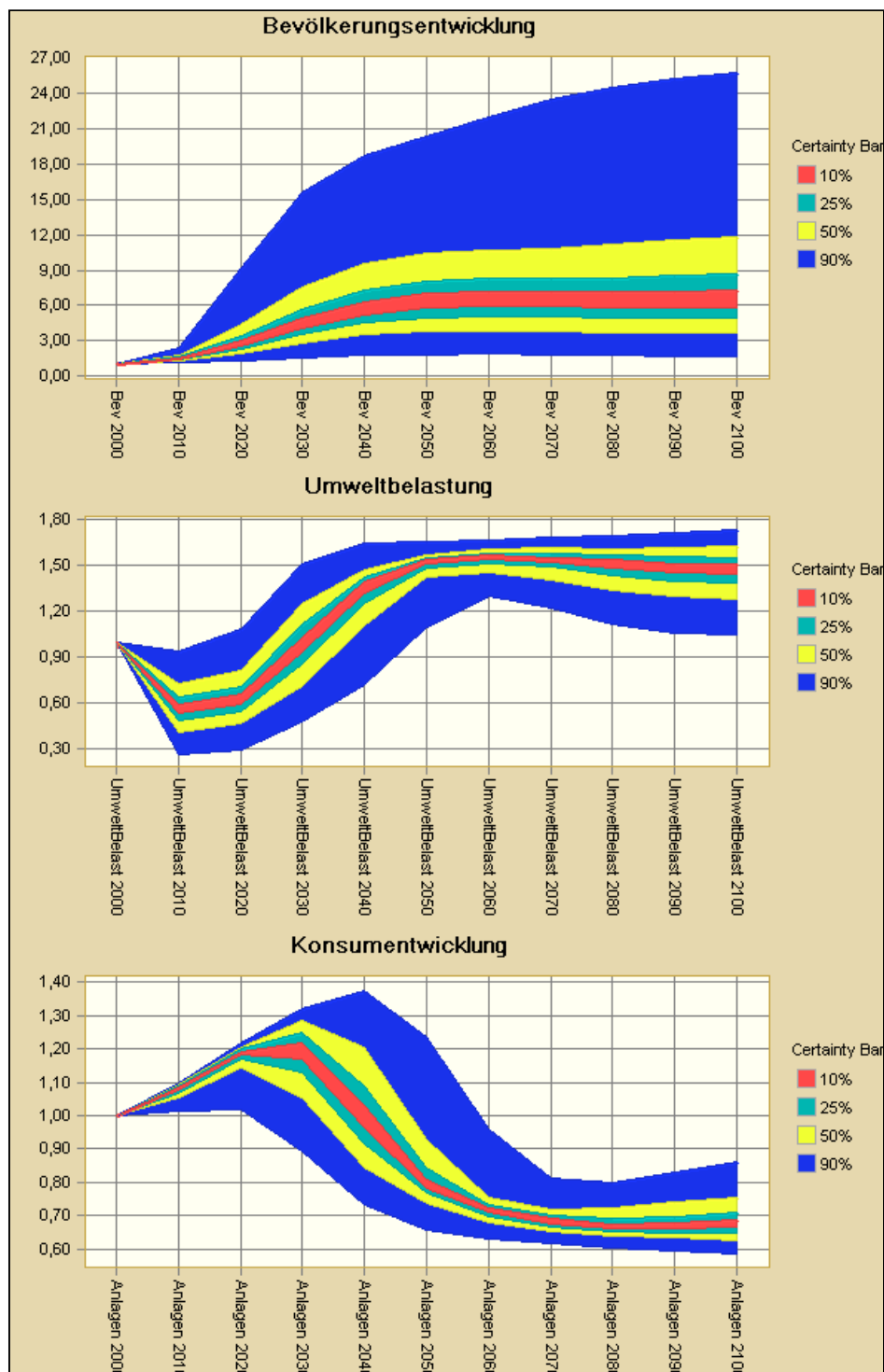


Abbildung 6: Modellverhalten (Ensembles) für Untersuchungspunkt 1.

Varianzzerlegung von Crystal Ball einige Schwächen hat, die die Interpretation erschweren (s. DecisioneeringTM, 2005, S. 166 ff.). Der Grund, warum keine Rang-Korrelation, sondern Varianzzerlegung zum Einsatz kommt, ist, dass Rang-Korrelationen stärker auf eine (lineare) funktionale Abhängigkeit zielen, was in unserem Modell ohne geschlossene analytische Lösung, nicht interpretierbar ist. Zur Varianzzerlegung ist darüber hinaus Folgendes wichtig. Die Varianz, die aus einer "Zufallsgröße" entsteht, setzt sich aus der *Zufälligkeit* und der *Modellsensitivität* der Größe zusammen. Die *Zufälligkeit* unserer drei Umweltparameter ist sehr strukturiert, durch die oben beschriebene diskrete Verdoppelung und Halbierung der Standard-Werte von d , e , p . Unser Model ist sehr kompliziert, so dass man nur hoffen kann, dass die rein multiplikative Verknüpfung der Umweltparameter im Modell, die *Modellsensitivität* nahezu ausschaltet, wenn die normierte Struktur von gleichwahrscheinlicher Verdopplung bzw. Halbierung für jeden Umweltparameter genutzt wird. Weiterhin erschwerend wirkt die Tatsache, dass die Varianzzerlegung nur approximativ ist, da sie auf den normierten quadrierten Rank-Korrelationskoeffizienten basiert und diese zusätzlich empfindlich auf diskrete Zufallsvariablen, wie unsere drei Umweltparameter, reagiert. Zudem haben wir bei d nicht-monotone Beziehungen zwischen dem Parameterraum und den Zustandsgrößen (s. Spider Charts in Abb. 10), was zu fehlerhaften Rang-Korrelation und damit Varianzen führt. In den meisten Fällen sind diese Anomalien aber nur schwach ausgeprägt, so dass wir sie in diesen Fällen vernachlässigen können.

Betrachten wir nun das Ensemble der Umweltbelastung und des Konsumniveaus fällt auf, dass diese zwei Größen, nicht nur absolut sondern auch relativ wesentlich weniger variieren als die Bevölkerung und beide symmetrische Trajektorien haben. Die Erklärung dafür findet sich in Abbildung 7, in der strukturellen Normierung der Umweltparameterverteilungen und im Gleichungssystem 1.5. Entscheidend ist das Verhalten der Schadschwelle d (Abb. 7). Erstens, wird deutlich, dass die **Umweltbelastung** U eng um die Trajektorie des *Standardlaufes* (Abb. 4) streut, weil eine erhöhte Schadschwelle, den Grenzwert der e -proportionalen Regeneration der Umwelt nach oben verschiebt, also die Umwelt sich bei erhöhter Umweltbelastung trotzdem e -proportional erholt, und bei geringer Schadschwelle die Umweltverschmutzung eher diese Schwelle überschreitet und damit zunächst auf einem hohen Niveau verbleibt, anstatt abgebaut zu werden, was in den Gleichungen für \dot{B} und \dot{K} zu negativen Rückkopplungen führt, damit aber U wieder gesenkt und das System somit eingefangen wird. Ein Paradebeispiel für einen komplexen Regelkreis. Die positive direkte Abhängigkeit von d dominiert das Verhalten von U .

Diese Wirkungsbeziehungen kann man auch anschaulich aus Abbildung 1 oder dem Wortmodell des Kapitels 2.1 entnehmen. Die Erkenntnis jedoch, dass die Umweltbelastung (bei konstantem und geringem Konsumziel k) hauptsächlich von d abhängt, ist nicht so leicht aus den komplexen Modellgleichungen zu entnehmen und hier zeigt die Monte-Carlo-Analyse ihre Stärke. Im Untersuchungspunkt 2 werden wir sehen, wie ein erhöhtes Konsumziel die Funktion des Regelkreises stark einschränkt und erhöhte Umweltbelastungen nicht mehr sanft eingefangen werden, sondern sich zunächst aufbauen, dann aber zu einem steilen Abschwung in der Bevölkerungszahl führen – das System wird bei erhöhtem Konsumziel destabilisiert.

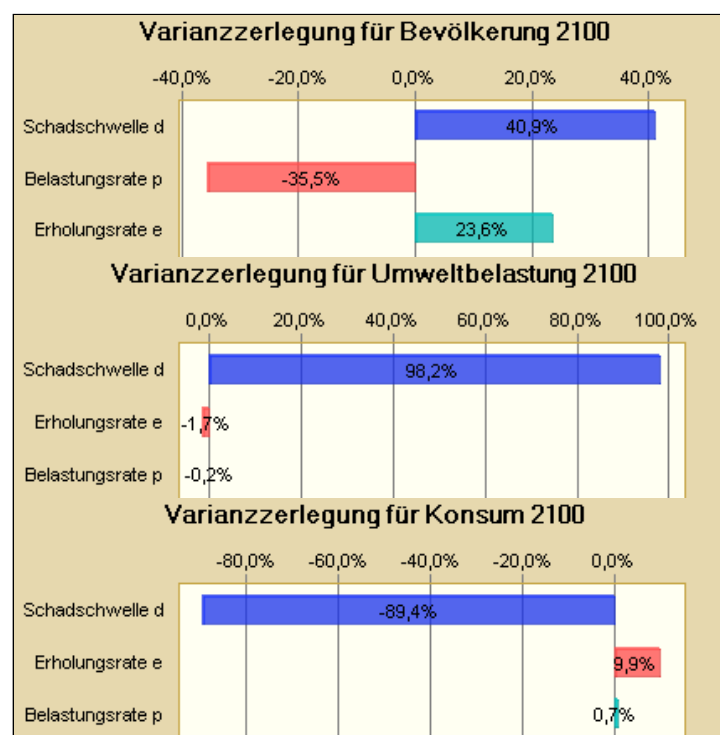


Abbildung 7: "Varianz"-Zerlegung für die drei Umweltparameter.

Zunächst wollen wir aber noch die **Konsumentwicklung** dieser ersten Simulation betrachten und ein erstes Fazit ziehen. Der Charakter des Ensembles des Konsumzieles ähnelt der Umweltbelastung (symmetrisch und enge Varianz) und wieder ist es die Schadschwelle, die der "Ordner" (Haken, 2004) zu sein scheint, diesmal jedoch mit negativer Einflussrichtung, da ein erhöhtes d höhere Umweltbelastung zulässt und dies somit schnell zum Fall $AxU > k$ und damit zur Senkung des Konsums führt (s. Gleichung 1.2). Dies ist ein Teilstück des Regelkreises der oben zur Beschränkung der Umweltbelastung führt. Der Grund, warum K negativ, U aber positiv von d abhängt, ist die *direkte* positive Kopplung von d mit U in Gl. 1.3, und die bei Konsumziel = 1 *schnell* greifende negative Kopplung von steigender Umweltbelastung und Konsum (Gl. 1.2). Bei einem höheren Konsumziel k werden wir sehen,

wie der Einfluss von d auf K verschwindet, weil $AxU > k$ in Gl. 1.2 bei hohem k seltener greifen wird.

Interessant ist noch, dass Trajektorien auf höherem Konsumniveau steiler abfallen, als jene auf geringerem Konsumniveau (Abb. 6 unten), was dem Charakter des Differentialgleichungssystems entspringt und ein weiteres Indiz dafür ist, dass höhere Konsumwerte den Regelkreis stören und es zu mehr abrupten statt sanften, kontrollierten Bewegungen kommt.

Es bleibt das wichtige Fazit, dass die Schadschwelle der wichtigste Umweltparameter ist und damit die „Carrying Capacity“ der (Modell-)Welt der *limitierende Umweltfaktor* des Systems zu sein scheint.

Resultate – Untersuchungspunkt 2: Umweltparameter- und zusätzlich Konsumziel-Variation

Die Ergebnisse des Untersuchungspunktes 2 bestätigen das bisherige Bild und die bislang geäußerten Vermutungen über den Einfluss des Parameters Konsumziel k . Sie sind von so fundamentaler Bedeutung, dass sie hier komplett aufgeführt werden müssen. Die entscheidende Beobachtung ist, dass bei Variation von k gemäß $Uni[0,5; 5]$ es zum ersten Mal zu bedeutenden Bevölkerungsrückgängen bei niedrigerem Gesamtniveau der Bevölkerung kommt, die Umweltbelastung und der Konsum aber ein höheres Niveau und absolut und relativ höhere Varianz aufweisen. Interessant ist zu sehen, wie das erhöhte Konsumziel ein steiles Ansteigen zuerst des Konsums, dann Bevölkerung und der Umweltbelastung verursacht (Abbildung 8). Die Schadschwelle d ist im Mittel bereits in 2020 überschritten und die Umweltgrenzen bremsen das Konsumwachstum, bis es deshalb um 2040 sein Maximum erreicht um dann steil abzufallen, was in den folgenden Jahren zu einem spürbaren Bevölkerungsrückgang führt und das umso strenger, je extremer die Ausprägungen der Zustandgrößen.

Ein Blick auf Abbildung 9 zeigt, dass ein überhöhtes Konsumziel aufgrund der begrenzten Umweltkapazität nicht mit einer hohen Bevölkerung vereinbar ist und k damit negativ auf B wirkt. Ebenfalls deutlich wird, dass bei hohem Konsumziel U und K durch k statt durch die Umweltgrenzen (d, p, e) getrieben werden. Das bedeutet nicht, dass die in d repräsentierte Umweltkapazität keinen Einfluss mehr auf das Niveau von U und K hat. Natürlich gilt immer noch die Grenze d (man sieht z. B. in Abb. 8, dass k höchstens 2,2 nie aber 5 erreicht), aber der in einem hohen k repräsentierte Drang des Systems über seine Grenzen (scheinbares „Grenz- k “ für fast alle „Welten“ bei $= 2,2$) hinaus ist ein Treiber für die ständige und nun heftigere Veränderung im System, also der Varianz – der stärkeren Schwingungen, die das dynamische System bei einem k über dem „Grenz- k “ aufweist (siehe auch Abb. 5).

Der in Kapitel 2.1, S. 9, angesprochene Regelkreis zeigt sich hier als Hauptregelkreis, was durch Untersuchungspunkte 3 und 4 unten bestätigt werden wird.

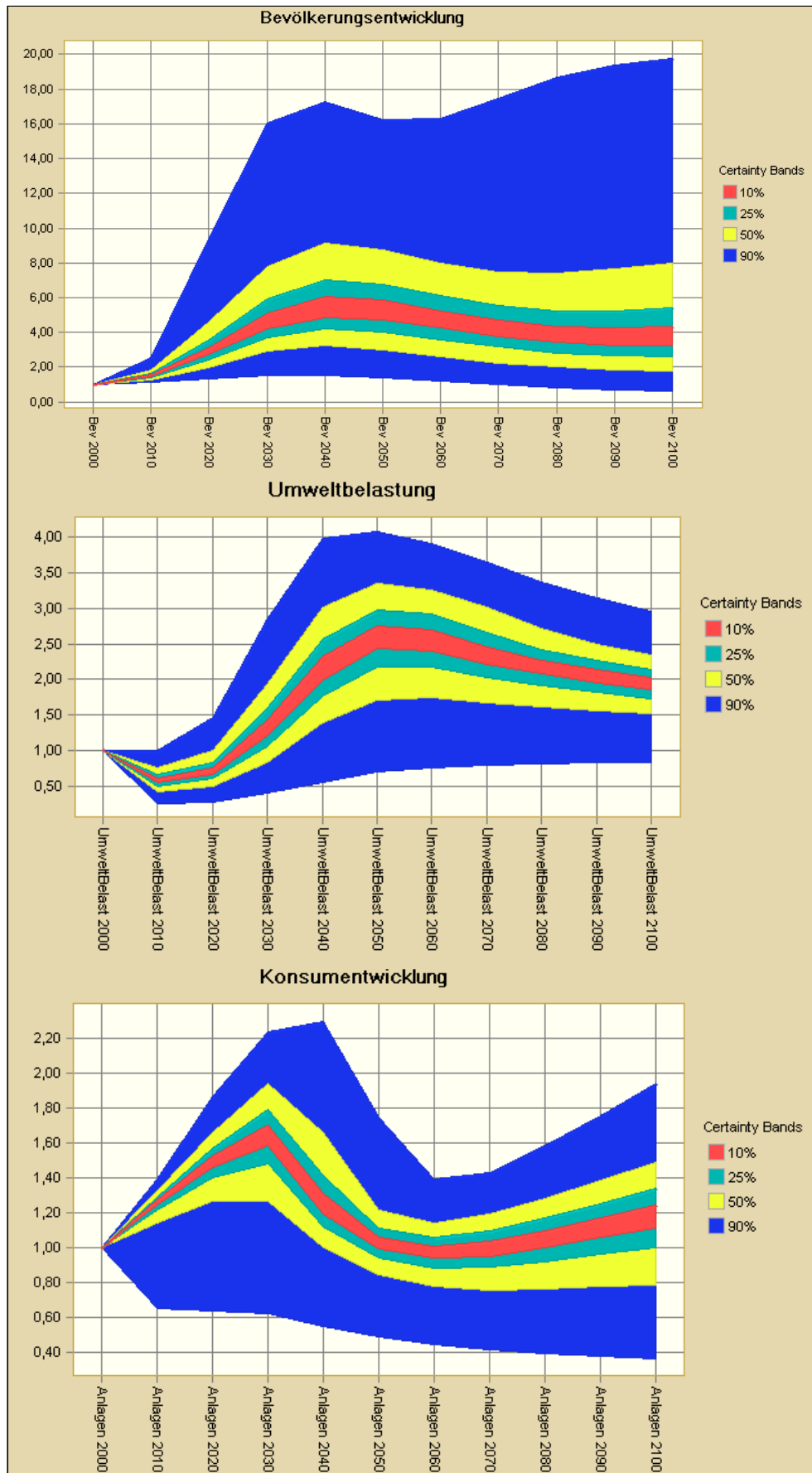


Abbildung 8: Ensembles der Zustandsgrößen für Untersuchungspunkt 2.

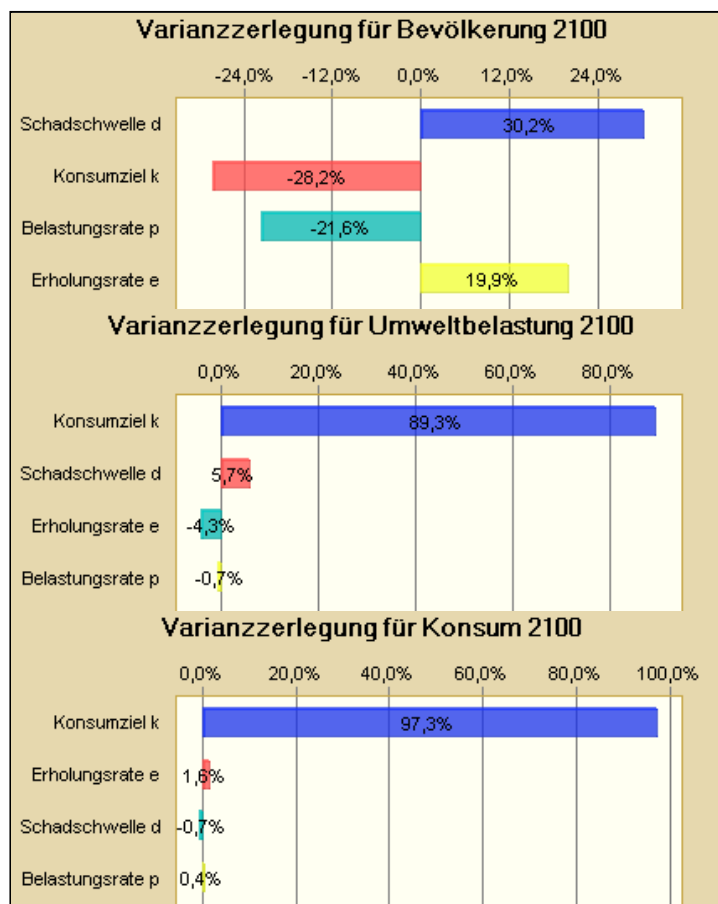


Abbildung 9: Varianzzerlegung für Untersuchungspunkt 2.

Resultate – Untersuchungspunkte 3 & 4: Umweltparameter, Konsumziel und Bevölkerung

Für die Untersuchungspunkte 3 und 4, die 1 und 2 mit zusätzlicher Variation der Geburten- und Sterberaten entsprechen, ergeben sich zu 1 und 2 konsistente Ergebnisse. Der zusätzliche Einfluss der Variation von Geburten- und Sterberaten führt lediglich dazu dass sowohl mit als auch ohne Konsumzielvariation die Bandbreite des Ensembles für die Bevölkerungsentwicklung eingeschränkt und für Umwelt und Konsum nahezu identisch ist, wobei die engere Ensemblebreite der Bevölkerung für die kleinen Änderungen der Ensembles für U und K relativ zu Punkten 1 und 2 verantwortlich ist (Abbildung 12).

Interessanter ist die detailliertere Betrachtung der kausalen Abhängigkeiten der drei Zustandsgrößen von den Parametern mittels Spider Charts, die den Einfluss eines Parameters unter Ceteris-Paribus-Bedingungen isolieren. In Abbildung 10 sehen wir das bekannte Muster (vgl. Abb. 7 mit Abb. 10) der Richtung und der Größenordnung des Einflusses der drei Umweltparameter auf die drei Zustandsgrößen mit der Umweltkapazität d als limitierendem Faktor bei konstantem $k = 1$. Sobald k aber nach oben variiert wird, ist das

erhöhte Konsumziel der ausschlaggebende Parameter für erhöhte *Variation* bei *U* und *K*. Für die Bevölkerungsentwicklung bleiben *d* und *k* dominant (vgl. Abb. 9 mit Abb. 11).

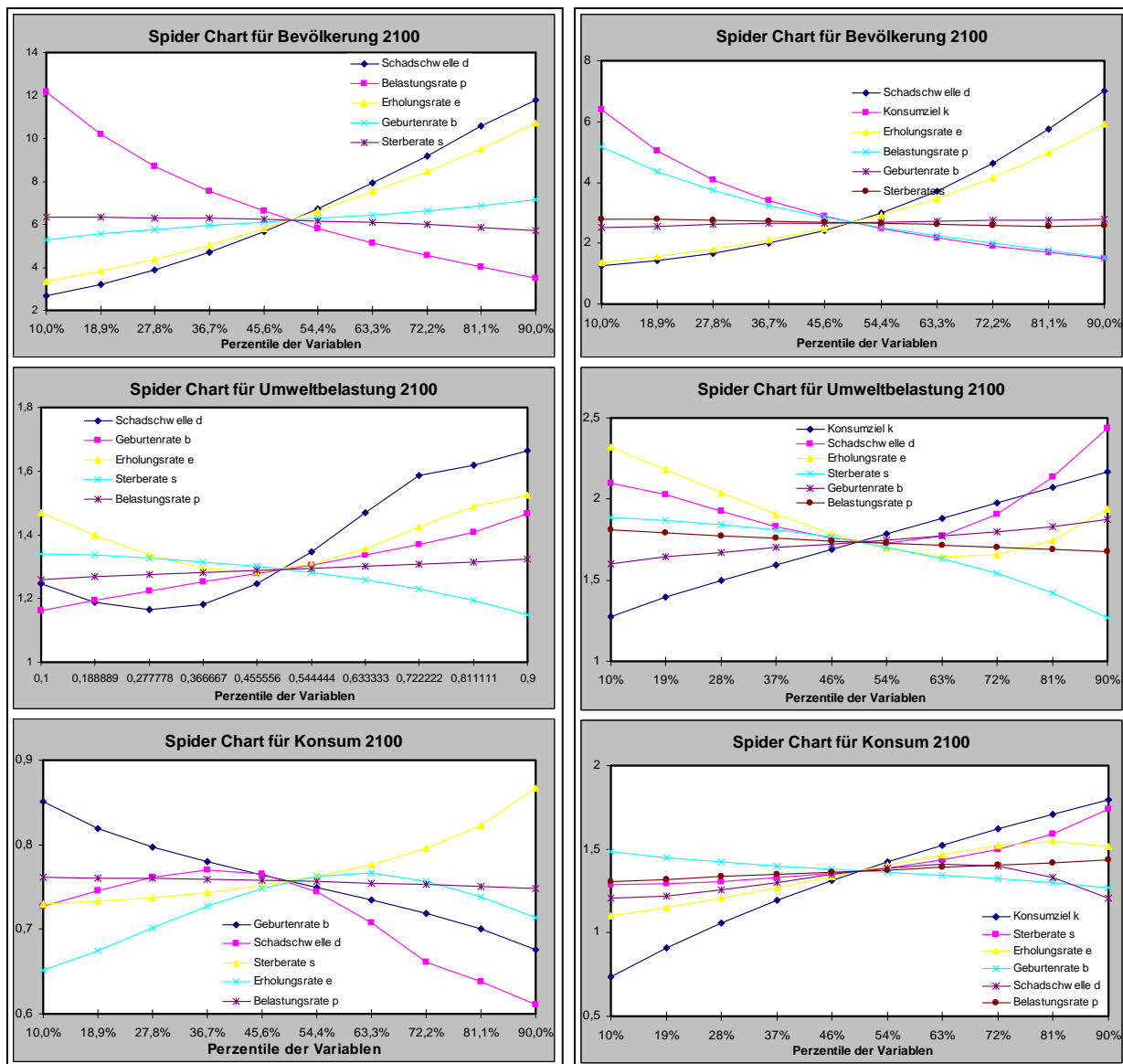


Abbildung 10: Spider Charts für Punkt 3.1 (ohne Konsumzielvariation)

Abbildung 11: Spider Charts für Punkt 3.2 (mit Konsumzielvariation)

In Abb. 10 & 11 werden nicht-monotonen Zusammenhänge zwischen der Schadschwelle *d* und Umweltbelastung *U* bzw. Konsum *K* sichtbar, was der Sprungfunktion in der Gleichung für *U* in *d* geschuldet sein dürfte, wovon in einem Falle auch *e* betroffen ist (s. Gl. 1.3). Für den Hauptregelkreis, der über die Bevölkerung läuft bleibt, dies ohne großen Belang und man kann weiterhin Vertrauen in die bisherigen Ergebnisse haben, zumal sich diese mit den Ergebnissen aus Meadows et al. (1992) decken. Der nicht-monotone Zusammenhang *d* und *U* und *K* führt für Punkt 3.1 lediglich zur Unterschätzung des Einflusses von *d*, den wir aber schon als Hauptfaktor identifiziert haben. Man vergleiche den geringen Einfluss der

Erholungsrate e auf die Umweltbelastung U in Abb. 7 mit der stark gekrümmten Kurve für e bzgl. U in Abb. 10. Man sieht wie sich positiver und negativer Einfluss von e auf U in Abb. 10 wegheben, was zur groben Unterschätzung von e in Abb. 7 führt. Analoge Aussagen gelten für den Fall in dem das Konsumziel mitvariiert. Für alle anderen Parameter, insb. das Konsumziel, liegt globale Monotonie in allen drei Zustandsgrößen vor (s. Abb. 10 & 11), so dass wir auch hier weiterhin k als Treiber der Dynamik auch bei Variation in b und s sehen können. Die Auswirkungen dessen entsprechen denen bei Punkt 2.

Ergeben sich auch neue Erkenntnisse durch die zusätzliche Variation der Bevölkerungsentwicklung? Geburten- und Sterberate variieren sehr eng gemäß empirisch geschätzten Verteilungen (s. Kap. 3.1). Der Blick auf Abbildung 10 (Punkt 3.1 - keine Konsumzielvariation) mag zunächst erstaunen angesichts des minimalen Einflusses von b und s auf die Bevölkerung. Wenn wir uns aber an die bisherigen Ergebnisse erinnern wird klar, dass die Bevölkerung noch so stark wachsen wollen kann, der begrenzende Faktor ist die Umweltkapazität! Entsprechend sehen wir, dass hohe Geburtenraten die Umweltbelastung erhöhen und auf den Konsum negativ wirken (wegen des Regelkreises in Gl. 1.2 des Konsums). Genau diese Größen limitieren aber das Bevölkerungswachstum und nicht der *direkte* Einfluss von b und s . Untersuchungspunkt 3.2 ergibt vollkommen analoge Schlüsse mit dem Unterschied das der Einfluss aller Parameter viel geringer ist, als Ausdruck der bereits mehrfach bestätigten Dominanz des Konsumzieles als Treiber der Dynamik (also der Varianz).

In **Untersuchungspunkt 4** trennen wir nun den Einfluss von Geburten- und Sterberate und den drei Umweltparametern mittels 2D Simulation sauber auf. Wir behandeln die Umweltparameter d , e , p als unbekannte Werte (im äußeren Lauf der 2D Simulation, $N = 10$, d.h. wir betrachten zehn verschiedene Welten); g und s stellen für uns Variabilität in dem Verhalten der Weltbevölkerung dar (im inneren Lauf der 2D Simulation, $N = 5000$). Für die 2D-Simulation ohne Konsumzielvariation (**Punkt 4.1**) ergeben sich deutlichen Unterschiede zwischen den zehn verschiedenen "Welten", die wir betrachten, was wiederum bestätigt, dass die Umweltparameter (insb. d) die Grenzen innerhalb derer die Bevölkerung wachsen kann, bestimmen (Abb. 12). Neu ist die Erkenntnis, dass zwischen den verschiedenen Welten die Größe der Bevölkerung um eine Größenordnung verschieden sein kann, die Umweltparameter also erhebliche Unsicherheit hervorrufen. Punkt 4.1 gibt für die

Umweltbelastung und den Konsum keine neuen Erkenntnisse. Das im Mittel erreichbare Niveau von U und K unterscheidet sich höchstens um den Faktor 2.

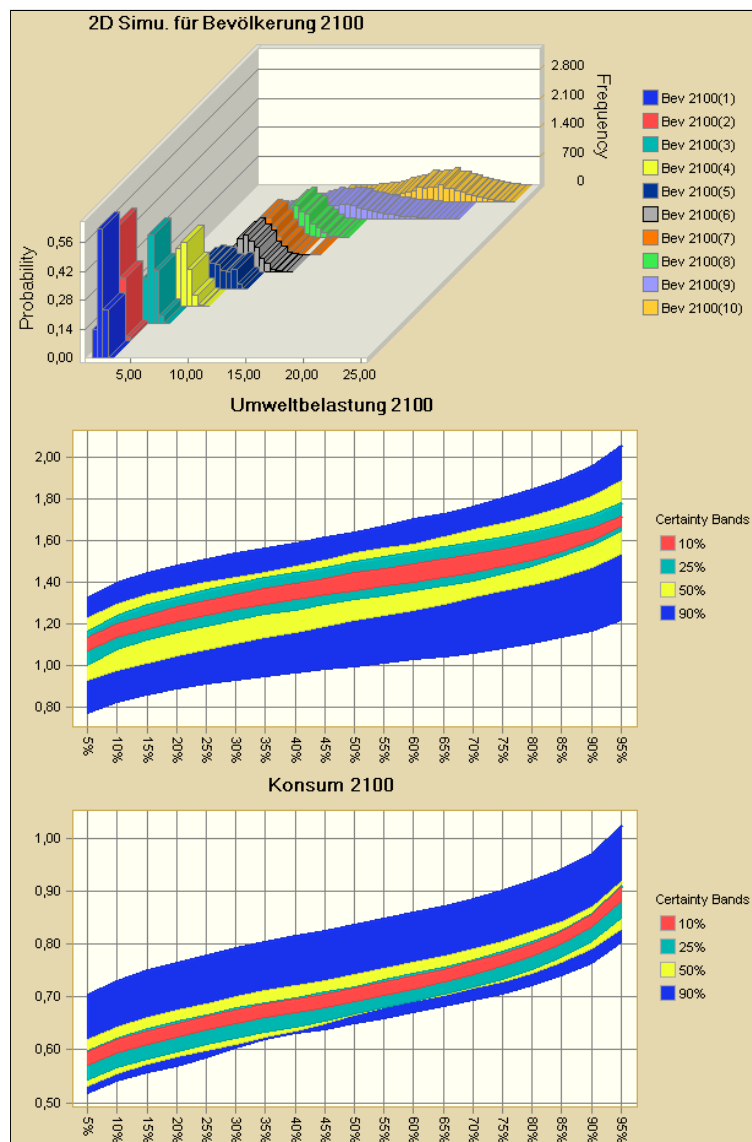


Abbildung 12: Punkt 4.1 – Bevölkerung als 3D Overlay, Umweltbelastung und Konsum als Trend Chart

Fügt man im Rahmen des **Untersuchungspunktes 4.2** das Konsumziel zu den variierenden Faktoren hinzu, gewinnt dieser Parameter in jeder der zehn untersuchten Welten die Oberhand und eine unbegrenzte Ausdehnung des Konsumzieles (repräsentiert durch Vielfache von $k = 1$ in der Verteilung $k \sim Uni [0,5; 5]$) hält die Bevölkerung in jeder möglichen Welt auf weit geringerem Niveau als zuvor in Punkt 4.1 (s Abb. 13). Für U und K ergeben sich wiederum in jeder untersuchten Welt erhöhte Werte bei einem mittlerem Faktor von ca. 2. Interessant wären 3-dimensionale Spider Charts für jedes 2D Experiment gewesen,

um die Änderung der Rangfolge der Einflussstärke von Parametern über verschiedene Welten sehen zu können. Diese Funktion ist aber in Crystal Ball nicht implementiert.

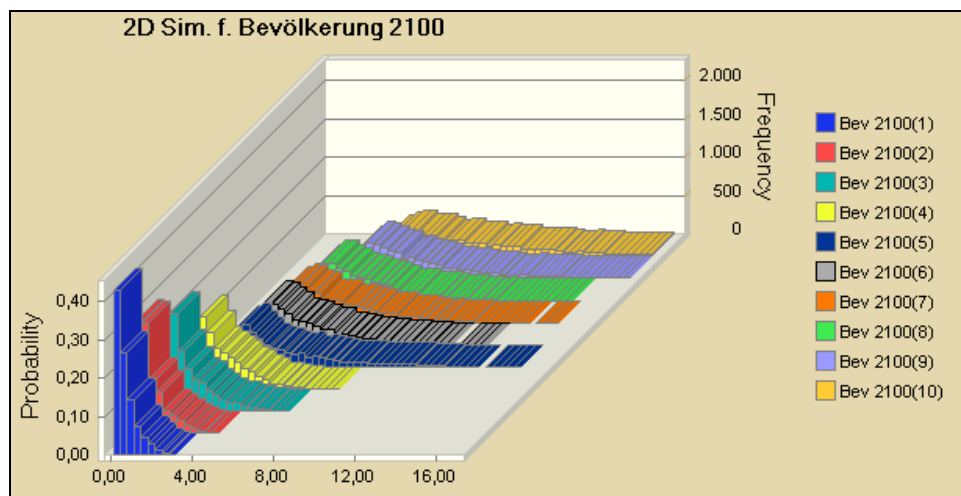


Abbildung 13: 2D Simulation für Bevölkerung mit Konsumzielvariation (Punkt 4.2)

Die wesentlichen Modellzusammenhänge sind hiermit geklärt. Nachdem wir festgestellt haben, dass ein unbegrenztes Wachstum des Konsums und der Bevölkerung nicht möglich sind, wollen wir nun in **Untersuchungspunkt 5** eine Parameterkombination suchen, die nachhaltige Entwicklung für eine möglichst große Bevölkerung ermöglicht. Die kompletten Optimierungsergebnisse sind in den Dateien “Crystal Ball Seminararbeit - Alex Ivanov - alle Simulationsgrafiken.doc“ und “ Crystal Ball Seminararbeit - Alex Ivanov - OptQuest Daten.doc“ dokumentiert.

Resultate - Untersuchungspunkt 5: Eingriffsplanung & Optimierung

Ziel der Optimierung ist die Maximierung der Bevölkerung bei Einhaltung der in Kap. 3.2 vorgegebenen Leitwerte i. S. einer nachhaltigen Entwicklung. Entscheidungsvariablen in der Modellwelt sind die Geburtenkontrolle g und das Konsumziel k . Je höher g desto höher die Geburten und Analoges gilt für k - bis zu einer bestimmten Grenze.

Optimierung 1: Zunächst werden die aus Bossel (2004a, Kap. 5.2) übernommenen Leitwerte als Nebenbedingungen definiert und die Optimierung gestartet. Abbildung 14 zeigt das Ergebnis. Es wurde kein Wert für die Entscheidungsparameter (Decision) g und k gefunden, der die Einhaltung aller Nebenbedingungen ermöglichen würde. Die beste gefundene Lösung lautet: $g = 0,2$, $k = 5$, Bevölkerung in 2100 = 1,76. Die kritischen Nebenbedingungen waren Geburten/Sterbefälle, die in den ersten 50

simulierten Jahren fast immer überschritten (zu viele Geburten) und in den letzten 50 Jahren fast immer unterschritten (zu viele Sterbefälle) wurden. Das bedeutet, dass die Bevölkerungsentwicklung zu stürmisch verläuft (wie bereits in Kap. 3.2 festgestellt). Anfangs wächst die Bevölkerung zu schnell und wird dann (durch die harten Umweltgrenzen) abrupt dezimiert. Insgesamt steht also eine große Bevölkerung (oder hoher Konsum) im Konflikt mit einer sanften Weltentwicklung.

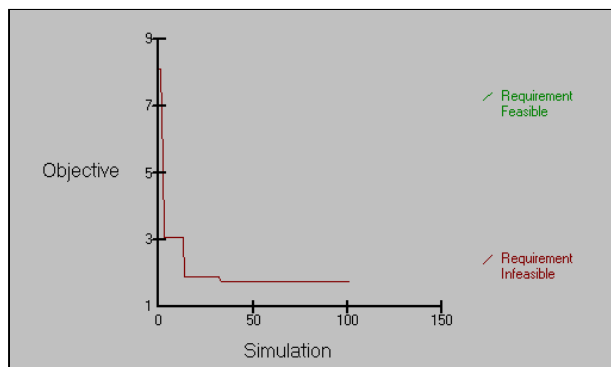


Abbildung 14: Optimierung 1

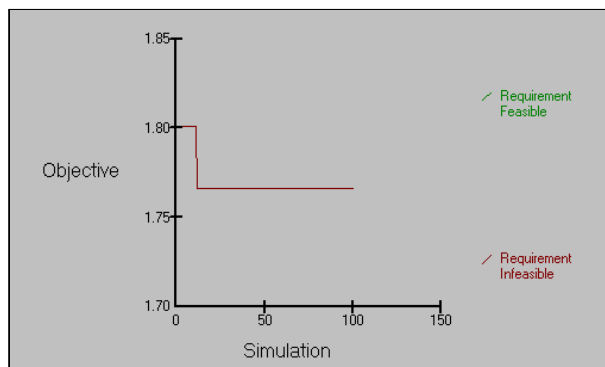


Abbildung 15: Optimierung 2.1

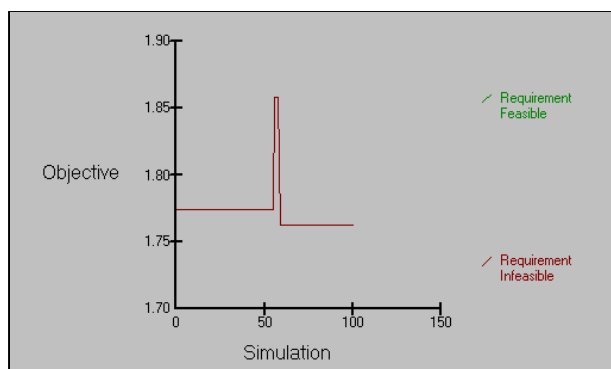


Abbildung 16: Optimierung 3

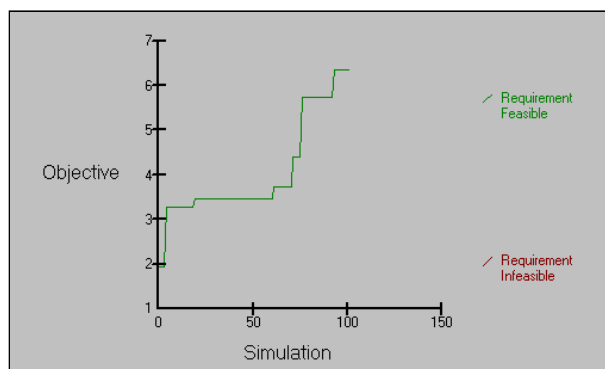


Abbildung 17: Optimierung 4

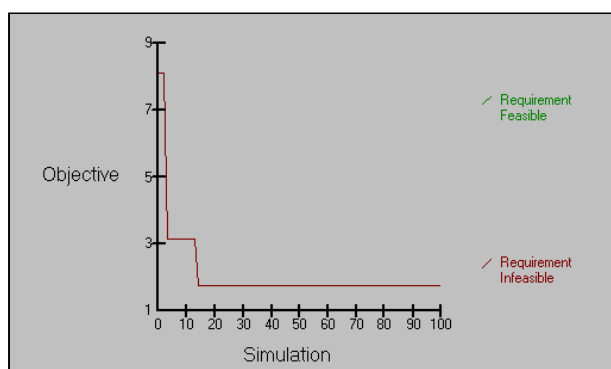


Abbildung 18: Optimierung 5

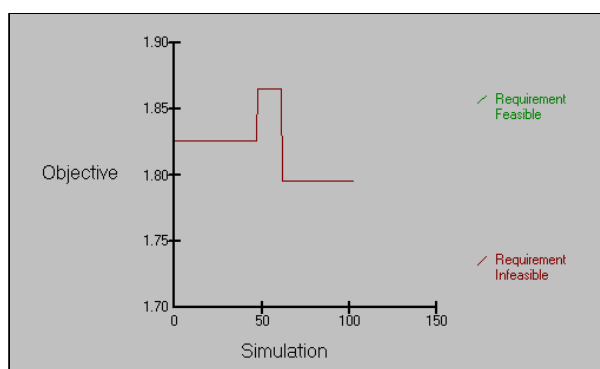


Abbildung 19: Optimierung 6

Optimierung 2.1: Um der Bevölkerungsentwicklung mehr Raum zu verschaffen, werden die Umweltgrenzleitwert relaxiert, genauer wird die Bedingung Erholung/Zerstörung $> 0,95$ von 2010 bis 2050 aufgeweicht (Genaueres in oben angegebenen Dateien). Dies führt zu ähnlichen Ergebnissen wie bei Optimierung 1 und wieder ist die Bevölkerungsentwicklung zu abrupt. Die beste Lösung lautet: $g = 0,2$, $k = 5$ und $B2100 = 1,77$.

Optimierung 2.2: Wie in Optimierung 2.1 werden die Grenzen der Umweltzerstörung mit zusätzlicher Aufweichung der Bedingung Umweltqualität $> 0,5$ für den gleichen Zeitraum wie in Optimierung 2.1 erweitert. Die Ergebnisse entsprechen denen der Optimierung 2.1. Die beste Lösung lautet: $g = 0,2$, $k = 4,93$ und $B2100 = 1,77$.

Optimierung 3: Noch stärkere und länger andauernde Aufweichung der zwei oben genannten Bedingungen mit zusätzlicher starker Relaxation der Bedingungen Sterbefälle/Bevölkerung $< 0,02$, d.h. es wird erlaubt, dass relativ zur Bevölkerung mehr Todesfälle auftreten (entsprechend einer erhöhten globalen Mortalität) zugelassen und das Bevölkerungswachstum darf abrupt abgebremsst werden, indem für Geburten/Sterbefälle das Minimum von 0,9 auf 0,6 herabgesetzt wird. Die Nebenbedingungen zum Schutz der Umwelt sind nun nicht mehr verletzt, aber die Bevölkerungsentwicklung ist auch mit den erweiterten Leitwerten nicht kompatibel. Die beste Lösung lautet: $g = 0,2$, $k = 4,67$ und $B2100 = 1,76$.

Optimierung 4: Wie Optimierung 3 jedoch werden mit $0,5 < \text{Geburten/Sterbefälle} < 5$ in 2090 & 2100 nun besonders krasse Bevölkerungsschwankungen in 2090 und 2100 erlaubt (was in der Realität einem "apokalyptischen" Szenario entspräche). Nun sind alle Nebenbedingungen erfüllt und bei $g = 0,68$ und $k = 1,17$ erreicht die Bevölkerung im Mittel einen Maximalwert von ca. 6,34, also mehr als das 6-fache der Bevölkerung im Jahre 2000.

Optimierung 5: Die Bedingung Geburten/Sterbefälle wird gegenüber Optimierung 4 leicht adjustiert und von 2010 bis 2100 graduell strenger (siehe oben genannte Dateien). Dies führt wieder zu einer zu extremen Bevölkerungsentwicklung. Die beste Lösung lautet: $g = 0,2$, $k = 4,63$ und $B2100 = 1,76$.

Optimierung 6: Ähnlich wie in Optimierung 5 wird versucht den Gradienten der Nebenbedingung Geburten/Sterbefälle so einzustellen, dass die Optimierung alle Nebenbedingungen erfüllt sind, was aber nicht gelingt. Die beste Lösung lautet: $g = 0,2$, $k = 4,19$ und $B2100 = 1,03$.

Die Optimierungsexperimente bestätigen, dass hoher Konsum mit einer hohen Bevölkerung nicht kompatibel ist. Darüber hinaus wird klar, dass selbst eine Beschränkung des Konsums auf das heutige Niveau bei weiterem Bevölkerungswachstum auf das 6- bis 7-fache des Niveaus im Jahr 2000 (wie etwa im Beschränkungsszenario des Standardlaufes, in Abb. 4 gezeigt) die ursprünglichen Leitwertgrenzen verletzt (s. Optimierung 1 – 3). Es ist also zu schließen, dass eine vollkommene Einhaltung der nachhaltigen Leitwerte aus Bossel (2004a, Kap. 5.2 – dort werden die Leitwerte übrigens auch in keinem Szenario eingehalten) mit den getesteten Modellspezifikationen, die von realen Daten ausgehend, erstellt wurden, nicht möglich ist. Sehr interessant ist die Beobachtung dass zwischen den Optimierungen 1 - 3 und 5 - 6 und Optimierung 4 zwei Verhaltensmodi zu dominieren scheinen: Hohes Konsumziel mit geringer Bevölkerung (Optimierungen 1, 2, 3, 5, 6) und geringer Konsum mit hoher Bevölkerung (Optimierung 4).

In Kapitel 4 werden die Erkenntnisse des dritten Kapitels zusammengefügt.

4. Schlussfolgerungen

Zusammenfassung der Ergebnisse & Schlussfolgerungen

Es ist klar geworden, dass die Umweltkapazität für die Zustandsvariablen Bevölkerung und Konsum eine harte Grenze darstellt. Weiterhin ist klar geworden, dass der globale Konsum in fast allen getesteten „Welten“ (repräsentiert durch verschiedene Tupel $\{d, e, p\}$) und bei verschiedensten Regimen für die Bevölkerungsentwicklung (Tupel $\{b, s\}$) im Model kaum über das Niveau des Jahres 2000 hinaus steigen kann. Ein erhöhtes Konsumziel k repräsentiert unbeschränkten Wachstumsdrang und ist ein Treiber, der das System wiederholt, schneller und heftiger gegen seine (Umwelt-)Grenzen fährt und somit zu erhöhter Verhaltensvolatilität führt. In Abhängigkeit der tatsächlichen Umweltparameterwerte kann die mittlere Bevölkerung im Jahre 2100 um bis zu eine Größenordnung schwanken (Untersuchungspunkt 4), die Ungewissheit über die genaue Lage der „harten Umweltgrenzen“ ist groß. Jedoch erreicht der Konsum im Jahre 2100 nur in sehr wenigen „Welten“ und Bevölkerungsentwicklungs-Regimen knapp mehr als das Doppelte des Niveaus von 2000 (siehe Untersuchungspunkte 2 und 4), dies wird dann aber mit extremen Bevölkerungsschwankungen und hoher Umweltbelastung erkaufte (Abb. 5 oben bzw. unten). Die zwei Extremszenarios in Abbildung 5 mit $k = 30$ führen zwar zu einem Konsumniveau von maximal knapp über 4, aber nur durch katastrophale Schrumpfung der Miniwelt-Bevölkerung auf ca. ein Sechzehntel bzw. ein Sechstel des Bestandes im Jahre 2000. Ein grenzenloses Wachstumsstreben des Konsums ist also nicht möglich und schränkt die Wirkung des Hauptregelkreis des Modells ein und destabilisiert das System (Kap. 3.3 Untersuchungspunkte 2, 3.2, 4.2), d.h. die Orientatoren *Adaptivität* und *Sicherheit*, Kap 3.2 werden attackiert.

Eine wichtige Erkenntnis ist, dass es mindestens **zwei alternative Verhaltensregime im Modell** zu geben scheint, die der Erfüllung der Leitwerte je am nächsten kommen:

1. Ein Regime in dem hoher Konsum, extreme Bevölkerungsschwankungen und ein insgesamt niedriges Bevölkerungsniveau im Jahr 2100 des maximal ca. 1,7-fachen der Bevölkerung des Jahres 2000 vorliegen (wie etwa in allen Optimierungen außer Nr. 4). Die Entwicklung verletzt dabei einige Leitwerte der Bevölkerungsentwicklung aus Kap. 3.2 (s. Abb. 20). Dies ist das Regime des „Überschießens mit Zusammenbruch“.
2. Ein weiteres Regime mit geringem Konsum aber relativ gleichmäßigem Bevölkerungswachstum gegen einen Grenzwert (Optimierung 4, ähnlich dem

Standardlauf in Abb. 4). Aber auch hier nur mit relaxierten Leitwerten. Dies ist das Regime der “logistischen Annäherung an einen oberen Grenzwert“.

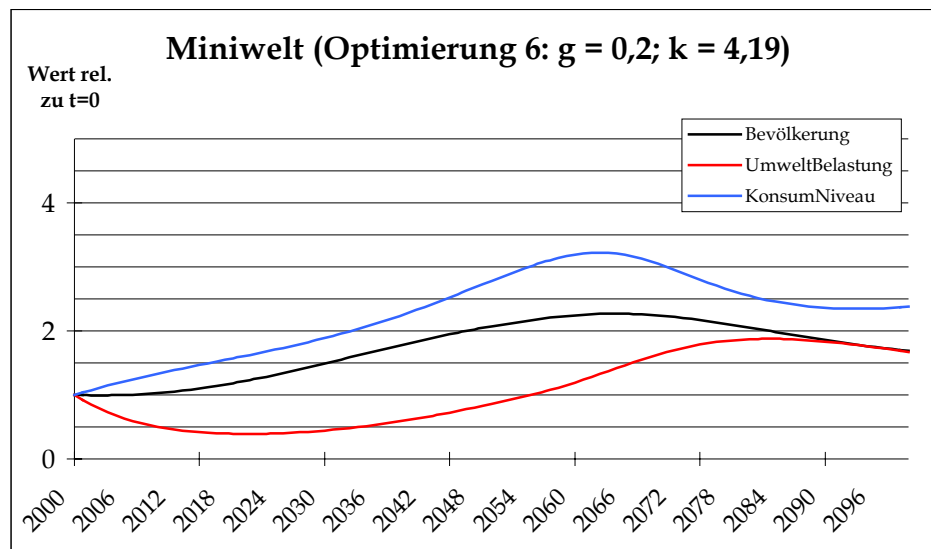


Abbildung 20: Modellverhalten mit den besten Parametern der Optimierung 6

Die zwei Regime repräsentieren prototypische Verhaltensweisen dynamischer Systeme (s. Forrester, 1977; Meadows, et al. 1972; Bossel, 2004a).

Abbildung 20 zeigt, wie Regime 1 mit den Werten der Optimierung 6 $g = 0,2$ und $k = 4,19$ aussehen könnte (Achse reskaliert, da kleine Werte darzustellen). Diese ist mit Regime 2 zu vergleichen, welches in etwa die Gestalt des Standardlaufes mit $g = 0,5$ und $k = 1$ hat (vgl. Abb. 5 Mitte). Die genaue Analyse der Optimierungen aus Kap. 3.3 (enthalten in der Datei “Crystal Ball Seminararbeit - Alex Ivanov - OptQuest Daten.doc“) offenbart, dass Regime 2 nur mäßige Überschreitungen der Leitwertgrenzen verursacht, während das Regime 1 (ähnlich dem Modellverhalten in Abb. 5 oben und unten) extremen Konsums zu stärkeren Grenzverletzungen der Leitwerte und immer wiederkehrenden Systemschwingungen führt. Der Grund ist wieder das treibende überhöhte Konsumziel, was den Regelkreis destabilisiert und deshalb das System immer wieder *abrupt* abgebremst wird. (s. Untersuchungspunkte 1 – 4 in Kap. 3.3).

Bei jeweils relaxierten Leitwerten kommt Regime 2 der “logistischen Annäherung“ einer sanften, man könnte sagen *humanen*, Bevölkerungsentwicklung durch logistische Annäherung an einen *durch die Umwelt bestimmten oberen Grenzwert*, durch absolute Beschränkung des Konsumzieles ($k \approx 1$) auf das Niveau von 2000 und verstärkte Geburtenkontrolle (g klein) am nächsten.

Handlungsempfehlungen

Das Modell gibt viele Aspekte der tatsächlichen Weltdynamik nicht wieder, aber durch die hohe Bandbreite an untersuchten Welten und den Fakt, dass in fast all diesen Welten das Konsum- und Bevölkerungsniveau kaum über das Niveau des Jahres 2000 steigen kann, ist es schwer, an den Ergebnissen vorüberzugehen ohne innezuhalten. Die Untersuchung bestätigt die Ergebnisse der Weltmodelle in Meadows et al. (1972, 1992, 2004) und erhöht deren Validität durch Anwendung der Monte-Carlo-Methode. Das oben als Regime 2 bezeichnete Verhalten scheint, gemäß den in Kap. 3.2 angegebenen Leitwerten des Systems, das bestmögliche zu sein, da es eine humane Bevölkerungsentwicklung ohne große Schwankungen ermöglicht. Die Konsequenz daraus ist ebenso simpel wie streng: Entweder Konsum- und Bevölkerungswachstum werden stärker als bisher gesenkt oder die Pro-Kopf-Umweltverschmutzung muss sehr gering werden (Belastungsrate $p \rightarrow 0$ durch technologischen Fortschritt, s. Gl. 1.4), um dadurch ein Mehr an Menschen und Konsum zu ermöglichen. Die Alternative wäre eine wahrscheinlich stark schwankende zukünftige Weltentwicklung.

Die Abbildungen 21 und 22 zeigen die tatsächlichen Wachstumsraten für Bevölkerung und Output (\approx prop. Konsum), welche bereits Abwärtsbewegungen aufweisen, die mit dem Erreichen von Grenzen aber auch mit Größeneffekten, wie in der Konvergenzgleichung von Barro & Sala-I-Martin (1999) modelliert, zusammenhängen. Diese Raten sind noch immer positiv, beide Bestände wachsen also. Im Modell des Wachstums mit oberer Schranke kommt es aber an der oberen Grenze zu Nullwachstum (bzw. leicht negativem Wachstum während des Einschwingvorgangs). Wenn also die Existenz einer oberen Umweltschranke unserer endlichen Biosphäre nicht bezweifelt wird, kann nur durch Senkung des Pro-Kopf-Schadstoffausstoßes (etwa durch technologischen Fortschritt) auf Null (Belastungsrate $p \rightarrow 0$), verhindert werden, dass weiteres Bevölkerungswachstum oder Konsumzunahme die Umweltgrenzen früher oder später doch erreichen. Ermöglicht unsere Technologie diese Schadstoffverringern nicht, bleibt nur noch die Wachstumsreduktion als Ausweg.

Befinden wir uns im kritischen oder unterkritischen Wachstumsbereich? Aus Abb. 21 & 22 und den Modellen ergibt sich folgendes Bild:

	mittleres Bevölkerungswachstum*	mittleres Konsumwachstum*
Welt in 2000	1,4%	2,5%
Standardlauf	3,8%	1,0%
Regime 1 ($g = 0,2, k = 4,19$)	1,3%	1,9%
Regime 2 ($g = 0,68, k = 1,17$)	2,9%	1,0%

Tabelle 1: Wachstumsraten von Bevölkerung & Konsum im Vergleich (* bis zum Erreichen des ersten Peaks)

Der momentane Weltkonsum(-output) wächst überkritisch im Vergleich zu allen Modellvarianten der Tab. 1. Im Vergleich zum Regime 2 liegen sogar alle momentanen Weltwachstumsraten über den mittleren Wachstumsraten des Regimes 2, welches in Optimierung 4 des Kap. 3.3 als das beste Regime des Modus “logistische Annäherung“ gefunden wurde. Die anderen Lösungen der Optimierung 4 sind sehr nahe an Regime 2 und entsprechen alle dem Modus “logistische Annäherung“. Dies deutet darauf hin, dass solange die mittleren Raten des Regimes 2 überschritten sind, die Welt im Modus “Überschießen mit Zusammenbruch“ operiert, wir also auf hartem Kollisionskurs mit den Umweltgrenzen der Biosphäre sind.

Da der Konsum der treibende Faktor im Modell und auch in der realen Welt über den Raten der Modelle in Tab. 1 liegt, hier einige Bemerkungen zum materiellen Konsum.

In der Glücksforschung gilt es als gesichertes Erkenntnis, dass ab einem Einkommen von etwa 15.000 EUR pro Jahr, das Einkommen, also der Konsum, nicht mehr der wichtigste Faktor für Glück ist (s. Überblick in Frey & Stutzer, 2001; Worm & Karstedt, 2005, S. 58). Eine Konsumbeschränkung in Industrieländern mit gleichzeitiger ausgleichender Konsumsteigerung in Entwicklungsländern ist also eher eine Frage der Mentalität (Wachstumsdoktrin) als der Wohlfahrt.

Dies kann auch aus spieltheoretischer Sicht betrachtet werden: Es ist bekannt, dass zusätzlicher Konsum nicht glücklicher macht, eine Senkung also per se anreizkompatibel wäre. Die negativen Effekte übersteigerten Konsums, erreichen mit viel zu großer Verzögerung ihre Verursacher (oder auch überhaupt nicht bei Verzögerungen länger als die Lebensdauer einer Kohorte). Eine Beschränkung des Konsums wäre langfristig aber für alle von Vorteil. Eine unilaterale Konsumbeschränkung würde durch den Preismechanismus am Markt (sinkende Preise durch geringere Nachfrage) immer einen Anreiz zur Erhöhung des Konsums schaffen. Es liegt also ein dynamisches Gefangenendilemma vor, bei dem niemand im Konsum zurückweicht und die negativen Effekte dessen erst mit Zeitverzögerung wirken (s. Axelrod, 1984), so dass sie nicht in die Auszahlungsfunktion der myopischen Spieler einfließen und das gute Gleichgewicht “Konsumbeschränkung“ wie im Gefangenendilemma immer instabil bleibt. Lernen ist wegen fehlender Wiederholbarkeit des Spieles aus Sicht der Spieler mit begrenzter Lebensdauer nicht möglich. Es sei nur gesagt, dass noch weitere interessante Erwägungen aus der dynamischen Spieltheorie existieren (s. Canty, 1995, Kap. 6.3.3).

Meadows et al. (1992, 2004) deuten an, dass die Umweltgrenzen bereits überschritten sind und ein Gegensteuern wegen lang laufenden Verzögerungen kaum einen Zusammenbruch wird verhindern - nur etwas schwächen - können. Es folgt dann die weitere Empfehlung, für die Folgen einer möglichen Katastrophe bereits jetzt bestmögliche Vorbereitungen zu treffen.

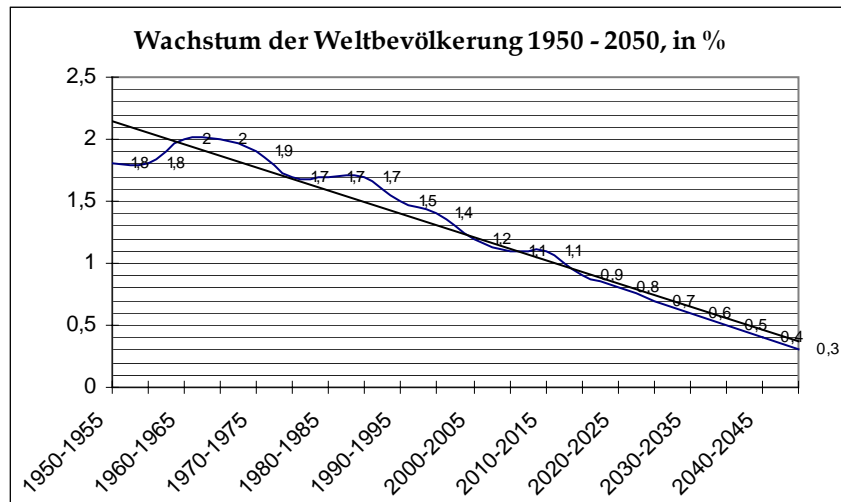


Abbildung 21: Wachstumsraten der Bevölkerung (The World Bank, 2005)

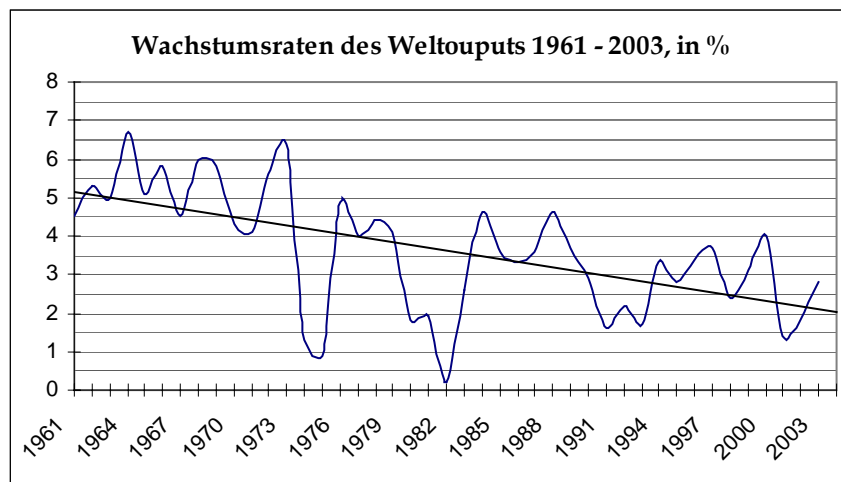


Abbildung 22: Wachstum des Weltoutputs (The World Bank, 2005)

Problembetrachtung

An dieser Stelle folgt eine knappe qualitative Fehlerbetrachtung

- Absoluter Schwachpunkt ist die zu B und K relative Umweltkapazität d → Folge: Es ist unklar welche Szenarien (Parameterkonstellationen) realistisch sind und welche nicht
- Die Bevölkerung ist homogen modelliert → Folge: Erhöhte Varianz in allen Modellteilen, da Bevölkerung als ein homogener Block variiert und so höhere Wucht entfaltet. Zudem verschiedene Wachstumsraten je nach Entwicklungsniveau nicht modellierbar.
- Die Antwort der Marktkräfte auf zunehmend knappe Ressourcen (Ölpreis, etc.) sowie die technologische Entwicklung sind nicht modelliert (sondern konstante Parameter je Modellspezifikation) und damit vollkommen ausgeblendet → Folge: bivalent, technologische Entwicklung ist ein kreativer gesamtgesellschaftlicher Prozess und

damit für den Forscher tatsächlich zufällig und unberechenbar - sowohl in ihrer Qualität (Richtung) als auch Quantität (Impact von Innovationen). Marktkräfte könnten dafür sorgen, dass nicht die harten Umweltgrenzen die Entwicklung abrupt abbremsen, sondern schon vorher eine Umorientierung stattfindet. Ob diese früh genug kommen kann oder die lang laufenden Folgen der bisherigen Entwicklung trotzdem das System an die Grenzen fahren ist unklar.

- Wie bereits oben angedeutet gibt es neben den Marktkräften noch vielfältige andere Phänomene von Systemen mit Bewusstsein, die unser einfaches Modell nicht erfasst
- Eine detailliertere Untersuchung der Leitwerte ist notwendig, aber mit den selben Problemen wie im ersten Strichpunkt behaftet.
- Die Euler-Cauchy-Methode erhöht die Varianz und senkt damit die Validität der Ergebnisse, da sie lediglich eine Genauigkeit erster Ordnung besitzt (Canty, 1995, S. 48).

Schlussbemerkungen

Die Monte-Carlo-Methode ist nur eine Ergänzung aber nicht der Hauptteil einer Analyse eines dynamischen Systems. Die vorliegende Analyse ist insofern unvollständig.

Ein Vergleich der Ergebnisse des Modells mit herkömmlichen volkswirtschaftlichen Wachstumsmodellen (Romer, 2001, Barro & Sala-I-Martin, 1999), die i.d.R. keinerlei (!) Wachstumsbeschränkung enthalten und lediglich auf die Gewinnung von Gleichgewichtszuständen abzielen, wäre interessant und sollte grundsätzliche Diskussionen in den Wirtschaftswissenschaften provozieren.

5. Quellenverzeichnis

- Axelrod, Robert (1984): *The Evolution of Cooperation*, Basic Books, New York
- Barro, Robert J.; Sala-I-Martin, Xavier (1999): *Economic Growth*, MIT Press, Cambridge
- Bärwolff, Günther (2005): *Höhere Mathematik*, Elsevier, München
- Bossel, Hartmut (2004a): *Systeme, Dynamik, Simulation*, Books On Demand, Norderstedt
- Bossel, Hartmut (2004b): *Systemzoo*, Books On Demand, Norderstedt
- Brenner, Thomas; Murmann, Joohann Peter (2003): *The Use of Simulation in Developing Robust Knowledge about Causal Processes*, Papers on Economics & Evolution #0303, Max-Planck-Institut für Ökonomie, Jena
- Bronstein, Ilja N.; et al. (2005): *Taschenbuch der Mathematik*, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main
- Brenner, Thomas; Werker, Claudia (2004): *Empirical Calibration of Simulation Models*, Papers on Economics & Evolution #0410, Max-Planck-Institut für Ökonomie, Jena
- Canty, Morton John (1995): *Chaos und Systeme*, Vieweg, Wiesbaden
- Decisioneering (2005): *Crystal Ball 7 Professional User Manual*, Decisioneering Inc., Denver
- Dixit, Avinash K. (1990) : *Optimization in Economic Theory*, Oxford University Press, New York
- Frey, Bruno S.; Stutzer, Alois (2001): *Happiness & Economics*, Princeton University Press, Princeton
- Forrester et al. (1974): *Dynamics of Growth in a Finite World*, Wright-Allen Press, Cambridge, MA. (Technische Dokumentation des WORLD3 Modells von 1971)
- Forrester, Jay W. (1977): *Principles of Systems*, The MIT Press, Cambridge, MA
- Haken, Hermann (2004): *Synergetics – Introduction and Advanced Topics*, Springer, Berlin
- Klar, Axel (2005): *Vorlesungsskript „Numerik gewöhnlicher Differentialgleichungen“*, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern
- Leven, Ronald W.; Koch, Bernd-Peter; et al.. (1984): *Chaos in dissipativen Systemen*, Akademie Verlag, Berlin
- Malerba , F. ; Nelson, R; Orsenigo, L.; Winter, S. (1999): *‘History-friendly Models of Industry Evolution: The Computer Industry*, Industrial and Corporate Change, Vol. 8, Nr. 1, Oxford University Press, Oxford
- Malerba , F. ; Orsenigo, L. (2002): *Innovation and market structure in the dynamics of the*

- pharmaceutical industry and biotechnology*, Industrial and Corporate Change, Vol. 11, Nr. 4, Oxford University Press, Oxford
- Meadows; et al. (1972): *The Limits to Growth*, Universe Books, New York
- Meadows ; et al. (1992): *Die neuen Grenzen des Wachstums*, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart
- Meadows; et al. (2004): *Limits to Growth: The 30-Year Update*, Chelsea Green, White River Junction
- Plaschko, P.; Brod, K. (1995): *Nichtlineare Dynamik, Bifurkation und Chaotische Systeme*, Vieweg, Wiesbaden
- Romer, David (2001): *Advanced Macroeconomics*, McGraw-Hill, New York
- The World Bank (2005): *World Development Indicators*, World Bank Development Data Group, Washington
- Ventana Systems, Inc. (2005): Vensim PLE 5.4, Ventana Systems Inc, Cambridge, MA
- Vereinte Nationen (2003): *World Population Prospects: The 2002 Revision*, United Nations, New York
- Wiedemann, Thomas (2005): *Skript zur Vorlesung Simulation betrieblicher Prozesse*, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Dresden
- World Resources Institute (2005): www.wri.org, Washington
- Worm, Thomas; Karstedt, Claudia (2005): *Lob der Faulheit*, natur + kosmos, S. 53 – 61, Nov. 2005, natur media GmbH Verlag, Leinfelden-Echterdingen