

Szenariomodellierung mit MAS für Savannenökologie im Rahmen von ARS AfricaE

Mitja Adebahr

HAW Hamburg

Email: mitja.adebahr@haw-hamburg.de

I. EINLEITUNG

Die Savanne Südafrikas ist ein sensibles Ökosystem. Sie unterliegt durch die Einwirkungen des Menschen und sich ändernden Klimabedingungen einem stetigen Wandel. Ein vertieftes Verständnis des Ökosystems kann helfen, Regeln für die Nutzung dieser Gebiete festzulegen. Das Projekt ARS AfricaE befasst sich mit eben dieser Erforschung des Savannenökosystems.

Bei der Erforschung und Modellierung von Ökosystemen hat sich der Einsatz von Individual-based Models etabliert. Dies gilt insbesondere für Modelle, in denen Menschen mit der Umwelt interagieren. Klassische Beispiele dafür sind die Landnutzung durch Viehzucht und Landwirtschaft.

Die Simulation auf Basis dieser Modelle wird mit Hilfe von Multiagentensystemen durchgeführt. Damit lassen sich verschiedene Szenarien simulieren um die Entwicklung der Umwelt zu prognostizieren. Daraus lassen sich wiederum Regeln zur Landnutzung ableiten, die den Erhalt eines Ökosystems gewährleisten sollen.

Die vorliegende Arbeit ist motiviert durch die Unterstützung des ARS AfricaE Projektes und gibt einen Überblick über die Entwicklung und den Einsatz von Individual-based Models zur Simulation von Ökosystemen. Dazu werden in Kapitel II das Projekt ARS AfricaE und dessen Ziele vorgestellt. In Kapitel III wird die Entwicklung von Individual-based Models beschrieben. Dazu gehören auch Best Practices und ein gängiger Standard, der zur Spezifizierung dieser Modelle eingesetzt wird. Frameworks zur Simulation werden in Kapitel IV vorgestellt. Kapitel V-B stellt ein Konzept für sozio-ökologische Modelle vor, so wie Beispiele für Modelle und Szenarien. Ein Ausblick über die Arbeit im folgenden Projekt erfolgt im Kapitel VI.

II. ARS AFRICAE

ARS AfricaE ist ein Projekt aus Südafrika und steht für Adaptive Resilience of Southern African Ecosystems. Dieses Projekt ist eine enge Zusammenarbeit zwischen deutschen und südafrikanischen Forschungseinrichtungen.

Das primäre Ziel des Projekts ist die Erforschung von Savannenökosystemen und dessen Elementen in Bezug auf deren adaptive Resilienz. Der Begriff adaptive Resilienz, der als Abkürzung auch in dem Projektnamen zu finden ist, wird von Robinson (2010) [1] folgendermaßen definiert:

“Adaptive resilience is the capacity to remain productive and true to core purpose and identity whilst absorbing disturbance and adapting with integrity in response to changing circumstances.”

In Bezug auf ein Ökosystem beschreibt adaptive Resilienz also nicht nur die Fähigkeit nach einer Zerstörung wieder in den ursprünglichen Zustand zu gelangen. Dies wäre die einfache Resilienz. Sondern sie beschreibt auch die Fähigkeit auf sich dauerhaft ändernde, äußere Umstände zu reagieren. Verdeutlicht wird dies in Abbildung 1.

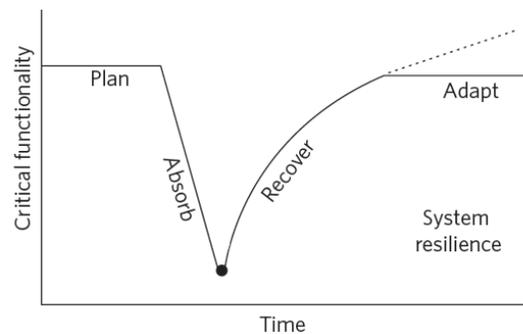


Figure 1. Adaptive Resilienz - vergleiche Linkov et al. (2014) [2]

In den Savannen Südafrikas gibt es zwei Haupteinflüsse, die zu Schädigungen führen. Zum einen hat der Mensch durch die zunehmende Landnutzung einen großen Einfluss - sei es durch Abholzen von Bäumen oder die Viehzucht, bei der die Tiere Grasflächen abgegrast werden. Zum anderen hat der Klimawandel durch steigende Temperaturen und extremere Wetterbedingungen Einfluss auf das Ökosystem.

Um ein tieferes Verständnis des Savannenökosystems, dessen adaptiver Resilienz und der Elemente des Ökosystems zu erlangen, wird ein Individual-based Model erstellt. Dieses Modell wird mit einem Multiagentensystem validiert.

Die Ziele von ARS AfricaE werden aus Sicht der Informatik in drei Teile unterteilt. Der erste Teil ist die Datenintegration. Hierbei wird eine Infrastruktur aufgebaut, die eine effiziente Speicherung und Verwaltung von ökologischen Daten gewährleistet. Darauf aufbauend werden Modelle und Szenarien entworfen und Simulationen durchgeführt. Der letzte Schritt besteht in der Auswertung und Visualisierung der zuvor gewonnenen Ergebnisse.

Die beiden Schritte der Erstellung eines Individual-based Models und die Simulation sind die Motivation für diese Arbeit.

III. INDIVIDUAL-BASED MODELLING

Dieses Kapitel bietet einen Überblick über die Anfänge und Entwicklung des Individual-based Modelings (im Fol-

genden IBM) bis in die Gegenwart. Dabei werden Klassifizierungsregeln und Best Practices für IBMs vorgestellt, so wie ein Standardprotokoll zu deren Beschreibung. Der Begriff IBM wird synonym mit Agent-based Modeling verwendet oder zu deutsch agentenbasierter Modellierung. Im Kontext der Ökologie trifft man häufiger auf den Begriff IBM, weshalb er auch in dieser Arbeit verwendet wird.

A. Anfänge

Der Ansatz des IBMs findet in der Ökologie seit den 1970er Jahren Verwendung. Huston et al. (1988) [3] stellen in ihrer Arbeit IBM als Alternative zu dem bis dahin gängigen mathematischen State-variable Model vor. Beim State-variable Modeling wird der Zustand eines Systems durch Zahlen, die so genannten State-variables repräsentiert.

Der Nachteil des State-variable Models besteht darin, dass es zwei wesentlichen Grundsätzen der Biologie nicht gerecht wird. Zum einen werden individuelle Organismen oft mittels einer oder weniger Zahlen zusammengefasst. Huston et al. (1988) [3] führen hierfür eine Population als Beispiel an. Zum anderen vernachlässigen die meisten Modelle den räumlichen Bezug von Individuen. Dadurch wird der Einfluss, den Individuen aufeinander ausüben können, wenn sie sich räumlich nahe sind, nicht berücksichtigt.

Den alternativen Ansatz IBM beschreiben sie über dessen Eigenschaften, bieten jedoch keine genaue Definition. So wird in Bezug auf die Nachteile des State-variable Models darauf hingewiesen, dass ein individueller Organismus die logische Basiseinheit für ökologisches Modellieren ist, was beim IBM auch umgesetzt wird. Weiter wird darauf hingewiesen, dass ein Vorteil des IBMs ist, dass die Eigenschaften eines einzelnen Individuums gemessen und beobachtet werden können. Huston et al. (1988) [3] weisen allerdings auch darauf hin, dass das State-variable Model für bestimmte Anwendungsfälle weiterhin sehr nützlich bleibt und nicht vollständig von IBM abgelöst wird.

B. Abgrenzung und Klassifizierung

Bis in die 1990er Jahre fand IBM vermehrt Anwendung bei Modellierern in der Ökologie. Mit wachsendem Einsatz stieg jedoch auch die Anzahl der Fehlinterpretationen dieses Ansatzes, da bis dato keine klare Definition des Begriffs stattgefunden hatte. Uchmahski und Grimm (1996) [4] griffen dies auf und erstellten mit ihrer Arbeit eine Abgrenzung zwischen IBM und den klassischen Ansätzen, da sie der Ansicht waren, dass IBM nur dann als neuer Ansatz gesehen werden kann, wenn bestimmte Kriterien erfüllt werden. Daher erarbeiteten sie die folgenden vier Kriterien zur Klassifizierung von Modellen.

- **Komplexität des Lebenszyklusses eines Individuums.** Es werden drei Klassen von Komplexitäten genannt. Die niedrigste Komplexität ist bei den klassischen, mathematischen Modellen vorhanden. Ein Organismus wird lediglich durch seine Geburt, seinen Tod und die Anzahl seiner Nachkommen definiert. Die nächste Komplexitätsstufe berücksichtigt das Alter eines Individuums, dessen Größe oder Lebensphase. Außerdem besteht eine Abhängigkeit von Fortpflanzung und Tod vom Alter. Auf der höchsten Komplexitätsstufe ist IBM anzusiedeln. Als Beispiele in diesem Bereich führen Uchmahski und Grimm

(1996) [4] Wachstumskurven für ein Individuum und die Fortpflanzung von Tieren abhängig von Jahreszeiten an.

- **Modellierung von Ressourcen.** Hierbei wird danach klassifiziert, ob in einem Modell Ressourcen explizit oder implizit modelliert sind. Für ein IBM wird die explizite Modellierung gefordert. Begründet wird dies durch ein Beispiel, in dem die Entwicklung einer Population von den ihr zur Verfügung stehenden Ressourcen und nicht nur von der Populationsdichte abhängig ist.
- **Populationsrepräsentation durch reelle oder natürliche Zahlen.** In dieser Klassifizierung wird darauf hingewiesen, dass die Darstellung einer Population durch ihre Dichte, also mit reellen Zahlen, ein Ansatz aus dem mathematischen Bereich ist, der die einzelnen Individuen ignoriert. Ein IBM sollte daher immer die Population in natürlichen Zahlen ausdrücken.
- **Wandelbarkeit von Individuen.** Hierbei geht es um die modellierte Wandelbarkeit eines Individuums in Bezug auf dessen Verhalten. Im Speziellen geht es um den Umgang mit anderen Individuen gleichen Alters. Dabei wird vor allem der Aspekt der Konkurrenz hervorgehoben, der sowohl bei Menschen als auch bei Pflanzen zu einem veränderten Verhalten führt.

C. Best Practices und Kritik

Gute zehn Jahre nachdem Huston et al. (1988) [3] IBM als Modellierungsansatz für die Ökologie vorgestellt hatten, schrieb Grimm (1999) [5] einen Überblick über den Einsatz von IBM im vergangenen Jahrzehnt. Dazu untersuchte er 50 IBMs von Tierpopulationen.

Grimm (1999) [5] weist darauf hin, dass Huston et al. (1988) [3] sich vorwiegend mit der Fragestellung beschäftigten, warum ein Modellierer IBMs nutzen sollte. Dabei wurde allerdings vernachlässigt wie dies umzusetzen sei. Aus diesem Grund werden aus den untersuchten IBMs einige Best Practices, beziehungsweise Regeln zur Modellierung, abgeleitet.

Zuvor wird auf die Kritik eingegangen, die Grimm (1999) [5] an der Entwicklung von IBM übt. Ein Grund für den Einsatz von IBMs war, dass die klassischen, mathematischen Modelle das Individuum vernachlässigen und nur abstrakte und generelle Fragen zu beantworten versuchen. Bei den untersuchten IBMs wird jedoch kritisiert, dass sie teilweise in das andere Extrem verfallen, nämlich sich zu sehr auf die Details von Individuen beschränken und dabei eine eigentliche Fragestellung, die ein Modell beantworten soll, vernachlässigen.

Grimm (1999) [5] plädiert dafür IBMs und klassische Ansätze zu kombinieren, indem die theoretischen Fragestellungen der klassischen Ansätze mit dem Potential von IBMs verknüpft werden. Abbildung 2 visualisiert diese klassischen Top-down Ansätze links und die IBM rechts.

Die Aufzählung der Regeln zur Erstellung von IBMs beginnt Grimm (1999) [5] mit dem Hinweis "Individual-based modelling is MODELLING". Dabei sagt er, dass Modellieren eine kreative und anspruchsvolle Arbeit ist und als Mittel zur Problemlösung eingesetzt werden soll. Außerdem soll speziell

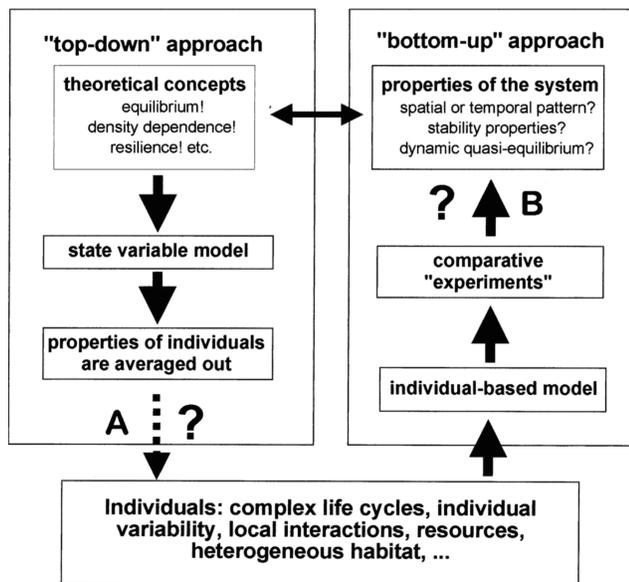


Figure 2. Top-down und Bottom-up Ansätze nach Grimm (1999) [5]

bei IBMs nicht davon ausgegangen werden, dass die Entitäten durch ihre Eigenschaften das Modell von selbst definieren. Verdeutlicht wird dies im nächsten Punkt *"Keep models as simple as possible"*. Es wird kritisch angemerkt, dass Modelle nicht mit zu vielen Details versehen werden sollten. Beispielsweise haben Biologen sehr detailliertes Wissen über Tiere, die sie untersuchen. Beim Modellieren können sie dazu neigen all ihr Wissen in das Modell einfließen zu lassen, auch welches, das für das Modell nicht relevant ist.

"The most important purpose of modelling is understanding". Dass das Verstehen das wichtigste am Modellieren ist wird mit der Hypothese unterstrichen, dass ein gutes Modell nach seiner Erstellung nicht mehr benötigt wird. Der nächste Punkt knüpft daran an. *"Modellers must adopt the attitude of experimenters"*. Diese Regel beschreibt auch, dass man das Verständnis eines Modells oder einer Simulation durch experimentieren vertiefen sollte - beispielsweise durch das Ändern von Eingabeparametern.

Es wird empfohlen beim Modellieren mit einem Muster als Ausgangspunkt zu arbeiten, das sich in der Natur wiederfindet. Dies bietet den Vorteil, dass Modelle dadurch besser überprüfbar sind. Dies wird durch folgende Regel ausgedrückt. *"Start modelling (if possible) with a pattern which can be observed in nature"*.

"Individual-based modelling must refer to the framework of classical theoretical ecology". Dieser Punkt bezieht sich auf das Zusammenspiel von klassischen Ansätzen und IBMs. Er stellt die bereits angesprochene Kritik dar, dass Top-down Ansätze zwar generelle Fragestellungen besser behandeln, jedoch das Individuum vernachlässigen. Mit IBMs, also Bottom-up Ansätze, hingegen ist es, in Bezug auf die Ökologie, schwer Aussagen über eine ganze Population zu treffen. Es sollte somit eine Kombination zwischen beiden Ansätzen genutzt werden. Das Zusammenwirken beider Ansätze wird in Abbildung 2 dargestellt. Der folgende Punkt setzt bei der eben genannten Idee an, klassische Ansätze und IBMs zu kombinieren. *"IBMs should, if possible, be analysed with tools developed for state*

variable models".

D. Overview, Design concepts, and Details

Overview, Design concepts, and Details (im Folgenden ODD) ist ein Standardprotokoll zur Beschreibung von IBMs, das Grimm et al. (2006) [6] erstellt haben. Der Bedarf eines solchen Standards wird damit begründet, dass der Einsatz von Agenten nicht nur in der Ökologie ständig zunimmt und es keine vorgegebene Form gibt diese Modelle zu beschreiben. Klassische, mathematische Modelle sind nicht nur weniger komplex als IBMs, sondern lassen sich auch einfacher formal spezifizieren. Weiterführend baut die Wissenschaft darauf auf Erkenntnisse reproduzieren zu können. Dafür muss ein Model klar strukturiert und verständlich sein. Grimm et al. (2006) [6] fassen dies mit folgenden Worten zusammen: *"A standard protocol for the description of IBMs would make reading and understanding them easier because readers would be guided by their expectations."*

Vier Jahre nach der Veröffentlichung des ODD stellen Grimm et al. (2010) [7] eine aktualisierte Version des Standardprotokolls vor. Die Aktualisierung wurde aufgrund der Analyse einiger IBMs, die mittels ODD dokumentiert wurden, vorgenommen. Im Folgenden wird die aktualisierte Version und deren Kernkomponenten vorgestellt.

Overview:

- Purpose
- Entities, state variables and scales
- Process overview and scheduling

Design Concepts:

- Design concepts

Details:

- Initialization
- Input data
- Submodels

Die oben genannten Punkte werden im Folgenden genauer dargestellt. Im *Purpose* wird die Fragestellung, die mit dem Modell versucht wird zu beantworten, vorgestellt. Im zweiten Punkt, *Entities, state variables, and scales*, werden die im Modell befindlichen Entitäten und die Attribute, die diese charakterisieren, beschrieben. Außerdem wird hier die Länge von Zeitintervallen und die Größe von Rasterzellen beschrieben. *Process overview and scheduling* - in diesem Abschnitt wird beschrieben, wie Agenten beziehungsweise Entitäten sich verhalten und in welcher Reihenfolge diese Aktionen durchgeführt werden. Beispiele für das Verhalten von Agenten sind Wachstum und Bewegung. Zur Darstellung hierfür können Diagramme oder Pseudocode genutzt werden.

Design concepts ist der umfangreichste Abschnitt und beschreibt die dem Modell zugrundeliegenden Entwurfskonzepte. Zu diesen Konzepten gehören die folgenden Punkte. Bei der Adaption wird die Fähigkeit von Entitäten beschrieben sich auf ändernde Umstände einzustellen. Dazu gehört auch die Beschreibung von Regeln zur Entscheidungsfindung. Das Lernen eines Individuums gehört ebenfalls dazu, also Verhaltensänderung durch gesammelte Erfahrung. Weiter wird in dem Interaktionskonzept beschrieben, ob und wie Individuen miteinander kommunizieren können.

Die übergeordnete Kategorie *Details* lässt sich in drei Punkte untergliedern. Beim Punkt *Initialization* des ODD wird der initiale Zustand eines Modells beschrieben. Beispielsweise welche und wie viele Entitäten vorhanden sind. Es wird auch beschrieben, ob der Start jedes Mal gleich ist oder gegebenenfalls der Startzustand variiert. *Input data* beschreibt Daten, die aus externen Quellen oder anderen Modellen kommen und von denen das eigene Modell beeinflusst wird. Unter dem Punkt *Submodels* werden die Submodelle im Detail beschrieben, die unter dem dritten Punkt *Process overview and scheduling* genannt werden.

IV. SIMULATIONSSOFTWARE

Nachdem erläutert wurde, wie IBMs erstellt werden und wie diese dokumentiert werden, werden in diesem Kapitel einige Implementierungen genannt, die es ermöglichen Modelle zu validieren. Dabei wird gängige Software vorgestellt, die unter anderem auch bei der Entwicklung der Modelle aus dem folgendem Kapitel verwendet wurden. Außerdem wird das MARS Framework beschrieben. Dabei handelt es sich um ein an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg entwickeltes hoch skalierbares Framework, das im Rahmen von ARS AfricaE eingesetzt werden soll.

A. NetLogo

NetLogo ist eine von Wilensky (1999) [8] entwickelte Programmiersprache. Entwickelt wurde sie für Ausbildungs- und Forschungszwecke. Dabei wurde darauf geachtet, dass der Einstieg möglichst einfach und schnell stattfinden kann. Eine graphische Unterstützung trägt zusätzlich dazu bei.

Auch wenn NetLogo bereits aus dem Jahre 1999 ist, so ist es noch nicht obsolet. Thiele et al. (2011) [9] stellen in ihrer Arbeit einige Erweiterungen für die Sprache vor und geben einen Ausblick auf weitere. Ein Nachteil von NetLogo ist allerdings, dass die Performanz nicht sehr gut ist. Daher sollte für umfangreiche Simulationen auf ein anderes Framework zurückgegriffen werden.

B. JADE

JADE (kurz für Java Agent Development Framework) ist die wohl bekannteste Software im Bereich der Multiagentensysteme. Es handelt sich dabei um eine agentbasierte Middleware. Bellifemine et al. (2007) [10] stellen JADE in ihrem Buch vor und richten sich dabei speziell an Entwickler, da auch herausgestellt wird, dass JADE erweiterbar ist. Es bietet außerdem eine graphische Unterstützung an.

JADE orientiert sich an den Standards der FIPA, kurz für Foundation for Intelligent Physical Agents. Diese Institution entwickelt Standards aus dem Bereich der agentenorientierten Software und Technologien. Dazu gehört auch die FIPA-ACL (kurz für Agent Communication Language), die Nachrichtenstruktur und -typen für Agentenkommunikation festlegt und in JADE Verwendung findet.

C. MASE

Die Software MASE wurde von Ralha et al. (2013) [11] entwickelt und baut auf dem im vorigen Abschnitt beschriebenen JADE auf. Zusätzlich wird MATLAB für einige Berechnungen eingesetzt. Die Software wurde nur lokal eingesetzt, ist jedoch auch verteilbar durch das Konzept der JADE-Container.

Um Modelle und Werte zu definieren wird XML eingesetzt. MASE bietet verschiedene Agenten- und Layerimplementierungen. Die Interaktion von Agenten lässt sich durch deren Level beeinflussen. Agenten eines höheren Levels haben Kontrolle über Agenten eines niedrigeren Levels.

Das Hauptziel der Software ist die Simulation von Land Use/Cover Change (LUCC). Dabei spielt der Prozess der Entscheidungsfindung eines Agenten, der einen Menschen repräsentiert, eine wichtige Rolle.

D. MARS

Das von Hüning et al. (2014) [12] vorgestellte Framework MARS ist ein verteiltes, hoch performantes Framework zur Durchführung von Simulationen mit Agenten. Hüning et al. (2014) [12] weisen darauf hin, dass mit der steigenden Verbreitung von IBMs sich auch die Anforderungen an die Simulationssoftware ändert. Szenarien werden immer größer und benötigen performante, skalierbare Frameworks. Außerdem soll es möglich sein Modelle aus verschiedenen Domänen und von unterschiedlichen Experten zu integrieren.

Es werden noch weitere Anforderungen formuliert, die die Software abdecken wird. Das Thema der Datenintegration wird in einem Modul umgesetzt. Daten werden zum Starten von Simulationen gebraucht, aber auch während einer Simulation erzeugt und danach ausgewertet. Ein wichtiger Punkt sind dabei Geoinformationen und deren Transformation. Weiter wird die Visualisierung ermöglicht, um die Entwicklung eines Szenarios zu verfolgen. Es wird möglich sein einen Teilausschnitt, beziehungsweise nur bestimmte Elemente eines Szenarios, zu betrachten.

Diese Anforderungen werden durch die Komponenten des MARS Frameworks umgesetzt. Zur Datenintegration werden die Komponenten GROUND, ROCK und SHUTTLE verwendet. GROUND verwaltet mit Hilfe eines Geoservers Geoinformationen, ROCK speichert Daten, die nicht mit Geoinformationen verknüpft sind und SHUTTLE bietet anderen Komponenten eine einheitliche Schnittstelle, um auf ROCK und GROUND zuzugreifen. LIFE ist die Kernkomponente des Frameworks und führt die verteilte Simulation durch. Die Komponenten VIEW und SURVEYOR sind für Analyse und Visualisierung zuständig.

Als Entwickler eines Modells werden die eben beschriebenen Komponenten genutzt. Ein wichtiger Punkt bei der Umsetzung eines Modells ist, dass MARS einen layer- beziehungsweise schichtenbasierten Ansatz verfolgt. Agenten werden auf Layern verteilt. Dieser Ansatz kommt aus dem Bereich der Geoinformationssysteme. Wie Layer unterteilt oder zusammengefasst ist nicht vorgeschrieben. Ein Layer kann beispielweise für Typen von Agenten stehen oder für Umweltfaktoren.

V. MODELLE

In diesem Kapitel werden zwei IBMs vorgestellt, die die Interaktion zwischen Menschen und Ökosystemen abbilden. Beide bauen auf einem Konzept für die Erstellung von sozio-ökologischen Modellen auf, das im folgenden Abschnitt erläutert wird. Weiter wird der Einsatz unterschiedlicher Szenarien im Zusammenhang mit einem der Modelle beschrieben.

A. LUDAS

Le et al. (2008) [13] stellen in ihrer Arbeit ein Konzept für die Erstellung von sozio-ökologischen Modellen vor. Betitelt ist das System als *Land Use Dynamic Simulator (LUDAS)*. Das in der Arbeit vorgestellte Konzept wenden Le et al. (2010) [14] auf ein Modell zur Untersuchung von Landnutzungsregelungen und deren Auswirkungen auf das Ökosystem in einem bestimmten Gebiet an. Dabei handelt es sich um ein Gebiet, welches um einen Flussverlauf in einer Gebirgsregion in Zentral-Vietnam gelegen ist. Folgend wird das Konzept und das Modell erläutert.

1) *Konzept für sozio-ökologische Modellierung*: Das von Le et al. (2008) [13] vorgestellte Konzept eines Modell-Frameworks besteht im Wesentlichen aus vier Komponenten:

- Eine Komponente beschreibt das System einer menschlichen Population. Dabei werden Haushalte als Granularitätsstufe für Agenten verwendet. Die Agenten verfügen dabei über ein eigenes Modell zur Entscheidungsfindung in Bezug auf der Fragen der Landnutzung.
- Eine weitere Komponente beschreibt das System der Umwelt beziehungsweise der Landschaft. Diese wird ebenfalls durch Agenten repräsentiert.
- Landnutzungsregeln, die den Entscheidungsprozess der menschlichen Agenten beeinflussen bilden eine eigene Komponenten. Durch das Ändern der Landnutzungsregeln in dieser Komponente lässt sich das Verhalten der menschlichen Agenten beeinflussen und dadurch können verschieden Szenarien abgebildet werden.
- Der Entscheidungsprozess von menschlichen Agenten wird in einer eigenen Komponente abgebildet. Dieser bestimmt die Aktionen von menschlichen Agenten aufgrund der Landnutzungsregeln der vorigen Komponente und der aktuellen Zustände der menschlichen Agenten und deren Umwelt.

Abbildung 3 stellt die eben beschriebenen Komponenten und deren Interaktion dar.

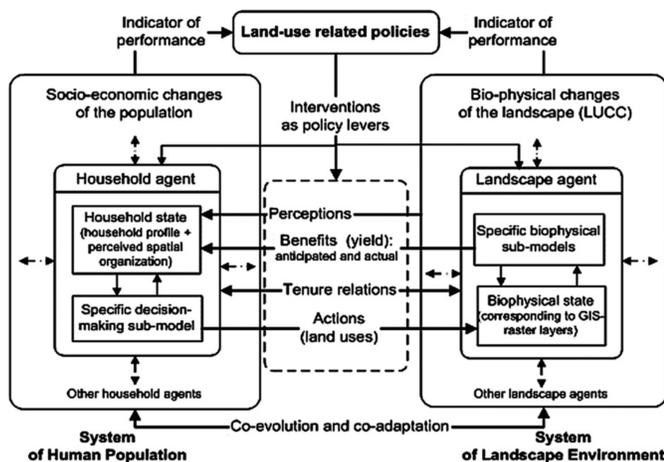


Figure 3. Konzept von LUDAS von Le et al. (2008) [13]

2) *Modell*: In der Arbeit von Le et al. (2010) [14] wird ein Modell vorgestellt, in dem der Einfluss von Landnutzungsregeln auf ein Gebiet, welches um einen Flusslauf in Zentral-Vietnam gelegen ist, untersucht wird. Die Landschaft der Gebirgsregion ist durch Wälder und landwirtschaftliche Nutzung bestimmt. Die staatlichen Landnutzungsregelungen sind darauf ausgelegt, die Abholzung der Waldbestände zu regulieren und gleichzeitig die Landwirtschaft zu fördern. Da jedoch einige Wissenschaftler davon abraten die landwirtschaftliche Nutzung auszuweiten und es auch Uneinigkeit in Bezug der auf die Nutzung der Waldbestände gibt, untersuchen Le et al. (2010) [14] die Auswirkungen verschiedener Szenarien. Das Modell, das sie dazu benutzen, wurde durch das von Grimm et al. (2006) [6] vorgestellte ODD Protokoll dokumentiert.

Die untersuchten Szenarien werden über die Menge von Regeln zur Landnutzung als Eingabe und deren sozio-ökologischen Auswirkungen im Verlauf der Simulation definiert. Es werden drei Landnutzungsregeln betrachtet, die in den Szenarien unterschiedliche Ausprägungen annehmen. Die erste Regel betrifft den Schutz der Waldbestände und die Regulierung der Abholzung. Die zweite Regel bezieht sich auf die Ausweitung der landwirtschaftlichen Nutzung und die letzte Regel betrifft die Subventionierung der Landwirtschaft.

Le et al. (2010) [14] demonstrieren, anhand der genannten Szenarien und deren Untersuchung, wie sich der Einsatz von IBMs zu einem besseren Verständnis menschlichen Einwirkens auf ein Ökosystem nutzen lässt. In diesem Fall wird ein besonderes Augenmerk auf die Regulierung des menschlichen Handelns gelegt. Für die Umsetzung wurde das in Abschnitt IV-A vorgestellte NetLogo verwendet.

B. Cerrado und MASE

Ralha et al. (2013) [11] stellen zusammen mit der entwickelten Software ihr Modell MASE vor (siehe Kapitel IV-C). Untersuchungsgegenstand des Modells ist die sich ändernde Landnutzung (beziehungsweise Land Use/Cover Change - LUCC) der Savanne Cerrado in Zentral-Brasilien. Da Cerrado flächenmäßig sehr groß ist und sich über 22% der Fläche Brasiliens erstreckt, wird der untersuchte Bereich auf den Distrito Federal, ein Bundesdistrikt in Zentral-Brasilien, beschränkt. Die Notwendigkeit der Untersuchung begründen die Autoren damit, dass Cerrado durch die ansteigende Viehzucht und den Anbau von Sojapflanzen zunehmend verändert wird. Außerdem gibt es kaum Kontrollen bezüglich der Landnutzung und des Weiteren sind die Auswirkungen, die diese Änderungen haben, kaum erforscht.

Zur Dokumentation ihres Vorgehens und des Modells nutzen sie, wie auch Le et al. (2010) [14], das ODD Protokoll. Außerdem bauen sie auf LUDAS von Le et al. (2008) [13] auf und entwickelt das Modell für ihre Zwecke weiter.

Ziel der Untersuchung ist die Entwicklung von nachhaltigen Landnutzungsstrategien. Ein wichtiger Punkt dabei ist der Entscheidungsprozess eines Agenten, der einen Menschen simulieren soll. Ralha et al. (2013) [11] folgen dabei einer Methode von Smajgl et al. (2011) [15] zur empirischen Charakterisierung von Agentenverhalten und erweitern dadurch das von Le et al. (2008) [13] entwickelte LUDAS.

Die Beschreibung des Modells nach dem ODD Protokoll wird an dieser Stelle kurz erläutert.

Purpose. Ziel der Untersuchung ist die Entwicklung von nachhaltigen Landnutzungsstrategien.

Entities, state variables and scales. MASE unterscheidet zwischen zwei Arten von Agenten: Menschliche Agenten und räumliche Agenten. Menschliche Agenten werden als "Transformer Agents (TA)" bezeichnet, da sie sich eines Entscheidungsprozess bedienen und aufgrund dessen Aktionen ausführen, die Auswirkungen auf die Umwelt haben. Räumliche Agenten stellen eine Rasterzelle der Umwelt dar. Die Umwelt ist in Rasterzellen unterteilt, die jeweils einen Hektar groß sind. Das Konzept der Agenten folgt dem von LUDAS und ist dadurch vergleichbar mit dem Konzept aus Abbildung 3. Der zeitliche Ablauf ist in Wochen unterteilt.

Process overview and scheduling. In jedem Zeitintervall werden Interaktionen zwischen den Agenten ausgeführt. Dabei wird zuerst die Umgebung aktualisiert und dann der Entscheidungsprozess des menschlichen Agenten durchgeführt.

Design Concepts. Unter diesem Punkt ist beschrieben, dass sich das Verhalten eines Agenten durch die Agentenklasse bestimmt wird, der er zugehörig ist. Das Verhalten einer jeden Agentenklasse ist durch die zuvor beschriebene empirische Studie spezifiziert. Die Interaktion zwischen Agenten kann direkt oder indirekt stattfinden. Direkte Interaktion kann bei Konkurrenz um eine Rasterzelle auftreten. Dabei wird je nach Agentenklasse entschieden, wer die Rasterzelle einnimmt. Indirekte Interaktion kann dadurch stattfinden, dass das Verhalten eines Agenten, die Entscheidungen eines sich in der Nähe befindlichen, anderen Agenten beeinflusst. Um eine Simulation zu überwachen wird in jedem Zeitabschnitt der Zustand der Landnutzung gespeichert.

Initialization. Als Eingabeparameter nutzt MASE Satellitendaten von Landsat-Satelliten zur Erstellung der Umwelt. Die Satellitenbilder sind aus den Jahren 2002 und 2008. Die Anzahl der menschlichen Agenten muss bei der Initialisierung auch angegeben werden und richtet sich nach den Bevölkerungszahlen.

Input. Es werden drei Input-Parameter genannt. Bilder des zu untersuchenden Gebietes, eine Menge von Landnutzungsregeln und Bilder der Infrastruktur (Schienen, Straßen, Flüsse, etc.).

Sub modules. Als Untermodell wird ein endlicher Automat aufgeführt, der die verschiedenen Zustände und mögliche Übergänge einer Rasterzelle beschreibt. Ein Beispiel dafür ist, dass eine Rasterzelle, die landwirtschaftlich genutztes Land darstellt zu natürlicher Vegetation übergehen kann. Eine Rasterzelle, die zu einer Stadt gehört, hat diesen Übergang jedoch nicht.

VI. AUSBLICK

Dieser Abschnitt gibt einen Ausblick über die Ziele, die im kommenden Projekt erreicht werden sollen. Wie im Kapitel II über ARS AfricaE beschrieben soll ein IBM erstellt werden. Dazu wurde ein Bereich von 4 x 4 km bei Skukuza zur Untersuchung ausgewählt. Skukuza ist ein Camp im Krüger-Nationalpark in Südafrika.

Neben der Erstellung des Modells gibt es einige Aufgaben in Bezug auf das MARS Framework, angefangen mit der Datenintegration. Der Vorteil bei dem gewählten Bereich ist, dass es Messdaten gibt, die teilweise mehr als 50 Jahre abdecken. Die vorhandenen Daten reichen von Baumbestände

und deren geographische Position, bis hin zu CO₂-Werten. Der Nachteil an diesen Werten ist, dass sie oft nicht in einheitlichen Formaten vorliegen. Um die Daten für Simulationen nutzen zu können, müssen sie in einheitliche Formate überführt und in der MARS Infrastruktur gespeichert werden.

Die Visualisierung der Simulationsergebnisse ist ebenfalls geplant. Hierfür muss die bestehende Visualisierungskomponente angebunden und gegebenenfalls angepasst werden.

Um einen ersten technischen Durchstich zu erlangen ist die Erstellung eines Modells eines Marula-Baumes, auch Elefantentannenbaum genannt, geplant. Dies ist eine Baumart, die häufig um Skukuza vorkommt. Darauf aufbauend sollen weitere Pflanzen und Tiere in das Modell integriert werden. Das erstellte Modell soll mit Hilfe der gesammelten Daten von Skukuza validiert und verbessert werden.

Bei der Dokumentation soll das ODD Protokoll nach Grimm et al. (2010) [7] genutzt werden. LUDAS (siehe Abschnitt V-A) von Le et al. (2008) [13] soll dabei vorerst nicht oder nur teilweise zum Einsatz kommen. Der Schwerpunkt des Konzepts liegt auf der Simulation menschlicher Entscheidungen aufgrund von Landnutzungsregeln. Das Modell für ARS AfricaE wird anfangs einen Schwerpunkt auf Bäume und Tiere legen. Ein zukünftiger Einsatz ist allerdings durchaus möglich.

Mit der Erstellung des Modells und der Durchführung von Simulationen wird die Erforschung der adaptiven Resilienz des untersuchten Systems vorangetrieben.

VII. ZUSAMMENFASSUNG

Das Projekt ARS AfricaE hat zum Ziel das Savannenökosystem in Südafrika zu erforschen und mit Hilfe des gewonnenen Wissens dieses zu schützen. Um dieses Projekt zu unterstützen wird ein Individual-based Model erstellt, welches das Ökosystem Savanne abbildet.

Diese Arbeit gibt dazu einen Überblick über die Entwicklung des Individual-based Modelings, Best Practices zu deren Erstellung. Außerdem wird ein etablierten Standard zur Beschreibung solcher Modelle vorgestellt.

Weiter werden Multiagentensysteme beschrieben, die zur Simulation solcher Modelle eingesetzt werden. Dazu gehört auch das MARS Framework, das an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg entwickelt wurde, und für die Simulation eines zukünftigen Modells verwendet wird.

Außerdem werden zwei sozio-ökologische Modelle vorgestellt, von denen sich eines auch mit der Modellierung einer Savanne und deren Nutzung durch Menschen befasst.

REFERENCES

- [1] M. Robinson, "Making adaptive resilience real resilience real Making adaptive resilience real," Cycle, no. July, 2010.
- [2] I. Linkov, T. S. Bridges, F. Creutzig, J. Decker, C. Fox-Lent, W. Kröger, J. H. Lambert, A. Levermann, B. Montreuil, and J. S. Nathwani, "Changing the Resilience Paradigm," Nature Climate Change, vol. 4, 2014, pp. 407–409.
- [3] M. Huston, D. DeAngelis, and W. Post, "New Computer Models Unify Ecological Theory," BioScience, vol. 38, no. 10, 1988, pp. 682–691.
- [4] J. Uchmański and V. Grimm, "Individual-based modelling in ecology: what makes the difference?" Trends in ecology & evolution (Personal edition), vol. 11, no. 1995, 1996, pp. 437–441.
- [5] V. Grimm, "Ten years of individual-based modelling in ecology: What have we learned and what could we learn in the future?" Ecological Modelling, vol. 115, 1999, pp. 129–148.

- [6] V. Grimm, U. Berger, F. Bastiansen, S. Eliassen, V. Ginot, J. Giske, J. Goss-Custard, T. Grand, S. K. Heinz, G. Huse, A. Huth, J. U. Jepsen, C. Jørgensen, W. M. Mooij, B. Müller, G. Pe'er, C. Piou, S. F. Railsback, A. M. Robbins, M. M. Robbins, E. Rossmanith, N. Rüger, E. Strand, S. Souissi, R. a. Stillman, R. Vabø, U. Visser, and D. L. DeAngelis, "A standard protocol for describing individual-based and agent-based models," *Ecological Modelling*, vol. 198, 2006, pp. 115–126.
- [7] V. Grimm, U. Berger, D. L. Deangelis, J. G. Polhill, J. Giske, and S. F. Railsback, "The ODD protocol : A review and first update Author ' s personal copy," *Ecological Modelling*, vol. 221, 2010, pp. 2760–2768.
- [8] U. Wilensky, "NetLogo," 1999. [Online]. Available: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>
- [9] J. Thiele, W. Kurth, and V. Grimm, "Agent-and individual-based Modelling with NetLogo: introduction and New NetLogo Extensions," *Die Grüne Reihe*, no. September 2010, 2011, pp. 68–101.
- [10] F. Bellifemine, G. Caire, and D. Greenwood, *Developing Multi-Agent with JADE Systems*, 2007.
- [11] C. G. Ralha, C. G. Abreu, C. G. C. Coelho, A. Zaghetto, B. Macchiavello, and R. B. Machado, "A multi-agent model system for land-use change simulation," *Environmental Modelling and Software*, vol. 42, 2013, pp. 30–46. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.12.003>
- [12] C. Hüning, J. Wilmans, N. Feyerabend, and T. Thiel-clemen, "MARS – A next - gen multi - agent simulation framework," no. 2008, 2014, pp. 1–14. [Online]. Available: <http://3ten.de/download/marslife/MARS-A-next-gen-simulation-framework.pdf>
- [13] Q. B. Le, S. J. Park, P. L. G. Vlek, and A. B. Cremers, "Land-Use Dynamic Simulator (LUDAS): A multi-agent system model for simulating spatio-temporal dynamics of coupled human-landscape system. I. Structure and theoretical specification," *Ecological Informatics*, vol. 3, 2008, pp. 135–153.
- [14] Q. B. Le, S. J. Park, and P. L. G. Vlek, "Land Use Dynamic Simulator (LUDAS): A multi-agent system model for simulating spatio-temporal dynamics of coupled human-landscape system. 2. Scenario-based application for impact assessment of land-use policies," *Ecological Informatics*, vol. 5, no. 3, 2010, pp. 203–221. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoinf.2010.02.001>
- [15] A. Smajgl, D. G. Brown, D. Valbuena, and M. G. a. Huigen, "Empirical characterisation of agent behaviours in socio-ecological systems," *Environmental Modelling and Software*, vol. 26, no. 7, 2011, pp. 837–844. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.02.011>