



**Dr. Christian Troost**

ist Agrarökonom und wissenschaftlicher Assistent an der Universität Hohenheim. Für seine Dissertation mit dem Titel "Agent-based modeling of climate change adaptation in agriculture: A case study for the Central Swabian Jura" wurde er mit dem Gerhard-Fürst-Preis 2015 in der Kategorie Dissertationen ausgezeichnet.

## MIKROSIMULATION LANDWIRTSCHAFTLICHER PRODUKTION AUF DER SCHWÄBISCHEN ALB

Klimaanpassungsforschung mit detaillierten Daten aus der Agrarstatistik

Dr. Christian Troost

↳ **Schlüsselwörter:** Mikrosimulation – Agentenbasierte Simulation – Landwirtschaft – Klimawandel – AFID-Panel Agrarstruktur

### ZUSAMMENFASSUNG

Der Klimawandel hat direkte Auswirkungen auf die Landwirtschaft, die über reine Änderungen in erwarteten Ernteerträgen hinausgehen. Die vorliegende Arbeit nutzt ein Mikrosimulationsmodell, um zu untersuchen, wie wichtig derartige Effekte zum Verständnis der Klimawandelanpassung von Landwirten auf der Schwäbischen Alb sind. Mikrosimulationsansätze können komplexe landwirtschaftliche Anpassungsreaktionen abbilden, stellen aber deutlich höhere Ansprüche an Datenverfügbarkeit, Rechenkapazität und Unsicherheitsanalyse als herkömmliche agrarökonomische Modelle. Die vorliegende Arbeit zeigt, dass (i) robuste Schlussfolgerungen mit einem solchen Modell möglich sind und (ii) Verschiebungen der Saat- und Erntezeitpunkte essenziell für das Verständnis der Anpassung im Untersuchungsgebiet sind.

↳ **Keywords:** *microsimulation – agent-based modelling – agriculture – climate change – AFID Panel „Agrarstruktur“*

### ABSTRACT

*Climate change has direct impacts on agriculture that go beyond changes in crop yields. We use a microsimulation model to analyze the importance of these additional effects for understanding climate change adaptation of farms in the Central Swabian Jura. Microsimulation approaches are able to capture complex agricultural adaptation decisions, but are more data and computation intensive and associated to a higher degree of uncertainty than conventional agricultural economic models. We show that (i) robust conclusions are possible despite these challenges, and that (ii) shifts in sowing and harvest dates will be essential to understanding adaptation in the study area.*

## 1

---

### Einleitung

---

Der Klimawandel hat das Potenzial, landwirtschaftliche Produktionsbedingungen fundamental zu verändern (Olesen/Bindi, 2002). Wissenschaftliche Analysen künftiger landwirtschaftlicher Entwicklungen können deshalb nicht einfach von einer Kontinuität bisher beobachteter statistischer Verteilungen und Zusammenhänge ausgehen. In globalen und regionalen Klimamodellen wird aus diesem Grund die mögliche klimatische Entwicklung auf Basis physikalischer Gesetze und Parameter modelliert, deren Konstanz auch unter künftigen Bedingungen angenommen werden kann. Aus dem gleichen Grund nutzen Agronomen prozessbasierte Pflanzenwachstumsmodelle, um Ernteerträge zu simulieren, die unter den veränderten Bedingungen zu erwarten sind (Robertson und andere, 2013).

Eine rein naturwissenschaftliche Analyse der Klimaveränderungen greift jedoch zu kurz: Wenn sich das Klima ändert, werden Landwirte andere Nutzpflanzen und Produktionsverfahren wählen. Durch die damit einhergehenden Landnutzungsänderungen – in Deutschland werden etwa 52% der Landoberfläche landwirtschaftlich genutzt (Statistisches Bundesamt, 2014) – könnten sich wiederum Rückstrahlung und Verdunstung sowie Wolkenbildung und Niederschlagsverteilung verändern und damit lokale Rückkopplungen auf Wetter und Klima entstehen.

Aufgabe der Agrarökonomie ist es nun, zu untersuchen, wie sich Landwirte an die veränderten Umweltbedingungen anpassen werden. Herkömmliche agrarökonomische Modellierungsansätze, wie globale und partielle Gleichgewichtsmodelle oder regionale Optimierungsmodelle, sind jedoch in der Regel auf statistisch geschätzte aggregierte Kosten- oder Produktionsfunktionen sowie Elastizitäten angewiesen. Zwar können in der Vergangenheit beobachtete durch für die Zukunft simulierte Erträge ersetzt werden, komplexere Veränderungen wie zum Beispiel eine Verschiebung von Saat- und Erntezeitpunkten oder die Einführung neuer Anbaufrüchte und Fruchtfolgen lassen sich aber deutlich schwerer abbilden.

Als Alternative kommen unter anderem agentenbasierte Mikrosimulationsmodelle in Betracht, bei denen jeder Landwirt durch einen eigenen Computeragenten reprä-

sentiert wird (Berger/Troost, 2014). Dieser Ansatz hat den Vorteil, Produktionsentscheidungen der Landwirte – und in fortgeschrittenen Anwendungen auch die Interaktionen zwischen den Landwirten – explizit zu modellieren und kommt damit einem prozessbasierten Ansatz sehr viel näher als die herkömmliche, regional oder sektoral aggregierte Modellierung. Grundsätzlich wird es damit auch möglich, die vereinfachende Annahme der allwissenden, kurzfristigen Profitmaximierung durch komplexere Präferenzen von wirtschaftlichen Akteuren zu ergänzen. Vor allem aber erlaubt der disaggregierte Ansatz, die Heterogenität der landwirtschaftlichen Produktionsbetriebe abzubilden und zu analysieren, welche Betriebe von Veränderungen besonders betroffen sind. Demgegenüber stehen ein deutlich höherer Datenbedarf und Rechenaufwand sowie eine nicht zu vernachlässigende Modellunsicherheit.

Die vorliegende Arbeit präsentiert die Konstruktion und Anwendung eines solchen Modells für die Mittlere Schwäbische Alb. Neben Änderungen im Ernteertrag ist auf der Schwäbischen Alb bei einer klimatischen Erwärmung mit einer Verlängerung der Vegetationsperiode zu rechnen und damit verbunden mit einer Verschiebung von Saat- und Erntezeitpunkten sowie anderen Arbeitsspitzen. Mithilfe des Modells wird in einem ersten Schritt untersucht, wie wichtig die Berücksichtigung dieser Effekte ist.

## 2

---

### Modellansatz

---

Zur Untersuchung dieser Fragestellung wird ein Mikrosimulationsmodell erstellt, das je einen Computeragenten für jeden der 533 Vollerwerbsbetriebe im Untersuchungsgebiet enthält. Jeder dieser Agenten löst gemischt-ganzzahlige Optimierungsprobleme, die die landwirtschaftlichen Produktionsentscheidungen seines realen Pendanten abbilden. Der Agent wählt dabei zu Beginn des Produktionsjahres die Kombination aus Investitionen und Produktionsaktivitäten, die sein erwartetes Einkommen maximiert. Als mögliche Produktionsaktivitäten sind der Anbau von Marktfrüchten (Winterweizen, Braugerste, Futtergerste, Winterraps) und Ackerfutter (Silagemais, Ackergras), Gründlandwirtschaft (Heu, Grassilage, Weide, Eingrasen), Viehzucht (Milchvieh, Rinderaufzucht, Bullenmast, Mutterkuh-

haltung, Schweinemast und -zucht) und Biogasproduktion berücksichtigt. Als Restriktionen sind die vorhandenen Ressourcen, das Zeitbudget der Arbeitskräfte und Maschinen, Fruchtfolgerestriktionen, Wirtschaftsdüngerbilanz, Futterbedarf, gesetzliche Vorschriften sowie Preiserwartungen zu berücksichtigen. Als politische Rahmenbedingungen müssen die Fördersätze und Cross-Compliance-Vorschriften der Gemeinsamen EU-Agrarpolitik, sowie die Anreizsysteme des baden-württembergischen Agrarumweltprogramms (MEKA) und des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) beachtet werden. Zum Ende des Produktionsjahres wird das erzielte Einkommen berechnet und die Arbeitskräfte- und Investitionsgüterausstattung gemäß angenommener Alterung aktualisiert.

Das Modell wurde in der agentenbasierten Simulationssoftware MPMAS (Schreinemachers/Berger, 2011) implementiert. Das komplette Entscheidungsmodell (etwa 3 800 Restriktionsgleichungen mit etwa 6 900 Entscheidungsvariablen) wird in Troost (2014) und Troost/Berger (2015a) ausführlich dokumentiert.

### 3

## Daten

Die Entscheidungsprobleme der Agenten berücksichtigen detaillierte agronomische und technische Produktionskoeffizienten, Maschinenkosten und -leistungen basieren auf Daten des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL, 2010) und wurden in Experteninterviews und einer lokalen Betriebsbefragung mit örtlichen Gegebenheiten abgeglichen. Produkt- und Betriebsmittelpreise sind den Veröffentlichungen der Landesanstalt für Entwicklung der Landwirtschaft und der ländlichen Räume (2010; 2011a; 2011b) sowie des Statistischen Bundesamtes (2012d) und KTBL (2010) entnommen. Preis- und Ertragserwartungen wurden in der lokalen Betriebsbefragung erhoben.

Das AFID<sup>1</sup>-Panel „Agrarstruktur“ 1999, 2003 und 2007 (FDZ, 2010) bietet Informationen zu Landnutzung und Viehbestand für jeden der 533 Betriebe. Aus Datenschutzgründen ist es jedoch selbstverständlich nicht

1 Projekt „Amtliche Firmendaten für Deutschland (AFID)“ des Forschungsdatenzentrums der Statistischen Landesämter.

möglich, die Daten „eins-zu-eins“ ins Simulationsmodell zu übernehmen. Stattdessen wurden aus den vorhandenen Daten statistische Verteilungsfunktionen für 15 Betriebscharakteristika geschätzt (Betriebsgröße, Ackerflächen-, Grünland- und Forstanteil sowie Viehbestände), auf deren Grundlage dann in einem Monte-Carlo-Verfahren eine Vielzahl von Agentenpopulationen mit jeweils 533 Agenten gezogen wurden. Die größte Herausforderung ist hierbei, die Kovarianz zwischen den Variablen auf Agentenebene realistisch wiederzugeben. Hierzu wurde in einer nichtparametrischen Herangehensweise für jede der 15 Variablen zunächst die empirische Randverteilung als erstes bis neunundneunzigstes Perzentil errechnet. Sodann wurde für jeden Betrieb im AFID-Panel ein Vektor erstellt, dessen 15 Stellen jeweils das Quintil einer der 15 Variablen angeben, in das der Betrieb fällt. Die Häufigkeitsverteilung der unterschiedlichen Vektoren von Quintilskombinationen ergibt dann eine empirische Copula (Nelsen, 2006), die die multivariate Verteilung der Variablen wiedergibt. (Aus Datenschutzgründen war das Auszählen der Kombinationen nur für ein Sample von 80 % der registrierten Betriebe möglich.) Im Monte-Carlo-Verfahren wird für jeden zu erstellenden Agenten dann zunächst eine Quintilskombination gezogen und anschließend der endgültige Wert der Variablen zufällig aus dem Teil der Randverteilung gezogen, das dem zugeordneten Quintil entspricht.

Die Familienzusammensetzung wurde ebenfalls im Monte-Carlo-Verfahren aufgrund allgemeiner statistischer Daten zum Alter der Betriebsleiter sowie Geburten-, Heirats- und Sterberaten der deutschen Bevölkerung (Statistisches Bundesamt, 2011; Statistisches Bundesamt, 2012a bis c) generiert. Regeln zur Maschinenausstattung der Agenten wurden aus der Betriebsbefragung abgeleitet.

Die räumliche Verortung der Agenten in der synthetischen Landschaft des Mikrosimulationsmodells erfolgte ebenfalls in einem speziell entwickelten Monte-Carlo-Verfahren auf Basis der zugeordneten Acker- und Grünlandanteile sowie CORINE-Landnutzungskarten (Umweltbundesamt, 2009). Durch Verschnitt der so generierten Landbesitzkarte mit der LUBW-Bodenkarte (LUBW, 2007) konnten dann Bodenklassen für die Ackerflächen der Agenten bestimmt werden. Innerhalb des Modells bestimmen die Bodenklassen sowohl die erwarteten Erträge als auch den Leistungsbedarf für die Feldarbeit.

### 4

---

#### Parameterunsicherheit

---

Trotz der relativ guten und umfangreichen Datenbasis des AfID-Panels sind viele Modellparameter mit nicht zu vernachlässigenden Unsicherheiten verbunden. Neben der zufällig generierten Agentenpopulation betrifft dies unter anderem Kosten- und Ertragsparameter, verfügbare Feldarbeitstage, Liquidität, Entnahmen aus dem Betriebsvermögen sowie Stallinvestitionen. Hinzu kommen Vereinfachungen in der Abbildung von Prozessen. So enthält das vorliegende Modell zum Beispiel keinen expliziten Marktmechanismus, sondern betrachtet die Marktpreise für landwirtschaftliche Güter als exogen. Bezogen auf Marktfrüchte und Betriebsmittel ist diese Vereinfachung aufgrund der geringen Größe der Region zu vernachlässigen. Dies gilt jedoch nicht für den Absatz vordringlich lokal gehandelter Güter, wie Maissilage oder Fermenterabwärme, oder den Bezug von Färsen zur Nachzucht oder Biertreber zur Viehfütterung. Aufgrund mangelnder Informationen war eine realistische Zuordnung von Absatz- und Bezugswahrscheinlichkeiten für diese Güter zu einzelnen Agenten nicht möglich. Stattdessen erhielten alle Agenten entweder keinen oder unbegrenzten Zugang zu diesen Märkten. Dies betrifft ebenso die Verfügbarkeit von Lohnarbeit; hier wurde angenommen, dass die Verfügbarkeit proportional zur Zahl der für die entsprechende Tätigkeit verfügbaren Feldarbeitstage ist. Insgesamt wurden 31 Parameter identifiziert, die als unsicher angesehen werden müssen.

Es liegt nahe, diese Parameter zu schätzen, indem man Modellsimulationen mit Beobachtungen vergleicht und die Parameter so wählt, dass die Abweichung möglichst gering ist. Eine derartige Modellkalibrierung ist hier jedoch nur eingeschränkt möglich, da (i) die Art der Fehlerverteilung, mit der die Abweichungen gewichtet werden müssten, unbekannt, aber höchstwahrscheinlich nicht normal ist, (ii) die Zahl der vorliegenden Beobachtungen und die Vereinfachungen im Modell eine Überkalibrierung befürchten lässt, und (iii) nicht für alle Parameter davon ausgegangen werden kann, dass für die Vergangenheit geschätzte Parameter auch in Zukunft konstant bleiben (Troost, 2014). Die Kalibrierung sollte sich deshalb, wie hier geschehen, auf die Eliminierung eindeutig unbefriedigender Parameterwerte beschrän-

ken und ansonsten eine große Bandbreite von möglichen Parameterkonstellationen zulassen.

Hierzu wurde das Modell jeweils für die Jahre 1999, 2003 und 2007 (die Jahre, für die im AfID-Panel Beobachtungen vorlagen) parametrisiert, das heißt Ausgangsdaten für Agentenpopulationen, Preis- und Ertragswartungen sowie geltende EU-, MEKA- und EEG-Förderungsprogramme wurden entsprechend der in dem jeweiligen Jahr vorherrschenden Bedingungen gewählt. Diese drei Modelljahre wurden dann für verschiedene Wertkombinationen für die unsicheren Parameter simuliert, und die erzielten Werte mit den jeweiligen Beobachtungen hinsichtlich Flächenanteilen der Ackerkulturen, Anteilen der verschiedenen Betriebstypen und Viehbeständen verglichen. Parameterwerte, die in allen drei Jahren und für alle drei Indikatoren zu deutlich stärkeren Abweichungen als ihre Alternativen führten, wurden ausgeschlossen. Infolgedessen ist zum Beispiel in den weiteren Experimenten keine Absatzmöglichkeit für Maissilage berücksichtigt, da die alternative Annahme unbegrenzter Absatzmöglichkeiten zu höchstunrealistischen Silagemais-Anbauflächen geführt hätte. Insgesamt bleibt die Reduktion des Parameterraums moderat, sodass 24 unsichere Parameter für die weiteren Simulationen verbleiben.

Mit dem reduzierten Parametersatz erreicht das Simulationsmodell eine Modelleffizienz von 0.73 bis 0.84 für die Flächenanteile, 0.62 bis 0.71 für die Betriebstypenverteilung und 0.9 bis 0.95 für die Viehbestände. Die Abweichungen sind hierbei konsistent mit den Modellvereinfachungen: So wird infolge der fehlenden Absatzmöglichkeit für Maissilage die Maisfläche nun etwas unterschätzt, während im Gegenzug Weizen-, Raps- und Brachflächen überschätzt werden.

### 5

---

#### Versuchsaufbau für das Simulationsexperiment

---

Ziel der hier vorgestellten Simulationsexperimente war es zu überprüfen, ob eine Einbeziehung von zusätzlichen Klimateffekten, die über den direkten Pflanzenertragseffekt hinausgehen, in der Klimafolgenforschung geboten ist. Hierzu wurden für die Schwäbische Alb drei Szenarien erstellt und miteinander verglichen.

Das Basisszenario (B) gibt die derzeit auf der Mittleren Schwäbischen Alb vorherrschenden agrarökologischen und klimatischen Bedingungen wieder. Das erste Anpassungsszenario (C1) berücksichtigt nur die direkten Veränderungen der Ernteerträge, die mithilfe des Pflanzen-Boden-Simulationsmodells Expert-N simuliert wurden (Aurbacher und andere, 2013; Biernath und andere, 2011). Das Basisszenario basiert dabei auf beobachteten Wetterdaten für die Station Stötten für die Jahre 1981 bis 2010. Die Anpassungsszenarien beruhen auf WETTREG-Projektionen für dieselbe Station über den Zeitraum 2000 bis 2030.

Das zweite Anpassungsszenario (C2) berücksichtigt zusätzlich potenzielle Verschiebungen in den Saat- und Erntezeitpunkten von Winterraps und Wintergerste, sowie in den verfügbaren Feldarbeitstagen. Aufgrund einer vergleichsweise kurzen Vegetationsperiode mit späten Frühjahrsfrösten und frühen Herbstfrösten ist es derzeit auf der Schwäbischen Alb meist nicht möglich, Winterraps in der Fruchtfolge nach Winterweizen anzubauen, da die Winterweizenernte zeitlich mit dem Zeitpunkt der Winterrapsaussaat zusammenfällt. Für die Zukunft nimmt das Szenario C2 an, dass durch Klimawandel eine frühere Winterweizenernte bei verlängerter Vegetationsperiode möglich sein könnte, sodass der Anbau von Winterraps nach Winterweizen möglich sein würde. Ebenso verfügen die Landwirte auf der Alb derzeit über vergleichsweise kurze Arbeitszeitfenster, die die notwendigen klimatischen Bedingungen für die Feldarbeit (Befahrbarkeit des Bodens, Pflanzenrestfeuchte und so weiter) ausweisen. Szenario C2 nimmt deshalb an, dass die globale Erwärmung in Zukunft zu der gleichen Zahl an Feldarbeitstagen führen wird, wie sie in den benachbarten Regionen heute vorherrschen.

Aufgrund der im vorherigen Kapitel beschriebenen Modellunsicherheiten reichte es jedoch nicht aus, diese drei Szenarien jeweils einmal zu simulieren und dann zu vergleichen. Vielmehr wurde jedes Szenario vielfach wiederholt und die unsicheren Parameter dabei variiert. Um bei beschränkter Rechenkapazität und einer nicht unerheblichen Modelllaufzeit von etwa fünf Stunden je Lauf (bei zehn Simulationsjahren) eine möglichst effiziente Abdeckung des Parameterraums in möglichst wenigen Läufen zu erreichen, erfolgte diese Variation nicht vollkommen zufällig, sondern folgte einem experimentellen Design, dem Unbiased Permuted Column Scheme (UPCS; Morris und andere, 2008). Hierbei handelt es

sich um ein deterministisch variiertes Latin-Hypercube Sample (LHS; McKay und andere, 1979), das die effiziente Parameterraumabdeckung eines LHS mit der Möglichkeit verbindet, „First-order effects“ der einzelnen Parameter zu berechnen und so zur Sensitivitätsanalyse beizutragen. Vorher wurde der Parameterraum jedoch nochmals verkleinert, indem mittels Elementary Effects Screening (Campolongo und andere, 2007) die Parameter mit dem größten Einfluss auf die zu untersuchenden Veränderungen identifiziert wurden. Im Gegensatz zur Parameterraumreduktion in der „Kalibrierung“ ging es hier nicht darum, realistische Parameterwerte zu finden, sondern solche Parameter auszusortieren, deren Veränderung im angenommenen Wertebereich keine nennenswerte Auswirkung auf die Ergebnisse hatte. Damit sollte die Zahl der benötigten Simulationen gering gehalten werden. So verblieben 17 Parameter, aus denen das UPCS konstruiert wurde.

Für jedes Szenario wurden die gleichen 68 Parameterkombinationen des UPCS genutzt. Jede dieser Wiederholungen stellt ein Experiment unter vollständig kontrollierten Bedingungen dar, mit dem die Klimaeffekte der Zukunftsszenarien im Vergleich zum Basisszenario direkt berechnet werden können. Die 68 Wiederholungen liefern somit eine Bandbreite für die vom Modell vorhergesagten Szenarioeffekte, nicht nur eine Punktschätzung.

Jeder der 204 Modellläufe erstreckte sich über zehn Simulationsperioden (Jahre). Hierbei wurden zunächst konstante Preise und Preiserwartungen entsprechend den Durchschnittspreisen der Jahre 2000 bis 2009 sowie eine Fortführung der bisherigen Umwelt- und Agrarförderprogramme unterstellt.

Um die Sensitivität der Ergebnisse im Hinblick auf mögliche Preisänderungen in der Zukunft zu testen, wurde in einem zweiten Simulationsexperiment ein LHS benutzt, das neben der Parameterunsicherheit auch die Preisunsicherheit für elf Produkt-/Betriebsmittelgruppen abbildet. Dieses Simulationsexperiment bestand aus 600 Wiederholungen je Szenario, die aus Kapazitätsgründen nur für das erste Simulationsjahr durchgeführt wurden.

6

Ergebnisse

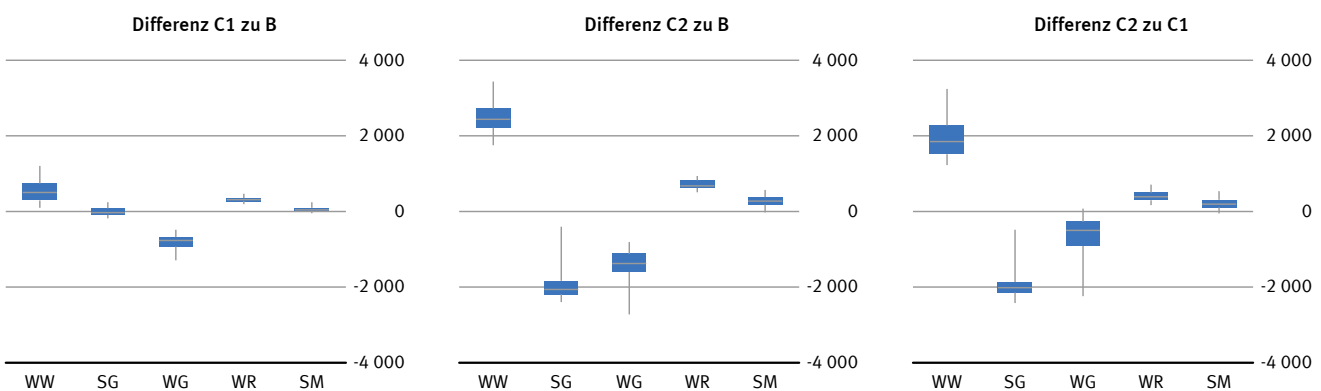
Grafik 1 zeigt den Effekt der beiden Anpassungsszenarien auf die Gesamtanbauflächen der wichtigsten Ackerfrüchte in der Region im ersten Simulationsjahr. Die Boxplots zeigen die Verteilung der Unterschiede zum Basisszenario B über die 68 Modellläufe. Wie im linken Teil der Grafik 1 zu sehen ist, führen die angenommenen Ertragsänderungen im Szenario C1 zu einer leichten Erhöhung der Weizenanbaufläche (im Mittel +7%) auf Kosten der Anbaufläche von Wintergerste (-33%). Die Rapsanbaufläche erhöht sich ebenfalls leicht (+8%), während die Auswirkungen auf die Sommergerste- und Silomaisflächen um Null herum schwanken. Berücksichtigt man die Verschiebung der Aussaat-/Erntezeitpunkte und Arbeitsspitzen (Szenario C2 in der Mitte der Grafik 1), so zeigt sich, dass die Effekte deutlich verstärkt werden (Winterweizen nun +36%, Wintergerste -56%, Winterraps +18% im Mittel) und es zusätzlich eine deutliche Reduktion der Anbaufläche von Sommergerste (-46%) gibt. Hinzu kommt in den meisten Wiederholungen eine leichte Erhöhung der Silomaisfläche (im Mittel +11%). Wir beobachten also einen deutlichen Unterschied zwischen den beiden Anpassungsszenarien, der robust ist in Bezug auf die Parameterunsicherheit, wie der rechte Teil der Grafik 1 nochmals verdeutlicht. [↘ Grafik 1](#)

Grafik 2 zeigt die gleiche Analyse für das zehnte und letzte Simulationsjahr. Es zeigt sich ein sehr ähnliches Bild, allerdings sind die absoluten Effekte kleiner als im ersten Simulationsjahr. Insbesondere die Reduktion der Sommergerstefläche erscheint nur halb so groß wie im ersten Jahr. Betrachtet man allerdings die Entwicklung der Sommergerstefläche über den gesamten Simulationszeitraum (siehe Grafik 3), so wird deutlich, dass die Sommergerstefläche in allen Szenarien, auch im Basisszenario, mit der Zeit abnimmt. Der absolute Unterschied zwischen den Szenarien nimmt ebenfalls ab, während der relative Unterschied im Mittel fast gleich bleibt. [↘ Grafik 2, Grafik 3](#)

Die Abnahme der Sommergerstefläche erklärt sich zum einen dadurch, dass jährlich etwa 3,6% (2,4% bis 5,3%) der Modellagenten aus der landwirtschaftlichen Produktion ausscheiden (aufgrund von Illiquidität, Scheitern der Nachfolge aus ökonomischen Gründen oder Fehlen eines geeigneten Nachfolgers). Zum anderen investiert eine gewisse Anzahl von Agenten in Biogasanlagen (siehe Grafik 4) und weitet infolgedessen ihre Silomaisanbaufläche stark aus (siehe Grafik 5). Auch in diesem Fall zeigt das Anpassungsszenario C2 einen deutlich stärkeren Effekt auf die installierte Biogaskapazität und Silomaisfläche als Szenario C1. Wesentlich wichtiger ist allerdings die Modellannahme zu einem möglichen Absatzmarkt für Fermenterabwärme (siehe auch Troost und andere, 2015). Da das EEG in der Version von 2012 mit wenigen Ausnahmen eine Nutzung von mindestens

Grafik 1

Veränderungen der Anbauflächen in den Anpassungsszenarien im Vergleich zum Basisszenario (Periode 1)  
ha

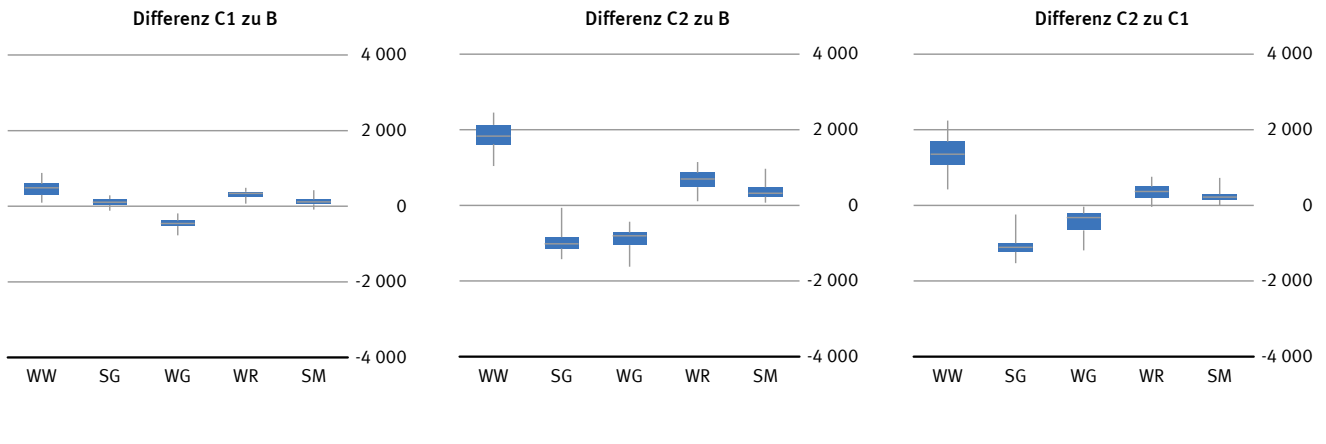


WW = Winterweizen, SG = Sommergerste, WG = Wintergerste, WR = Winterraps, SM = Silomais

2016-01-0034

**Grafik 2**

Veränderungen der Anbauflächen in den Anpassungsszenarien im Vergleich zum Basisszenario (Periode 10)  
ha

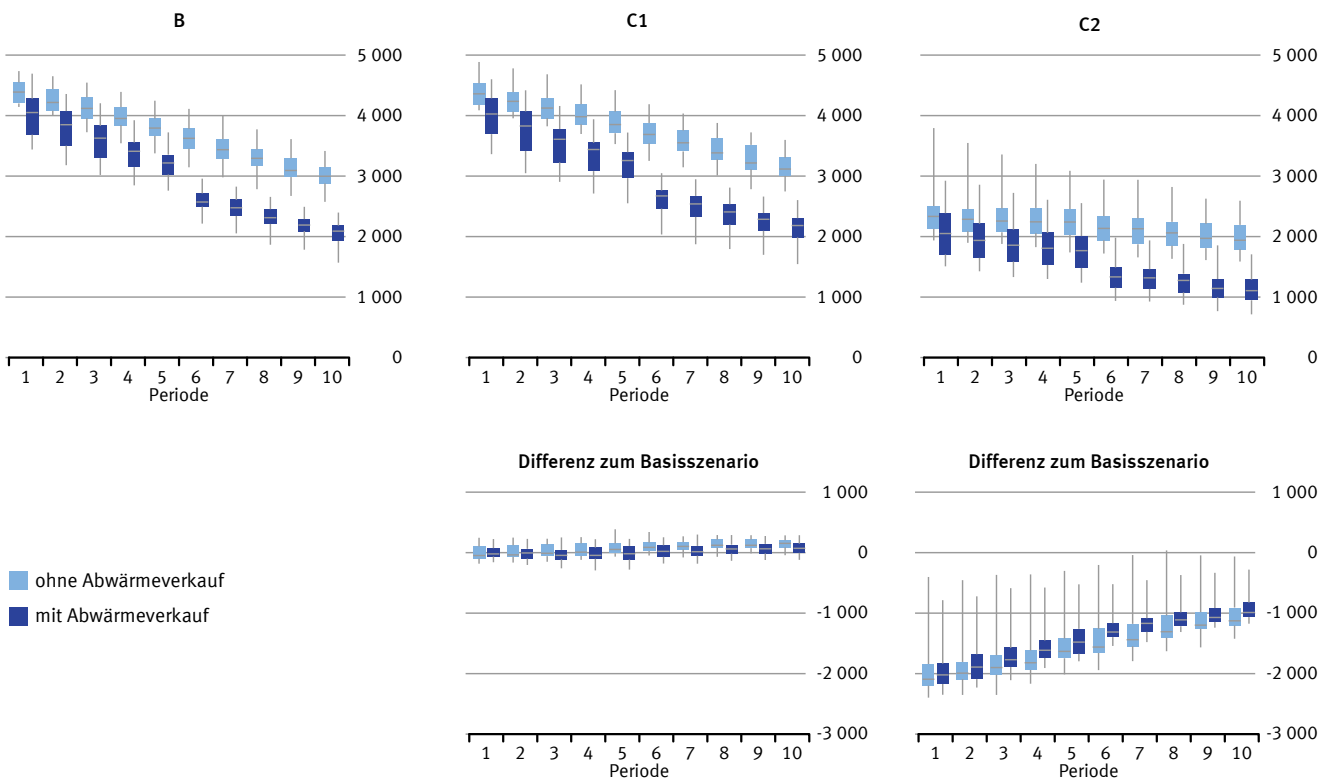


WW = Winterweizen, SG = Sommergerste, WG = Wintergerste, WR = Winterraps, SM = Silomais

2016 - 01 - 0034

**Grafik 3**

Simulierte Entwicklung der Sommergerstefläche  
ha



2016 - 01 - 0043

60% der Abwärme fordert, zeigen sich Investitionen auch nur in den Simulationsläufen, die das Vorhandensein eines Absatzmarkts annehmen (dunkelblaue Boxplots). [↪ Grafik 4, Grafik 5](#)

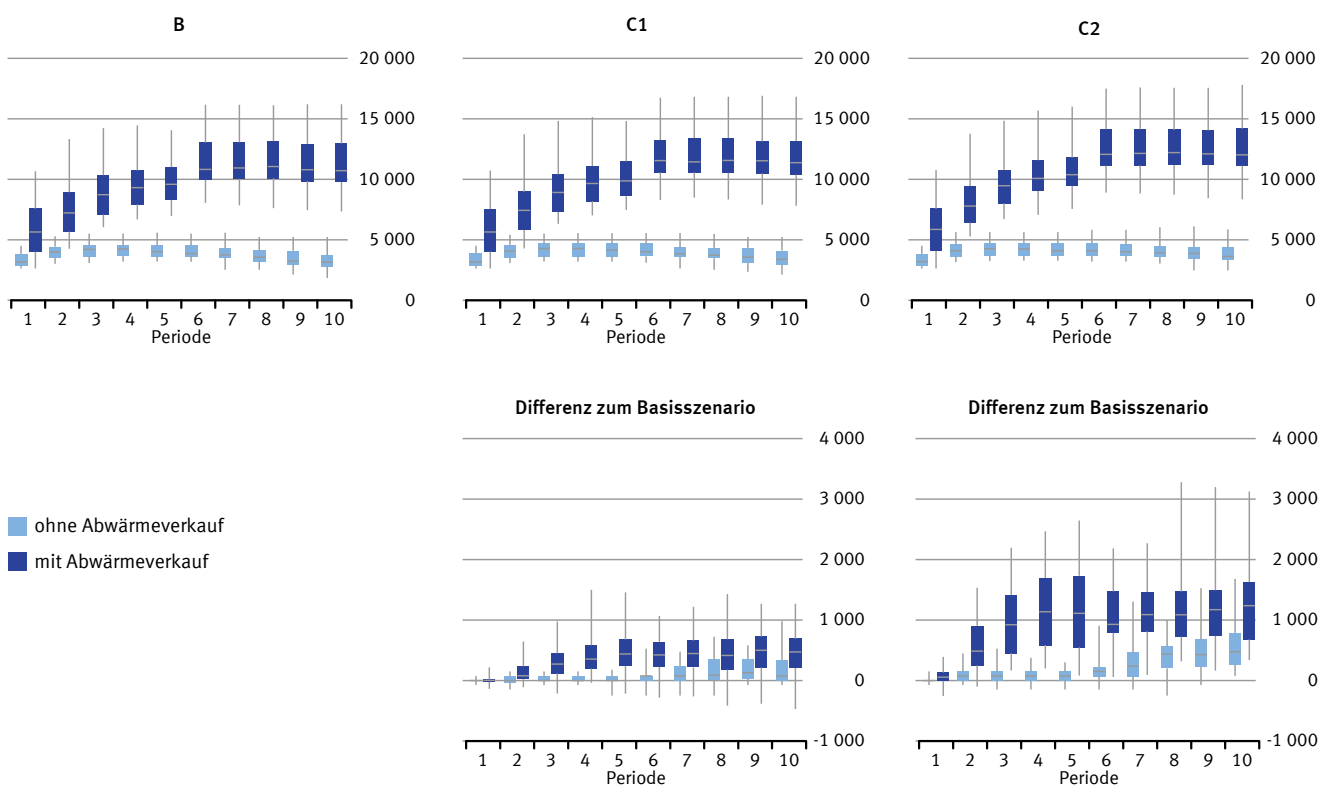
Grafik 6 zeigt die Ergebnisse des zweiten Simulationsexperiments, das auch Preisvariationen miteinbezogen. Jeder Punkt in der Grafik repräsentiert einen der 600 Läufe des LHS, rote Punkte die Läufe des Basisszenarios, hellblaue Punkte das Szenario C1 und dunkelblaue Punkte das Szenario C2. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden LOWESS-Glättungsfunktionen über den Scatterplot gelegt, um die Unterschiede im lokalen Mittel zwischen den Szenarien hervortreten zu lassen. Wie Grafik 6 zeigt, ist die deutliche Reduktion der Sommergerstefläche über weite Bereiche des Braugerste/Weizenpreilverhältnisses zu sehen, sie verschwindet nur bei sehr hohen relativen Braugerstepreisen. Unter den bisherigen klimatischen Bedingungen sind die Landwirte auf der Schwäbischen Alb mehr oder weniger gezwungen,

Sommergerste in ihrer Fruchtfolge anzubauen, wenn sie die profitablen Marktfrüchte Raps und Weizen anbauen wollen. Mit der in C2 angenommenen neuen Option, aufgrund des Klimawandels Raps direkt nach Weizen anbauen zu können, kann Sommergerste aus der Fruchtfolge herausgenommen werden und reagiert deshalb wesentlich stärker auf den Marktpreis als im Basisszenario. [↪ Grafik 6](#)

Dies gilt ebenso für die Beteiligung an der MEKA-Fördermaßnahme A2 „Fruchtartendiversifizierung“, die eine mindestens viergliedrige Fruchtfolge mit jeweils mindestens 15% Flächenanteil je Fruchtfolgeglied fordert. Hier fällt in den Simulationsexperimenten die Beteiligung in den Anpassungsszenarien deutlich (in C2 wiederum stärker als in C1) und reagiert ebenfalls sensibler auf Änderungen im Preisniveau. [↪ Grafik 7](#)

## Grafik 4

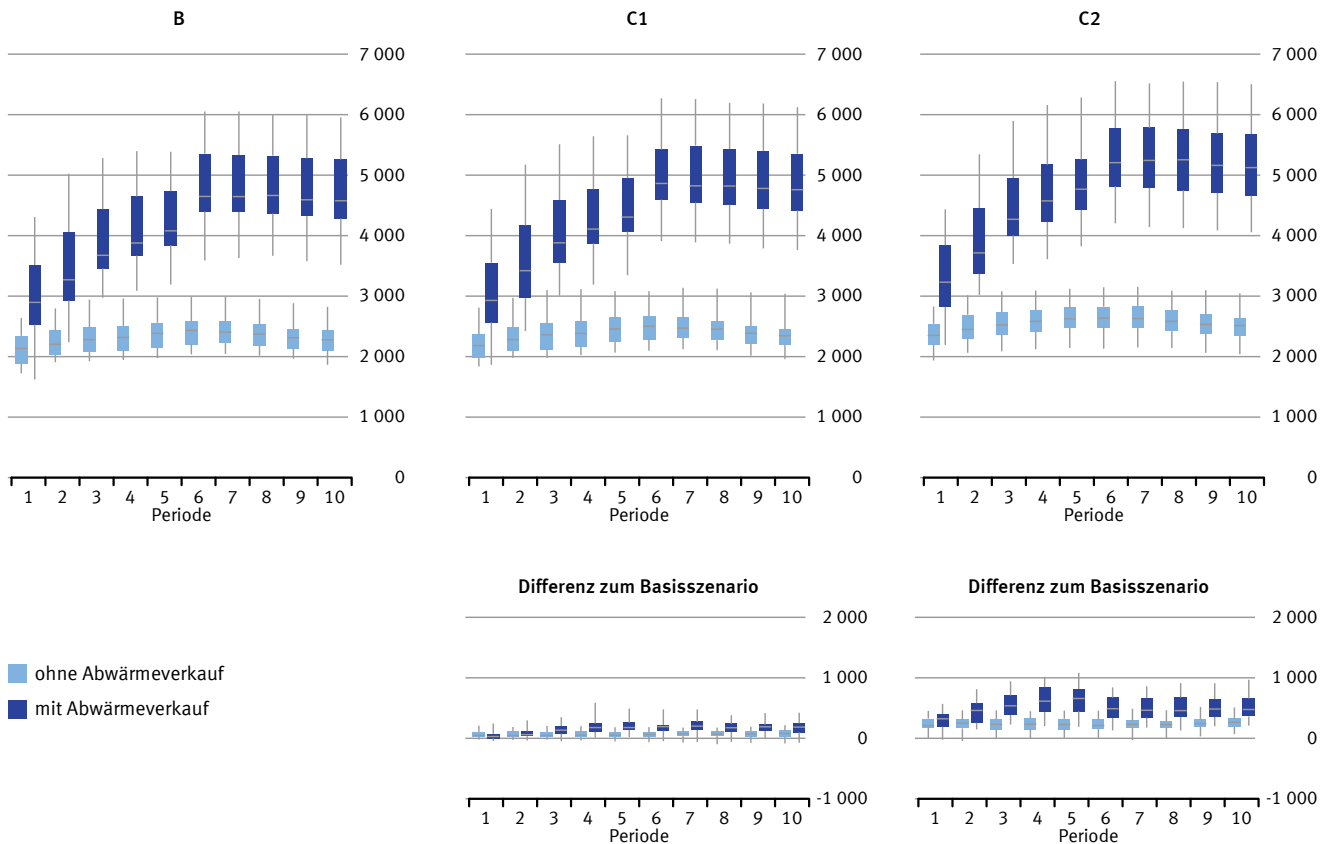
### Simulierte Entwicklung der installierten Biogaskapazität Kilowatt



2016 - 01 - 0044



**Grafik 5**  
**Simulierte Entwicklung der Silomaisfläche**  
 ha



2016 - 01 - 0045

## 7

### Diskussion

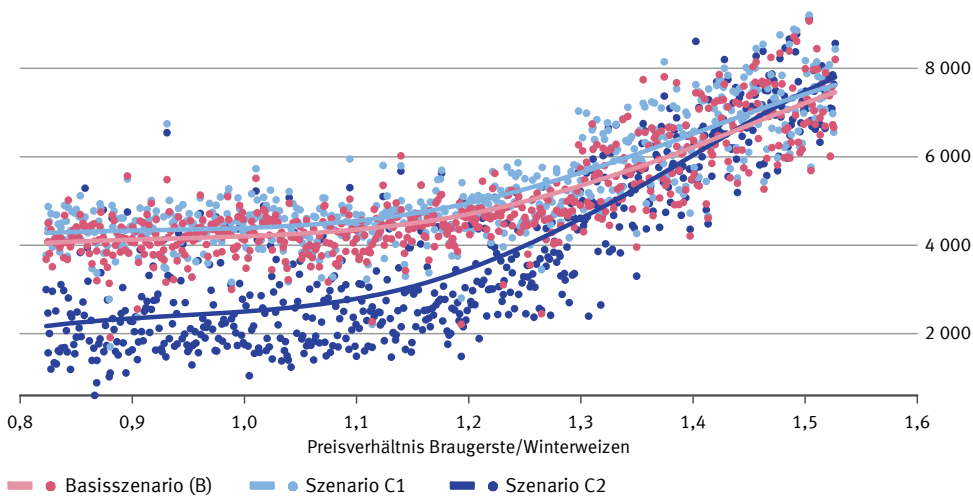
Auch wenn die vorgestellten Simulationsergebnisse aus agrarökonomischer Sicht plausibel erscheinen, sollten sie noch nicht als verlässliche Projektion der künftigen Anbauflächenentwicklungen auf der Mittleren Schwäbischen Alb verstanden werden. Dies gilt zum einen deshalb, weil es sich bei den verwendeten Zukunftsszenarien nicht um Klimaprojektionen, sondern um sachkundigen Annahmen beruhende Testszenarien handelt. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist aus der Klimaforschung noch nicht bekannt, ob und wann sich Rapsaussaat und Weizenernte in der Schwäbischen Alb soweit verschoben haben werden, dass ein Anbau von Raps nach Weizen möglich wird. Die hier verwendeten Prognosen für Ertragsänderungen beruhen zudem

auf Simulationen eines Pflanzenmodells, und bisherige Erfahrungen haben gezeigt, dass die Varianz in Ertragssimulationen unter Klimawandelbedingungen oft noch sehr groß ist: Unterschiede in Ertragsprognosen sind oft in stärkerem Maße auf Unterschiede zwischen Pflanzenwachstumsmodellen als auf Unterschiede in zugrunde liegenden Klimaprojektionen zurückzuführen (von Lampe und andere, 2014). Die Veränderungen der künftigen Ernteerträge auf der Schwäbischen Alb sind deshalb womöglich noch stärker als hier angenommen, weshalb man aus den Ergebnissen zu diesem Zeitpunkt nicht schließen sollte, dass die Effekte aus den Verschiebungen der Vegetationsperiode auf jeden Fall stärker sein werden als die Ertragseffekte.

Zum anderen gibt es eine Reihe von Vereinfachungen im Modell, deren genaue Auswirkungen auf die Ergebnisse unbekannt sind. In den Simulationen nehmen wir zum Beispiel an, dass Landwirte die veränderten Rah-

**Grafik 6**

Simulierte Entwicklung der Sommergerstefläche mit Preisvariationen  
ha



menbedingungen sofort realisieren und in ihre Planungen einbeziehen. Tatsächlich liegt hier in der Realität wohl ein gradueller Lernprozess mit Entscheidungen unter Unsicherheit vor, der zudem von Betriebsleiter zu Betriebsleiter unterschiedliche Ausprägungen haben kann. Darüber hinaus zeigt die Validierung, dass das Modell aufgrund der fehlenden Absatzmöglichkeit die Silomaisfläche tendenziell unterschätzt. Infolgedessen ist es wahrscheinlich, dass auch die Zunahme der Silomaisfläche über die Zeit unterschätzt wird, da mit der Zahl der Biogasanlagen auch die Absatzmöglichkeiten für Maissilage wachsen dürften. Die in den vorliegenden Simulationen fehlende Berücksichtigung von Bodenpachtmärkten führt dazu, dass die Agentenbetriebe nicht wachsen können, sodass zum Beispiel Biogasanlagen kleiner dimensioniert werden als in der Realität. Auch Kooperationen zwischen den Agenten zum Bau einer gemeinsamen Anlage sind im Modell nicht berücksichtigt. Vor allem aber ist zu erwarten, dass die Produktmärkte auf Änderungen der Anbauflächen und Erntemengen reagieren würden. Da die simulierte Region vergleichsweise klein ist (weniger als 0,5 % der deutschen Weizenproduktion), ist eine endogene Modellierung der Preisbildung wenig sinnvoll. Hier kommt es entscheidend darauf an, wie sich die Anbauflächen in anderen Regionen entwickeln. Das zweite Simulationsexperiment zeigt jedoch auch, dass der

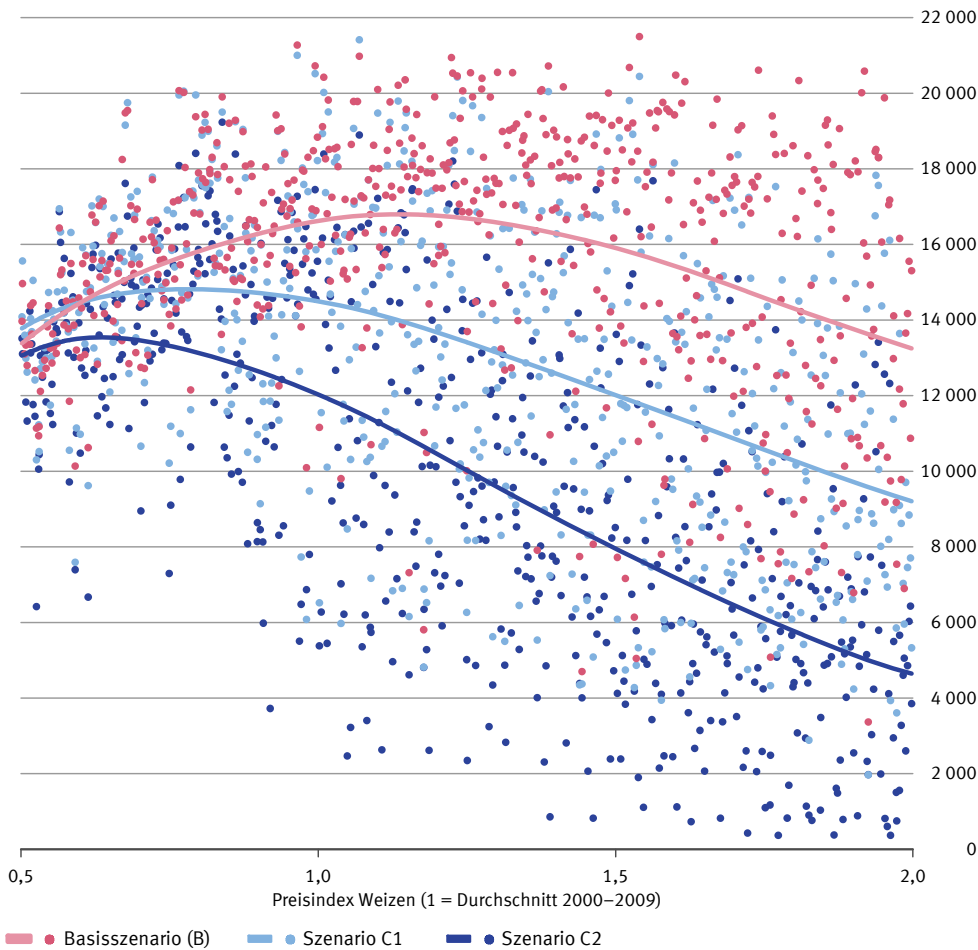
relative Braugerstepreis um mindestens 10 % im Verhältnis zum Weizenpreis steigen müsste, um die Anbaufläche im ersten Simulationsjahr auf heutigem Niveau zu halten.

Was die Simulationsergebnisse aber trotz aller Unsicherheit sehr deutlich demonstrieren, ist, wie bedeutsam der Effekt einer möglichen Verschiebung der Saat- und Erntezeitpunkte auf der Mittleren Schwäbischen Alb sein kann. Ihre Vernachlässigung in der Klimafolgenforschung würde die Auswirkungen des Klimawandels auf die regionale Landnutzung deutlich unterschätzen und manche Aspekte, wie die Reduktion der Sommergerstefläche, gar nicht erst hervortreten lassen. Dieser Effekt ist robust gegenüber der Parameterunsicherheit im Modell, stabil über zehn Simulationsperioden und weite Teile des Preisbereichs (siehe auch Troost/Berger, 2015b) und lässt sich nicht nur in Bezug auf die Anbauflächen unterschiedlicher Marktfrüchte beobachten, sondern auch in Bezug auf Politikwirkungen (EEG, MEKA) und auf das landwirtschaftliche Einkommen (hier nicht gezeigt, siehe Troost, 2014; Troost/Berger, 2015a).

Darüber hinaus verdeutlichen die Ergebnisse den Wert einer rekursiv-dynamischen Modellierung. Die endogene Dynamik von Investitionen in neue Betriebsbereiche kann miteinbezogen und die Stabilität der simu-

**Grafik 7**

Simulierte Entwicklung der an der MEKA-Fördermaßnahme A2 "Fruchtartendiversifizierung" beteiligten Flächen  
ha



2016 - 01 - 0047

lierten Effekte über einen längeren Zeitraum analysiert werden. Auch können Anpassung und Investition realistischer abgebildet werden. Die maximale Biogaskapazität, die hier nach sechs Perioden erreicht wird, liegt mit 8 bis 16 Megawatt deutlich unter dem in Troost und andere, 2015, errechneten Maximalpotenzial von 24 plus/minus 4 Megawatt. Der hier benutzte rekursiv-dynamische Ansatz kann im Gegensatz zu Potenzialanalysen realistische Liquiditätsrestriktionen, die jährliche Reduktion der Garantiepreise und ihr Zusammenspiel über die Zeit einbeziehen: Für Agenten, die ihre Investitionen aufgrund von mangelndem Eigenkapital zunächst zurückstellen müssen, lohnen sich die Investi-

tionen bei reduzierten Garantiepreisen zu einem späteren Zeitpunkt nicht mehr.

## 8

### Fazit und Ausblick


Die hier vorgestellten Simulationsexperimente unterstreichen, wie wichtig ein Verständnis möglicher Verschiebungen in der Vegetationsperiode für die Klimafolgenforschung ist. Tiefergehende Untersuchungen, wie sich Saat- und Erntezeitpunkte auf der Schwäbischen

Alb entwickeln werden, sind aus diesem Grund eine notwendige Ergänzung zu Simulationen von Ertragsveränderungen mit Pflanzenwachstumsmodellen. Die hier untersuchten Klimateffekte sind zwar teilweise – insbesondere die momentan nicht mögliche Weizen-Raps-Folge – spezifisch für die Mittlere Schwäbische Alb. Sie stehen jedoch exemplarisch für eine Reihe komplexer Wirkmechanismen, die sich nicht direkt mit Ertragssimulationen in Pflanzenwachstumsmodellen abbilden lassen und die potenziell zu strukturellen Brüchen in bisher beobachteten statistischen Zusammenhängen führen können.

Eine Untersuchung der agrarökonomischen Auswirkungen dieser Effekte erfordert eine Modellierung „von Grund auf“, das heißt vom einzelnen Betrieb ausgehend (Reidsma und andere, 2010). Die Verwendung linearer oder gemischt-ganzzahliger Optimierungsmodelle hat in der Agrarökonomie eine lange Tradition für die Simulation von Einzelbetrieben (Buysse und andere, 2007). Aber erst die heute verfügbaren Rechenkapazitäten und statistischen Datensätze erlauben ihre Erweiterung zu Mikrosimulationsmodellen für ganze Agrarregionen. Die vorliegende Arbeit zeigt, dass die dabei auftretenden Herausforderungen, insbesondere hinsichtlich Datenbedarf und Modellunsicherheit, überwunden und robuste Simulationsergebnisse erzielt werden können.

Das hier beschriebene Mikrosimulationsmodell nutzt das Potenzial dieser Modellklasse dabei bis jetzt nur begrenzt aus. Die Einbeziehung der Lernprozesse von Agenten im Angesicht sich verändernder Rahmenbedingungen und Entscheidungen unter Unsicherheit würden die Analyse der Anpassung an den Klimawandel wesentlich bereichern. Durch eine Einbeziehung von Interaktionen zwischen Landwirten in Form von regionalen Märkten (Land, Silage, Wirtschaftsdünger) und Kooperationen (Biogas, Maschinenringe) kann das Modell zu einem vollständigen agentenbasierten Modell erweitert werden, welches sich dann insbesondere für die Analyse des landwirtschaftlichen Strukturwandels anbietet. Es ermöglicht selbstverständlich auch eine Untersuchung der Heterogenität der simulierten Effekte über verschiedene Betriebstypen hinweg, die hier aus Platzgründen ausgelassen wurde (siehe Troost, 2014).

Eine große Herausforderung bleibt dabei, die Ergebnisse agentenbasierter Mikrosimulationsmodelle für verschiedene Regionen zusammenzuführen, um Verschiebungen

globaler oder nationaler Preisgleichgewichte analysieren zu können, die sich aus den simulierten regionalen Veränderungen ergeben (van Wijk, 2014; Troost/Berger, 2015b). 

## LITERATURVERZEICHNIS

---

Aurbacher, Joachim/Parker, Philip S./Calberto Sánchez, Germán Andrés/Steinbach, Jennifer/Reinmuth, Evelyn/Ingwersen, Joachim/Dabbert, Stephan. *Influence of climate change on short term management of field crops – A modelling approach*. In: Agricultural Systems. Band 119/2013, Seite 44 ff.

Berger, Thomas/Troost, Christian. *Agent-based Modelling of Climate Adaptation and Mitigation Options in Agriculture*. In: Journal of Agricultural Economics. Band 65/2014, Ausgabe 2, Seite 323 ff.

Biernath, Christian/Gayler, Sebastian/Bittner, Sebastian/Klein, Christian/Högy, Petra/Fangmeier, Andreas/Priesack, Eckart. *Evaluating the Ability of Four Crop Models to Predict Different Environmental Impacts on Spring Wheat Grown in Open-Top Chambers*. In: European Journal of Agronomy. Band 35/2011, Seite 71 ff.

Buysse, Jeroen/van Huylbroeck, Guido/Lauwers, Ludwig. *Normative, positive and econometric mathematical programming as tools for incorporation of multifunctionality in agricultural policy modelling*. In: Agriculture, Ecosystems & the Environment. Band 120/2007, Ausgabe 1, Seite 70 ff.

Campolongo, Francesca/Cariboni, Jessica/Saltelli, Andrea. *An effective screening design for sensitivity analysis of large models*. In: Environmental Modelling & Software. Band 22/2007, Ausgabe 10, Seite 1509 ff.

FDZ – Forschungsdatenzentren der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder. *AFID-Panel Agrarstruktur 1999, 2003, 2007*. Düsseldorf/Kiel 2010.

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. [KTBL]. *KTBL-Datensammlung. Betriebsplanung Landwirtschaft 2010/11*. Darmstadt 2010.

Landesanstalt für Entwicklung der Landwirtschaft und der ländlichen Räume Schwäbisch Gmünd [LEL]. *Material aus der Ernährungswirtschaft des Landes Baden-Württemberg: Getreide und Futtermittel 2008/2009*. 2010.

Landesanstalt für Entwicklung der Landwirtschaft und der ländlichen Räume Schwäbisch Gmünd [LEL]. *Material aus der Ernährungswirtschaft des Landes Baden-Württemberg: Milch 2010*. 2011a.

Landesanstalt für Entwicklung der Landwirtschaft und der ländlichen Räume Schwäbisch Gmünd [LEL]. *Material aus der Ernährungswirtschaft des Landes Baden-Württemberg: Vieh und Fleisch 2010*. 2011b.

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg [LUBW]. *Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg*. Karlsruhe 2007.

McKay, Michael D./Beckman, Richard J./Conover, William J. *A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code*. In: Technometrics. Band 21, 1979, Ausgabe 2, Seite 239 ff.

### LITERATURVERZEICHNIS

---

Morris, Max D./Moore, Leslie M./McKay, Michael D. *Using Orthogonal Arrays in the Sensitivity Analysis of Computer Models*. In: Technometrics. Band 50/2008, Seite 205 ff.

Nelsen, Roger B. *An Introduction to Copulas*. 2. Auflage. New York 2006.

Olesen, Jørgen E./Bindi, Marco. *Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy*. In: European Journal of Agronomy. Band 16/2002, Ausgabe 4, Seite 239 ff.

Reidsma, Pytrik/Ewert, Frank/Lansink, Alfons Oude/Leemans, Rik. *Adaptation to climate change and climate variability in European agriculture: The importance of farm level responses*. In: European Journal of Agronomy. Band 32/2010, Ausgabe 1, Seite 91 ff.

Robertson, Richard/Nelson, Gerald/Thomas, Timothy/Rosegrant, Mark. *Incorporating Process-Based Crop Simulation Models into Global Economic Analyses*. In: American Journal of Agricultural Economics. Jahrgang 95/2013, Ausgabe 2, Seite 228 ff.

Schreinemachers, Pepijn/Berger, Thomas. *MP-MAS: An agent-based simulation model of human-environment interaction in agricultural systems*. In: Environmental Modelling & Software. Band 26/2011, Ausgabe 7, Seite 845 ff.

Statistisches Bundesamt. *Fachserie 3 Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, Heft 2, Arbeitskräfte – Landwirtschaftszählung 2010*. 2011. [Zugriff am 7. Januar 2016]. Verfügbar unter: [www.destatis.de](http://www.destatis.de)

Statistisches Bundesamt. *GENESIS-Online Datenbank, Tabelle 12411-0008: Bevölkerung Deutschland*. 2012a. [Zugriff am 7. Januar 2016]. Verfügbar unter: [www-genesis.destatis.de](http://www-genesis.destatis.de)

Statistisches Bundesamt. *GENESIS-Online Datenbank, Tabelle 12612-0008: Geburtenziffern Deutschland*. 2012b. [Zugriff am 7. Januar 2016]. Verfügbar unter: [www-genesis.destatis.de](http://www-genesis.destatis.de)

Statistisches Bundesamt. *GENESIS-Online Datenbank, Tabelle 12613-0008: Gestorbene Deutschland*. 2012c. [Zugriff am 7. Januar 2016]. Verfügbar unter: [www-genesis.destatis.de](http://www-genesis.destatis.de)

Statistisches Bundesamt. *GENESIS-Online Datenbank, Tabelle 61221-0002: Index der Einkaufspreise landwirtschaftl. Betriebsmittel: Deutschland, Wirtschaftsjahr, Messzahlen mit/ohne Umsatzsteuer, Landwirtschaftliche Betriebsmittel*. 2012d. [Zugriff am 7. Januar 2016]. Verfügbar unter: [www-genesis.destatis.de](http://www-genesis.destatis.de)

Statistisches Bundesamt. *GENESIS-Online Datenbank, Tabelle 33111-0001: Bodenfläche (tatsächliche Nutzung): Deutschland, Stichtag, Nutzungsarten*. 2014. [Zugriff am 7. Januar 2016]. Verfügbar unter: [www-genesis.destatis.de](http://www-genesis.destatis.de)

## LITERATURVERZEICHNIS

---

Troost, Christian. *Agent-based modeling of climate change adaptation in agriculture: A case study in the Central Swabian Jura*. Dissertation, Universität Hohenheim. Stuttgart 2014. [Zugriff am 7. Januar 2016]. Verfügbar unter: <http://opus.uni-hohenheim.de>

Troost, Christian/Berger, Thomas. *Dealing with Uncertainty in Agent-Based Simulation: Farm-Level Modeling of Adaptation to Climate Change in Southwest Germany*. In: American Journal of Agricultural Economics. Jahrgang 97, Ausgabe 3, Seite 833 ff. 2015a.

Troost, Christian/Berger, Thomas. *Process-based simulation of regional agricultural supply functions in Southwestern Germany using farm-level and agent-based models*. In: International Association of Agricultural Economists. Italien 2015. 2015b. [Zugriff am 7. Januar 2016]. Verfügbar unter: <http://purl.umn.edu/211929>

Troost, Christian/Walter, Teresa/Berger, Thomas. *Climate, energy and environmental policies in agriculture: Simulating likely farmer responses in Southwest Germany*. In: Land Use Policy. Ausgabe 46/2015, Seite 50 ff.

Umweltbundesamt. *CORINE Land Cover 2006*. Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) und Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). 2009.

van Wijk, Mark T. *From global economic modelling to household level analyses of food security and sustainability: How big is the gap and can we bridge it?* In: Food Policy. Ausgabe 49/2014, Teil 2, Seite 378 ff.

von Lampe, Martin/Willenbockel, Dirk/Ahammad, Helal/Blanc, Elodie/Cai, Yongxia/Calvin, Katherine/Fujimori, Shinichiro/Hasegawa, Tomoko/Havlik, Petr/Heyhoe, Edwina/Kyle, Page/Lotze-Campen, Hermann/Mason d' Croz, Daniel/Nelson, Gerald C./Sands, Ronald D./Schmitz, Christoph/Tabeau, Andrzej/Valin, Hugo/van der Mensbrugge, Dominique/van Meijl, Hans. *Why do global long-term scenarios for agriculture differ? An overview of the AgMIP Global Economic Model Intercomparison*. In: Agricultural Economics. Jahrgang 45/2014, Ausgabe 1, Seite 3 ff.

---

#### Herausgeber

Statistisches Bundesamt, Wiesbaden

[www.destatis.de](http://www.destatis.de)

---

#### Schriftleitung

Dieter Sarreither, Präsident des Statistischen Bundesamtes

Redaktionsleitung: Kerstin Hänsel

Redaktion: Ellen Römer

---

#### Ihr Kontakt zu uns

[www.destatis.de/kontakt](http://www.destatis.de/kontakt)

---

#### Erscheinungsfolge

zweimonatlich, erschienen im Februar 2016

Das Archiv aller Ausgaben ab Januar 2001 finden Sie unter [www.destatis.de/publikationen](http://www.destatis.de/publikationen)

---

#### Print

Einzelpreis: EUR 18,- (zzgl. Versand)

Jahresbezugspreis: EUR 108,- (zzgl. Versand)

Bestellnummer: 1010200-16001-1

ISSN 0043-6143

ISBN 978-3-8246-1043-3

---

#### Download (PDF)

Artikelnummer: 1010200-16001-4, ISSN 1619-2907

---

#### Vertriebspartner

IBRo Versandservice GmbH

Bereich Statistisches Bundesamt

Kastanienweg 1

D-18184 Roggentin

Telefon: +49 (0) 382 04 / 6 65 43

Telefax: +49 (0) 382 04 / 6 69 19

[destatis@ibro.de](mailto:destatis@ibro.de)

---

Papier: Metapaper Smooth, FSC-zertifiziert, klimaneutral, zu 61% aus regenerativen Energien

© Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2016

Vervielfältigung und Verbreitung, auch auszugsweise, mit Quellenangabe gestattet.