

Thomas Berger

# Objektorientierte Implementierung eines Programmierungsansatzes mit Verhaltensheterogenität und betrieblichen Interaktionen

Die Vorzüge von Programmierungsmodellen in der Landwirtschaft sind wohlbekannt und erklären die Vielzahl von Anwendungen zur Politikanalyse. Es bestehen aber auch gewisse theoretische Schwächen, die u.a. damit zusammenhängen, dass die zwischenbetrieblichen Beziehungen entweder stark idealisiert oder vollkommen ausgeblendet werden. Der vorliegende, mit dem GIL-Preis 2000 ausgezeichnete Beitrag zeigt, dass es neuere Methoden aus der Informatik ermöglichen, Verhaltensheterogenität und betriebliche Interaktionen in Programmierungsmodellen zu berücksichtigen und damit ihren Anwendungsbereich für die Analyse von Technologiealternativen und marktorientierten Politikoptionen wesentlich zu erweitern.

## 1 Einführung

Nach etlichen Dekaden, geprägt durch umfangreiche staatliche Interventionen, zeichnet sich in der agrar- und entwicklungspolitischen Diskussion ein allgemeiner Trend zu „Marktlösungen“ ab. Modernisierung und Wettbewerb gelten heute als die Rezepte für vielfältige Probleme der Nahrungsmittelerzeugung und der ländlichen Räume. Es stellt sich deshalb die Frage nach geeigneten dynamischen Theorie- und Modellansätzen, die Innovationsprozesse, Ressourcennutzung und marktwirtschaftlichen Wettbewerb der ökonomischen Analyse zugänglich machen.

Vor diesem Hintergrund bestand die Zielsetzung von Berger (2000) darin, mit einem mikroökonomisch fundierten Simulationsmodell den möglichen technischen und strukturellen Wandel in einer konkreten Agrarregion zu erforschen und Szenarien für Politikalternativen zu entwerfen. Der hierzu entwickelte Modellansatz gehört sowohl in die Klasse der Multi-Agenten-Systeme, weil viele unabhängige Entscheidungseinheiten miteinander agieren, als auch der Zellulären Automaten, weil räumliche Nachbarschaftsbeziehungen über Pacht- und Wassermärkte eine tragende Rolle spielen. Das Modell von Balmann (1995) und die Erweiterung von Berger (1995) dienen dabei als Ausgangspunkt für die Weiterverfolgung der agentenbasierten Zellulärmodellidee. Da eine umfassende Verwirklichung von Verhaltensheterogenität und Interaktionen nicht innerhalb dieser einfachen Modellstruktur und programmtechnischen Realisierung möglich ist, musste der Quelltext vollkommen neu geschrieben werden. Die Implementierung des Multi-Agenten-Modells wurde dabei in der objektorientierten Programmiersprache C++ vorgenommen, deren Sprachmittel eine effiziente Abbildung von diversifizierten Verhaltensmustern der jeweiligen Betriebstypen ermöglichen. Für die Durchführung der

Simulationsexperimente wird mit Hilfe eines Szenariomanagers auf einen Cluster aus Windows NT-Einzelplatzrechnern zurückgegriffen. Der Schwerpunkt dieses Artikels liegt auf den eher technischen Details; für die ausführliche Darstellung und Auswertung der Simulationsrechnungen wird auf Berger (2000) verwiesen.

## 2 Modellidee

In einem Beitrag für die „Zeitschrift für Agrarinformatik“ beschreibt Balmann (1993), wie sich das Konzept des Zellulären Automaten zur Abbildung der räumlichen Anordnung von fiktiven landwirtschaftlichen Betrieben nutzen lässt. Die Entscheidungen der zufällig im Gitternetz verteilten Modellbetriebe werden durch einzelbetriebliche LP-Probleme repräsentiert. Mit seinem einzelbetrieblich gestützten Zellulärmodell führt Balmann (1995) dann den Existenzbeweis für Pfadabhängigkeiten in der Agrarstrukturentwicklung. Sofern nämlich sehr geringe Wiederverkaufswerte für den Anlagenbestand unterstellt werden, geben wesentlich weniger Modellbetriebe die landwirtschaftliche Produktion auf und machen damit Parzellen für mögliche Flächenaufstockungen der überlebenden Betriebe frei. Das Ausmaß der Flächenabgabe und der Betriebsauflösungen hängt dabei, so zeigen weitere Simulationsergebnisse, von der Ausgangssituation des Zellulären Automaten ab. Wenn viele kleinere Betriebseinheiten auf dem Gitternetz angesiedelt sind, zeigt sich ein wesentlich langsamerer „Agrarstrukturwandel“, als wenn nur mittelgroße Betriebe vorhanden sind.

### 2.1 Verhaltensheterogenität

Die hier entwickelte Multi-Agenten-Modellklasse geht ebenfalls nach dem Prinzip vor, die vielfältigen

Entscheidungsprobleme eines landwirtschaftlichen Betriebs-Haushalts in kleinere, nacheinander zu lösende Probleme zu unterteilen. Auch weiterhin ist der wesentliche Bestandteil die Methode der Linearen Programmierung zur Ableitung der individuellen Agenten-Entscheidungen. Als wichtigste konzeptionelle Änderung werden jedoch Agenten eingeführt, die sich während des gesamten Simulationslaufs heterogen und kommunikativ verhalten und damit zwei wesentliche Eigenschaften von Multi-Agenten-Systemen, vgl. Gilbert/Troitzsch (1999, 158ff.), aufweisen. Für die einzelnen Agenten gelten etwa unterschiedliche Technologien, Zinssätze und Opportunitätskosten sowie abweichende Formen des Innovationsverhaltens und der Erwartungsbildung. Durch diesen hohen Grad der Verhaltensheterogenität lassen sich in der Realität auftretende betriebstypenspezifische Verhaltensweisen und vor allem selektive Agrarpolitiken implementieren, vgl. Brandes/Recke/Berger (1997, 408ff.).

Auch die Diffusion von Innovationen kann als ein Kommunikationsprozess angesehen werden, bei dem die „Nachzügler“ von den Anwendern davon überzeugt werden, ebenfalls diese Neuerung zu übernehmen. Wie Rogers (1995, 167) mit Verweis auf zahlreiche empirische Studien ausführt, legen Landwirte in den kritischen Phasen ihres Adoptions-Entscheidungsprozesses großes Gewicht auf die persönlichen Beurteilungen von Vertrauenspersonen, mit denen sie im Informationsaustausch stehen. Als Schwellenwert wird dabei derjenige Anteil aus dem engeren Personenkreis definiert, der mindestens notwendig ist, damit ein Betriebsleiter ebenfalls die neue Technologie erstmalig nutzt. Wenn sich beispielsweise ein Landwirt gewöhnlich mit zehn Berufskollegen und Freunden über die Vorzüge von Innovationen und ihre Implementierung austauscht und selbst die Neuerung übernimmt, nachdem acht dieser Personen sie angewendet haben, beträgt sein Schwellenwert 80%. Individuen mit niedrigen Schwellenwerten („early adopters“) wenden deshalb eine Innovation frühzeitig an, bevor dies die große Mehrheit tut, während Individuen mit hohen Schwellenwerten („laggards“) erst, wenn fast die gesamte Gruppe die Neuerung angenommen hat, gleichziehen. Dieser Diffusionsansatz ist somit dem in der Literatur als „entrepreneurial inertia“ bezeichnetem Konzept zuzurechnen, das auch dem berühmten Treitmühlenmodell von COCHRANE (1979) zugrunde liegt. Wie bei den klassischen Diffusionsanalysen werden für das Multi-Agenten-Modell mit Hilfe von empirischen Studien sogenannte Erstanwenderkategorien („adopter categories“) gebildet, in die Betriebsleiter mit gleichen Schwellenwerten gruppiert werden. Es wird weiterhin postuliert, dass sich ihre Innovationsübernahme durch einen zweistufigen Entscheidungsfindungsprozess repräsentieren lässt. Zunächst prüfen die Modellagenten die aktuelle Verbreitung einer spezifischen Innovation in ihrem Netzwerk („exposure“). Nur wenn ihr persönlicher Schwellenwert („threshold“) erreicht ist, stellen sie Investitionskalküle unter Einbeziehung der jeweiligen Neuerung an und entscheiden dann nach einer Annuitätenmethode über die tatsächliche Anschaffung.

## 2.2 Unmittelbare Interaktionen

Als weitere wichtige Änderung im Gegensatz zu den beiden Vorläuferarbeiten Balmann (1995) und Berger (1995)

sind die unmittelbaren Interaktionen zwischen den Betrieben zu nennen. Die Agentenbetriebe pachten ihre Parzellen nicht mehr von einem außerlandwirtschaftlichen Bodenbesitzer (sozusagen dem Spielleiter), der die Flächen ohne ökonomische Intentionen zu jedem Pachtpreis größer Null vergibt. Stattdessen wird mit Hilfe eines Auktionsmechanismus der bilaterale Handel zwischen Eigentümern und Pächtern auf den Bodenmärkten vermittelt. Die Pachtpreise bilden sich hier durch das lokale Angebot und die lokale Nachfrage, was eine räumliche Preisdifferenzierung ermöglicht.

Weitere Interdependenzen zwischen den Agenten ergeben sich durch die Bewässerungsabflüsse, die in der Landwirtschaft der semiariden und ariden Gebiete eine große Rolle spielen können. Bewässerungsverfahren mit niedriger Bewässerungseffizienz führen i.d.R. zu hohen Anteilen von „Return-flows“, die von den flussabwärts gelegenen landwirtschaftlichen Betrieben wiedergenutzt werden. Infolgedessen ist die Berücksichtigung der räumlichen Verteilung von Frischwassernutzung und Wiedernutzung essentiell für Betriebsmodelle in Entwicklungsländern mit typischerweise geringen Wirkungsgraden in der Bewässerung. Die Datenrepräsentation in Zellulären Automaten verbunden mit einem Wasserbilanzierungsmodell ermöglicht die Berücksichtigung dieser räumlichen Beziehungen.

## 2.3 Tatsächliche Agrarregion

Überdies soll keine Neubesiedlung einer fiktiven Agrarregion untersucht, sondern die realitätsnahe Abbildung einer tatsächlichen Region erreicht werden. Dies erfordert ein Programm-Modul, mit dessen Hilfe die Ausgangsdaten zur Agrarstruktur, also Bodenkarten mit Betriebsstandorten und hofeigenen Parzellen sowie die einzelbetrieblichen Daten, „eingelesen“ werden können. Die angestrebte, hohe Realitätsnähe erfordert außerdem die Berücksichtigung von unterschiedlichen Bodenqualitäten, von Dauerkulturen und von Eigentumsflächen. Als Untersuchungsgebiet wird das Melado-Wassereinzugsgebiet in Chile gewählt, in dem ein Projekt zum Technologietransfer der Universität Talca angesiedelt ist. Die mögliche Diffusion der dort getesteten Innovationen kann mit dem Modell in speziellen Politikszenerarien näher untersucht werden. Insbesondere soll der Frage nachgegangen werden, ob die kontrovers diskutierte Assoziierung Chiles zur Zollunion MERCOSUR Einkommenschancen für die Landwirtschaft bietet oder eher ihren vorhergesagten Ruin bedeutet.

## 3 Aufbau des Modells

Um die weitere Beschreibung anschaulich zu halten, wird zunächst anhand von Abbildung 1 der Modellaufbau verdeutlicht, und zwar besteht der neue agentenbasierte Modelltyp aus einer ökonomischen und einer hydrologischen Teilkomponente. Dabei wird ein „holistischer Ansatz“ mit einer engen Verbindung beider Teilkomponenten gewählt, so dass eine konsistente Modelleinheit mit einem integrierten Analyserahmen vorliegt. Dies erleichtert insbesondere die Abbildung von Interdependenzen zwischen sozio-ökonomischen und biophysikalischen Prozessen, da beide Modellteile zur Simulationslaufzeit entsprechend Variablen

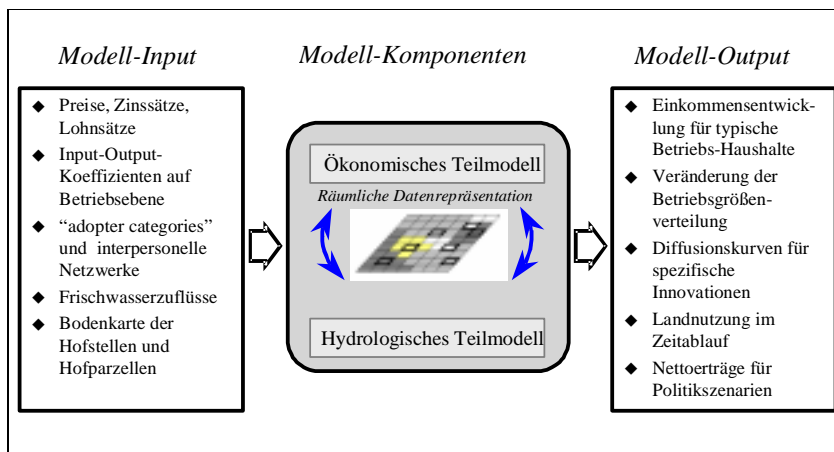


Abb.1: Bestandteile des Multi-Agenten-Modells

austauschen und so direkt interagieren. Das Bindeglied zwischen den beiden Teilmodellen ist die räumliche Repräsentation der Daten mit Hilfe eines einfachen, rasterbasierten Geographischen Informationssystems (GIS). Wie Abbildung 1 zu entnehmen ist, besteht der Modellinput aus ökonomischen, technischen, sozialen sowie wasserbezogenen und räumlichen Daten. Auf der Outputseite liefert das Modell einen umfangreichen Datensatz, der die Analyse der regionalen Agrarentwicklung und von Politikenszenarien auf Mikro- und Makroebene erlaubt. Zu nennen sind dabei Daten zur Einkommensentwicklung für typische Betriebsgruppen und die Veränderung in der Betriebsgrößenstruktur. Außerdem lassen sich Diffusionskurven für spezifische Innovationen ableiten und die Bodennutzung über die Zeit verfolgen. Speziell für die

Politikanalyse können mit etwas zusätzlichem Aufwand die Nettoerträge von Politikoptionen berechnet werden.

### 3.1 Beschreibung der Teilmodelle

Der gedankliche Ausgangspunkt für das ökonomische Teilmodell ist das von Day (1971) vorgestellte Konzept des Agrarsektors als ein Adaptives Mikrosystem, in dem die individuellen Entscheidungsträger als autonome Einheiten untereinander und mit ihrer Umwelt interagieren (vgl. auch Berger/Brandes (1998)). Für das Simulationsmodell werden die von einem realen Betriebs-Haushalt im Verlauf eines Wirtschaftsjahres zu lösenden, häufig sehr komplexen Entscheidungsprobleme in eine Sequenz von kleineren Einzelproblemen untergliedert (vgl. Abbildung 2).

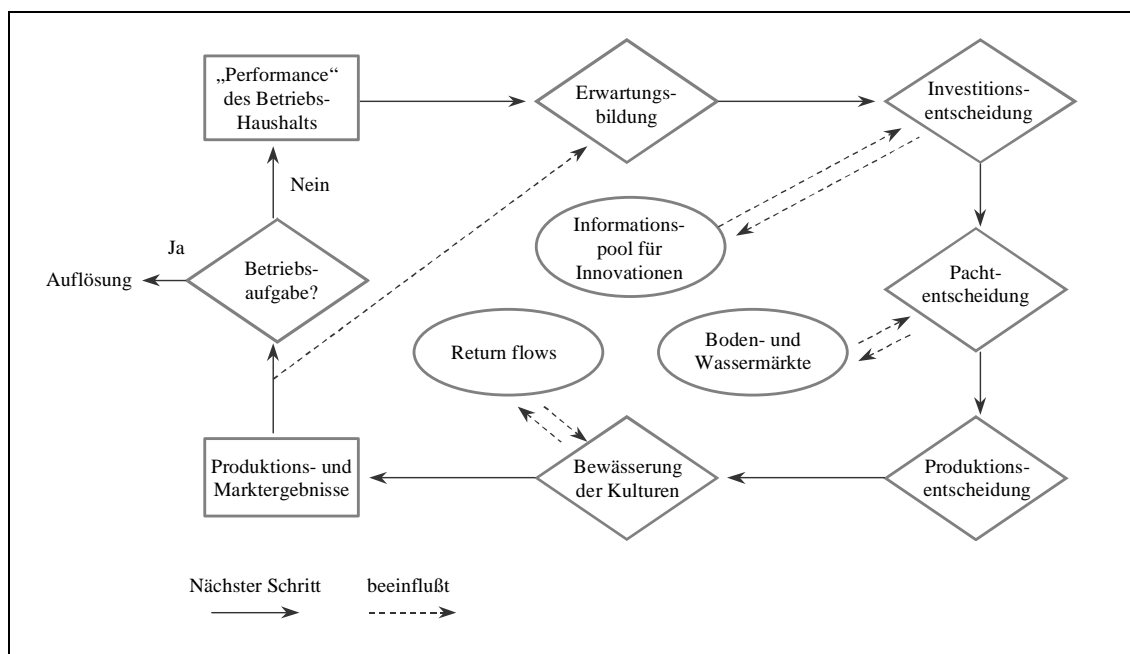


Abb. 2: Abfolge der Periodenereignisse für einen Modellhaushalt

Zielfunktionskoeffizienten	RHS	Zielfunktionskoeffizienten
Investitionskapazitäten <sup>1</sup>	Kapazitäten	Investitionsaktivitäten <sup>2</sup>
Arbeitskräfte		Verkaufsaktivitäten
Liquide Mittel		Zukaufaktivitäten
Ackerumzäunung		Vorfahren im Pflanzenbau
Wasseranlieferung		Vorfahren der Tierhaltung
Maschinen		Dauerkulturen
Stallplätze		
Obstbaufleichen		
Fruchtfolgeerwartungen		

Abb. 3: Übersicht über das verwendete LP-Tableau

Es handelt sich im wesentlichen um Fragestellungen, die als lineare Programmierungsaufgaben formalisiert werden können. Das dazu von den Agenten-Haushalten verwendete LP-Tableau ist in Abbildung 3 in Übersichtsform dargestellt. Zu unterscheiden sind in dieser Matrix der Dimension 120 \* 240 (Füllungsgrad: 9,8%) verschiedene Gruppen von Aktivitäten und Restriktionen. Die Agenten-Haushalte bedienen sich dieser Ausgangsmatrix und tragen ihre jeweiligen Kapazitäten (RHS-Variablen) sowie Preiserwartungen (Zielfunktionskoeffizienten) ein; die technischen Koeffizienten bleiben bis auf die der Dauerkulturen unverändert. Die hier als „Investitionsaktivitäten“ und „Investitionskapazitäten“ bezeichneten Zeilen und Spalten des LP-Tableaus werden speziell für die Investitionsplanung und Innovationsentscheidungen benötigt. Als Ziel der Betriebs-Haushalte gilt hier die Maximierung des erwarteten Haushaltseinkommens unter weitest gehender Vermeidung von Flächenabgaben. Auf die von Hazel/Norton (1986, 58ff.) empfohlenen, mehrperiodisch gemischt-ganzzahligen Planungsverfahren wird aufgrund des hohen Rechenaufwands verzichtet. Statt dessen wird für die Investitionsplanung ein heuristisches gemischt-ganzzahliges Vorgehen gewählt, das auf einperiodischer LP und dem Simplex-Algorithmus basiert. Der im Modell implementierte Planungsalgorithmus wird in Berger (2000, Kap. 5) ausführlich erläutert. Es sei an dieser Stelle im Hinblick auf zukünftige Modellanwendungen darauf hingewiesen, dass das LP-Tableau nicht auf diese spezielle Form fixiert ist. Der Modellansatz ist so flexibel angelegt, dass auch andere technische Zusammenhänge dargestellt werden können.

Ein weiteres Entscheidungsproblem, das mit Hilfe des LP gelöst wird, ist das der Verpachtung und Zupachtung von Boden-Wasser-Bündeln unterschiedlicher Bodengüte und monatlicher Wasseranlieferung (Wassernutzungsrechten). Für seine Pachtüberlegungen orientiert sich dabei ein Modellbetrieb vernünftigerweise an den Opportunitätskosten für Boden und Wasser und vergleicht sie mit seinen betriebseigenen Schattenpreisen. Ein spezielles Boden- und Wassermarktmodul bildet dazu den bilateralen Handel zwischen expansions- und abstockungswilligen Agentenbetrieben ab.

Das hydrologische Teilmodell teilt den landwirtschaftlichen Agenten-Betrieben ihr Bewässerungswasser unter Berücksichtigung der Wiederverwertung von „Return-flows“ zu, die bei traditioneller Bewässerung etwa die Hälfte des Frischwasserzuflusses betragen können. Für weitere Details hinsichtlich der Modellgleichungen und -parameter, der Datengewinnung und Modellkalibrierung wird auf Berger (2000, Kap. 5 und Anhang) verwiesen.

Die räumliche Dimension stellt den gemeinsamen Bezugsrahmen für die beiden Teilmodelle und die zwischen ihnen zu modellierenden Wechselwirkungen dar. Wie in den meisten Geographischen Informationssystemen (GIS) sind die Daten in einem Gitternetz aus Flächeneinheiten räumlich organisiert. Jede Gitterzelle der gewählten Größe von 2,5 ha hat verschiedene biophysikalische und ökonomische Attribute, die sich im Laufe der Zeit verändern können. Lokale Interaktionen ergeben sich dabei durch die „Return-flows“ der Bewässerung und durch den Austausch von bewässerten Parzellen auf Pachtmärkten. Das wichtigste biophysikalische Attribut ist der „Bodentyp“, der wesentlich die Nutzungsmöglichkeiten (Obstbau und Weideland als Extrema) vorgibt. Die übrigen Attribute, insbesondere die Wasseranlieferung, die Bodenbedeckung oder der Nutzungszustand, werden durch die autonomen Entscheidungen der Nutzer-Agenten und Eigentümer-Agenten bestimmt.

### 3.2 Programmablauf und Periodenereignisse

Der Programmablauf gestaltet sich wie folgt: Zunächst wird die Modellregion sektorweise initialisiert, d.h. es werden die Bodenkarten mit Gitterdaten zu den Betriebsstandorten, den Hofparzellen und den Bodentypen eingelesen sowie die Betriebsobjekte angelegt. Dabei werden die einzelnen Agenten mit permanenten Arbeitskräften und Besatzkapital ausgestattet sowie insbesondere die räumlichen Bezüge zu ihren hofeigenen Parzellen hergestellt. Mit Hilfe von Preis- und Wasserdaten, die ebenfalls einzulesen sind, initialisieren die Agenten ihre Preis- und Wassererwartungen.

Anschließend geht es in die erste Simulationsperiode, bei der sektorweise in Wasserfließrichtung die Agenten-Haushalte die in Abbildung 2 wiedergegebenen Periodenereignisse durchführen. Die Agenten starten oben links mit den Betriebsergebnissen der Vor- bzw. Initialisierungsperiode und bilden ihre Erwartungen, führen dann jeweils die Investitionsplanung durch, und erst wenn alle Agenten-Betriebe diesen Schritt vorgenommen haben, die Pachtentscheidungen, usw. Das Programm behandelt also zeitlich simultan ablaufende Prozesse in sequenzieller Vorgehensweise, stellt jedoch durch besondere Datenstrukturen und Mechanismen, etwa auf den Pachtmärkten, eine gewisse Parallelisierung her.

Zum Ende einer Periode, nach Feststellung der Produktions- und Vermarktungsergebnisse, stellen die Agenten-Haushalte ihre Fortführungsüberlegungen an. Sofern sie sich für die Betriebsauflösung entscheiden, werden ihre Flächen verkauft. Betriebsneugründungen und -fusionen werden aufgrund der nur geringen Attraktivität eines Engagements in der chilenischen Landwirtschaft für die Modellszenarien vernachlässigt.

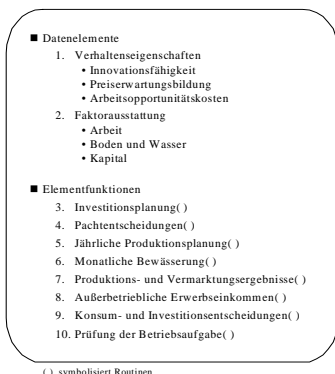


Abb. 4: Komponenten des Objekts „landwirtschaftlicher Betriebs-Haushalt“

Für alle Perioden werden Pachtmarkt- und Wasserstatistiken, Diffusionsdaten, Bodennutzerkarten und die wichtigsten einzelbetrieblichen Informationen in Output-Dateien geschrieben. Bei den betrieblichen Informationen handelt es sich neben Erfolgskennziffern insbesondere um die Kapazitätsvektoren sowie Primal- und Dualwerte. Mit Hilfe dieser Daten können die Aktivitäten der einzelnen Agenten-Haushalte beispielsweise mit externen LP-Solvern überprüft werden.

### 3.3 Objektorientierte Implementierung

Wie Barton/Nackmann (1994, 12) kurz und treffend zusammenfassen: „The basic idea of object-oriented development is to decompose a software system on the basis of objects – entities characterized by actions – instead of on the basis of functions or data, as it is done in more traditional design methodologies.“ Dabei beschreibt eine „Klasse“ sowohl die Attribute als auch das Verhalten eines Objekts, wie Josuttis (1994, 28) mit einem einfachen Beispiel verdeutlicht: Die Klasse Auto definiert z.B., dass ein Auto aus Motor, Karosserie und Rädern besteht (Attribute), und dass man in ein Auto einsteigen, damit fahren und aussteigen kann (Verhalten). In der traditionellen, strukturierten Programmierung müssen dagegen relativ aufwendig die Operationen und Randbedingungen für das Verhalten eines Objekts als Ergänzungen programmiert werden. Der große Vorteil der objektorientierten Programmierung für die Repräsentation von Multi-Agenten-Systemen liegt damit auf der Hand.

Der Quelltext des vollkommen neu geschriebenen Programms ist recht umfangreich und umfasst ausgedruckt etwa 380 Seiten bzw. 17.000 Zeilen. Im Vergleich dazu würde es die einfache Zellular-Modellversion von Berger (1995) auf 80 Seiten bringen. Natürlich ist die Länge eines Quelltextes kein guter Indikator für die Qualität eines Computerprogramms, auch kann er nicht mit Anwendungen mit grafischen Benutzeroberflächen (GUI) verglichen werden, bei denen durch die visuellen Komponenten der Quelltext ja beträchtlich anwächst. Dennoch soll diese Größenangabe eine ungefähre Vorstellung über die notwendigen Programmierarbeiten und den Aufwand beim Testen des Programms vermitteln. Hierbei kommen jedoch die großen Vorteile der objektorientierten Implementierung des Programmcodes im Vergleich zu traditionellen,

prozeduralen Computerprogrammen zum Tragen, die lediglich mit den Sprachmitteln „einfache Sequenz“, „Iteration“ und „Verzweigung“ aufgebaut sind. Zum einen ist die Programmstruktur trotz des großen Umfangs relativ übersichtlich und damit für Außenstehende eher nachzuvollziehen. Vor allem ist das Programm sehr flexibel und kann mit vergleichsweise geringem Aufwand für andere Regionen und Fragestellungen modifiziert werden, da der Code wesentlich leichter abzuändern und zu erweitern ist, als dies bei der sogenannten strukturierten Programmierung möglich wäre. Ein weiterer vorteilhafter Aspekt eines objektorientierten Programms ist die einfache Portierbarkeit des Programmcodes, der im vorliegenden Fall unter Windows 95/NT sowie unter UNIX verwendbar ist.

Die wichtigsten Objekte bei der Implementierung des ökonomischen Teilmodells stellen natürlich die landwirtschaftlichen Betriebs-Haushalte dar, die jeder für sich, als autonome Agenten, mit ihrer näheren Umgebung interagieren. Ein einzelner Agenten-Haushalt (in Lesart der objektorientierten Programmierung: ein konkretes Objekt der Klasse Betriebs-Haushalt) umfasst dabei eine Vielzahl von Komponenten, die sich wie in Abbildung 4 in „Datenelemente“ (Attribute) und „Elementfunktionen“ (Methoden oder Operationen) unterteilen lassen. Verschiedene Datenelemente halten die Ausstattung der Agenten-Haushalte mit den „klassischen“ Produktionsfaktoren Arbeit, Boden und Kapital fest sowie deren Veränderung über die Zeit. Die dazu nötigen „Inventarobjekte“ gehören ihrerseits Klassen mit eigenen Datenelementen und Elementfunktionen an, auf deren weitere Beschreibung jedoch verzichtet wird.

Die wichtigsten Objekte des hydrologischen Teilmodells sind die Bewässerungssektoren, für die monatliche Wasserbilanzen aufgestellt werden (vgl. Abbildung 5, links). Bewässerungssektoren stellen hydrologische Einheiten in Untereinzugsgebieten dar, in denen das Bewässerungswasser annahmegemäß einmal wiedergenutzt werden kann. Ihre wesentlichen Datenelemente sind Frischwasserzuflüsse, für die die Agentenbetriebe Wasserrechte halten, Zuflüsse aus stromaufwärts gelegenen Sektoren, Sektorabflüsse und der innerhalb des Sektors wiedernutzbare Wasseranteil. Außerdem sind die in die Sektorklasse eingebetteten Objekte „Bodenkarte“ und „Pachtmarkt“ zu nennen, die hier jedoch nicht weiter erläutert werden. Der überwiegende Teil der Elementfunktionen dient dazu, die monatlichen Wasserbilanzen aufzustellen und an die einzelnen Agenten-Betriebe Bewässerungswasser entsprechend ihrer Wasserrechte zuzuteilen. Die Interdependenzen zwischen den Bewässerungssektoren werden von übergeordneten Objekten einer Klasse „Untereinzugsgebiet“ abgewickelt, die hier ebenfalls nicht näher beschrieben werden sollen.

Das zentrale Objekt und gewissermaßen das Bindeglied zwischen dem ökonomischen und dem hydrologischen Teilmodell ist die „land- und forstwirtschaftlich nutzbare Parzelle“, die einer Zelle im Gitternetz des Zellulären Automaten entspricht. Die Datenkomponenten eines Parzellenobjekts sind in Abbildung 5, rechts zusammengefasst, allen voran das Attribut „Bodentyp“, das wesentlich die Nutzungsmöglichkeiten (Obstbau und Weideland als Extrema) vorgibt. Für die vorliegende Arbeit wird dabei eine konstante Bodenqualität unterstellt; in Zukunft sind hier interessante Modellerweiterungen etwa zur Bodenerosion als Folge von Bewirtschaftungsmaßnahmen möglich. Die übrigen Attribute, insbesondere die Bodenbedeckung oder der Nutzungszustand, werden wie bereits erwähnt durch die autonomen Entscheidungen der Nutzer-Agenten und Eigentümer-Agenten bestimmt.

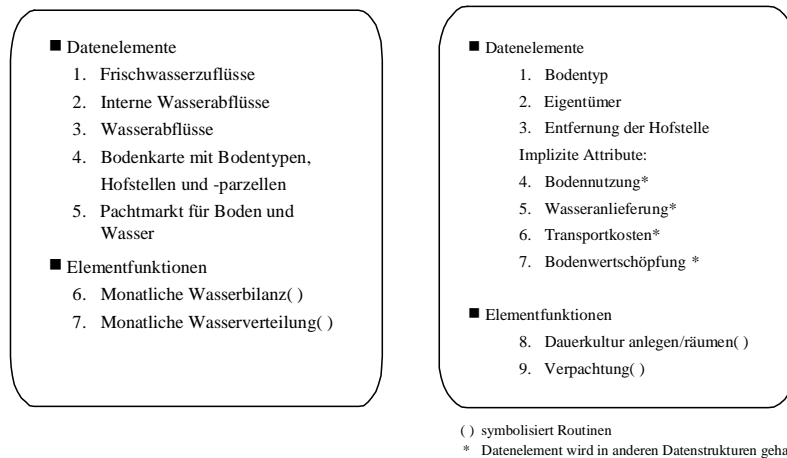


Abb. 5: Komponenten der Objekte „Bewässerungssektor“ und „Parzelle“

Zum Abschluss dieser eher technischen Ausführungen sollen noch einige Details zum verwendeten LP-Solver, der meist genutzten Routine des Programms und damit dem entscheidenden Faktor für die Programmlaufzeit, gegeben werden. Trotz der bekannten Schwächen des Simplex-Algorithmus bei der Lösung von größeren LP-Aufgaben hat er sich, wie Kistner (1998, 93f.) ausführt, in der Praxis äußerst gut bewährt. Für das Simulationsmodell wird hier gezwungenermaßen ein eigener Simplex-Solver implementiert, da zum Zeitpunkt der Programmierarbeiten keine geeignete kommerzielle Programmbibliothek (DLL) verfügbar war. Der Programmcode ist dabei im wesentlichen angelehnt an Wilkinson/Reinsch (1971), wobei jedoch aus Vereinfachungsgründen auf eine automatische Skalierung sowie Permutation der Spalten verzichtet wird. Statt dessen wird das LP-Ausgangstableau weitestgehend auf Eins skaliert und eine vorteilhafte Spaltenreihenfolge gewählt. Insgesamt erscheint der LP-Solver als äußerst leistungsfähig; denn ein Simulationslauf mit ungefähr 1,2 Mio. LP benötigt auf einem Pentium-II-Rechner mit einer Taktfrequenz von 450 MHz, 128 MByte Arbeitsspeicher sowie dem Betriebssystem Windows NT ca. 50 Stunden.

Für die Durchführung der Simulationsrechnungen unter Windows 95/NT wird ein für diese Arbeit konzipierter Szenario-Manager benutzt, der von Matthias Nott (mnott@mnsoft.org) erstellt wurde. Der Szenario-Manager nimmt die Zuteilung der zu rechnenden „Jobs“ auf mehrere PC vor und führt dazu auf einem Netzlaufwerk eine Liste nach dem Schwarze-Brett-Prinzip. Die Einzelplatzrechner holen sich dort einen unbearbeiteten Job ab, sperren ihn für die übrigen PC und übernehmen nach Beendigung der Simulationsrechnung einen neuen Auftrag. Die Aufgabe des Szenario-Managers entspricht also weitgehend dem Batch-Betrieb unter UNIX, wenngleich die Job-Verwaltung erheblich vereinfacht und zudem ungesichert abgewickelt wird. Der entscheidende Vorzug ist, dass außer den UNIX-Workstations auch Windows-PC für die Simulationsrechnungen genutzt werden können und enorme „Schlagkraft“ entwickelt wird, um einen treffenden Ausdruck aus der landwirtschaftlichen Praxis zu gebrauchen. Da die Simulation als Hintergrundprozess ausgeführt wird, kann der PC weiterhin für andere Anwendungen verwendet werden.

## 4 Simulationsszenarien

Für die Simulationsszenarien wird ein Datensatz einer Agrarregion in Chile verwendet, der aus verschiedenen empirischen Quellen zusammengestellt wurde. Die Untersuchungsfragen leiten sich aus dem Modellbedarf zur Politikbewertung ab, die mit der Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der chilenischen Landwirtschaft im Kontext des MERCOSUR-Assoziierungsabkommens zusammenhängt. Trotz der Forschungsanstrengungen und eingesetzten finanziellen Mittel im Technologietransfer und der Agrarberatung bestehen gewisse Zweifel, ob die in der Erprobung befindlichen Innovationen von den traditionellen Landwirtschaftsbetrieben übernommen werden und ob sie genügend Einkommen erzeugen können, um im harten Wettbewerb zu bestehen. Vor diesem Hintergrund versucht die vorliegende Arbeit, plausible Entwicklungspfade für die regionale Landwirtschaft aufzuzeigen und die möglichen Wirkungen von agrarpolitischen Maßnahmenbündeln abzuschätzen.

Die in Berger (2000) diskutierten Simulationsergebnisse belegen, dass die neue Modellklasse einen reichhaltigen und flexiblen Ansatz zum besseren Verständnis von Diffusionsprozessen und Ressourcennutzungsänderungen bietet. Mit Hilfe von Simulationsexperimenten lässt sich der „Möglichkeitenraum“ für die regionale Agrarentwicklung und das Ressourcenmanagement erforschen. Dabei kann das Multi-Agenten-Modell zur Beantwortung der folgenden Fragen beitragen:

- Wie hoch könnten die mögliche Diffusionsgeschwindigkeit und der maximale Verbreitungsgrad verschiedener Agrarinnovationen sein?
- Erreichen die Innovationen auch den traditionellen Teil der Landwirte und tragen sie in ausreichendem Maße zum Einkommen bei?
- Sind substantielle Änderungen in der Ressourcennutzung zu erwarten?
- Werden sich die Unterschiede zwischen bevorzugten und benachteiligten Standorten vergrößern?
- Welche direkten und indirekten Effekte von Politikoptionen lassen sich quantifizieren? Sofern soziale Friktionen auftreten, welche politischen Maßnahmen könnten zur Erleichterung und Abfederung der Strukturanpassung beitragen?

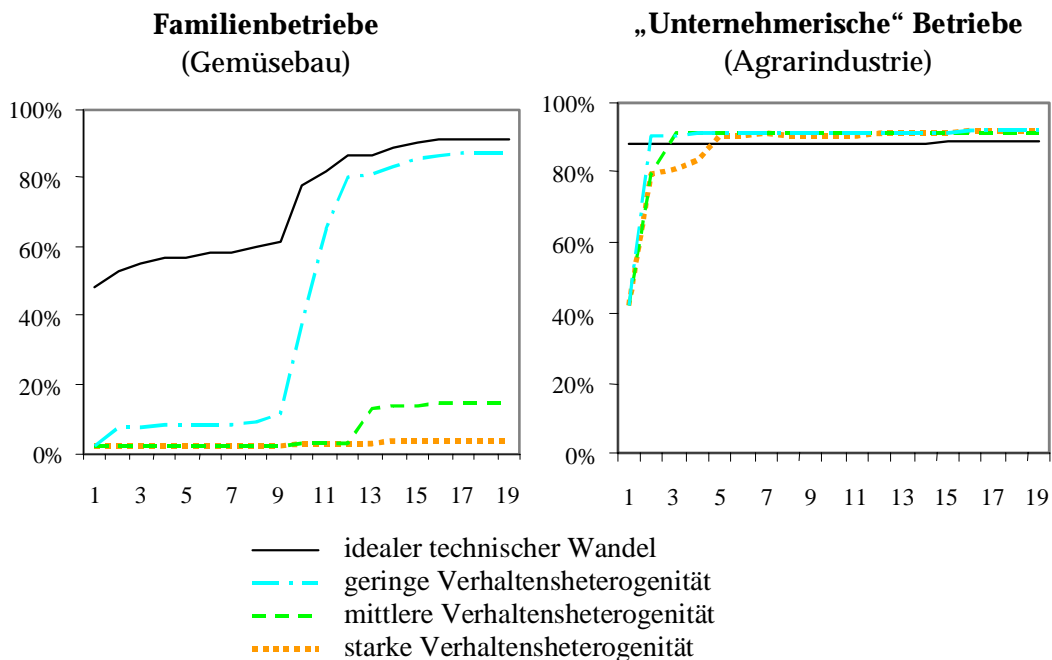


Abb. 6: Diffusionsmuster für spezifische Innovationen

- Lassen sich Tendenzen zur Auflösung von pfadabhängigen Strukturen erkennen? Zeichnen sich dabei Strukturbrüche ab, und wenn ja, unter welchen Bedingungen?

Für die Modellkalibrierung, Robustheitstests und konkrete Szenarioanalyse wird auf die ausführliche Darstellung in Berger (2000, Kap. 7) verwiesen, an dieser Stelle kann lediglich der Forschungsaspekt der Diffusionsmuster und „Tretmühleneffekte“ kurz angesprochen werden. Dazu wird in Abbildung 6 demonstriert, welche Ergebnisse das Modell hinsichtlich der Diffusionsverläufe für spezifische Innovationen liefert. Bestimmte Innovationen wie etwa ‚Anbauverträge mit der Agrarindustrie‘ diffundieren rasch und erreichen sehr hohe Verbreitungsgrade unter den unternehmerischen Betrieben (Betriebsgröße oberhalb 12 ha). Verhaltensheterogenität und Kommunikationseffekte spielen hier keine entscheidende Rolle, ganz im Gegensatz zu beispielsweise der Innovation ‚Gemüsebau‘ im Fall der Familienbetriebe (Betriebsgröße zwischen 2,5 und 12 ha). Dort finden sich beträchtliche Unterschiede in der Diffusionsgeschwindigkeit und dem Saturationsniveau, sofern weniger „ideale“ technologische Bedingungen in Form von a priori unvollständiger Innovationsinformation sowie häufigkeitsabhängigen Kommunikationseffekten unterstellt werden.

Wie weitere Simulationsrechnungen zeigen, bietet die Assoziierung zum MERCOSUR ein beträchtliches Einkommenspotential für die Landwirtschaft, zumindest für die agrar-ökologisch bevorzugte Melado-Region. Dieses Potential kann jedoch nur unter sehr optimistischen, „idealen“ technologischen Annahmen ausgeschöpft werden.

Sobald Verhaltensheterogenität und Kommunikationsprozesse in das Modell eingeführt werden, ergeben sich ähnlich moderate Einkommensentwicklungen wie in den vollkommen pessimistischen Szenarien ohne jeglichen technischen Wandel.

Politikmaßnahmen, wie sie der chilenische Agrarverband SNA gefordert hat, könnten die landwirtschaftlichen Einkommen zwar erhöhen, es stellt sich aber dann die Frage, ob insgesamt positive Wohlfahrtseffekte resultieren. Es scheint sich jedoch, so legen die Simulationsexperimente nahe, ein beträchtlicher Strukturwandel durch Betriebsaufgaben der nicht vom technischen Wandel erfassten landwirtschaftlichen Haushalte abzuzeichnen. Unter „idealen“ Bedingungen beträgt die jährliche Rate der Betriebsaufgaben durchschnittlich etwa 0,1%, bei Berücksichtigung von Verhaltensheterogenität und Kommunikationsnetzwerken ergeben sich jedoch die von Cochrane (1979) beschriebenen Verdrängungs- und Tretmühleneffekte. In erster Linie scheiden die weniger innovationsfreudigen Betriebe aus, im Fall der unternehmerischen Betriebe beispielsweise jährlich fast 6% der „laggards“. Aufgrund der teilweise ad hoc getroffenen Verhaltensannahmen zur Betriebsaufgabe, sollten diese speziellen Simulationsergebnisse nicht überinterpretiert werden. Die Ergebnisse laden jedoch nach Auffassung des Verfassers dazu ein, das Modell mit besseren empirischen Datensätzen auszustatten, um in weiteren Simulationsexperimenten die gefundenen Resultate zu erhärten bzw. Untersuchungen für andere Agrarregionen durchzuführen.

## 5 Literatur

- BALMANN, A. (1993): Modellierung regionaler Agrarstrukturentwicklungen mittels des Konzepts "zellulärer Automaten". Zeitschrift für Agrarinformatik, Heft 2, 34-41.
- BALMANN, A. (1995): Pfadabhängigkeiten in Agrarstrukturentwicklungen – Begriff, Ursachen und Konsequenzen. Berlin.
- BARTON, J.J., Nackmann, L.R. (1994): Scientific and Engineering, C++: An Introduction with Advanced Techniques and Examples. Addison-Wesley.
- BERGER, T. (1995): Zum Diffusionsprozeß von Innovationen – eine Modellierung der strukturellen Wirkungen. Diplomarbeit am Institut für Agrarökonomie, Göttingen.
- BERGER, T. (2000): Agentenbasierte räumliche Simulationsmodelle in der Landwirtschaft. Anwendungsmöglichkeiten zur Bewertung von Diffusionsprozessen, Ressourcennutzung und Politikoptionen. Agrarwirtschaft Sonderheft 168.
- BERGER, T., Brandes, W. (1998): Evolutionäre Ansätze in der Agrarökonomik. Agrarwirtschaft 47, 275-282.
- BRANDES, W., Recke, G., Berger, T. (1997): Produktions- und Umweltökonomik – traditionelle und moderne Konzepte. Stuttgart.
- COCHRANE, W. W. (1979): The Development of American Agriculture. Michigan.
- DAY, R.H. (1971): Rational Choice and Economic Behavior. Theory and Decision 1 (reprint).
- GILBERT, G.N., Troitzsch, K.G. (1999): Simulation for the Social Scientist. Open University Press.
- HAZELL, P.B.R., Norton, R.D. (1986): Mathematical Programming for Economic Analysis in Agriculture. New York.
- JOSUTTIS, N. (1994): Objektorientiertes Programmieren in C++. Von der Klasse zur Klassenbibliothek. Bonn.
- KISTNER, K.-P. (1998): Optimierungsmethoden. Einführung in die Unternehmensforschung für Wirtschaftswissenschaftler. 2. Aufl. Berlin.
- ROGERS, E. (1995): Diffusion of Innovations. 4. Aufl., The Free Press, New York.
- WILKINSON, J.H., Reinsch, C. (1971): Linear Algebra, Vol. II of Handbook for Automatic Computation. New York.

### **Objektorientierte Implementierung eines Programmierungsansatzes mit Verhaltensheterogenität und betrieblichen Interaktionen (T. Berger)**

#### **Zusammenfassung**

*Programmierungsmodelle erfreuen sich auch weiterhin großer Beliebtheit für die Politikanalyse in der Landwirtschaft, da sie eine detaillierte Berücksichtigung von Technologien erlauben und robuste Ergebnisse liefern. Es gibt jedoch auch Forschungsfragen, für die konventionelle Programmierungsansätze i.d.R. nur begrenzt einsetzbar sind, da sie gewisse theoretische Schwächen aufweisen. In einzelbetrieblichen Betriebsmodellen etwa werden zwischenbetriebliche Beziehungen und die räumliche Dimension weitestgehend ausgeblendet, während aggregierte*

*Sektormodelle eine perfekte Koordination über Betriebsgrenzen hinweg implizieren und gewisse einschränkende Annahmen zur Verhaltensheterogenität voraussetzen (Stichwort: Aggregationsfehler). Zur Beurteilung von Technologiealternativen, lokal angepasster Ressourcennutzung und marktorientierten Politikoptionen sind aber vielfach betriebliche Interaktionen im räumlichen Kontext bedeutsam. Ohne die Berücksichtigung der Verhaltensheterogenität von Akteuren lassen sich zudem Phänomene wie häufigkeitsabhängige Effekte, Pfadabhängigkeiten sowie technischer und struktureller Wandel nicht erklären.*

*Bereits in den sechziger Jahren entwarfen Richard Day und Theodor Heidhues die Modellidee eines adaptiven Mikrosystems, mit dem der strukturelle Wandel in der Landwirtschaft vorausgeschätzt werden sollte. Aufgrund der damals geringen Rechnerkapazitäten konnte jedoch nur ein adaptives Makrosystem realisiert werden, das mit den bekannten Problemen des Aggregationsfehlers behaftet war. Erst der hier entwickelte Modellansatz kann unter Ausnutzung heutiger Rechnerkapazitäten und objektorientierter Programmiersprachen den technischen und strukturellen Wandel als adaptives Mikrosystem abbilden.*

*Das wesentliche Kennzeichen dieses Multi-Agenten-Ansatzes ist die Modellierung der Verhaltensheterogenität von wirtschaftlichen Akteuren und der direkten Interaktionen zwischen ihnen. Mit Hilfe der neuen Modellklasse lassen sich ökonomische Theorien „durchspielen“, die zwar seit längerer Zeit bekannt sind, aber aufgrund fehlender bzw. inkonsistenter aggregierter Datensätze nicht getestet werden konnten. Vor allem aber ermöglichen derartige Modelle die Erfüllung der genannten alten, agrarökonomischen Träume. Die zukünftigen Anwendungsmöglichkeiten dieser Modellklasse sind vielfältig und die Grenzen des Möglichen noch lange nicht erreicht. Zum Zeitpunkt der Abfassung dieses Artikels wird ein 866 MHz-Pentiumrechner bereits zu einem Preis von DM 2.000 angeboten. Die Simulationsszenarien für die Melado-Region in Chile ließen sich jetzt fast in der Hälfte der vor einem Jahr benötigten Zeit berechnen.*

**Stichworte:** Programmierungsansatz, Multi-Agenten-Systeme, Zelluläre Automaten, technischer und struktureller Wandel in der Landwirtschaft

### **Objectoriented Implementation of a Programming Approach with Behavioral Heterogeneity and Interfarm Linkages (T. Berger)**

#### **Summary**

*This paper presents a spatial multi-agent programming model, which has been developed for assessing policy options in the diffusion of innovations and resource use changes. Unlike conventional simulation models used in Agricultural Economics, the model class described here applies an object-oriented approach by using autonomously acting farm-households and capturing the interactions among them endogenously. The individual choice of the farm-household among available production, consumption, investment and*

*marketing alternatives is represented in recursive linear programming models. Adoption constraints are introduced in form of network-threshold values that reflect the cumulative effects of experience and observation of peers' experiences. The simulation runs of the model are carried out with an empirical data set, which has been derived from various data sources of an agricultural region in Chile. Simulation results show that agent-based cellular automata modeling constitutes a powerful approach to better understand processes of technical and structural change.*

**Key words:** *Programming Approach, Multi-Agent Systems, Cellular Automata, Technical and Structural Change in Agriculture*

*Der Autor, Dr. Thomas Berger, arbeitet am Zentrum für Entwicklungsforschung der Universität Bonn, ZEF-Bonn, Walter-Flex-Str. 3, D-53113 Bonn. Er ist telefonisch erreichbar unter (0228) 73-4964 oder per Fax (0228) 73-1869. Seine e-mail-Adresse lautet: t.berger@uni-bonn.de*

