

Abstract of the thesis “A complex systems perspective on land-use dynamics in the Amazon: patterns, agents, networks” by Finn Müller-Hansen

This thesis investigates how to model and analyze human-nature interactions using the example of deforestation and land-use change in the Brazilian Amazon. Deforestation of tropical rainforests remains a huge threat to biodiversity, local weather patterns, and global climate. I approach this topic from a complex systems point of view, using concepts from theoretical physics and network analysis to guide data analyses of land-use changes and design models of deforestation dynamics.

The thesis is divided into three main parts. The first part reviews modeling approaches to human decision making and behavior. I discuss differences in the underlying assumptions and theories of approaches in three categories: individual decision making and behavior, social interaction, and aggregation of agent behavior and interactions. I give an overview of how these approaches are used in agent-based and land-use models. A main conclusion of this review is that no single modeling approach captures all relevant aspects of human behavior. Instead, modelers have to choose the appropriate approaches by taking into account the type of agent, the suitability of the underlying behavioral theory to the context of decision making, and the spatial and temporal scales that are relevant for the research questions and the model purpose.

The second part of the thesis combines Markov-chain and cluster analyses to detect patterns in satellite-derived land-cover maps of the Brazilian Amazon. I derive transition rates between different land-cover types for various subregions and apply cluster analysis and community detection algorithms to find spatial patterns of land-cover dynamics. The analysis reveals the spatial and temporal heterogeneity of land-cover transitions and shows that neighboring subregions tend to undergo similar transitions. The resulting patterns can be linked to and thus complement local studies of land-cover dynamics in the Brazilian Amazon. Finally, I use the obtained transition rates to parameterize simple Markov-chain models and compute land-cover projections.

The third part develops an agent-based model to investigate under which conditions the intensification of cattle ranching can reduce deforestation in the Amazon. Cattle ranching is the main direct driver of deforestation in the region and its intensification has been proposed but also highly debated as an anti-deforestation measure. The model captures stylized environmental, economic, as well as social processes, and uses heuristics representing extensive or semi-intensive land management strategies to describe agent decision making. I present a detailed analysis of the non-linear transient model behavior. Fast intensification can only lower deforestation rates if local cattle markets saturate. Under other environmental and economic conditions intensification does not reduce deforestation rates and may even increase deforestation.

The contributions of this thesis are a demonstration that a combination of modeling tools from complexity science and social-science theories of human decision making is needed to study emergent dynamics of social-ecological systems. To understand such systems is a main prerequisite for designing effective policies that foster a more sustainable management of these systems. I conclude by suggesting domains for further research to approach this goal.

Zusammenfassung der Doktorarbeit „Landnutzungsänderungen im Amazonas aus der Perspektive komplexer Systeme: Muster, Agenten, Netzwerke“ von Finn-Müller-Hansen

Die vorliegende Doktorarbeit untersucht, wie sich Mensch-Umwelt-Interaktionen am Beispiel der Abholzung und Landnutzungsänderung im Amazonas modellieren und analysieren lassen. Die Abholzung tropischer Regenwälder ist eine große Bedrohung für Biodiversität, lokale Wettergeschehen und das globale Klima. Hier nähere ich mich dem Thema, indem ich Landnutzung aus der Perspektive komplexer Systeme betrachte. Konzepte der theoretischen Physik und Netzwerkanalyse ermöglichen es, Daten zu analysieren und Modelle zu entwickeln, die die Dynamik der Abholzung fassen können.

Die Arbeit ist in drei Hauptteile gegliedert. Im ersten Teil gebe ich einen detaillierten, kritischen Überblick über Modellansätze um Entscheidungen und menschliches Verhalten zu beschreiben und diskutiere deren zugrundeliegende Annahmen. Die Ansätze werden in drei Kategorien eingeteilt: individuelle Entscheidungen und individuelles Verhalten; soziale Interaktionen zwischen Akteuren; und Techniken um das Verhalten individueller Akteure und deren Interaktionen zu aggregieren. Ich diskutiere außerdem Beispiele für Anwendungen dieser Ansätze in agentenbasierten Modellen und Landnutzungsmodellen. Der Review kommt zu dem Schluss, dass es keinen Ansatz gibt, der alle relevanten Aspekte menschlichen Verhaltens abbilden kann. Um einen geeigneten Ansatz zwischen den aufgezeigten Optionen auszuwählen, müssen folgende Aspekte berücksichtigt werden: der Akteurstypus, die Eignung der zugrundeliegenden Verhaltenstheorie für den Entscheidungskontext, und die zeitlichen und räumlichen Skalen, die für die Forschungsfrage und den Modellzweck entscheidend sind.

Der zweite Teil der Arbeit kombiniert die Theorie von Markow-Ketten mit Clusteranalysen um Muster in satellitengestützten Landbedeckungsdaten im brasilianischen Amazonas zu identifizieren. Für unterschiedliche Teilgebiete bestimme ich Übergangsraten zwischen verschiedenen Arten der Landbedeckung und vergleiche diese mit Clusteranalysen. Ziel ist die Identifikation von räumlichen Mustern. Die Analyse macht die räumliche und zeitliche Heterogenität von Übergängen deutlich und zeigt, dass für angrenzende Teilgebiete ähnliche Übergänge festzustellen sind. Die identifizierten Muster decken sich mit den Ergebnissen von Studien, die die Dynamik von Landnutzung im Amazonas lokal untersuchen und ergänzen diese Studien daher. Abschließend werden einfache Markow-Modelle mit den gewonnenen Daten parametrisiert um Projektionen für Landbedeckungsanteile zu errechnen. Diese werden untersucht und ihre Aussagekraft diskutiert.

Im dritten Teil entwickle ich ein agentenbasiertes Modell um die Frage zu untersuchen, unter welchen Bedingungen die Intensivierung der Viehhaltung im Amazonas die Abholzung reduzieren kann. Rinderhaltung ist der wichtigste unmittelbare Treiber von Abholzung in der Region. Um die Abholzung einzudämmen, wird eine Intensivierung der Rinderhaltung als politische Maßnahme vorgeschlagen, gleichzeitig aber auch scharf kritisiert. Um die Wirkung einer Intensivierung zu untersuchen, verbindet das Modell vereinfachte ökologische, ökonomische und soziale Prozesse und wendet Heuristiken an, um extensive und semi-intensive Landnutzungsstrategien der Viehhalter abzubilden. Das Modell weist nichtlineare, transiente Dynamiken auf. Eine detaillierte Analyse des Modells zeigt, dass eine Intensivierung die Abholzungsraten nur dann verringern kann, wenn der lokale Viehmarkt saturiert. Unter anderen ökologischen und ökonomischen Bedingungen wird die Abholzung durch eine stärkere Intensivierung nicht verringert und kann die Abholzung sogar erhöhen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit demonstrieren, dass eine Kombination aus Modellierungsansätzen aus der Theorie komplexer System einerseits und sozialwissenschaftlichen Theorien menschlicher Entscheidungen andererseits gebraucht wird, um die emergente Dynamik sozial-ökologischer Systeme zu untersuchen. Ein besseres Verständnis solcher Systeme ist eine Grundvoraussetzung um effektive Politikmaßnahmen zu entwickeln, die eine nachhaltigere Bewirtschaftung des brasilianischen Amazonas und anderer sozial-ökologischer Systeme fördern. Die Arbeit schließt mit Vorschlägen für weiterführende Forschungen, um diesem Ziel näherzukommen.