

**Zeitschrift:** Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

**Herausgeber:** Schweizerischer Forstverein

**Band:** 163 (2012)

**Heft:** 10

**Artikel:** Vorgehen zur agentenbasierten Modellierung eines schweizerischen Waldenergieholzmarktes

**Autor:** Kostadinov, Fabian / Steubing, Bernhard / Holm, Stefan

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1097688>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 09.04.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Vorgehen zur agentenbasierten Modellierung eines schweizerischen Waldenergieholzmarktes

Fabian Kostadinov Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)\*  
Bernhard Steubing Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (CH)  
Stefan Holm Institut für Informatik, Universität Zürich (CH)

## Procedure to develop an agent-based model of a Swiss forest wood fuel market

It is helpful to develop agent-based model based on a structured procedure. The chosen traditional software engineering approach is mainly composed of five phases: 1) the analysis of the observed system; 2) the model development; 3) the detailed design; 4) the actual software implementation; and 5) the model's evaluation. The different phases are briefly described by the respective goals, tasks and expected results. This contribution shows the development of a Swiss forest wood fuel market with specific examples for each phase. The essential work steps and intermediate results are demonstrated from the start to a fully developed agent-based model. Finally it is demonstrated how to carry through scenario analyses for the modeled forest wood fuel market. The simulation example shows first that, as is to be expected, a reduction of the wood supply leads to increasing forest wood fuel prices. Second, it shows how the decision behavior of wood suppliers can additionally modify the price of forest wood fuel in a situation of scarce supply, whereas this effect is smaller in a situation of balanced supply and demand.

**Keywords:** agent-based modeling, market simulation, energy wood  
**doi:** 10.3188/szf.2012.0422

\* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail fabian.kostadinov@wsl.ch

Agentenbasierte Modelle bieten die Möglichkeit zur Exploration von emergenten, d.h. sich spontan herausbildenden Eigenschaften komplexer sozialer Systeme. Märkte sind solche komplexe soziale Systeme. Sie werden typischerweise als Prozess und Resultat der Interaktion von Individuen, den Marktteilnehmern, aufgefasst. Die Aggregation der Interaktionen der Marktteilnehmer auf der einzelwirtschaftlichen Ebene führt gemäss der Standardökonomie zu einem beobachtbaren Gesamtmarktverhalten. Diesen Ansatz macht sich die agentenbasierte Modellierung (ABM) zunutze: Sie modelliert Individuen als Softwareagenten, lässt diese miteinander interagieren und aggregiert anschliessend diese Interaktionen zu einem Gesamtverhalten. Prozesse und Veränderungen können somit gleichzeitig aus der Mikro- wie auch der Makroperspektive näher untersucht werden, und es werden Szenarioanalysen im Sinne von Wenn-dann-Fragestellungen möglich.

Die agentenbasierte rechnergestützte Ökonomie (Englisch: agent-based computational economics, ACE) beschäftigt sich mit der Simulation ökonomischer Fragestellungen mittels ABM (Tessatton 2006, de Marchi & Page 2008). Eine allgemeine

Einführung in das Thema der ABM von Märkten mit besonderer Berücksichtigung der Modellierung von Holzmärkten bietet Troitzsch (2012, dieses Heft). Im Bereich der Forstwirtschaft kamen agentenbasierte Modelle bisher beispielsweise zur Simulation von Managemententscheidungen (Pérez & Dragičević 2010, Purnomo & Guizol 2006) oder des Waldwachstums und Holzhandels (Gebetsroiter et al 2006) zum Einsatz.

Im vorliegenden Artikel wird beispielhaft die schrittweise Entwicklung eines agentenbasierten Modells eines schweizerischen Waldenergieholzmarktes aufgezeigt. Während eine frühere Modellversion (Olschewski et al 2009, Kostadinov & Steubing 2011) noch weitgehend auf standardökonomischen Annahmen beruhte, wurde die hier vorgestellte Version bezüglich Funktionalität und Komplexität erheblich erweitert. Im Folgenden soll von Marktteilnehmern oder Marktakteuren jeweils dann die Rede sein, wenn realweltliche Entscheidungsträger gemeint sind, und von Agenten, wenn als deren Abbildung modellhafte Softwareartefakte bezeichnet sind.

Da es sich bei agentenbasierten Modellen letztlich um Softwareartefakte handelt, ähnelt das Erstellen derselben dem Vorgehen der traditionellen Soft-



Abb 1 Agentenbasierte Modelle eignen sich, um die Verfügbarkeit des Waldenergieholzes zu beurteilen. Foto: Oliver Thees

wareentwicklung. Die agentenbasierte Modellierung besitzt jedoch auch einige spezifische Eigenheiten. Von Standardsoftware unterscheidet sie sich in Bezug auf die Zielsetzung: Nicht Arbeitsabläufe werden gesteuert oder unterstützt, sondern es werden soziale Netze und die Interaktionen der Netzteilnehmer simuliert. Nach Macal & North (2006) unterscheidet sie sich von herkömmlicher Simulationssoftware wiederum dadurch, dass nicht in erster Linie eine Prozessperspektive eingenommen wird, sondern Softwareeinheiten – die Agenten – im Mittelpunkt des Interesses stehen. Nikolić & Ghorbani (2011) schlagen, analog zum traditionellen Softwareentwicklungsprozess, ein systematisches Vorgehen in fünf Schritten vor:

1. Analyse des Systems
2. Modellentwurf (konzeptueller Entwurf)
3. Detaillierter Entwurf
4. Softwareimplementierung
5. Modellevaluation

Der Beitrag ist diesen fünf Schritten gemäss gegliedert. In der Realität können diese Schritte selten streng sequenziell durchgeführt werden, sondern überlappen sich mindestens teilweise. Nach Nikolić (2009) werden komplexe Systeme wie agentenbasierte Modelle letztlich nicht im traditionellen Sinne phasenbasiert entworfen und implementiert, sondern sie entstehen vielmehr aus einfacheren Systemen pfadabhängig und unter Einbezug verschiedener Stakeholder koevolutiv. Das Vorgehen ist somit eher «inkrementell» (Macal & North 2007) beziehungsweise «iterativ» (Nikolić 2009).

Das Entwerfen eines agentenbasierten Modells ist immer auch ein sozialer Erkenntnisgewinnungsprozess, bei welchem verschiedene Stakeholder in

verschiedenen Phasen hinzugezogen werden müssen. Der dabei erzielte Erkenntnisgewinn durch Offenlegung und Bündelung von Wissen ist ein wesentlicher Aspekt der ABM.

## Analyse des Systems

Das Ziel dieser Phase besteht darin, die Ausgangslage zu erfassen und verständlich darzulegen, klare Projektziele und eine eindeutige Fragestellung zu formulieren, die mittels ABM beantwortet werden soll (Macal & North 2007). Es sollte Einigkeit darüber hergestellt werden, wofür und von wem das Modell überhaupt genutzt werden soll. Die Problemomäne<sup>1</sup> muss abgegrenzt werden, sodass klar ist, wer oder was modelliert werden soll. In Bezug auf ABM als Methode ist insbesondere ihre Eignung zur Beantwortung der Fragestellung vorrangig zu prüfen (Abbildung 1). Ebenfalls wichtig ist es, sich über das angestrebte grundlegende methodische Vorgehen klar zu werden.

Nikolić & Ghorbani (2011) zählen unter anderem vier Punkte als Resultat dieses Prozesses auf, die als Grundlage für den Modellentwurf dienen: 1) eine Liste der Akteure und ihres Verhaltens, 2) eine Liste der sozialen Beziehungen der Akteure, 3) eine Spezifikation der von den Akteuren ausgeführten Aktionen und 4) eine Beschreibung der Umwelt, in welcher die Akteure tätig sind.

Im Rahmen eines Projekts des Kompetenzzentrums für Energie und Mobilität (CCEM) wurde in Zusammenarbeit mit der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) und der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa) ein agentenbasiertes Modell eines schweizerischen Waldenergieholzmarktes am Beispiel eines Kantons entwickelt. Das Ziel bestand darin, die relevanten Faktoren für die Marktverfügbarkeit von Waldenergieholz besser verstehen zu können. Ein besonderes Augenmerk wurde dabei auf das Entscheidungsverhalten von Förstern und Waldeigentümern gerichtet. Beach et al (2005) vergleichen in einer Metastudie mehrere Studien bezüglich des Managementverhaltens nicht industrieller Privatwaldbesitzer in mehreren nordeuropäischen Ländern und Staaten der USA. Wie sie aufzeigen, liegen dem Entscheidungsverhalten der untersuchten Gruppe auch nicht monetäre Anreizstrukturen zugrunde. Janssen & Jager (2001) wiederum zeigen in einer Studie, wie in einem agentenbasierten Modell [...] *verschiedene Arten kognitiver Verarbeitung, Änderungen der Präferenzen, die Fokussie-*

<sup>1</sup> A problem domain is the area of expertise or application that needs to be examined to solve a problem (Wikipedia). Domänenwissen bezeichnet somit das Wissen über ein Anwendungsgebiet.

nung auf das Bedürfnis nach Identität und soziale Netze wichtige Determinanten sind, welche zur Selektion von Produkten führen und Veränderungen der Marktdynamik erklären. Vor diesem Hintergrund wurden, basierend auf der Annahme, dass Marktteilnehmer nicht ausschliesslich monetär motiviert sind, ebenfalls nicht monetäre Anreizstrukturen in das Modell aufgenommen.

Um das an der WSL bereits vorhandene Domänenwissen zu erweitern, wurden in einem ersten Schritt Experteninterviews mit mehreren Förstern und Vertretern von Branchenvereinigungen (z.B. Holzenergie Schweiz, Holzindustrie Schweiz und IG Industrieholz) durchgeführt. Eine Übersicht über die Marktakteure und ihre Beziehungen gibt das nächste Kapitel.

## Modellentwurf

Nach Nikolić (2009) beinhaltet die Modellentwurfsphase alle Schritte, um das bis anhin noch weitgehend unstrukturierte, nicht geteilte Domänenwissen in strukturiertes, geteiltes Domänenwissen zu überführen. Daraus kann dann ein konzeptuelles Modell erstellt werden.

Um bei der Modellierung möglichst strukturiert vorzugehen, wurde entschieden, der MAIA-Methodologie (Methodological Approach to Institutional Analysis; Ghorbani et al 2010) zu folgen. MAIA ist eine auf dem Institutional Analysis and Development Framework (Ostrom 1999) und dem Opera-Framework (Dignum 2004) aufbauende Methodologie zur Modellierung von agentenbasierten Modellen. Von MAIA vorgeschlagen wird nebst einer methodischen Vorgehensweise eine Menge von Modellelementen, derer sich der Modellierer bedienen kann.

Aufbauend auf dem gesammelten Domänenwissen wurden zuerst die Märkte und die darin auftretenden Akteure identifiziert, wobei Akteure als Agenten abgebildet wurden. Dabei wurde die von MAIA (Ghorbani et al 2010) getroffene Unterscheidung

zwischen Rollen, Agenten und eine Rolle einnehmenden Agenten (Role Enacting Agent, REA) der Einfachheit halber vernachlässigt. Für jede Klasse von Agenten wurden Agententypen definiert. Die Märkte wurden gemäss MAIA als Teil der operativen Struktur (Operational Structure) als Handlungssituationen (Action Situations) abgebildet. Eine Handlungssituation bildet einen relativ autonom ablaufenden Prozess eines Modells ab, beispielsweise eine Interaktion von Agenten. Alle Handlungssituationen wurden abschliessend in eine sequenzielle Reihenfolge gebracht.

Es wurden vier Märkte modelliert (Tabelle 1): der Rundholzmarkt, der Waldenergieholzmarkt, der Markt für Erntedienstleistungen und der Markt für Fernwärme. Auf jedem Markt wird gemäss Modellannahmen nur ein einziges homogenes Gut beziehungsweise eine homogene Dienstleistungen gehandelt. Weitere Märkte, die nur summarisch als exogene Grössen im Modell abgebildet wurden und somit auch keine eigenen Handlungssituationen bilden, sind der Markt für Sägeprodukte, der Markt für Papier- und chemische Produkte, der Elektrizitätsmarkt und der Markt für Heizöl und Gas.

In unserem Modell treten Agenten als Anbieter von Gütern und Dienstleistungen, als Nachfrager oder als Intermediäre auf (Tabelle 1). Nicht alle Agenten werden in allen Märkten aktiv. Die Agenten sind: Förster, private Waldeigentümer, Forstunternehmer, Bündelorganisationen, Sägewerke, private Einzelhaushalte mit Holzheizung, von Gemeinden betriebene Holzheizungen, juristische Personen, die ein Gebäude mit eigener Holzheizung betreiben, die chemische Industrie, Fernwärmeanbieter und private Fernwärmeabnehmer.

In Abbildung 2 sind die Agentenklassen, die Märkte und die gehandelten Produkte in ihrem Zusammenhang dargestellt. Durchgezogene Pfeile zeigen mögliche Geschäftsbeziehungen in den verschiedenen Märkten. An der Pfeilspitze befinden sich die Anbieter einer Dienstleistung/Ware, am Pfeilanfang die Nachfrager derselben. Blaue Pfeile zeigen mögliche Geschäftsbeziehungen von Agen-

**Tab 1** Agentenklassen und Märkte im agentenbasierten Modell des Waldenergieholzmarkts.

Agent	Rundholzmarkt	Waldenergieholzmarkt	Markt für Erntedienstleistungen	Fernwärmemarkt
Förster	Anbieter	Anbieter	Nachfrager	–
Private Waldeigentümer	Anbieter	Anbieter	Nachfrager	–
Forstunternehmer	Intermediär	Intermediär	Anbieter	–
Bündelorganisationen	Intermediär	Intermediär	–	–
Sägewerke	Nachfrager	Anbieter	–	–
Private Einzelhaushalte mit Holzheizung	–	Nachfrager	–	–
Von Gemeinden betriebene Holzheizungen	–	Nachfrager	–	–
Juristische Personen mit Holzheizung	–	Nachfrager	–	–
Chemische Industrie	–	Nachfrager	–	–
Fernwärmeanbieter	–	Nachfrager	–	Anbieter
Fernwärmeabnehmer	–	–	–	Nachfrager

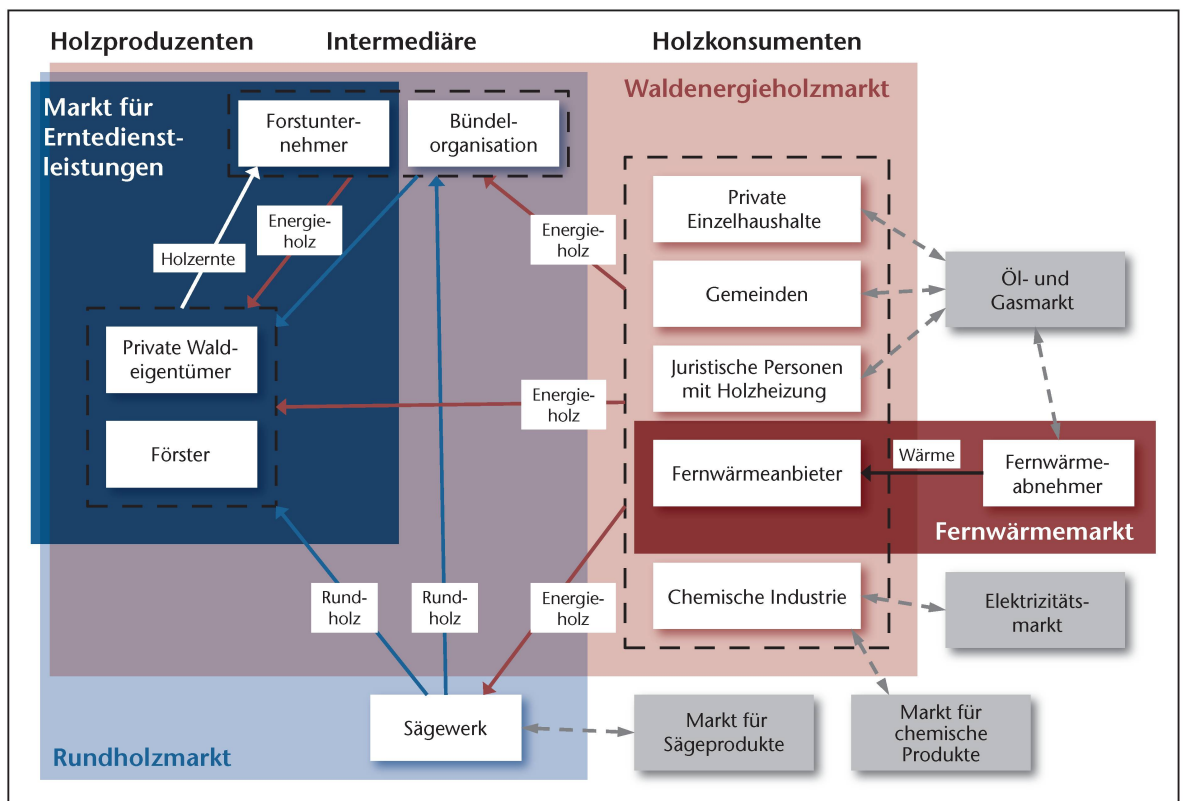


Abb 2 Aufbau des konzeptuellen Modells.

ten im Rundholzmarkt auf, rote Pfeile solche im Waldenergieholzmarkt, der weiße Pfeil solche im Markt für Erntedienstleistungen und der schwarze Pfeil solche im Fernwärmemarkt. Alle grauen, zweiseitigen, gestrichelten Pfeile subsumieren Interaktionen verschiedenster Art von Agenten mit exogen definierten Märkten.

Das Modell ist rundenbasiert implementiert. Eine Runde simuliert ein Jahr. Pro Runde werden einige Handlungssituationen einmal, andere mehrfach durchlaufen. Abbildung 3 zeigt die vier als Handlungssituationen modellierten Märkte sowie eine weitere Handlungssituation für den Markteintritt und -austritt von Heizungsbesitzern. Start und Ende der Simulation stellen keine eigenen Handlungssituationen dar, wurden aber zur vollständigen Darstellung ebenfalls eingefügt.

Der grundlegende Marktalgorithmus lautet:

1. Starte die Simulation.
2. Wiederhole für n Jahre:
  - 2.1. Handlungssituation «Fernwärmemarkt» ausführen.
  - 2.2. Handlungssituation «Markteintritt/-austritt» ausführen.
  - 2.3. Wiederhole 12× pro Jahr:
    - 2.3.1. Handlungssituation «Rundholzmarkt» ausführen.
    - 2.3.2. Handlungssituation «Waldenergieholzmarkt» ausführen.
    - 2.3.3. Handlungssituation «Markt für Erntedienstleistungen» ausführen.
3. Beende die Simulation.

Der Rundholzmarkt und der Waldenergieholzmarkt werden wiederum in je zwei Phasen ausgeführt. In der ersten Phase treten die Intermediäre am Markt als Anbieter auf, in der zweiten Phase als Nachfrager.

### Detaillierter Entwurf

Während in der Phase des Modellentwurfs der Fokus auf der Strukturierung von Domänenwissen lag, gilt das Augenmerk beim detaillierten Entwurf der Formalisierung, Ausarbeitung und Präzisierung der Modellelemente und der Strukturierung der noch zu erstellenden Software (Nikolić & Ghorbani 2011). Typische Resultate dieser Phase sind Klassen-, Zustands-, Fluss- und Interaktionsdiagramme. Bei Bedarf werden die zentralen Algorithmen in Pseudocode festgehalten. Spätestens am Ende dieser Stufe muss geklärt sein, welche Experimente und Szenarioanalysen durchgeführt und wie deren Resultate gemessen werden sollen.

Die beim Modellentwurf spezifizierten Modellelemente wurden wie folgt ausgearbeitet:

#### Anzahl der Agenten pro Klasse

Aufgrund der grossen Anzahl der modellierten Marktteilnehmer auf der einen und der beschränkten Rechenkraft selbst moderner Multiprozessorenrechner auf der anderen Seite ist es nötig, gewisse Marktteilnehmer in Gruppen zusammenzufassen. Ein Agent in der Simulation repräsentiert dann eine festgelegte Anzahl realer Marktteilnehmer.

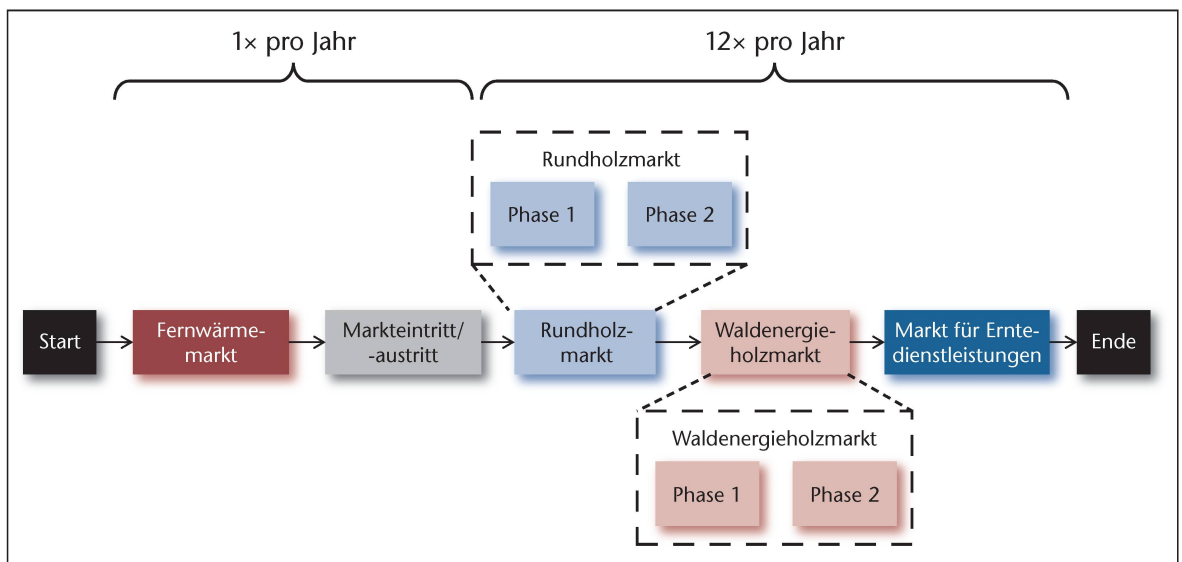


Abb 3 Zeitliche Abfolge der simulierten Handlungssituationen.

mer. Ein Skalierungsfaktor von zum Beispiel 50 bedeutet folglich, dass ein Agent 50 realen Marktteilnehmern entspricht. Folgende Anzahl Agenten wurden initial pro Simulationsdurchlauf festgelegt: Förster (80, nicht skaliert), private Waldeigentümer (285, Skalierungsfaktor 50), Forstunternehmer (35, nicht skaliert), Bündelorganisationen (5, nicht skaliert), Sägewerke (20, nicht skaliert), private Einzelhaushalte (200, Skalierungsfaktor 50), von Gemeinden betriebene Holzheizungen (29, Skalierungsfaktor 10), juristische Personen mit Holzheizungen (40, Skalierungsfaktor 10), Fernwärmeanbieter (20, nicht skaliert), chemische Industrie (2, nicht skaliert) und Fernwärmeabnehmer (200, Skalierungsfaktor 50).

### Agententypen

Gemäss MAIA (Ghorbani et al 2010) haben alle Agenten, sobald sie eine Rolle einnehmen, Ziele, die sie verfolgen, Nebenziele, die sie bei der Zielverfolgung berücksichtigen müssen, formale/informelle Verbote, Bewilligungen, Verpflichtungen, nach denen sie sich richten müssen, Informationen, auf welche sie Zugriff haben, materielle und immaterielle Ressourcen, über die sie verfügen können, individuelle Präferenzen, unterschiedliche Kapazitäten und Fähigkeiten zur Informationsverarbeitung usw.

Weiter lassen sich Agenten gleicher Klasse (z.B. Förster) hinsichtlich ihrer Präferenzen typisieren. So ist zu vermuten, dass Förster bei Verkaufsentscheidungen nicht in jedem Fall den Preis als alleiniges Entscheidungsmass heranziehen, sondern dass weitere Kriterien wie soziale Beziehungen oder besondere ökologische Erwägungen einen wichtigen Einfluss ausüben. Im Rahmen des Modellierungsprozesses müssen solche Agententypen und ihre Unterscheidungsmerkmale spezifiziert werden. Modelliert wurden beispielsweise vier verschiedene Förstertypen. Für die Einteilung der Förster in Typen stützten sich die Autoren auf verschiedene Stu-

dien aus dem Ausland (Amacher et al 2003, Majumdar et al 2008, Boon et al 2004, Jennings & Putten 2006) sowie auf eigenes Expertenwissen. Auch für andere Agentenklassen wurden verschiedene Typen eingeführt.

### Entscheidungsfindung der Agenten

Die Softwareagenten benutzen den analytischen Hierarchieprozess (AHP; Saaty 2008) für ihre Entscheidungsfindung. AHP ist eine Methode zur Entscheidungsfindung ähnlich der Nutzwertanalyse. In jeder Verhandlungsrunde priorisieren Verkäufer und Käufer diverse Anfragen respektive Offerten untereinander mittels AHP. Alle Agenten benutzen dieselben drei Kriterien zur Priorisierung:

- «Profit»: Der Variablenwert für das Profitkriterium setzt sich zusammen aus einem Preis- und einem Mengenanteil. Ein hoher Verkaufspreis erhöht den Variablenwert für einen Verkäufer und vermindert denselben für einen Käufer. Eine hohe Verkaufsmenge erhöht ihn sowohl für den Verkäufer als auch den Käufer. Dies entspricht den in der Realität durch grössere gehandelte Mengen eingesparten Transaktionskosten.
- «Freundschaft»: Für das Freundschaftskriterium wird zu Beginn der Simulation ein unveränderlicher Variablenwert zwischen einem Anbieter und einem Nachfrager gesetzt. Ein hoher Freundschaftswert repräsentiert eine enge Freundschaft beziehungsweise Kunden-Lieferanten-Beziehung zwischen Verkäufer- und Käuferagent.
- «Ökologie»: Das Ökologiekriterium wird gemessen als geografische Nähe zwischen Verkäufer- und Käuferagent. Je geringer die geografische Distanz, desto höher der Ökologiewert, da durch den Handel weniger Umweltbelastungen entstehen (Abbildung 4).

Durch unterschiedliche Gewichtung dieser Kriterien während des AHP ist es nun möglich, pro



**Abb 4** Kurze Transportdistanzen sind sowohl ökonomisch wie auch ökologisch effizient. Foto: Fritz Frutig

Agentenklasse unterschiedliche Agententypen einzuführen, die unterschiedliche Präferenzstrukturen von realen Marktteilnehmern abbilden. Ein profitorientierter Agent, welcher einen profitorientierten Marktteilnehmer abbildet, wird dem Profitkriterium ein höheres Gewicht beimessen als den anderen beiden Kriterien. Beispielsweise könnte er den Profit mit 0.7 gewichten, den Freundschaftsaspekt mit 0.2 und die Ökologieorientierung mit 0.1. Analog auch ein freundschafts- oder ein ökologieorientierter Agent. Bei der Initialisierung lassen sich so für die Simulation für jede Agentenklasse die Verhältnisse der Anzahl Agenten pro Agententyp zueinander festlegen. Theoretisch wäre es sogar möglich, für jeden einzelnen Agenten eigene Präferenzen zu wählen. Dies könnte interessant sein, wenn aufgrund von Umfragen konkrete Daten einzelner Marktteilnehmer bekannt sind.

#### Interaktion der Agenten

Die Ausführung der Geschäftsprozesse aller modellierten Märkte ist eines der zentralen Elemente des agentenbasierten Modells. Zur Illustration soll hier die Ausführung der Handelsprozesse auf dem Waldenergieholzmarkt geschildert werden. Die anderen modellierten Märkte verhalten sich in dieser Hinsicht ähnlich.

1. Alle Agenten, welche Waldenergieholz kaufen möchten (=Nachfrager), bestimmen ihren Bedarf. Jeder Nachfrageragent hat in der Simulation ein eigenes Telefonbuch, aus dem er eine Anzahl poten-

zieller Anbieteragenten auswählt, welchen er eine Nachricht schickt.

2. Alle Agenten, die Waldenergieholz verkaufen möchten (=Anbieter), haben bereits die Menge an Energieholz, welche ihnen zum Verkauf zur Verfügung steht, berechnet. Einer nach dem anderen bestimmt mittels AHP, welche Anfragen von Nachfragern er annehmen und welche er ablehnen möchte. Eine entsprechende Offerte wird an den jeweiligen Nachfrager geschickt.

3. Auch die Nachfrager benutzen nun AHP zur Evaluation verschiedener Offerten. Die besten Offerten werden akzeptiert, und ein verbindlicher Vertrag zwischen Käufer und Verkäufer wird erstellt. Alle anderen Offerten werden abgelehnt.

Nach einem Durchlauf der drei Schritte ist es möglich, dass es weiterhin Anbieter gibt, die noch gerne Waldenergieholz verkaufen möchten, während es Nachfrager gibt, die noch kein Waldenergieholz kaufen konnten. Aus diesem Grunde werden die drei Schritte für eine einzelne Ausführung des Waldenergieholzmarktes mehrfach hintereinander durchlaufen, wobei bei jeder Iteration die Nachfrager ihren Suchradius ausdehnen.

#### Softwareimplementierung

Das zuvor spezifizierte Modell wird nun als Software implementiert. Als Unterstützung bei der Implementierung agentenbasierter Modelle gibt es

verschiedene kommerzielle und freie Plattformen, Programmiersprachen, Bibliotheken und Softwareinstrumente. Einige bekannte ABM-Entwicklungsplattformen sind NetLogo,<sup>2</sup> Repast Symphony<sup>3</sup> oder AnyLogic.<sup>4</sup>

Das agentenbasierte Modell Waldenergieholzmarkt wurde in Java ausprogrammiert. Eingesetzt wurde auch eine OWL-basierte<sup>5</sup> Ontologiedatenbank. Dabei handelt es sich um eine Datenbank zur Speicherung von Wissen über realweltliche Zusammenhänge. Der Zugriff auf die Datenbank wurde mittels Jena<sup>6</sup> bewerkstelligt.

Einen nicht zu unterschätzenden Aufwand bedeutet die Kalibrierung des ausprogrammierten Modells. Agentenbasierte Modelle weisen typischerweise eine grosse Anzahl variabler Parameter auf, von welchen nur näherungsweise bekannt ist, in welcher Grössenordnung sie zu setzen sind, oder welche Auswirkungen eine Parametervariation auf die Simulation hat.

Während der Implementierungsphase mussten diverse Annahmen zu in den vorangehenden Phasen noch nicht spezifizierten Details getroffen werden. Um die Nachvollziehbarkeit weiterhin zu gewährleisten, wurde ein entsprechender Annahmekatalog erstellt.

## Modellevaluation

Das entworfene Modell sowie die implementierte Software müssen verifiziert und validiert (V&V) werden. Nach Gilbert & Troitzsch (2005) untersucht die Verifikation eines Modells, ob das Modell gemäss den an es gestellten Erwartungen korrekt arbeitet, während die Validierung untersucht, ob das Modell eine realitätsgetreue Abbildung des betrachteten Systems ist. Sargent (1998) gibt eine Übersicht über den generellen V&V-Prozess von Modellen sowie mögliche V&V-Techniken.

Ein wichtiges Instrument zur Verifikation eines agentenbasierten Modells stellen Sensitivitätsanalysen dar. Durch Variation der Modellparameter können einflussreiche Parameter des implementierten Modells identifiziert und es kann gezielt nach Orten von Unstetigkeit im Modellverhalten gesucht werden. Insbesondere müssen Extremwerte getestet werden, um sicherzustellen, dass das implementierte Modell auch unter diesen Bedingungen sinnvolle Ausgabewerte produziert. Typischerweise haben agentenbasierte Modelle eine Vielzahl von Parametern, die variiert werden können. Die während der Sensitivitätsanalysen anfallenden Datenmengen können sehr gross werden. Dementsprechend sollte die Auswertung der Simulationsdaten sorgfältig geplant und durchgeführt werden.

Wie verschiedene Autoren aufzeigen, ist allerdings besonders die Validierung agentenbasierter

Modelle notoriously schwierig, da es sich um die Abbildung sozialer Systeme handelt, deren zugrunde liegende Gesetzmässigkeiten – im Gegensatz zu physikalischen Systemen – nur unzulänglich bekannt sind (Louie & Carley 2008, Schutte 2010). Oreskes et al (1994) bestreiten gar die Möglichkeit einer Validierung von Modellen, wie es das unsere darstellt, in einem strengen Sinne. Die Suche nach geeigneten Validierungstechniken ist weiterhin Gegenstand aktueller Forschung.

Die geschriebene Software muss nun in Betrieb genommen und später gegebenenfalls gewartet werden. Im Betrieb auftauchende Fehler müssen behoben werden. Die entwickelte Software kann für Szenarioanalysen genutzt werden. Das Simulationsprogramm wird dabei für jedes Szenario mindestens einmal (üblicherweise viele Male) laufen gelassen.

Die Autoren sind momentan dabei, die V&V des implementierten Softwareprogramms voranzutreiben. Zur Validierung des konzeptuellen Modells des Waldenergieholzmarktes wurden Workshops mit Experten durchgeführt. V&V des implementierten Softwareprogramms sind noch im Gange. Geplant sind unter anderem systematische Sensitivitätsanalysen der Modellparameter mittels eines leistungsfähigen Cluster-Computers.

## Beispiel einer Szenarioanalyse

Im Folgenden ist ein Beispiel mit mehreren Szenarien aufgezeigt. Da das agentenbasierte Modell Waldenergieholz noch nicht genügend verifiziert und validiert ist, weisen die Autoren ausdrücklich darauf hin, dass es sich hierbei nur um ein Beispiel zu Demonstrationszwecken handelt. Keineswegs sollen dadurch gültige Aussagen über reale Waldenergieholzmärkte gemacht werden!

Idee: Es soll untersucht werden, ob sich eine verstärkt freundschaftsorientierte Ausrichtung der Holzanbieter (Szenarien 1 und 3) zulasten einer ökonomischen Ausrichtung (Szenarien 2 und 4) auf den Marktpreis für Waldenergieholz niederschlägt. Wie weiter oben gezeigt wurde, gibt es für die meisten Agentenklassen verschiedene Agententypen mit unterschiedlicher Präferenzstruktur. Die Szenarien 1 und 3 unterscheiden sich von den Szenarien 2 und 4 dadurch, dass in den Ersteren eine anteilmässige grössere Anzahl von Agenten auf allen Märkten ak-

2 <http://ccl.northwestern.edu/netlogo> (16.8.2012)

3 <http://repast.sourceforge.net> (16.8.2012)

4 <http://www.xjtek.com> (16.8.2012)

5 OWL: Web Ontology Language. Eine auf dem XML-Standard aufbauende Sprache zur Abbildung von Ontologien. Offizielle Homepage: [www.w3.org/TR/owl-features](http://www.w3.org/TR/owl-features) (16.8.2012)

6 Jena ist ein Java-basiertes Framework zur Speicherung und Verwaltung von semantischen Netzen. Offizielle Homepage: <http://jena.sourceforge.net> (16.8.2012)

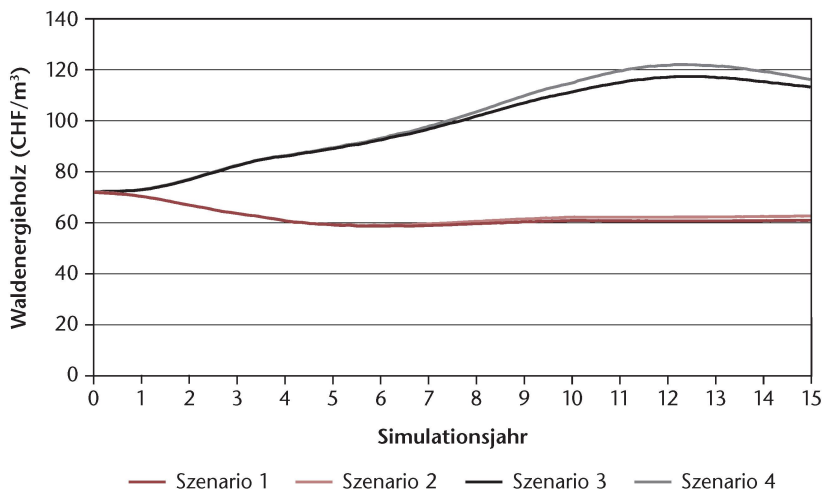


Abb 5 Simulierte Preisentwicklung bei unterschiedlichem Anbieterverhalten und unterschiedlichen Marktsituationen.

Szenario	Beschreibung	Simulierter, durchschnittlicher Waldenergieholzpreis über die Jahre 5–15
Szenario 1	Freundschaftsorientierte Holzanbieter; Ausgewogenheit von Angebot und Nachfrage	61 CHF/m <sup>3</sup>
Szenario 2	Profitorientierte Holzanbieter; Ausgewogenheit von Angebot und Nachfrage	62 CHF/m <sup>3</sup>
Szenario 3	Freundschaftsorientierte Holzanbieter; verknapptes Angebot	108 CHF/m <sup>3</sup>
Szenario 4	Profitorientierte Holzanbieter; verknapptes Angebot	111 CHF/m <sup>3</sup>

Tab 2 Simulierte durchschnittliche Waldenergieholzpreise in verschiedenen Szenarien.

tiv sind, die einem «freundschaftsorientierten» Typ zugeordnet sind, während in den Letzteren eine grössere Anzahl von Agenten einem «profitorientierten» Typ zugeordnet sind. Weiter entspricht in den Szenarien 1 und 2 die Gesamtmarktnachfrage nach Waldenergieholz ungefähr dem Gesamtmarktangebot, während in den Szenarien 3 und 4 eine Knappheitssituation von Waldenergieholz (Verringerung des Waldwachstums um 25%) simuliert wird. Der Simulationszeitraum wird auf 15 Jahre festgelegt. Zu Beginn der Simulation wird für alle Waldenergieholz konsumierenden Agenten ein Initialpreis für Waldenergieholz von 75 CHF/m<sup>3</sup> gesetzt.

Abbildung 5 zeigt den unterschiedlichen Verlauf der Waldenergieholzpreise über den simulierten Zeitraum. Ausgewiesen werden einzig Durchschnittspreise, die simulierten Einzelpreise liegen jeweils innerhalb eines Bandes von teilweise beträchtlicher Spannweite.

Die Simulation benötigt zuerst eine gewisse Anlaufzeit, hier ungefähr vier bis fünf Jahre, um einen dynamischen Gleichgewichtszustand zu erreichen. Bei den genannten Waldenergieholzpreisen wurden konsequenterweise die ersten fünf simulier-

ten Jahre nicht in die Berechnung des Preisdurchschnittes mit aufgenommen.

In Tabelle 2 sind die simulierten, durchschnittlichen Waldenergieholzpreise der Jahre 5 bis 15 aufgeführt. Den absoluten Zahlen sollte bei der Deutung weniger Gewicht beigemessen werden als dem relativen Verhältnis der Preiskurven zueinander. Die absoluten Zahlen sind sehr stark von einer Vielzahl von Parametern abhängig, für welche «korrekte» Werte empirisch nicht bekannt oder nur sehr schwer zu erheben sind.

Zuerst sollen nur die Szenarien 1 und 2 betrachtet werden. Es stellt sich heraus, dass eine verstärkte Freundschaftsorientierung der Holzanbieter sich im Modell unter den Umständen der Ausgewogenheit von Angebot und Nachfrage (Szenario 1) preislich nur geringfügig von einer verstärkten Profitorientierung der Holzanbieter (Szenario 2) unterscheidet. In einer Situation der Ausgeglichenheit von Waldenergieholzangebot und -nachfrage muss also geschlossen werden, dass innerhalb des Modells eine verstärkte Freundschaftsorientierung anstelle einer verstärkten Preisorientierung der Holzanbieter nur eine sehr geringe Auswirkung auf den Marktpreis von Waldenergieholz hat. Dies kann dadurch erklärt werden, dass bei einer Ausgeglichenheit von Angebot und Nachfrage die Holzanbieter jeweils mehr oder weniger alle Anfragen bedienen werden, um ihren gesamten Vorrat an Waldenergieholz verkaufen zu können. Unabhängig davon, mit welcher Präferenzstruktur (Freundschaftsorientierung oder Profitorientierung) sie mittels AHP die verschiedenen Anfragen untereinander bewerten, gehen sie am Ende trotzdem in den meisten Fällen auf sämtliche Anfragen ein. Dadurch macht es kaum einen Unterschied, nach welchen Kriterien sie verschiedene Anfragen priorisieren, denn am Ende werden ja alle Alternativen berücksichtigt und somit alle Nachfrager bedient.

Um zu untersuchen, ob dies auch in einer Knappheitssituation noch gilt, wurden die Szenarien 3 und 4 so festgelegt, dass das Gesamtmarktangebot von Waldenergieholz die Gesamtmarktnachfrage nicht befriedigt. Es ist in Abbildung 5 erkenntlich, dass die Preise in beiden Szenarien längerfristig ansteigen und mit 108 CHF/m<sup>3</sup> (Szenario 3) beziehungsweise 111 CHF/m<sup>3</sup> (Szenario 4) deutlich höher als in den Szenarien 1 und 2 zu liegen kommen (Tabelle 2). Die steigenden Preise kommen dadurch zustande, dass im Modell jene Nachfrageragenten schrittweise ihre Zahlungsbereitschaft erhöhen, die eine Runde zuvor ihren Bedarf nicht decken konnten. Nicht ersichtlich aus dieser Abbildung ist, dass einige Nachfrageragenten langfristig aus dem Markt ausscheiden, sei es, weil der Waldenergieholzmarkt für sie unattraktiv geworden ist und sie sich für ein alternatives Heizungssystem entscheiden oder weil sie in Konkurs gehen. Zusätzlich ist erkennbar, dass

eine verstärkte Profitorientierung der Holzanbieter in einer Knappheitssituation von Waldenergieholz (Szenario 4) zu einem um 2.8% höheren Waldenergieholzpreis als bei einer verstärkten Freundschaftsorientierung (Szenario 3) führt. Das Entscheidungsverhalten der Holzanbieter wird durch die Knappheit des Angebots relevanter. Da sie nicht mehr alle Nachfrager bedienen können, macht es mit zunehmender Knappheit des Angebots einen immer grösseren Unterschied, nach welchen Kriterien sie ihre Alternativen im AHP priorisieren. In Szenario 3 sind es an erster Stelle Anfragen von befreundeten Nachfragern, in Szenario 4 hingegen Anfragen über hohe Profitwerte. Das treibt die Preise in Szenario 4 zusätzlich in die Höhe.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass im Modell die Knappheit des Angebots viel stärker über die Höhe des Waldenergieholzpreises bestimmt als das Entscheidungsverhalten der Holzanbieteragenten. Ebenfalls kann der Schluss gezogen werden, dass das Entscheidungsverhalten der Holzanbieter nur in einer Knappheitssituation des Angebots, nicht hingegen in einer Situation der Ausgewogenheit von Angebot und Nachfrage einen, wenn auch verhältnismässig geringen, Einfluss auf die Preisentwicklung ausübt. Weitere Szenarien sollen in Zukunft untersucht werden.

## Ausblick

Die Autoren sind zurzeit dabei, den noch unvollständigen V&V-Prozess weiterzutreiben. Danach können diverse Szenarioanalysen durchgeführt werden. Im Hinblick auf eine Weiterentwicklung des agentenbasierten Modells sind getroffene Annahmen noch einmal kritisch zu hinterfragen und Verbesserungsmöglichkeiten für spätere Modellversionen abzuleiten. Insbesondere wäre es wünschenswert, über bessere empirische Grundlagen zu verfügen, beispielsweise zu den Akteuren am schweizerischen Waldenergieholzmarkt, zu deren Entscheidungsverhalten oder zu deren Interaktionen. Zu diesem Zweck sind die Marktakteure stärker einzubeziehen. Janssen & Ostrom (2006) nennen als Möglichkeiten zur empirischen Fundierung agentenbasierter Modelle den Einsatz von Fallstudien, formalisierten Faktensammlungen (stylized facts), Rollenspielen und Laborexperimenten. Es bietet sich an, denselben Ansatz auch auf den Rundholzmarkt auszudehnen ■

*Eingereicht: 18. November 2011, akzeptiert (mit Review): 16. August 2012*

## Literatur

AMACHER GS, CONWAY MC, SULLIVAN J (2003) Econometric analyses of nonindustrial forest landowners: Is there anything left to study? *J For Econ* 9: 137–164.

- BEACH RH, PATTANAYAK SK, YANG JC, MURRAY BC, ABT RC (2005) Econometric studies of non-industrial private forest management: A review and synthesis. *For Policy Econ* 7: 261–281.
- BOON TE, MEILBY H, THORSEN J (2004) An empirically based typology of private forest owners in Denmark: Improving communication between authorities and owners. *Scand J For Res* 19 (S4): 45–55.
- DE MARCHI S, PAGE SE (2008) Agent based modeling. In: Collier D, Brady HE, Box-Steffensmeier JM, editors. *The Oxford Handbook of Political Methodology*. Oxford: Oxford Univ Press. doi: <http://dx.doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199286546.003.0004>
- DIGNUM MV (2004) A model for organizational interaction: Based on agents, founded in logic. Utrecht: Univ Utrecht, PhD thesis. 270 p.
- GEBETSROITER E, KAUFMANN A, GIGLER U, RESETARITS A (2006) Agent-based modelling of self-organization processes to support adaptive forest management. doi: 10.1007/3-7908-1721-X\_8
- GHORBANI A, DIGNUM V, DIJKEMA G (2012) An analysis and design framework for agent-based social simulation. *Lect Notes Comput Sc* 7068: 96–112. doi: 10.1007/978-3-642-27216-5
- GILBERT N, TROITZSCH KG (2005) Simulation for the social scientist. Berkshire: Open Univ Press, 2 ed. 295 p.
- JANSSEN MA, JAGER W (2001) Fashions, habits and changing preferences: Simulation of psychological factors affecting market dynamics. *J Econ Psychol* 22: 745–772.
- JANSSEN MA, OSTROM E (2006) Empirically based, agent-based models. *Ecol Soc* 11(2): 37. [www.ecologyandsociety.org/vol11/iss2/art37/](http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss2/art37/) (16.8.2012)
- JENNINGS SM, PUTTEN IE (2006) Typology of non-industrial private forest owners in Tasmania. *Small-scale For Econ Manage Policy* 5: 37–56.
- KOSTADINOV F, STEUBING B (2011) An agent-based model of an energy wood market in a Swiss region. [www.wsl.ch/fe/waldressourcen/produktionssysteme/publikationen/ESSA2011\\_FabianKostadinov\\_v2.pdf](http://www.wsl.ch/fe/waldressourcen/produktionssysteme/publikationen/ESSA2011_FabianKostadinov_v2.pdf) (16.8.2012)
- LOUIE MA, CARLEY KM (2008) Balancing the criticisms: Validating multi-agent models of social systems. *Simul Model Pract Th* 16: 242–256.
- MACAL CM, NORTH MJ (2006) Tutorial on agent-based modeling and simulation. [www.informs-sim.org/wsc06papers/008.pdf](http://www.informs-sim.org/wsc06papers/008.pdf) (25.8.2012)
- MACAL CM, NORTH MJ (2007) Managing business complexity – discovering strategic solutions with agent-based modeling and simulation. Oxford: Oxford Univ Press. 313 p.
- MAJUMDAR I, TEETER L, BUTLER B (2008) Characterizing family forest owners: A cluster analysis approach. *For Sci* 54: 176–184.
- NIKOLIĆ I (2009) Co-evolutionary method for modelling large scale socio-technical systems evolution. Delft: Techn Univ Delft, PhD thesis. 345 p.
- NIKOLIĆ I, GHORBANI A (2011) A method for developing agent-based models of socio-technical systems. doi: 10.1109/IC-NSC.2011.5874914
- OLSCHEWSKI R, STEUBING B, LEMM R, THEES O (2009) Ansätze für eine agentenbasierte Modellierung von Holzmärkten. In: Thees O, Lemm R, editors. *Management zukunftsfähige Waldnutzung: Grundlagen, Methoden und Instrumente*. Zürich: VDF. pp. 225–244.
- ORESQUES N, SHRADER-FRECHETTE K, BELITZ K (1994) Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences. *Science* 263: 641–646. doi: 10.1126/science.263.5147.641
- OSTROM E (1999) Institutional rational choice: An assessment of the institutional analysis and development framework. In: Sabatier PA, editor. *Theories of the policy process*. Boulder: Westview. pp. 35–71.

- PÉREZ L, DRAGIĆEVIĆ S (2010)** Exploring forest management practices using an agent-based model of forest insect infestations. [www.iemss.org/iemss2010/papers/S07/S.07.09.Exploring%20Forest%20Management%20Practices%20Using%20An%20AgentBased%20Model%20of%20Forest%20Insect%20Infestations%20-%20LILIANA%20PEREZ.pdf](http://www.iemss.org/iemss2010/papers/S07/S.07.09.Exploring%20Forest%20Management%20Practices%20Using%20An%20AgentBased%20Model%20of%20Forest%20Insect%20Infestations%20-%20LILIANA%20PEREZ.pdf) (25.8.12)
- PURNOMO H, GUIZOL P (2006)** Simulating forest plantation co-management with a multi-agent system. *Math Comput Model* 44: 535–552.
- RECHENBERG P, POMBERGER G (1999)** *Informatik-Handbuch*. München: Hanser, 2 ed. 1166 p.
- SAATY T (2008)** Decision making with the analytic hierarchy process. *Int J Serv Sci* 1: 83–89.
- SARGENT RG (1998)** Verification and validation of simulation models. [www.informs-sim.org/wsc98papers/016.PDF](http://www.informs-sim.org/wsc98papers/016.PDF) (25.8.2011)
- SCHUTTE S (2010)** Optimization and falsification in empirical agent-based models. *J Artif Soc Soc Simulat* 13 (1). <http://jass.soc.surrey.ac.uk/13/1/2.html> (16.8.2012)
- TESFATSION L, JUDD KL, EDITORS (2006)** *Handbook of computational economics, vol II: Agent-based computational economics*. Amsterdam: Elsevier. 904 p.
- TROITZSCH KG (2012)** Agentenbasierte Modellierung von Märkten. *Schweiz Z Forstwes* 163: 408–416. doi: 10.3188/szf.2012.0408

## Vorgehen zur agentenbasierten Modellierung eines schweizerischen Waldenergieholzmarktes

Um agentenbasierte Modelle zu entwickeln, ist es hilfreich, einem methodisch strukturierten Vorgehen zu folgen. Analog zur traditionellen Softwareentwicklung lässt sich dieses Vorgehen im Wesentlichen in fünf Phasen gliedern: 1) Analyse des betrachteten Systems, 2) Modellentwurf, 3) detaillierter Entwurf, 4) Softwareimplementierung und 5) Modellevaluation. Im vorliegenden Beitrag wird beispielhaft durch alle Phasen hindurch die Entwicklung eines agentenbasierten Modells eines schweizerischen Waldenergieholzmarktes aufgezeigt. Jede Phase wird bezüglich ihrer Ziele, der zu erledigenden Aufgaben und der zu erwartenden Ergebnissen beschrieben. Die wichtigen Arbeitsschritte und Zwischenergebnisse werden präsentiert, bis zuletzt ein funktionsfähiges agentenbasiertes Modell erstellt ist. Abschliessend wird demonstriert, wie mittels des entwickelten Modells Szenarioanalysen für den modellierten Waldenergieholzmarkt durchgeführt werden können. Anhand des Simulationsbeispiels wird erstens gezeigt, dass im Modell erwartungsgemäss eine Verknappung des Holzangebots zu steigenden Waldenergieholzpreisen führt. Zweitens wird gezeigt, wie das Entscheidungsverhalten von Holzanbietern den Preis von Waldenergieholz in einer Situation der Angebotsknappheit zusätzlich modifizieren kann, während derselbe Effekt in einer Situation der Ausgewogenheit von Angebot und Nachfrage geringer ausfällt.

## Méthode de modélisation à base d'agents d'un marché de bois-énergie suisse

Pour développer des modèles à base d'agents, il est utile d'adopter une méthode structurée. Au même titre que lors du développement d'un logiciel traditionnel, cette méthode comprend essentiellement cinq phases, soit 1) l'analyse du système étudié, 2) l'élaboration du projet de modèle, 3) l'établissement du projet de détail, 4) la propre implémentation du logiciel et enfin 5) l'évaluation du modèle. Cet article présente l'exemple du développement d'un modèle par agents d'un marché de bois-énergie de forêt suisse. Il contient une brève description des objectifs, des tâches à accomplir et des résultats attendus dans chacune des cinq phases. Les principales étapes du travail et les résultats intermédiaires y sont également présentés jusqu'à l'obtention d'un modèle à base d'agents qui soit opérationnel. Il est finalement démontré comment ce modèle permet d'analyser des scénarios pour le marché du bois-énergie modélisé. Un exemple de simulation indique premièrement, comme prévu, qu'une diminution de la demande de bois entraîne une augmentation des prix du bois-énergie. Il montre deuxièmement comment l'attitude de décision des fournisseurs de bois peut aussi modifier le prix du bois-énergie face à une diminution de la demande, tandis que le même effet est moins marqué en cas d'équilibre entre l'offre et la demande.