

# Agentenbasierte Modellierung von Landnutzungsdynamiken und Politikoptionen

## Agent-based Modeling of Land Use Dynamics and Policy Options

Thomas Berger

Zentrum für Entwicklungsforschung, Bonn

### Zusammenfassung

Agentenbasierte Modellierung bietet die technische Möglichkeit, biophysikalische und sozioökonomische Teilmodelle räumlich disaggregiert zu verknüpfen, um damit die Wechselwirkungen zwischen agrar- und umweltpolitischen Maßnahmen, betrieblichen Landnutzungsentscheidungen und Umweltprozessen abzubilden. Mit Hilfe von Computersimulationen können so mögliche Entwicklungspfade der Ressourcennutzung gerechnet und Spielräume für betriebliche Anpassung und politische Gestaltung aufgedeckt werden. Durch Anknüpfung an globale Modellsysteme sind Szenarioanalysen zur Untersuchung des globalen Wandels und der Auswirkungen auf Land- und Wasserressourcen auf regionaler und lokaler Ebene möglich. Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über den Stand der Entwicklung und des Einsatzes von agentenbasierten Modellsystemen und diskutiert ihre Anwendungseignung. Er skizziert ein agrarwissenschaftliches Forschungsprojekt zur agentenbasierten, integrierten Modellierung und schließt mit einer Liste von unmittelbar zu bearbeitenden Fragen.

### Schlüsselwörter

Multi-Agentensysteme; integrierte Modellierung; Land- und Wasserressourcen; Entscheidungsunterstützung; Agrar- und Umweltpolitik

### Abstract

Agent-based modeling offers the technical opportunity to spatially integrate biophysical and socio-economic model components, thereby capturing the interactions between agricultural and environmental policy measures, land use decisions and ecological processes. Development paths in the use of resources can be calculated with the help of computer stimulations which determine the range of possible farm adjustments and policy interventions. Through coupling with global modeling systems, scenario analyses can be run to investigate the impacts of global change on land and water resources at regional and local level. This article gives an overview of agent-based modeling applied to the study of land use dynamics and policy options. It outlines an agricultural research project on agent-based, integrated modeling and concludes with a list of open questions.

### Key words

Multi-agent systems; integrated modeling; land and water resources; decision support; agricultural and environmental policy

## 1. Dynamik von Landnutzungsänderungen

Die Erforschung von Landnutzungsdynamiken und geeigneten Agrarumweltpolitiken ist ein gesellschaftlich relevantes Forschungsfeld, zu dem die Agrar- und Ressourcenökonomik einen zentralen Beitrag leisten kann. Landnutzungsänderungen und die damit verbundenen wasserbaulichen Infrastrukturmaßnahmen haben unmittelbare ökonomische und ökologische Auswirkungen auf lokaler, regio-

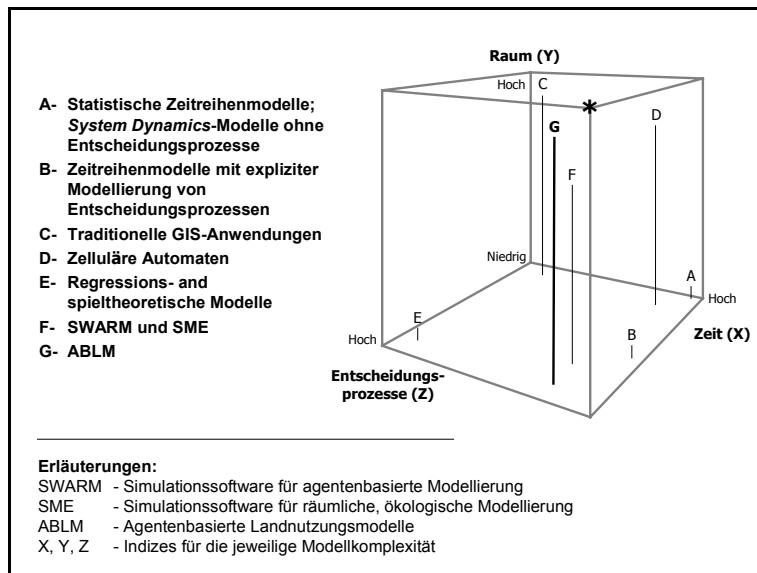
naler und globaler Ebene, etwa „feinskalige“ Aspekte der Landbewirtschaftung, Boden- und Wasserqualität und „groskskalige“ Aspekte der Welternährung, des Weltagrarhandels und globalen Klimawandels.<sup>1</sup> Besonders drastische Folgen werden Landnutzungsänderungen und globaler Wandel voraussichtlich für Entwicklungsländer haben, in denen die Agrarwirtschaft einerseits einen hohen Stellenwert hat, andererseits aber häufig Boden- und Wasserressourcen übernutzt werden. Hier Spielräume für Anpassung und Gestaltung aufzuzeigen, indem Frühwarnsysteme etabliert und mögliche Entwicklungspfade der Ressourcennutzung sowie korrigierende Politikmaßnahmen analysiert werden, ist eine wissenschaftliche Herausforderung, der z.Zt. verschiedene internationale Forschungsinitiativen versuchen Rechnung zu tragen. Zu nennen wären etwa das Forschungsprojekt „Land-Use and Land-Cover Change“ (LUCC), eingebettet in die internationale Biosphären- und Klimafolgenforschung IGBP und IHDP<sup>2</sup>, das „Challenge Program for Water and Food“ der internationalen Agrarforschungsinstitute CGIAR, Exzellenznetzwerke wie „Land Use Change Modelling Europe“ (LUCMODE) und das Programm des Bundesforschungsministeriums „Globaler Wandel des Wasserkreislaufs“ (GLOWA). Das übergeordnete Ziel dieser Forschungsinitiativen ist ein „optimierendes“ und grenzüberschreitendes Management von Wasser- und Landressourcen, wobei der spezifische Beitrag der Agrar- und Ressourcenökonomik darin liegt, Tradeoffs und Externalitäten zu identifizieren sowie Allokations- und Kompensationsmechanismen zu erforschen.

<sup>1</sup> Forschung zum ‚globalem Wandel‘ untersucht die Interaktionen zwischen globalen Umweltveränderungen und der ökonomisch-gesellschaftlichen Entwicklung, beispielsweise die Folgen des Klimawandels auf Wasserverfügbarkeit, Nahrungsmittelproduktion, Migration und Weltwirtschaft. Ein wichtiger Aspekt dabei sind ‚Landnutzungsänderungen‘, d.h. Änderungen in der Nutzung oder Bewirtschaftung des Landes durch den Menschen, die durch die damit verbundenen Änderungen der Bodendeckung wiederum auf das lokale oder globale Klima wirken können. Je nach Fragestellung und Datenverfügbarkeit beziehen sich die untersuchten Landnutzungsänderungen auf aggregierte Landnutzungsklassen wie Ackerland, Forst und bebaute Flächen oder auf nach Produktionsverfahren disaggregierten Landnutzungsformen. Einen ersten Überblick über das Thema bietet das Internet-Portal <http://www.climate-change.ch> sowie der Tagungsband von COENEN (2001).

<sup>2</sup> Hintergrundinformation zum LUCC-Projekt finden sich auf den Internetseiten des ‚International Geosphere Biosphere Programme (IGBP)‘ <http://www.igbp.kva.se/> und des ‚International Human Dimensions Programme On Global Environmental Change (IHDP)‘ <http://www.ihdp.org/>.

Eine wichtige Rolle in diesen Forschungsinitiativen nehmen integrierte Modellsysteme ein, die eine Analyse von Landnutzungsänderungen erlauben. Dabei lassen sich insbesondere mit Computersimulationen die Wechselwirkungen zwischen sozio-ökonomischen und biophysikalischen Prozessen abbilden, um so durch Szenarioanalysen die möglichen Wirkungen verschiedener Politikoptionen abzuschätzen. Abbildung 1 zeigt die Dimensionalität unterschiedlicher Modelltypen zur Abbildung der Dynamik von Landnutzungsänderungen. Die drei Achsen geben die jeweilige Modellkomplexität hinsichtlich Zeit, Raum und Entscheidungsprozessen wieder, basierend auf den von AGARWAL et al. (2003) vorgeschlagenen Komplexitätsindizes. Zeitliche Komplexität bezieht sich dabei auf das Zeitintervall und die Zeitspanne der modellierten Prozesse, räumliche Komplexität auf die räumliche Auflösung und Ausdehnung, und Komplexität der Entscheidungsprozesse auf die involvierten Akteure und ihren Wirkungsbereich.<sup>3</sup> Konventionelle Modelltypen werden meist entlang forschungsdisziplinärer Grenzen implementiert und weisen, wie etwa im Fall von statistischen, biophysikalischen Modellen (A), GIS-Anwendungen (C) sowie ökonometrischen Modellen (E), eine hohe Komplexität in einer der drei Dimensionen auf.<sup>4</sup> Für Interaktionen und Feedbacks zwischen unterschiedlichen Skalen und Aggregationsniveaus, wie sie typisch für Landnutzungsänderungen sind, resultieren für diese konventionellen Modelltypen allerdings eng umgrenzte Anwendungsbereiche, die nur Teilantworten für umfassende politikrelevante Fragestellungen zulassen.

**Abbildung 1. Modelltypen zur Abbildung von Landnutzungsänderungen**



Quelle: Basierend auf AGARWAL et al. (2003)

Durch eine Vielzahl von technischen und konzeptionellen Innovationen ergeben sich neue Perspektiven für die Implementierung von integrierten Modellsystemen, die bisher ansatzweise im Fall von Zellulären Automaten (D) und Simulationsansätzen wie SWARM oder SME (F) in Abbildung 1 verwirklicht worden sind. Leistungsfähige und kostengünstige Rechner, Fortschritte in Komplexitätstheorie und „Verteilte Künstlicher Intelligenz“ sowie die größere Datenverfügbarkeit durch Fernkundungssysteme und Datentransfer über das Internet bieten ein noch unausgeschöpftes Potenzial für die Verknüpfung von separaten Modellansätzen. Hinzu kommen neue Ansätze aus der Institutionenökonomik und politischen Theorie, etwa „Property Rights Analysis“ und „Legal Pluralism“, die zu einem besseren Verständnis der Entscheidungsprozesse unterschiedlicher Akteure beitragen. Konzepte der Transaktions- und Entscheidungskosten sowie der „Constitutional Economics“ ermöglichen weiterhin die Analyse von sich etablierenden institutionellen Mechanismen (BIRNER, 2003).

Vor diesem Hintergrund stellen die in diesem Beitrag vorzustellenden *Multi-Agentensysteme* ein viel versprechendes Modellierungskonzept zur Implementierung von integrierten Modellsystemen dar, um Landnutzungsänderungen zu erforschen und Planungsprozesse in der Agrar- und Umweltpolitik zu unterstützen. Der folgende Abschnitt 2 gibt einen Überblick über bisherige agentenbasierte Modellierungen zu Landnutzungsänderungen und schlägt die Unterscheidung von vier Modellklassen vor. Abschnitt 3 erläutert anschließend die Modellimplementierung für die

Klasse von empirisch parametrisierten Agentenmodellen. Abschnitt 4 diskutiert die Anwendungseignung dieser Modellklasse für Forschung und Agrarumweltpolitik. Abschnitt 5 stellt abschließend Bezüge zu anderen Forschungsprogrammen in den Wirtschaftswissenschaften und speziell der Agrarökonomik her, listet offene Forschungsfragen auf und skizziert ein agentenbasiertes Forschungsprojekt zu ihrer unmittelbaren Beantwortung.

## 2. Agentenbasierte Landnutzungsmodelle

Es ist einigermaßen schwierig, den Überblick über die Vielzahl von Anwendungen von Multi-Agentensystemen zu bewahren und agentenbasierte Landnutzungsmodelle entsprechend einzuordnen. Eine Anfrage an die Suchmaschine <http://www.google.de> mit den Suchbegriffen „multi-agent“ und „agent-based“ liefert annähernd 26 000 Treffer und eine Recherche bei einschlägigen Literaturdatenbanken wie EconLit, Wisonet und SSCI etwa 700 Fachveröffentlichungen. Die beiden Begriffe stammen ursprünglich aus der Informatik und beziehen sich dort auf ein Softwarekonzept für das Design von „Künstlicher Intelligenz“ und für die Implementierung von Hilfsprogrammen in der Informations- und Kommunikationstechnologie, so genannten „Softbots“ (Kurzform für „software robots“). Seit wenigen Jahren gibt es in den Geowissenschaften, den Sozial- und Wirtschaftswissenschaften und speziell der Agrarökonomik zunehmend mehr Computeranwendungen, die auf dieses Softwarekonzept rekurrieren.

<sup>3</sup> Der englische Begriff ‚domain‘ wird hier mit ‚Wirkungsbereich‘ übersetzt. Gemeint ist die weiteste Form der sozialen Organisation, innerhalb derer die Entscheidungsprozesse der Akteure modelliert werden, z.B. Nation, Region, Distrikt oder Haushalt.

<sup>4</sup> Vgl. AGARWAL et al. (2003) für eine vergleichende Beschreibung der Modelltypen A bis F.

## 2.1 Definition

Gemäß der Definition des Forschungsberichts von PARKER et al. (2002) für die oben erwähnte internationale Forschungsinitiative „Land-Use and Land-Cover Change“ bestehen agentenbasierte Landnutzungsmodelle (im Folgenden abgekürzt ABLM) aus zwei Modellkomponenten:

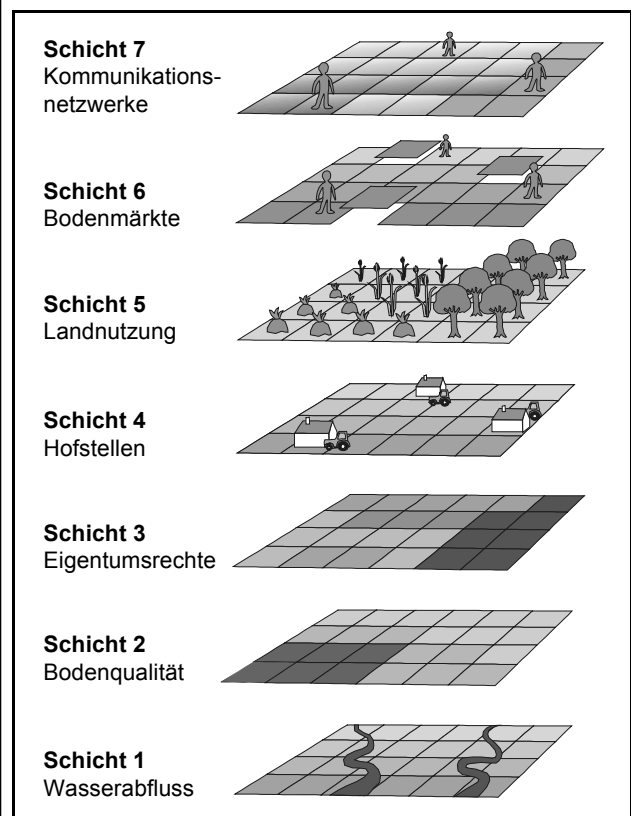
- einem Zellularmodell zur Abbildung der zu untersuchenden Landschaft, wobei dieses Zellularmodell auf unterschiedlichen räumlichen Modellierungstechniken basieren kann, z.B. auf zellulären Automaten, räumlichen Diffusionsmodellen und Markov-Modellen,<sup>5</sup>
- einem agentenbasierten Modell zur Abbildung von Entscheidungsprozessen menschlicher Akteure und ihrer Interaktionen. Das Agentenmodell umfasst autonome Entscheidungseinheiten („computational agents“), eine Umwelt in der diese Agenten interagieren, Regeln, welche die Beziehungen zwischen Agenten und ihrer Umwelt definieren und Regeln für die Abfolge von Entscheidungen und Handlungen.

Typischerweise repräsentiert ein Modellagent einen Landnutzer, der ausgehend von seinem Wissen und den individuellen Präferenzen, Informationen über Topografie, Boden- und Wasserqualität (die „biophysikalische, landschaftliche“ Umgebung) sowie Informationen über Wahlhandlungen von benachbarten Modellagenten (die „räumliche, soziale“ Umgebung) kombiniert und darauf aufbauend die eigenen Landnutzungsentscheidungen trifft. Abbildung 2 zeigt schematisch die räumliche Datenrepräsentation eines agentenbasierten Landnutzungsmodells. Die Modellagenten können auch höher aggregierte Entscheidungseinheiten repräsentieren, z.B. Dorfversammlungen, Distriktregierungen oder ganze Länder. Wie BERGER and RINGLER (2002) ausführen, ergibt sich damit die Möglichkeit, mehrskalige Multi-Agentenmodelle zu integrieren und so genannte „verschachtelte Strukturen“ bzw. Hierarchien von sozialen Organisationsformen abzubilden.

Die spezifische Stärke von agentenbasierten Landnutzungsmodellen liegt in ihrer Fähigkeit, Heterogenität und Interaktionen von Agenten und ihrer Umwelt abzubilden. Die Zellularkomponente bietet einen räumlichen Modellierungsrahmen, um verschiedene biophysikalische und sozioökonomische Teilmodelle für die einzelnen Schichten aus Abbildung 2 mit einander zu verknüpfen. So kann ein hydrologisches Teilmodell den Wasserabfluss zwischen den Gitterzellen in Schicht 1, ein Bodenerosionsmodell den Erosionsabtrag in Schicht 2 und beispielsweise ein Marktteilmodell den Handel mit Parzellen- und Wasserrechten in Schicht 6 repräsentieren. Wie in BERGER (2001a) und NAJLIS et al. (2002) diskutiert, werden derartig integrierte ABLM üblicherweise mit objekt-orientierten Programmiersprachen implementiert, die eine effiziente und transparente Organisation großer Datenmengen und komplexer Prozesse ermöglichen. Dabei lässt ihr hoher Grad an Flexibilität die Implementierung einer Vielzahl von Agentenentscheidungsregeln zu. Für Landnutzungsfragen bietet es sich an, zu diesem Zweck auf den großen agrarökonomischen Wissensschatz zu mathematischen Programmierungsmodellen

<sup>5</sup> Einen Überblick über Zellularmodelle für die Landnutzungsmodellierung geben PARKER et al. (2003) und VERBURG et al. (2003).

**Abbildung 2. Räumliche Datenrepräsentation von ABLM**



Layout: C. Block, ZEF-Bonn

Quelle: BERGER and RINGLER (2002)

zurückzugreifen. Besonders BALMANN (1995) hat hier Pionierarbeit zur Kombination von mathematischer Programmierung und agentenbasierter Modellierung geleistet. Mit seinem hypothetischen Agrarsektormodell konnte er so die theoretischen Effekte der räumlichen Verteilung von Landwirtschaftsbetrieben auf die Bodenwertschöpfung und Geschwindigkeit des Agrarstrukturwandels aufzeigen. BERGER (2000) entwickelte einen Prototyp für empirisch gestützte Agentenmodelle und untersuchte damit die Diffusion von Bewässerungstechnologien in Chile. Weitere Arbeiten zu agentenbasierter mathematischer Programmierung entstehen gegenwärtig in Stuttgart-Hohenheim (HAPPE et al., 2001), am IAMO in Halle (KELLERMANN, 2002) sowie am ZEF in Bonn (BERGER et al., 2004).

Neben mathematischer Programmierung zur Implementierung von Agentenentscheidungsregeln werden in ABLM auch einfache Heuristiken, genetische Algorithmen oder durch Planspiele und Laborexperimente empirisch gewonnene Regeln verwendet (PARKER et al., 2002). Eine ähnliche weite Bandbreite von Regeln lässt sich auch für die Implementierung von biophysikalischen Prozessen realisieren, etwa für die Abbildung von Pflanzenwachstum, Nährstoffkreisläufen und Austauschvorgängen zwischen Atmosphäre und Landoberflächen.

## 2.2 Modellklassen

Je nach Art der implementierten Regeln für die Modellagenten, ihrer Modelumwelt und ihrer Interaktionen ergeben sich, wie im Folgenden kurz diskutiert wird, unterschiedliche methodische Implikationen für Modellanwen-

derung, Validierungsstrategie und Software-Implementierung. BERGER and PARKER (2002) schlagen dazu eine Klassifizierung von ABLM mit Hilfe von zwei Gliederungskriterien vor. Das erste Kriterium unterscheidet zwischen „Agenten“ und ihrer „Umwelt“ und das zweite Kriterium die Form des wissenschaftlichen Experiments, d.h. ob die Modellkomponenten „konstruiert“ oder „analysiert“ werden. „Konstruierte Agenten“ sind hypothetische Akteure, deren Verhalten nicht direkt aus empirischem Datenmaterial abgeleitet wird, während „analysierte Agenten“ direkt auf empirischen Beobachtungen beruhen – oder auf ad hoc Werten, die realistische Substitute für noch fehlende empirische Daten darstellen. „Analysierte Agenten“ können aber auch reale Akteure in experimentellen Versuchsanordnungen oder Planspielen sein. Analog dazu hat eine „konstruierte Umwelt“ keine empirische Parametrisierung, während eine „analysierte Umwelt“ direkt von empirischen Messungen herrührt. Damit ergibt sich eine Matrix mit vier Zellen bzw. Modellklassen: Abstrakte, experimentelle, historische und empirische ABLM (Abbildung 3).

**Abbildung 3. Modellklassen und Anwendungen von ABLM**

		Agenten	
		konstruiert	analysiert
Umwelt	konstruiert	<i>abstrakt</i> Existenzbeweis; Entdeckung neuer Beziehungen	<i>experimentell</i> Laborexperimente; 'Role-playing games'
	analysiert	<i>historisch</i> Erklärung	<i>empirisch</i> Erklärung; Möglichkeitsanalyse; bedingte Vorhersagen

Bei **abstrakten agentenbasierten Landnutzungsmodellen** wird eine auf das Wesentliche reduzierende, und nicht eine realistische Abbildung angestrebt. Die mit ihnen durchgeführten Computersimulationen dienen als eine Form von Gedankenexperimenten zur Aufdeckung noch unerkannter Wirkungsmechanismen. AXELROD (1997) sieht dementsprechend Simulation neben Induktion und Deduktion als dritte wissenschaftliche Methode für die Sozialwissenschaften an. BALMANN (1995) etwa konnte mit seinem abstrakten ABM einen Existenzbeweis für Pfadabhängigkeiten in der Agrarstrukturentwicklung führen und damit bedenkenwerte Fragen für die Ausgestaltung von Agrarpolitikmaßnahmen aufwerfen. Weitere Beispiele für abstrakte Modelle werden in PARKER et al. (2002) diskutiert. Die Agenten und ihre Umwelt werden dabei so sparsam wie möglich konstruiert, um hypothetische Mechanismen in Simulationsexperimenten besser nachvollziehen und verstehen zu können. Auf der anderen Seite bedeutet das aber auch, dass abstrakte ABLM nicht mit herkömmlichen, sich auf einen empirischen Kontext beziehenden Methoden validiert werden können. Es besteht immer die Gefahr, dass die Modellbauer fälschlicherweise Artefakte interpretieren,

also Implikationen von gewählten Modellstrukturen oder auch von Programmierfehlern. Die Validierungsstrategie besteht deshalb häufig darin, die Simulationsergebnisse mit anderen theoretischen Überlegungen oder mit den Ergebnissen analytischer Modelle oder alternativer Simulationsexperimente zu vergleichen.

**Experimentelle agentenbasierte Landnutzungsmodelle** führen Computersimulationen mit einer konstruierten Umwelt durch, in der menschliche Akteure, deren Verhalten analysiert wird, direkt oder indirekt interagieren. OPALUCH et al. (2002) berichten von „direkten“ Multi-Agenten-Laborexperimenten, mit deren Hilfe sich Einblicke in die Entscheidungsprozesse von tatsächlichen Landnutzern gewinnen lassen. „Indirekte“ Experimente nimmt die Forschungsgruppe am CIRAD in Montpellier vor; ABLM werden dabei für Rollenspiele mit Akteursgruppen benutzt, um so kollektive Entscheidungsprozesse über Landnutzungsalternativen zu strukturieren und konsensualen Konfliktlösungen den Weg zu ebnet (D'AQUINO et al., 2002). Das agentenbasierte Computermodell bildet dabei eine konstruierte Umwelt ab sowie Agenten, die sich entsprechend der von den Rollenspielteilnehmern artikulierten Entscheidungsregeln verhalten. Die Teilnehmer beobachten in iterativen Experimentrunden, wie sich ihre virtuellen Analoga in den Computersimulationen bewähren, diskutieren und ändern ggf. die Agentenentscheidungsregeln und entdecken womöglich auf diese Weise verbesserte Landnutzungsalternativen, die dann in die Realität umgesetzt werden können. Auch bei experimentellen ABLM gestaltet sich die Modellvalidierung nicht unproblematisch, da es sich hier um Versuchsanordnungen mit nicht vollkommen kontrollierbaren Bedingungen handelt. Zwar kann durch Experimentwiederholungen versucht werden, „Messfehler“ zu minimieren; die Modellbauer stehen jedoch vor der schwierigen Aufgabe, sicherzustellen, dass der Versuchsaufbau adäquat ist und die Probanden tatsächlich das von den Experimentatoren intendierte Spiel spielen.

**Historische agentenbasierte Landnutzungsmodelle** nehmen, was die empirische Datengrundlage angeht, eine Mittelstellung zwischen abstrakten und empirisch basierten Landnutzungsmodellen ein. GUMERMAN and KOHLER (2002) verwenden Zeitreihen von empirischen Umweltdaten, etwa zu klimatischen und hydrologischen Bedingungen, und konstruieren dazu entsprechende Agenten, die in Computersimulationen zu einer Übereinstimmung der modellierten Landnutzungsänderungen mit verfügbaren archäologischen Daten führen. Auf diese Weise lassen sich Einblicke in Handlungsoptionen in der Vergangenheit gewinnen, die zu einem besseren Verständnis von langfristigen, prähistorischen Landnutzungsänderungen beitragen. Die simulierten Zeiträume betragen z.B. im Fall der *Anasazi*-Indianerkultur rund 1 000 Jahre. Die Validierungsstrategie beruht, wie in der Agrarökonomik gängige Praxis, auf Übereinstimmungstests von Modell- und beobachteten Daten. Aufgrund der unvollständigen empirischen Datengrundlage insbesondere für die Agenten kann jedoch die Validierung von historischen ABLM nur qualitativen Charakter haben.

**Empirische agentenbasierte Landnutzungsmodelle** dagegen nutzen empirische Daten für Agenten und Umwelt in weit stärkerem Maße und mit wesentlich höherer zeitlicher und räumlicher Auflösung. Sie versuchen, detaillierte

Analysen und Prognosen von Landnutzungsänderungen zu rechnen und damit Informationen für die Agrarumweltpolitik zu liefern. Beispiele sind u.a. die Forschungsprojekte LUCITA und LUCIM (Quellen in PARKER et al., 2002) sowie MANSON (2002a) und BERGER (2001b). Für empirische Modelle der vierten Klasse werden die in der Agrarökonomik üblichen quantitativen Tests für mathematische Programmierung bzw. die in der Geodäsie und Geoinformatik angewandten raum-zeitlichen Übereinstimmungsmaße verwendet. In Abschnitt 3 wird die Implementierung dieser Modellklasse im Detail vorgestellt.

### 2.3 Software

Aus Anwendungszweck, Datengrundlage und Semantik eines agentenbasierten Computermodells resultieren unterschiedliche Lösungen der Software-Implementierung, die detailliert in PARKER et al. (2002) erläutert werden. Abstrakte ABLM lassen sich ohne große Programmierkenntnisse mit Simulationspaketen wie „RePast“ oder „Ascape“ implementieren. Speziell für die Simulation des Agrarstrukturwandels bietet die Forschungsgruppe am IAMO die Software „AgriPoliS“ sowie ein Politikplanspiel „PlayAgriPoliS“ an (<http://www.iamo.de>). Experimentelle ABLM sind wesentlich von der CORMAS Forschungsgruppe am CIRAD voran getrieben worden (<http://cormas.cirad.fr>). Die entsprechende Software basiert auf der Programmiersprache „Smalltalk“; regelmäßig werden Einführungskurse und Workshops zur Modellanwendung und Planspielen gegeben. Für historische Agentenmodelle sind Simulationsumgebungen mit Schnittstellen zu geografischen Informationssystemen erforderlich, etwa die GIS-Erweiterung „Kenge“ für die Simulationsbibliotheken von SWARM (<http://www.swarm.org/>). Für empirische ABLM, die aufgrund ihrer komplexen Programmstruktur und den umfangreichen Datenmanipulationen direkt in C++ oder anderen „Low-Level“-Programmiersprachen implementiert werden, sind noch keine vergleichbar gut dokumentierten, und damit für Neuanwender zugänglichen Simulations-Plattformen verfügbar. Forschungsgruppen beispielsweise an der Clark University (<http://earth.clarku.edu/lcluc/>) und am Zentrum für Entwicklungsforschung (<http://www.zef.de/mas.htm>) arbeiten z.Zt. an entsprechenden, agentenbasierten Softwarepaketen.

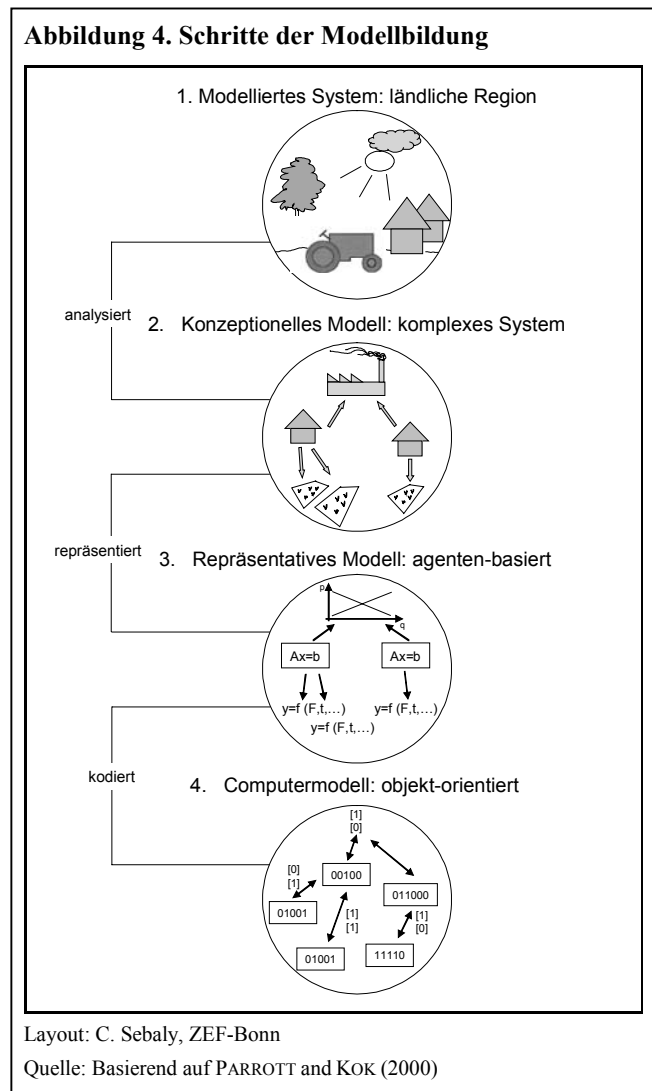
### 3. Implementierung von empirischen Agentenmodellen

Im Weiteren wird kurz die Implementierung und Parametrisierung von empirischen ABLM zur Anwendung in der Landnutzungs- und Politikanalyse beschrieben. Mit dieser Beschränkung auf eine Modellklasse ist, so soll betont werden, kein implizites Urteil über die Anwendungseignung der anderen Modellklassen verbunden; im Gegenteil, wie unten in Abschnitt 5 argumentiert wird, eröffnen insbesondere experimentelle ABLM neue interessante Forschungsperspektiven. Zur Übersichtlichkeit der Diskussion werden vier Schritte der Modellimplementierung unterschieden: (1) Spezifikation der grundlegenden Modelleinheiten, (2) Regeln für die Dynamik und Interaktionen, (3) Datengrundlage und Parametrisierung sowie (4) Simulationsexperimente. Modellgleichungen werden dabei ebenso ausgespart wie Feinheiten ihrer Umsetzung mit objekt-

orientierter Programmierung (siehe hierzu BERGER (2001a) und NAJLIS et al. (2002)). Ein Beispiel für einen dokumentierten Quelltext geben HAPPE et al. (2001).

### 3.1 Grundlegende Modelleinheiten

Für die Spezifikation der grundlegenden Einheiten der Untersuchungsregion und ihrer Modellierung ist Abbildung 4 hilfreich, die zeigt, wie ausgehend von einem konzeptionellen Modell Regeln bzw. mathematische Modellgleichungen für ihre Abbildung aufgestellt werden, um sie dann in Computercode zu übersetzen. Agentenbasierte Modellierung bietet dabei die Möglichkeit, grundlegende Einheiten, wie Wassereinzugsgebiete, Betriebs-Haushalte und Parzellen so zu spezifizieren, dass weitestgehend eine strukturelle Übereinstimmung erhalten bleibt von modelliertem System, konzeptionellem, repräsentativem und programmiertem Modell. Hieraus ergeben sich, im Gegensatz zu Differentialgleichungen, die das Verhalten z.B. aller Betriebs-Haushalte im Aggregat abbilden, große Vorteile für die Modellierung, Parametrisierung und Validierung. Das agentenbasierte Computermodell als „virtuelles“ Abbild des realen Multi-Agentensystems, in dem wir leben, macht die Komplexität des Modells überschaubar und interpretierbar, weil direkt nachvollziehbar ist, wie das Verhalten einzelner Akteure im Computermodell codiert ist. Das individuelle Verhalten von Modellagenten kann des-



halb nachgezeichnet und durch Messungen bzw. empirischen Vergleich direkt überprüft werden.

Die Struktur von agentenbasierten Modellen entspricht zudem der ökonomischen Theorie einer Wirtschaft mit vielen Akteuren zwischen den beiden Extremen der „Unsichtbaren Hand“ und des „Sozialen Dilemmas“ (BRANDES et al., 1997: 26). Das Problem der empirisch gestützten Modellierung besteht ja u.a. darin, dass ein Computersimulationsmodell mit den vorhandenen Daten kalibriert wird, bis es die Realität treffend abzubilden scheint. Wenn sich jedoch die Umstände ändern, auf die es kalibriert wurde, dann verzerrt das Modell und bietet keine gute Abbildung. Ein Computermodell, das in seiner Struktur direkt an ökonomische Theorie anknüpft, dürfte dagegen i.d.R. ein höheres Ausmaß an struktureller Validität aufweisen.<sup>6</sup> Entsprechende Modelltests zur *strukturellen Validierung* lassen sich aufgrund des Baukastenprinzips der objektorientierten Programmierung relativ leicht durchführen (MANSON, 2002b).

### 3.2 Dynamik und Interaktionen

Im Anschluss an die Spezifizierung der grundlegenden Modelleinheiten müssen Regeln für die Dynamik und Interaktionen der Agenten und der Umwelt aufgestellt werden. Für die Dynamik der Agenten gilt größtenteils unverändert das von HANF (1989: 18ff.) zu unabhängigen repräsentativen Betriebsmodellen Gesagte: Auch für ABLM ist mathematische Programmierung mit Rekursivität und Erwartungsbildung eine zweckmäßige Form der Implementierung von betrieblichen Entscheidungsprozessen. Neu ist der Aspekt der Interaktionen zwischen Modellagenten, der vor gut 15 Jahren nur mit Hilfe von sehr zeitaufwendigen Modelliterationen realisiert werden konnte. Mit heutiger, wesentlich leistungsfähigerer Hard- und Software ist eine effiziente „Automatisierung“ von Modelliterationen möglich, etwa um etwa Märkte für landwirtschaftliche Zwischenprodukte zu simulieren. Vor allem aber lässt sich bei Interaktionen der räumliche Kontext berücksichtigen. Entscheidend ist dies z.B. für die Modellierung von Bodenpachtmärkten, bei denen Transportkosten zwischen der Hofstelle und der zur Pacht angebotenen Parzelle den Kreis der Interessenten räumlich begrenzen. BALMANN (1995) implementiert einen Bodenpachtmarkt mit einem einheitlichen, regionalen Gleichgewichtspreis, bei dem die Modellagenten ihre Parzellen von einem hypothetischen außerlandwirtschaftlichen Bodenbesitzer (sozusagen dem „virtuellen“ Auktionator) pachten können. BERGER (2000) implementiert Pachtmärkte mit räumlich differenzierten Pachtpreisen, die das jeweils lokale Angebot und die lokale Nachfrage widerspiegeln. Aufgrund der Transportkosten der Modellagenten bilden sich für eine angebotene Parzelle gewissermaßen „Von Thünen'sche Ringe“ der Pachtinteressenten. Anbieter mit den niedrigsten Pachtforderungen und Nachfrager mit höchsten Pachtgeboten kommen vorrangig zum Zuge und schließen bilateral Pachtverträge ab. Wie Validierungsexperimente ergaben, führt der implementierte Pachtmechanismus zu räumlich plausiblen Parzellenallokationen, und Pachtpreisniveaus sowie Zahl der Transaktionen entsprechen den empirisch beobachtbaren Größenordnungen.

ABLM sind darüber hinaus geeignet, die Transaktionen von Akteuren auf verschiedenen, mehr oder weniger vollkommenen Märkten abzubilden. In BERGER (2000) etwa werden Pachtmärkte für Parzellen unterschiedlicher Bodengüte und für Wasserrechte implementiert. Damit ergeben sich interessante Perspektiven für die Modellierung von lokalen Ökonomien, bei denen die Stellung eines Akteurs auf einem Markt – tritt er als Anbieter oder Nachfrager auf – von der Stellung auf einem komplementären oder substitutiven Markt abhängt (HOLDEN, 2002).

Für die Modellierung von Agenteninteraktionen gibt es außer Auktionsmechanismen weitere geeignete Implementierungskonzepte. Zu nennen sind beispielsweise Kommunikationsnetzwerke, bei denen die Aktionen eines einzelnen Modellagenten davon abhängen, wie viele andere Agenten bereits ein bestimmtes Verhalten zeigen. BERGER (2001) modelliert auf diese Weise die Verbreitung von Information über technologische Innovationen. DEFFUANT et al. (2002) entwickeln ein Agentenmodell, bei dem die Kommunikationswege und Kommunikationshäufigkeiten in Netzwerken sowie ihr Einfluss auf den Adoptionsentscheidungsprozess von Landwirten detailliert abgebildet wird. Die Autoren kalibrieren ihr Kommunikationsmodell mit Adoptionsdaten einer Untersuchungsregion in Frankreich und erforschen mit Sensitivitätstests die Auswirkungen von Änderungen der Kommunikationsparameter auf die Innovationsdiffusion.

In Hinblick auf die Regeln für die Dynamik und Interaktionen der modellierten Umwelt sei auf die umfangreiche Literatur zu biophysikalischen und bioökonomischen Simulatoren verwiesen (ORIADE and DILLON, 1997), die an das Zellularmodell von ABLM angeknüpft werden können. DEADMAN et al. (2002) z.B. bilden Änderungen von Bodenqualität und Pflanzenerträgen ab, MANSON (2002a) modelliert das Wachstum von Sekundärvegetation sowie Schädlingsbefall und BERGER (2001b) verwendet ein hydrologisches Teilmodell für Wasserabflüsse sowie das FAO-Modell für Pflanzenerträge bei Bewässerung. Das große Potential zur Implementierung von räumlichen, bioökonomischen Modellen mit agentenbasierter Modellierung ist jedoch bei weitem noch nicht ausgeschöpft, wie in BERGER et al. (2004) erörtert wird.

### 3.3 Parametrisierung

Für die empirische Parametrisierung von ABLM sind Inputvariablen und Parameter für die Zellularmodell- und die agentenbasierte Modellkomponente zu ermitteln. In den wenigsten Fällen liegt jedoch für die Modellagenten ein vollständiger, disaggregierter und räumlich expliziter Datensatz vor, so dass Daten für ihre Parametrisierung generiert werden müssen. Zwei unterschiedliche Verfahren werden hierzu in der agentenbasierten Modellierung angewandt: Die Disaggregation von aggregierten Daten durch Duplizierung von typischen Betrieben und die Generierung von Zufallsdaten mit Verteilungsfunktionen für einzelne Betriebsmerkmale.

Beim „Duplizierungs“-Verfahren werden landwirtschaftliche Betriebsdaten etwa aus der europäischen Datenbank FADN herangezogen. Typischerweise liegen Daten auf Distriktebene über die Anzahl von Betrieben und die aggregierten Anbaumfänge vor sowie anonymisierte, nicht-räumliche Buchführungsdaten für einzelne Betriebstypen.

<sup>6</sup> Vgl. hierzu BRANDES (1985: 183) sowie die Diskussion in BERGER ET AL. (2002) zu ‚data and model fitting‘.

Mit Hilfe dieser Daten wird ein vollständiger Betriebsdatensatz durch Duplizierung der typischen Betriebe generiert und zwar durch Lösung eines Optimierungsproblems. Es wird eine Disaggregation der Anbauumfänge vorgenommen bei Minimierung der quadratischen Abweichungen des konstruierten Datensatzes von den aggregierten Daten (BALMANN et al., 2002). DEFFUANT et al. (2002) erweitern dieses Verfahren in einem zweiten Schritt und fügen zum FADN-Datensatz sozioökonomische Informationen zum betrieblichen Innovationsverhalten hinzu, die in eigenen Tiefenbefragungen gewonnen wurden. Bei dem dazu notwendigen „Matching process“ der Tiefenbefragung mit FADN-Einzelbetriebsdaten wird optimistisch davon ausgegangen, dass die Detailinformationen für diese befragten Betriebe auch auf die FADN-Betriebstypen übertragbar sind.<sup>7</sup>

Beim „Zufallsdaten“-Verfahren handelt es sich um ein mehrstufiges, hierarchisches Stichprobenverfahren, bei dem detaillierte Betriebsinformationen an Teilstichproben erhoben werden und komplette Agentendatensätze mit Zufalls-generatoren generiert werden. Dieses Verfahren für die Agentenparametrisierung wird z.Zt. von der Forschungsgruppe am ZEF entwickelt und besteht aus den folgenden Einzelschritten (Details der Datenanalyse für Betriebs-Haushalte in Uganda finden sich in WOELCKE, 2003):

- Im Anschluss an Fokusgruppenbefragungen auf Distrikt- und Dorfebene werden in einer ersten Runde von Haushaltsbefragungen Primärdaten von Betriebs-Haushalten erhoben. Dabei werden insbesondere solche Informationen abgefragt, die in mathematischen Programmierungsmodellen für die Spezifizierung der bindenden Restriktionen, z.B. Bodenausstattung und Wasserverfügbarkeit, benötigt werden. Für die räumliche Verknüpfung mit biophysikalischen Teilmodellen erfolgt eine Geo-Referenzierung durch GPS-Messungen.
- Aufbauend auf diesen Daten werden Betriebs-Haushaltsgruppen mit Hilfe von geeigneten Analyseverfahren identifiziert, z.B. durch Hauptkomponentenanalyse und Clustering, um anschließend repräsentative Haushalte auszuwählen.
- Die zweite Runde von Haushaltsbefragungen aus dieser Teilstichprobe kombiniert dann Tiefenbefragungen mit biophysikalischen Messungen, z.B. Ermittlung von Schlaggrößen, Ertragsschätzungen, Boden- und Wasserproben.
- Mit der Hilfe des gesamten Haushalts-Datensatzes erfolgt anschließend die Schätzung von Modellvariablen, z.B. Häufigkeitsverteilungen für die Variablen der bindenden Restriktionen, Netzwerkparameter und technische Koeffizienten, sowie von aggregierten Daten wie Anbauumfänge.
- Mit Hilfe der geschätzten Verteilungsfunktionen wird dann von einem Zufallszahlengenerator ein kompletter einzelbetrieblicher Datensatz erzeugt, indem den einzelnen Modellagenten mit einem *Monte-Carlo*-Verfahren Betriebsmerkmale zugewiesen werden (Verfahren beschrieben in BERGER, 2000: 125).

Als Ergebnis erhält man eine Vielzahl von Agentenpopulationen, deren Merkmalsverteilung den geschätzten Verteilungen in der Grundgesamtheit entspricht. In wiederholten Simulationsexperimenten mit diesen generierten Agentendatensätzen werden Robustheitstests und Mittelwertauswertungen durchgeführt. Der Vorteil im Vergleich zum „Duplizierungs“-Verfahren liegt darin, dass ein realitätsnaher Grad an Heterogenität der Modellagenten verwirklicht werden kann. Wie in BERGER (2000: 126) ausgeführt, wird damit im Modell auch die Gefahr von Artefakten wie „Ecklösungen“ oder „Strukturbrüchen“ reduziert, die durch eine homogene Agentenpopulation selbst hervorgerufen werden können.

### 3.4 Simulationsexperimente

Für die Planung und Formulierung von Politikoptionen der Agrar- und Umweltpolitik können Simulationen mit ABLM nützliche Informationen liefern. Sollen öffentliche Mittel in die Entwicklung von nachhaltigkeitsverträglichen Produktionsalternativen investiert werden? Ist es wirksamer, Kreditinstitutionen zu fördern oder entsprechende Landnutzungspraktiken zu subventionieren? Welche Märkte sind am stärksten verzerrt und wo genau sollen Maßnahmen der Marktregulierung ansetzen? Indem mögliche Reaktionen von Betriebs-Haushalten und die damit verbundenen Auswirkungen auf Umweltqualitätsindikatoren simuliert werden, lassen sich Politikmaßnahmen ex ante am Rechner erproben und Ansatzstellen für eine effiziente Implementierung testen.<sup>8</sup>

Die Komplexität des Untersuchungsgegenstandes legt nahe, derartige agentenbasierte Politiksimulationen nach dem *Ceteris-Paribus*-Prinzip durchzuführen, um schrittweise die Effekte von Parameteränderungen zu isolieren. Tabelle 1 etwa zeigt eine Experimentfolge, um betriebliche Restriktionen und daran ansetzende Politikanreize für die Übernahme von nachhaltigkeitsverträglichen Landnutzungspraktiken in ökologisch sensiblen Agrarregionen zu erforschen. Auch wenn, möglicherweise durch Politikinterventionen, auf einzelbetrieblicher Ebene die Übernahme dieser Landnutzungsinnovationen rentabel erscheint, so ist zu prüfen, ob weitere Hemmnisse auf zwischenbetrieblicher und

**Tabelle 1. Sequenz von Simulationsexperimenten zur Politikanalyse**

Szenario	Forschungsfrage
#1	Direkte Auswirkungen von Politikoptionen?
#2	Durchführbarkeit auf einzelbetrieblicher Ebene?
#3	Restriktionen auf einzelbetrieblicher Ebene?
#4	Ausgestaltung von Politikinstrumenten?
#5	Mögliche Anpassungsgeschwindigkeit?
#6	Mögliche Verteilungseffekte?
#7	Zusätzliche Hemmnisse durch betriebliche Interaktionen?
#8	Optimale Abfolge und zeitliche Implementierung von Politikmaßnahmen?

Quelle: BERGER et al. (2004)

<sup>8</sup> BERGER et al. (2004) diskutieren in detaillierter Form, welche Optionen der Agrar- und Agrarumweltpolitik im Zusammenhang mit Landnutzungsänderungen insbesondere in Entwicklungsländern getestet werden können.

<sup>7</sup> Vgl. dazu die kritischen methodischen Hinweise von CHATTOE (2000).

regionaler Ebene dem entgegenstehen. BERGER et al. (2004) diskutieren für Fallstudien in Uganda und Chile die Simulationsergebnisse zu dieser Tabelle und zeigen, wie dazu unterschiedliche Spezifikationen des agentenbasierten Modells eingesetzt werden. Die erste Gruppe der Fragen in Tabelle 1 bezieht sich auf die Rentabilität von ökologisch nachhaltigen Produktionstechniken und wird zunächst mit einer komparativ-statischen Modellvariante ohne Berücksichtigung von betrieblichen Interaktionen bearbeitet („diskretes“ ABLM). Die zweite Gruppe der Fragen dreht sich um die möglichen Anpassungsprozesse und Landnutzungsänderungen auf Regionsebene und erfordert eine dynamische Modellvariante mit betrieblichen Interaktionen („verknüpftes“ ABLM).

#### 4. Diskussion der Anwendungseignung

Über den Sinn und Unsinn von Simulationsmodellen ist in dieser Fachzeitschrift schon viel diskutiert worden. Die häufig dabei geäußerte grundlegende Kritik an Simulationsansätzen steht ganz in der empirisch-ökonomischen Tradition von MILTON FRIEDMAN, nach der nur ein exakt vorhersagendes Modell ein gutes Modell ist (BRANDES, 1989). Man wird jedoch den Intentionen von ABLM nicht gerecht, wenn sie ausschließlich im Hinblick auf das Kriterium Prognosefähigkeit bzw. Abbildungsgüte evaluiert werden; denn hierin liegt nicht die wirkliche Anwendungseignung von agentenbasierten Computersimulationen. Ziel der agentenbasierten Modellierung ist nicht so sehr die möglichst exakte Prognose von Landnutzungsänderungen, sondern die Prognose von zusätzlichen Eigenschaften der untersuchten Mensch-Umwelt-Systeme: Wie stabil sind räumliche, ländliche Strukturen? Welche Korridore für mögliche Entwicklungspfade der Landnutzung gibt es? Welches sind „kritische“ Raten und Schwellenwerte der Ressourcennutzung, an denen nach heutigem Wissen Irreversibilitäten auftreten? Welches sind bindende Restriktionen auf einzelbetrieblicher, zwischenbetrieblicher und regionaler Ebene? Unter welchen Bedingungen sind agrar- und umweltpolitische Maßnahmen, die an diesen bindenden Restriktionen ansetzen, besonders wirkungsvoll? Sofern ABLM eine akzeptable strukturelle Abbildung gelingt, lassen sich mit ihnen zu diesen Fragen politikrelevante Szenarioanalysen rechnen. Sie würden es erlauben, den Möglichkeitsraum einzugrenzen, und auch wenn sie nicht räumlich exakte Prognosen liefern, so könnten sie doch aufdecken, was nur sehr unwahrscheinlich geschehen wird.

Die spezifische Stärke von ABLM ist die Berücksichtigung der Heterogenität und Interaktionen von Agenten und ihrer Umwelt, und es liegt deshalb nahe, ihre Modellanwendung besonders auf solche empirischen und politikrelevanten Fragen zu konzentrieren, bei denen unterschiedliche Landnutzungsinteressen und Externalitäten eine wichtige Rolle spielen und Transaktionen nicht über perfekte Märkte abgewickelt werden. Hier können sie komplementär zu den wohletablierten Landnutzungs-Modellansätzen – einen Überblick geben VERBURG et al. (2003) sowie das Sonderheft 4/2003 der Agrarwirtschaft – wichtige Beiträge zur Prioritätensetzung von Politikinstrumenten sowie Denkanstöße zur Entwicklung neuer, kreativer Politikoptionen geben.

Mehr Rechnerleistung und räumliche Datensätze bieten dabei die Chance, eine neue Generation von konzeptionellen Modellen für Computersimulationen zu implementieren. In den letzten Jahren wurde eine Vielzahl von Theorieansätzen entwickelt, die mit herkömmlichen Methoden kaum empirisch analysiert werden können, beispielsweise Pfadabhängigkeiten, häufigkeitsabhängige Effekte, soziale Dilemmata, „collective action“ und nachhaltiges Ressourcenmanagement. Mit ABM lassen sich derartige Theorieansätze simulieren und *pseudo-induktiv* auswerten (siehe hierzu auch JUDD, 1997). ABLM sollten dabei so implementiert werden, dass die Entscheidungsregeln der Modellagenten auf akzeptierbaren mikroökonomischen Entscheidungsmodellen basieren und sämtliche Daten empirisch gestützt werden können. Hierin liegt zweifellos die besondere Kompetenz einer anwendungsorientierten Disziplin mit ingenieurwissenschaftlichem Hintergrund wie der Agrarökonomik. Aus dem großen Fundus von Einzelmodellen für Pflanzenwachstum, Nährstoffflüssen und Bewässerung, für Betriebsplanung, Technologiediffusion und interdependenten Märkten stehen empirisch erprobte Ansätze für ABLM zur Verfügung, um wichtige Teilaspekte der Landnutzungsmodellierung zu integrieren. Es sei hier betont: Dies ist kein Plädoyer für voll integrierte Modellsysteme, bei denen sämtliche Teilmodelle miteinander gekoppelt werden, sondern für eine pragmatische Herangehensweise. Integration sollte nur wenn nötig erfolgen, z.B. wenn an den Schnittstellen von Teilmodellen hoch sensitive Variablen wirken; ansonsten reichen lose Formen der Modellkopplung (vgl. VLEK et al., 2003). Es ist sicherlich verfehlt, dem Modellgigantismus zu verfallen und nur, weil leistungsfähige und kostengünstige Rechner zur Verfügung stehen, immer komplexere Simulationsmodelle mit immer höheren Datenumständen anzustreben.

Mit ihrer besonderen Eignung zur Integration von Teilmodellen ist ein zweiter wichtiger Anwendungsaspekt verbunden. ABLM können als wissenschaftliches Werkzeug im ursprünglichen Sinn eingesetzt werden, d.h. als Mittel zur Synthese von bestehendem Wissen, zur Strukturierung von neuen Forschungsfragen, zur Offenlegung von Wissenslücken und zur Anleitung von zusätzlichen Datenerhebungen. Diese Anwendung als „internes“ wissenschaftliches Kommunikationsmittel bietet sich insbesondere für Forschungsfragen zu Landnutzungsänderungen und Agrarumweltpolitik an, bei denen Expertise von unterschiedlichen Wissenschaftsdisziplinen benötigt wird. Entsprechend positive Erfahrungen wurden damit im GLOWA-Volta Projekt gemacht (VLEK et al., 2003). Die gemeinsame Implementierung eines zunächst einfachen agentenbasierten Modells, das Landnutzungsdaten sowie hydrologische und meteorologische Teilmodelle mit Hilfe von mathematischer Programmierung verbindet, kann zum einen bestehende Wissenslücken aufdecken und setzt zum anderen die Bedeutung der untersuchten Daten und Prozesse in Perspektive (was aus Sicht beispielsweise der Bodenwissenschaften als unverzichtbarer Forschungsgegenstand erscheint, mag für das Gesamtmodell ein wenig sensitiver Bestandteil sein, der nur wenig Modellierungsaufwand rechtfertigt). Die technischen Hürden für die gemeinsame Modellentwicklung sind dank moderner Hard- und Software nur noch gering: Excel-Spreadsheets mit Solver Add-Ins, dynamische Links und Visual-Basic-Makros erlauben die Implementierung von ersten integrierten Simulationsmodellen, die einen guten



Ausgangspunkt für komplexere, auf leistungsfähigere Plattformen portierte ABLM darstellen.

Eine dritte, potenziell große Anwendungseignung liegt in der „externen“ Kommunikation von Modellergebnissen, die Informationen über Politikoptionen für Entscheidungsprozesse liefern könnten. Der Nutzen und die Vertrauenswürdigkeit eines Simulationsmodells liegt, so sei nochmals betont, nicht ausschließlich in einer hohen Abbildungsgüte, wie die Rolle von Computersimulationen in der Klimaforschung verdeutlicht hat (z.B. IPCC, 2001). Obwohl diese Klimamodelle, wie von den Modellbauern betont, viele wichtige Teilaspekte nicht angemessen würdigen und von daher keine exakten Vorhersagen über die Erderwärmung liefern können; ohne sie wäre der anthropogene Beitrag zum Klimawandel nicht wissenschaftlich thematisiert und ins öffentliche Bewusstsein gedrungen. Es gäbe heute weder das Kyoto-Abkommen noch Vereinbarungen über Mechanismen des „Clean Development“. Für die Landnutzungsmodellierung bedeutet das, dass es gelingen muss, das Vertrauen in die strukturelle Validität der agentenbasierten Modelle zu erhöhen. Erreichen ließe sich dies, außer durch die von AXELROD (1997) vorgeschlagenen Maßnahmen zur Erhöhung der Transparenz, womöglich mit für interaktive Anwendungen vereinfachten Modellversionen (siehe etwa KIRSCHKE und JECHLITSCHKA, 2003). Externalitäten in der Nutzung von natürlichen Ressourcen und Wege zur Kompensation der beteiligten Landnutzerguppen ließen sich, wie HAZELL et al. (2001) vorschlagen, mit Payoff-Matrizen verdeutlichen. Dabei müsste auch versucht werden, die Unsicherheit der Simulationsergebnisse zu vermitteln. Zusätzlich zu einer GIS-Darstellung der erosionsgefährdeten Landschaft, sollte die Stabilität dieser Landschaft über Parametervariationen hinweg aufgezeigt werden. Auch für die „externe“ Kommunikation von Simulationsergebnissen ist ein gewisses Augenmaß im Einsatz der Mittel angebracht. Trotz faszinierender Möglichkeiten der Visualisierung mit neuen Rechnergenerationen: Ob man unbedingt Agrar- und Umweltpolitiker technisch aufwendig auf dem Computerbildschirm durch eine dreidimensionale Landschaft fliegen müssen, um ihnen die Wirkungen ihrer Subventionspolitik anhand von virtuellen Agrarwüsten zu demonstrieren?

## 5. Agentenbasiertes Forschungsprojekt

Die agentenbasierte Modellierung von Landnutzungsänderungen steht im Kontext eines Forschungsprogramms in den Wirtschafts-, Agrar- und Umweltwissenschaften, das die Heterogenität und Interaktionen von Mensch und Umwelt in den Vordergrund stellt. Sie führt die in dieser Fachzeitschrift diskutierten Ansätze der Pfadabhängigkeit (BRANDES, 1995), evolutionärer Agrarökonomik (BERGER und BRANDES, 1998) und Politiksimulationen (BALMANN und HAPPE, 2001) fort und bündelt sie zu einem agentenbasierten, empirischen Forschungsprojekt. Das Ziel dieses Forschungsprojekts ist ein Anwendungspaket aus Datenbank- und Simulations-Software sowie damit abgestimmten Methoden der Datenerhebung und -aufbereitung, Experimentauswertung und Informationsweitergabe. Aus dem hier gemachten Überblick über den Stand der Entwicklung und des Einsatzes von agentenbasierten Modellsystemen lässt sich ein unmittelbarer Forschungsbedarf zu den folgenden vier Fragekomplexen ableiten:

1. *Technische Integration*: Wie oben erläutert wurde, bietet es sich an, agentenbasierte Mathematische Programmierung und biophysikalische Modellierung durch ein Zellularmodell zu verknüpfen. Hierfür ist ein allgemeines Vorgehen zu entwickeln, um Schnittstellen zwischen Modellkomponenten zu definieren und geeignete Formen der technischen Kopplung zu implementieren. Eine Möglichkeit besteht etwa darin, Sensitivitätsanalysen von gemeinsamen Modellvariablen durchzuführen und nur die Variablen eng zu koppeln, die enge Stabilitätsbereiche aufweisen.
2. *Empirische Parametrisierung*: Verfeinerte Methoden der Datenerhebung müssen entwickelt werden, um Modellagenten und ihre sozialen Netzwerke empirisch parametrisieren zu können. Verschiedene Instrumente der empirischen Sozialforschung sollten kombiniert und getestet werden, wobei besonders die Verwendung von experimentellen ABLM als Mittel zur Offenlegung von Parametern des tatsächlichen Agentenverhaltens viel versprechend erscheint.
3. *Modellvalidierung*: Gegenwärtig existieren noch keine spezifischen Methoden, um die räumliche Anordnung der mit ABLM simulierten Landschaften zu validieren. Mehr Forschung ist auch nötig, um die detaillierten, räumlichen Modellergebnisse von Politikenszenarien zu interpretieren, etwa die Einkommensverteilung entlang von Flusssystemen, die Bevölkerungsmigration auf Grenzstandorte und die räumlichen Muster der Innovationsdiffusion.
4. *Modellanwendung*: Für die Anwendung in der Agrar- und Agrarumweltpolitik sind weiterhin Nutzerschnittstellen, die den Zugang zum Modellsystem und seinen Informationen ermöglichen, zu entwickeln und zu testen. Gegenwärtig etwa im GLOWA-Volta Projekt (VLEK et al., 2003) diskutierte Ideen z.B. sind eine Client-Server-Implementierung mit einem „Front end“ für Datenbankabfragen und interaktive Politiksimulationen sowie einem „Back end“ für die von den beteiligten Wissenschaftlern entwickelten, integrierten Modellsysteme.

Insgesamt eröffnet sich mit der agentenbasierten Modellierung von Landnutzungsänderungen ein sowohl faszinierendes als auch politikrelevantes Forschungs- und Anwendungsfeld. Ein Mini-Symposium auf der letzten und ein Computer-Workshop auf der diesjährigen IAAE, ein Workshop auf dem Kolloquium „Adaptive Agents, Intelligence and Emergent Human Organization“ der „National Academy of Science“, die Zugehörigkeit zu Initiativen der „Global Change“-Forschung bzw. zu europäischen Exzellenznetzwerken belegen die internationale Einbindung. Wie in diesem Beitrag diskutiert wurde, werden damit Kernkompetenzen der Agrarökonomik angesprochen, die auch zukünftig wichtige Beiträge für die Entwicklung und Anwendung der agentenbasierten, integrierten Modellierung erwarten lassen.

## Literatur

- AGARWAL, C., G.M. GREEN, J.M. GROVE, T.P. EVANS and C.M. SCHWEIK (2003): A Review and Assessment of Land-Use Change Models: Dynamics of Space, Time, and Human

- Choice. USDA Forest Service, USDA Forest Service Northeastern Forest Research Station, Burlington, Vt.
- AXELROD, R. (1997): Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences. In: Conte, R., Hegselmann, R., Terna, P. (Hrsg.): *Simulating Social Phenomena*. Springer, Berlin.
- BALMANN, A. (1995): *Pfadabhängigkeiten in Agrarstrukturentwicklungen – Begriff, Ursachen und Konsequenzen*. Duncker-Humboldt, Berlin.
- BALMANN, A. und K. HAPPE. (2001): Agentenbasierte Politik- und Sektoranalyse. Perspektiven und Herausforderungen. In: *Agrarwirtschaft* 8 (50): 505-516.
- BALMANN, A., K. HAPPE, K. KELLERMANN und A. KLEINGARN (2002): Adjustment costs of agri-environmental policy switchings: an agent-based analysis of the German region Hohenlohe. In: Janssen, M.A., (Hg.). *Complexity and Ecosystem Management: The Theory and Practice of Multi-Agent Systems*. Edward Elgar Publishers, Cheltenham, U.K., and Northampton, Mass.
- BERGER, T. (2000): Agentenbasierte räumliche Simulationsmodelle in der Landwirtschaft. Anwendungsmöglichkeiten zur Bewertung von Diffusionsprozessen, Ressourcennutzung und Politikoptionen. In: *Agrarwirtschaft Sonderheft 186, Agrimedia*.
- (2001a): Objektorientierte Implementierung eines Programmierungsansatzes mit Verhaltensheterogenität und betrieblichen Interaktionen. In: *Zeitschrift für Agrarinformatik* 9/2: 26-33.
- (2001b): Agent-based spatial models applied to agriculture: a simulation tool for technology diffusion, resource use changes and policy analysis. In: *Agricultural Economics* 25 (2/3): 245-260.
- BERGER, T. und W. BRANDES (1998): Evolutionäre Ansätze in der Agrarökonomik. In: *Agrarwirtschaft* 47 (4): 275-282.
- BERGER, T., M. GOODCHILD, M.A. JANSSEN, S.M. MANSON, R. NAJLIS und D.C. PARKER (2002): Methodological Considerations for Agent-Based Modeling of Land-Use and Land-Cover Change. In: Parker, D.C., Berger, T., Manson, S. (2002).
- BERGER, T. and D.C. PARKER (2002): Examples of Specific Research – Introduction. In: Parker, D.C., Berger, T., Manson, S. (2002).
- BERGER, T. and C. RINGLER (2002): Trade-offs, efficiency gains and technical change – Modeling water management and land use within a multiple-agent framework. In: *Quarterly Journal of International Agriculture* 41 (1/2): 119-144.
- BERGER, T., P. SCHREINEMACHERS and J. WOELCKE (2004): Multi-Agent Simulation for Development of Less-Favored Areas. In: *Agricultural Systems, Special Issue "Development Strategies for Less-Favored Areas"*. (in Kürze erschienen).
- BIRNER, R. (2003): *Devolution and Collaborative Governance in Natural Resource Management – Theory and Empirical Evidence from Developing Countries*. Habilitationsschrift, Universität Göttingen.
- BRANDES, W. (1985): *Über die Grenzen der Schreibtisch-Ökonomie*. Mohr-Siebeck, Tübingen.
- (1989): On the Limitations of Armchair Economics: Some Views of an Armchair Agricultural Economist. In: *European Review of Agricultural Economics* 16 (3): 319-43.
- (1995): Pfadabhängigkeit: Ein auch für die Agrarökonomik fruchtbares Forschungsprogramm? In: *Agrarwirtschaft* 44 (8/9): 277-279.
- BRANDES, W., G. RECKE und T. BERGER (1997): *Produktions- und Umweltökonomik. Traditionelle und moderne Konzepte. Band I*. Ulmer UTB, Stuttgart.
- CHATTOE, E. (2000): Why is building Multi-Agent Models of social systems so difficult? A case study of innovation diffusion. Beitrag für das Mini-Symposium zu "Integrating Approaches for Natural Resource Management and Policy Analysis: Bioeconomic Models, Multi-Agent Systems and Cellular Automata", IAAE 2000, Berlin. In: [http://www.zef.de/download/iaae\\_symp/chattoe\\_paper.pdf](http://www.zef.de/download/iaae_symp/chattoe_paper.pdf).
- D'AQUINO, P., C. LE PAGE and F. BOUSQUET (2002): The SELF-CORMAS Experiment: Aiding Policy and Land-Use Management By Linking Role Playing Games, GIS and ABM in the Senegal River Valley. In: Parker, D.C., Berger, T., Manson, S. (2002).
- DEADMAN, P., K. LIM, D. ROBINSON, E. MORAN, E. BRONDÍZIO and S. MCCRACKEN (2002): LUCITA: Multi-Agent Simulations of Land-Use Change near Altamira, Brazil. In: Parker, D.C., Berger, T., Manson, S. (2002).
- DEFFUANT, G., S. HUET, J.P. BOUSSET, J. HENRIOT, G. AMON and G. WEISBUCH (2002): Agent-based simulation of organic farming conversion in Allier département. In: Janssen, M.A. (Hg.): *Complexity and Ecosystem Management: The Theory and Practice of Multi-Agent Systems*. Edward Elgar Publishers, Cheltenham, U.K., and Northampton, Mass.
- GUMERMAN, G.J. and T. KOHLER (2002) Virtual Anasazi: Modeling a Sociodemographic System of the Past. In: Parker, D.C., Berger, T., Manson, S. (2002).
- HANF, C.-H. (1989): *Agricultural Sector Analysis by Linear Programming Models*. Vauk, Kiel.
- HAPPE, K., K. KELLERMANN und A. BALMANN (2001): *AgriPolis: Documentation*. In: <http://www.iamo.de/PlayAgriPoliS/AgriPoliS.pdf>.
- HAZELL, P., U. CHAKRAVORTY, J. DIXON and R. CELIS (2001): *Monitoring Systems for Managing Natural Resources: Economics, Indicators and Environmental Externalities in a Costa Rican Watershed*. EPTD Discussion Paper No. 73. International Food Policy Research Institute.
- HOLDEN, S. (2002): Applied Bio-Economic Modelling for NRM Impact Assessment: Static and Dynamic Models. Paper presented at the International Workshop on Methods for Assessing the Impacts of Natural Resource Management Research, Dec. 6-7, 2002. ICRISAT, India.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)(2001): *Climate Change 2001. IPCC Third Assessment Report*. Intergovernmental Panel on Climate Change. In: [http://www.grida.no/climate/ipcc\\_tar/](http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/).
- JUDD, K.L. (1997): Computational Economics and Economic Theory: Substitutes or Complements? In: *Journal of Economic Dynamics and Control* 21(6): 907-942.
- KELLERMANN, K. (2002): *PlayAgriPoliS – Ein agentenbasiertes Politikplanspiel*. Diplomarbeit Humboldt-Universität zu Berlin, Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät.
- KIRSCHKE, D. und K. JECHLITSCHKA (2003): Interaktive Programmierungsansätze für die Gestaltung von Agrar- und Umweltprogrammen. In: *Agrarwirtschaft* 52 (4): 211-217.
- MANSON, S.M. (2002a): Integrated Assessment and Projection of Land-Use/Land-Cover Change in the Southern Yucatan Peninsular Region of Mexico. In: Parker, D.C., Berger, T., Manson, S. (2002).
- (2002b): Calibration, Verification, and Validation. In: Parker, D.C., Berger, T., Manson, S. (Hg.): *Meeting the Challenge of Complexity. Proceedings of a Special Workshop on Land-Use/Land-Cover Change, October 4-7, 2001, Irvine, CA*. CIPEC Collaborative Report CCR-3.
- NAJLIS, R., M.A. JANSSEN and D.C. PARKER (2002). *Software Tools and Communication Issues*. In: Parker, D.C., Berger, T., Manson, S. (Hg.): *Meeting the Challenge of Complexity. Proceedings of a Special Workshop on Land-Use/Land-Cover Change, October 4-7, 2001, Irvine, CA*. CIPEC Collaborative Report CCR-3.

- OPALUCH, J.J., P. AUGUST, R. THOMPSON, R. JOHNSTON and V. LEE (2002): Linking Agent Models and Controlled Laboratory Experiments for Managing Community Growth. In: Parker, D.C., Berger, T., Manson, S. (2002).
- ORIADE, C.A. and C.R. DILLON (1997): Developments in Biophysical and Bioeconomic Simulation of Agricultural Systems: A Review. In: Agricultural Economics 17 (1997): 45-48.
- PARKER, D.C., T. BERGER and S. MANSON (2002): Agent-Based Models of Land Use / Land Cover Change. LUCR Report Series No. 6. LUCR International Project Office, Louvain-la-Neuve.
- PARKER, D.C., S.M. MANSON, M.A. JANSSEN, M.J. HOFFMANN and P. DEADMAN (2003): Multi-Agent Systems for the Simulation of Land-Use and Land-Cover Change: A Review. In: Annals of the Association of American Geographers (93)2.
- PARROTT, L. and R. KOK (2000): Incorporating Complexity in Ecosystem Modeling. Complexity International Vol. 7. In: <http://www.csu.edu.au/ci/vol07/lparro01/>.
- VLEK, P.L.G., T. BERGER, S.J. PARK and N. VAN DE GIESEN (2003): Integrative Water Research in the Volta Basin. In: Ehlers, E., Krafft, T. (Hsg): Earth System Science in the

Anthropocene: Emerging Issues and Problems. Springer-Wissenschaftsverlag, Berlin (in Kürze erscheinend).

WOELCKE, J. (2003): Bio-Economics of Sustainable Land Management in Uganda. Dissertationsschrift, Peter Lang, Frankfurt.

## Danksagung

Der Robert-Bosch-Stiftung wird für die Förderung der Nachwuchsforschergruppe „Agent-Based Simulation of Sustainable Resource Use in Agriculture and Forestry“ gedankt.

Verfasser:

**DR. THOMAS BERGER**

Zentrum für Entwicklungsforschung (ZEF)

Walter-Flex-Str. 3, 53113 Bonn

Tel.: 02 28-73 49 64, Fax: 02 28-73 18 69

e-mail: t.berger@uni-bonn.de