

Agent-based modeling of climate change adaptation in agriculture: A case study for the Central Swabian Jura

Christian Troost

Zusammenfassung

Agentenbasierte Modelle ermöglichen eine vertiefte Analyse des Ausmaßes und der Geschwindigkeit landwirtschaftlicher Anpassung an den Klimawandel, da sie Prozesse einbeziehen, die in anderen agrarökonomischen Modellansätzen gewöhnlich nicht berücksichtigt werden können. In der vorliegenden Arbeit wird mithilfe der Modellierungssoftware MPMAS ein agrarökonomisches Multiagentenmodell entwickelt, um die Anpassung der Landwirtschaft auf der Mittleren Schwäbischen Alb zu untersuchen. Die Arbeit ist Teil der DFG Forschungsprojekte PAK346 und FOR1695, deren Ziel es ist das Verständnis jener Prozesse zu verbessern, die auf der regionalen Ebene Struktur und Funktionen von Agrarlandschaften unter Bedingungen des Klimawandels bestimmen. Vor dem Hintergrund dieser Anwendung werden neue Ansätze diskutiert, entwickelt und getestet, um vier typischen Problemen zu begegnen, die sich bei der empirischen Anwendung agentenbasierter Modelle für ökonomische Analysen ergeben: Datenverfügbarkeit, Prozessunsicherheit, Modellvalidierung und benötigte Rechenkapazität. Mithilfe des erstellten Modells untersucht die Arbeit Klimaeffekte auf die Landwirtschaft, Veränderungen landwirtschaftlicher Angebotsfunktionen sowie Auswirkungen von Fördermaßnahmen für erneuerbare Energieproduktion und Agrarumweltmaßnahmen und demonstriert auf diese Weise seine Anwendbarkeit in der Anpassungsforschung.

Die Arbeit besteht aus zwei Teilen: Der erste Teil diskutiert methodische Aspekte der Nutzung agentenbasierter Modelle wie MPMAS, die Entscheidungen als mathematischer Optimierungsprobleme darstellen, in der landwirtschaftlichen Anpassungsforschung: Bisherige Erkenntnisse zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft und den sich daraus ergebenden Anpassungsprozessen werden zusammengefasst und bestehende agentenbasierte Modelle hinsichtlich ihres potentiellen Beitrags zur Anpassungsforschung untersucht. Der Hauptfokus des ersten Teils liegt dann auf der Diskussion bestehender Ansätze zur Modellvalidierung, -kalibrierung und Unsicherheitsanalyse und ihrer Anwendbarkeit auf optimierungsorientierte, agentenbasierte Modelle. Die Diskussion orientiert sich an vier Prinzipien, die die Validität der aus der Modellierung gezogenen Schlussfolgerungen sicherstellen sollen: (i) eine transparente Modelldokumentation, (ii) dass als konstant angenommene Modellelemente tatsächlich nicht zwischen den untersuchten Szenarien variieren, (iii) dass das Modell nicht stärker kalibriert wird als es die verfügbaren Beobachtungen und die erwartete Fehlerverteilung erlauben, und (iv) dass etwaige Auswirkungen der Prozessunsicherheit auf Ergebnisse und Schlussfolgerungen untersucht und kommuniziert werden.

Bei agrarökonomischen agentenbasierten Modelle, die auf mathematischer Optimierung beruhen, ist die zu erwartende Fehlerverteilung oft unklar und es stehen in der Regel nur wenige Beobachtungen zur Verfügung. In diesem Fall ist es ratsam mit robusten Kalibrierungskriterien zu arbeiten und auf die Identifikation einer einzigen, bestangepassten Parameterkombination zu verzichten. Stattdessen sollte der Parameterraum mithilfe robuster Kriterien nur eingegrenzt und Szenarien für ein geeignetes den eingegrenzten Parameterraum abbildendes experimentelles Design wiederholt werden. Simulationsergebnisse sollten dann als Spanne oder Verteilung über alle Wiederholungen des Designs angegeben wer-

den, so dass die Unsicherheit der Ergebnisse deutlich wird. Für die Umsetzung dieses Ansatzes der Validierung und Unsicherheitsanalyse waren generische Erweiterungen des MPMAS Softwarepakets notwendig, die in dieser Arbeit entwickelt wurden.

Der zweite Teil der Arbeit beschreibt die Anwendung der neuentwickelten Verfahren bei der Erstellung und Nutzung eines Multiagentenmodells für die Mittlere Schwäbische Alb. Der Schwerpunkt der Modellentwicklung lag hierbei auf der Abbildung der Heterogenität des Agentenverhaltens, der empirischen Parametrisierung, und der Berücksichtigung klimatischer Effekte auf mögliche Fruchtfolgen und zur Feldarbeit geeignete Arbeitstage – neben den klimatischen Auswirkungen auf Ernteerträge. Darüberhinaus wurde die Modellierung von Demographie, Investitionsentscheidungen und Pachtmärkten in MPMAS ergänzt, um die Simulation des landwirtschaftlichen Strukturwandels über die Zeit zu verbessern.

Die Daten zur Modellparametrisierung stammen von Statistischen Ämtern, Agrarberatungen, Expertenbefragungen und aus einer Erhebung unter Landwirten der Region. Der traditionell in MPMAS-Modellen benutzte Ansatz künstliche, aber repräsentative Agentenpopulationen mithilfe eines Monte-Carlo-Verfahrens zu erstellen wurde ergänzt, um multivariate Verteilungen besser abbilden zu können und die Datenschutzbestimmungen bei der Nutzung von Daten aus der Landwirtschaftszählung und der Agrarstrukturerhebung einhalten zu können. Prozessunsicherheiten konnte teilweise mithilfe eines konservativen Kalibrierungsansatzes reduziert werden, der darauf angelegt war eine Überkalibrierung des Modells zu vermeiden: Der Parameterraum wurde nur in solchen Fällen verkleinert, in denen eine Verbesserung der Anpassungsgüte in allen drei Beobachtungsjahren, d.h. über strukturelle Brüche hinweg, zu beobachten war. Die verbleibende Unsicherheit wird explizit dargestellt, indem alle Simulationsergebnisse nicht als Punktschätzungen, sondern als Verteilungen über den Parameterraum angegeben werden. Die Simulationsergebnisse zeigen robuste Klimaeffekte trotz einer großen, verbleibenden Prozessunsicherheit. Die simulierten Produktionsentscheidungen überzeugten Experten in einem Turing-Test und das kalibrierte Modell reproduziert die beobachtete Landnutzung mit zufriedenstellender Genauigkeit. Beobachtete Abweichungen entsprachen den aufgrund der bei der Modellerstellung angenommenen Vereinfachungen zu erwartenden Fehlern. Die Modellsimulationen benötigen eine hohe Rechenkapazität und wurde nur möglich durch die Nutzung von Grid-Computing Clustern, die Entwicklung von Pre-/Postprocessing-Skripten für flexible Erstellung von Szenarien und Wiederholungen, und die Nutzung effizienter experimenteller Designs.

Mithilfe des Modells wurden potentielle Anpassungsreaktionen der Landwirte auf den Klimawandel hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf landwirtschaftliche Produktion und Landnutzung in der Untersuchungsregion analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass neben Ertragsveränderungen auch andere klimainduzierte Veränderungen der landwirtschaftlichen Produktionsbedingungen bedeutende Auswirkungen auf die Landnutzungsentscheidungen der Landwirte haben können und mehr Aufmerksamkeit verdienen: Potentielle Klimaeffekte auf Feldarbeitstage und zusätzliche Fruchtfolgeoptionen zeigten ähnliche Auswirkungen wie die von einem Pflanzenwachstumsmodell vorhergesagten Ertragsveränderungen. Die Ergebnisse deuten auf eine Ausweitung der Weizen- und Silomaisanbaufläche auf Kosten des Gersteanbaus hin. Die Verdrängung von Sommergerstefläche durch Weizenfläche gilt allerdings für momentane Preisrelationen und ist bei höheren Relativpreisen für Sommergerste weniger stark ausgeprägt. Eine Analyse der Angebotsreaktionen zeigte, dass die Winterweizenfläche unter Klimawandelbedingungen in ein Substitutionsverhältnis mit der Sommergersteproduktion tritt, während die Konkurrenz mit Wintergerste abnimmt. Das bedeutet auch, dass die Kreuzpreiselastizität der Winterweizenfläche hinsichtlich des Brauger-

stepreises zunimmt.

Das Modell wurde außerdem genutzt, um die Förderung der Biogaserzeugung durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) und die Förderung der Grünlandextensivierung und Fruchtfolgediversifizierung durch das MEKA-Programm zu untersuchen. Speziell die Beteiligung an der Fruchtfolgediversifizierung zeigte einen starken Rückgang in den Klimawandelszenarien, während die Investition in Biogasanlagen leicht stieg. Nach der letzten Änderung des EEG, die die Nutzung von Prozessabwärme zur Voraussetzung für eine Förderung macht, muss davon ausgegangen werden, dass weitere Investitionen in Biogasanlagen stark von der lokalen Vermarktbarkeit von Überschusswärme abhängen werden, da die Alternativoption erhöhter Güllenutzung nach den Simulationsergebnissen für die Landwirte eher unattraktiv erscheint. Die Simulationen zeigen auch den Zielkonflikt zwischen den beiden Politikmaßnahmen auf: Erhöhte Investitionen in Biogasanlagen steigern die Silomaisnachfrage und Grünlandintensivierung und verringern die Attraktivität der Beteiligung an MEKA-Fruchtfolge- und Grünlanddiversifizierungsmaßnahmen. Die MEKA-Maßnahmen haben auf der anderen Seite eine leicht verringernde und verzögernde Wirkung auf Biogasinvestitionen.