

Agroforstsysteme im Alley-Cropping-Anbauverfahren: Eine Risikoanalyse im Vergleich zum klassischen Ackerbau anhand der Monte-Carlo-Simulation

Alley Cropping Agroforestry Systems: Using Monte-Carlo Simulation for a Risk Analysis in Comparison with Arable Farming Systems

Josef Langenberg, Marius Feldmann und Ludwig Theuvsen
Georg-August-Universität Göttingen

Zusammenfassung

Agroforstsysteme im Alley-Cropping-Anbauverfahren sind Mischkultursysteme, in denen streifenförmig angelegte Gehölze simultan mit annuellen landwirtschaftlichen Feldfrüchten oder Dauerkulturen auf einer Fläche kultiviert werden. Agroforstsysteme bieten viele ökologische Vorteile, wie die Reduzierung von Bodenerosion und Nährstoffauswaschung, wirken biodiversitätssteigernd und werten zudem das Landschaftsbild auf. Trotz der vielen Vorteile ist der Anbauumfang von Agroforstsystemen in Deutschland unbedeutend und beschränkt sich auf einige wenige Versuchsflächen. Gründe für die Zurückhaltung hinsichtlich der Anlage von Agroforstsystemen können in wirtschaftlichen Nachteilen gegenüber der ganzflächigen Feldbewirtschaftung liegen. Zur Beantwortung der Fragestellung, wie Rentabilität und Risiko von Agroforstsystemen im Vergleich zum klassischen Ackerbau zu bewerten sind, wurden auf der Grundlage von Daten von zwei Versuchsstandorten jeweils die Risikoprofile für das Agroforstsystem und den Ackerbau mittels Monte-Carlo-Simulation errechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass für den Versuchsstandort Dornburg das Agroforstsystem einen höheren Erwartungswert hinsichtlich der Leistungs-Kosten-Differenz bei gleichzeitig niedrigerer Standardabweichung aufweist als die Ackerreferenzfläche. Für den zweiten Versuchsstandort Forst zeigen die Ergebnisse, dass der Erwartungswert der Leistungs-Kosten-Differenz für das Agroforstsystem ebenfalls höher ist und auch die Standardabweichung höher als bei der Ackerreferenzfläche ist. In beiden Fällen ist die Rentabilität des Agroforstsystems somit besser zu bewerten als die des klassischen Ackerbaus, wobei in Dornburg das Risiko gleichzeitig geringer ist, während in Forst mit der höheren zu erwartenden Rentabilität auch das höhere Risiko einhergeht. Die Ergebnisse haben vielfältige

Implikationen für die Ausgestaltung der Agrarpolitik und bieten vielfältige Ansatzpunkte für die weitere Forschung.

Schlüsselwörter

Agroforstwirtschaft; Alley-Cropping; Niederwaldstreifen mit Kurzumtrieb; Monte-Carlo-Simulation; Risikoanalyse

Abstract

Alley cropping agroforestry systems are mixed farming systems in which forest stripes are cultivated simultaneously with annual crops or pasture systems. Agroforestry systems have several advantages like lower levels of soil erosion, the reduction of nutrient leaching, increasing biodiversity and an improvement of the landscape. Despite the various advantages, the number of agroforestry system in Germany is negligible and alley cropping is only applied at specific experimental sites. Reasons for this retention might be economic disadvantages in comparison with traditional annual cropping systems. In order to compare the profitability and risk profiles of agroforestry and traditional annual cropping systems, we applied Monte-Carlo simulation. The analysis is based on data from two different experimental farms in Germany. In comparison with an annual arable farming system, the experimental agroforestry system in Dornburg shows a higher expected value of the performance cost difference in combination with a lower standard deviation. For the second experimental site in Forst, the results also reveal a higher expected value of the performance cost difference for the agroforestry system in comparison to the annual arable farming system. However, differences to the first experimental area occur because in Forst the standard deviation is higher for the agroforestry system than for the annual

arable farming system. Thus, in both cases the agroforestry system turns out to be more profitable than the annual arable farming system but in the case of the Forst the higher profitability goes hand in hand with higher risk. The results have manifold implications for agricultural policy and future research.

Key Words

agroforestry; alley cropping; short rotation coppice; Monte-Carlo simulation; risk analysis

1 Einleitung

Der Anbau von Ackerkulturen mit dem Ziel der Nahrungsmittelproduktion ist nach wie vor der wichtigste Aspekt im Rahmen der Nutzung von landwirtschaftlicher Fläche. Trotz des hohen Stellenwertes der landwirtschaftlichen Nutzfläche für die Erzeugung von Lebensmitteln sind im Laufe der Zeit weitere Anforderungen und Ansprüche an den Produktionsfaktor Boden in den Fokus gerückt. Dazu zählt u.a. die Aufwertung des Landschaftsbildes, aber vor allem die Bereitstellung von nachwachsenden Rohstoffen für die stoffliche Nutzung oder für Energiegewinnung als Beitrag zur Erreichung von Klimaschutzziele (OPPERMANN et al., 2013). Im Rahmen der Biomasseproduktion zur Erzeugung erneuerbarer Energien beanspruchten die Pflanzen zur Biogasherstellung im Jahr 2016 mit deutschlandweit 1.450.000 ha – nach dem Forst – den weitaus größten Flächenanteil von allen landwirtschaftlich angebauten nachwachsenden Rohstoffen (FNR, 2017). Das hat jedoch besonders in Regionen mit hoher Biogasanlagendichte einen deutlich zunehmenden Monokulturmaisbau zur Folge, was wiederum zu starker öffentlicher Kritik führt (KRÖGER et al., 2016). Eine weitere Möglichkeit zur landwirtschaftlichen Produktion nachwachsender Rohstoffe ist der Anbau von Agrarholz, der im Gegensatz zum Monokulturmaisbau höhere gesellschaftliche Akzeptanz findet (PRETZSCH und SKODAWESSELY, 2010; HENKE und THEUVSEN, 2014). Die Anpflanzung der Gehölze zur energetischen Nutzung kann einerseits in Form großflächig angelegter Kurzumtriebsplantagen umgesetzt werden oder als streifenweiser Anbau in Kombination mit Ackerkulturen in Mischkultursystemen erfolgen. Besonders die Kultivierung der Gehölze in Agroforstsystemen im Alley-Cropping-Anbauverfahren bietet viele ökologische Vorteile und wertet das Landschaftsbild auf (ZEHLIUS-ECKERT, 2010), bei gleichzeitiger Berücksichti-

gung der Wertschöpfungsfunktion des Bodens (SCHMIDT, 2011). Durch die Implementierung von Gehölzstreifen in die Ackerfläche können u.a. eine Reduzierung von Bodenerosion, eine Reduzierung von Nährstoffauswaschungen, eine bessere Ausnutzung des Bodenwassers und eine Steigerung der Biodiversität erreicht werden (GRÜNEWALD, 2005; ZEHLIUS-ECKERT, 2010). Zudem bewirkt die Zunahme des Agrarholzes in das Anbauportfolio eine Diversifikation des unternehmerischen Risikos (KRÖBER et al., 2008). Ungeachtet der vielen Vorteile der landwirtschaftlichen Holzproduktion sind im Jahr 2016 deutschlandweit nur auf insgesamt 11.000 ha Agrarhölzer angebaut worden (FNR, 2017). Der Anbau fand diesbezüglich nahezu ausschließlich in Kurzumtriebsplantagen statt, während der Anbau in Agroforstsystemen für Deutschland kaum Relevanz besitzt und sich auf einige Versuchsflächen beschränkt (BÄRWOLFF und VETTER, 2011). Gründe für die Zurückhaltung bei der Anlage von Agroforstsystemen können in wirtschaftlichen Nachteilen gegenüber dem klassischen Ackerbau liegen (EMMANN et al., 2013). Denn neben den erwähnten positiven Effekten der Gehölzstreifen sind auch negative Einflüsse auf die zwischenstehenden Ackerkulturen möglich. Zum Beispiel können die Gehölze durch Beschattung, Wasser- sowie Nährstoffkonkurrenz und durch Bildung neuer Lebensräume für Pflanzenschädlinge Ertragsdepressionen der Ackerfrüchte bewirken (GRÜNEWALD, 2005). Zudem können die Holzstreifen zu Behinderungen bei der Feldbewirtschaftung führen und dadurch höhere Arbeitserledigungskosten verursachen.

Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel dieses Beitrags, auf der Grundlage von Daten, die an den Versuchsstandorten Dornburg und Forst, an denen Agroforstsysteme im Alley-Cropping-Verfahren bewirtschaftet werden, gewonnen wurden, sowie anhand von Literaturdaten die Wirtschaftlichkeit von Agroforstsystemen im Vergleich zum klassischen Ackerbau zu berechnen. Zudem wird eine Risikoanalyse mittels Monte-Carlo-Simulation durchgeführt, um Risikoprofile für die verschiedenen Anbaualternativen zu erstellen. Anhand der Risikoprofile können aus Rentabilitäts Gesichtspunkten und unter Berücksichtigung der Risikoeinstellung des Entscheiders Handlungsempfehlungen hinsichtlich der Wahl der jeweiligen Anbaualternativen gegeben werden.

In Kapitel 2 werden dazu Hintergrundinformationen bezüglich der Anlage von Agroforstsystemen gegeben sowie rechtliche Rahmenbedingungen für die

Umsetzung in Deutschland erläutert. Die methodische Vorgehensweise zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit und zur Erstellung der Risikoprofile mittels Monte-Carlo-Simulation wird in Kapitel 3 dargestellt. Im vierten Kapitel werden die Modellannahmen und das zugrundeliegende Datenmaterial beschrieben. Kapitel 5 zeigt die Ergebnisse der Berechnung. In Kapitel 6 werden die Ergebnisse diskutiert, bevor in Kapitel 7 ein Fazit gezogen wird.

2 Agroforstwirtschaft als landwirtschaftliches Produktionssystem

In Agroforstsystemen werden einjährige oder mehrjährige landwirtschaftliche Feldfrüchte zeitgleich mit Gehölzen auf derselben Fläche kultiviert. Zu unterscheiden sind diesbezüglich silvoarable Agroforstsysteme, in denen annuelle Ackerkulturen mit der Holzproduktion kombiniert werden, von silvopastoralen Systemen, die den simultanen Anbau von Grünland und Gehölzen realisieren (BÄRWOLFF, 2013; OLI et al., 2015). Die silvopastoralen Systeme, deren Grünlandnutzung sowohl durch Beweidung als auch durch Mahd erfolgen kann, zählen dabei zu den ältesten Konstrukten der agroforstlichen Nutzungsformen. Zurückzuführen ist die lange Tradition auf die umfangreichen Vorzüge der klassischen Streuobst- und Waldwiesen, die einerseits als Weidegrund sowie der Holzherzeugung dienen und andererseits Obst bzw. Waldfrüchte zur Verfügung stellen (NAIR, 1993; GRÜNEWALD und REEG, 2009). Allerdings hat mit der Mechanisierung der Landwirtschaft die Vorzüglichkeit dieser Produktionsverfahren erheblich abgenommen (HERZOG, 1997).

Die Anordnung der Baumbestände auf den landwirtschaftlichen Flächen kann in silvoarablen genau wie in silvopastoralen Agroforstsystemen sowohl planmäßig als auch willkürlich erfolgen. In gegenwärtigen Anlageformen werden die Gehölze jedoch aufgrund der überwiegend maschinellen Feldbearbeitung zumeist systematisch angeordnet. Die Baumanordnung kann diesbezüglich verschiedenen Schemata folgen und beispielsweise die Begradigung von Flächen entlang von Straßen, Gewässern oder Flurgrenzen unterstützen. Ebenso können die Bäume im Alley-Cropping-Anbauverfahren streifenförmig in die Fläche integriert werden (MOSQUERA-LOSADA et al., 2009; EMMANN et al., 2013; HEAVEY und VOLK, 2014). Dabei werden die Gehölzstreifen in definierten Abständen und parallel zueinander angelegt, wobei

die Abstände zwischen den Gehölzstreifen idealerweise einem gemeinsamen ganzzahligen Vielfachen der jeweiligen Arbeitsbreiten der landwirtschaftlichen Maschinen für Bodenbearbeitung, Aussaat, Pflanzenschutz und Ernte entsprechen. Dadurch können die Arbeitserledigungskosten minimiert werden, sodass sich die Verknüpfung der Acker- bzw. Grünlandnutzung mit der Agrarholzproduktion möglichst wirtschaftlich darstellen lässt (EICHHORN et al., 2006).

Die Auswahl der Baumarten für die Gehölzstreifen ist abhängig von der geplanten Verwertung; für die stoffliche Nutzung werden z.B. Werthölzer wie Nuss und Kirsche zur Herstellung von Möbeln und anderen hochwertigen Holzprodukten mit einer Umtriebszeit von 40 bis 70 Jahren angepflanzt (UNSELD et al., 2011). Für silvoarable Agroforstsysteme eignen sich hingegen besser Baumarten mit hohen jährlichen Biomassezuwächsen wie Pappeln oder Weiden, die im Kurzumtrieb mit drei- bis vierjährigen Ernteintervallen bewirtschaftet werden und deren Holz energetisch genutzt wird. Durch die verhältnismäßig kurzen Umtriebsintervalle wachsen die Baumkronen nicht weit in die Fläche hinein, was die Opportunitätskosten des Schattenwurfs reduziert und die Feldarbeiten nicht wesentlich beeinträchtigt (SCHMIDT, 2011). Zudem erfordert der geringe Stammdurchmesser bei kurzen Umtriebszeiten keine Forsterntetechnik, sondern die Gehölze können mit Feldhäckslern oder Anbauhackern als Hackschnitzel geerntet werden (UNSELD et al., 2011; BÄRWOLFF et al., 2013).

Rechtlich sind Agroforstsysteme sowohl vom Wald als auch von Kurzumtriebsplantagen abzugrenzen. Gemäß Bundeswaldgesetz § 2 Abs. 1 gilt zwar generell jede mit Forstpflanzen bestockte Grundfläche als Wald, jedoch werden in § 2 Abs. 2 Nr. 1 Kurzumtriebsplantagen mit einer Umtriebszeit von nicht länger als 20 Jahren vom Waldbegriff ausgenommen. Agroforstlich genutzte Flächen hingegen werden unabhängig von der Umtriebszeit nach § 2 Abs. 2 Nr. 2 grundsätzlich nicht dem Wald zugeordnet (BMJV, 2017).

Agroforstsysteme können durch die gemischte Nutzung der Fläche zudem eine erkennbare ökologische Aufwertung des gesamten Ackerschlags bewirken und ferner das Landschaftsbild insbesondere in großflächig ausgeräumten Agrarlandschaften aufwerten (BENDIX et al., 2010; BÖHM, 2013).

Agroforstflächen sind im Rahmen der EU-Agrarförderung beihilfefähig, jedoch sind gewisse Maßgaben einzuhalten, um die entsprechenden Direktzahlungen generieren zu können. So ist seit der Reform

der Gemeinsamen Agrarpolitik 2013 zum Erhalt der Direktzahlungen das sogenannte Greening – bestehend aus Anbaudiversifizierung, Erhalt des Dauergrünlandes und Ausweisung ökologischer Vorrangflächen – einzuhalten (BMEL, 2015; LWK-NRW, 2017a). Da Agroforstflächen im Ganzen deutschlandweit nicht als ökologische Vorrangfläche ausgewiesen werden können, muss neben der Ackerfläche jeder Gehölzstreifen einzeln als Niederwald mit Kurzumtrieb ausgewiesen werden, um Prämien zu erlangen. Voraussetzung dafür ist, dass die Gehölzstreifen jeweils eine Mindestgröße von 0,3 ha aufweisen und ausschließlich Pappeln, Weiden, Birken, Erlen, Eschen oder Eichen angepflanzt werden. Die ökologische Wertigkeit des Niederwalds mit Kurzumtrieb ist auf 0,5 festgesetzt, sodass für einen Hektar ökologische Vorrangfläche zwei Hektar Agrarholz erforderlich sind (BÄRWOLFF et al., 2013; BMEL, 2015; LANGENBERG et al., 2017).

3 Methodische Vorgehensweise

Die Risikoanalyse hinsichtlich der untersuchten Anbaualternativen ist mittels Monte-Carlo-Simulation durchgeführt worden. Die stochastische Methode ermöglicht es, Fragestellungen numerisch zu lösen, die analytisch nur aufwendig bzw. gar nicht lösbar wären (POULTER, 1998; COUTO et al., 2013). So wird die Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Zielgröße durch die Monte-Carlo-Simulation auf Grundlage vielzahliger Simulationsläufe numerisch-experimentell errechnet, während für analytische Verfahren die Erwartungswerte sowie die Streuungs- und Zusammenhangsmaße der einzelnen Variablen vorliegen oder aus historischen Daten abgeleitet werden müssen. Zwar lässt sich auch mit einer historischen Simulation die Verteilung einer Zielgröße numerisch z. B. durch Bootstrapping ermitteln, indem mithilfe zurückliegender, bekannter Daten für die jeweiligen Unsicherheitsvariablen die Werte der Zielgröße direkt berechnet werden, jedoch bedarf es dafür einer großen Zahl an Beobachtungswerten. Dagegen werden im Rahmen der Monte-Carlo-Simulation aus den zur Verfügung stehenden Daten parametrische Verteilungen für die jeweiligen Zufallsvariablen abgeleitet. In Abhängigkeit der geschätzten Verteilungen werden in den einzelnen Simulationsläufen computergestützt Zufallszahlen und damit Werte für die disaggregierten Zufallsvariablen erzeugt, woraus sich letztlich die Verteilung der Zielgröße ergibt (MUBHOFF und HIRSCHAUER, 2016). Als Zielgröße wurde mit der Leistungs-

Kosten-Differenz, auch als Annuität oder jährlicher Gewinnbeitrag bezeichnet, ein dynamisches Investitionsverfahren gewählt, um die zeitliche Variation der Zahlungsströme der auf mehrere Produktionszeiträume angelegten Agroforstsysteme berücksichtigen zu können. Die Verteilung der Zielgröße entspricht diesbezüglich dem Risikoprofil der jeweiligen Anbaualternative (IBID.). Zur Bestimmung des Risikoprofils mittels Monte-Carlo-Simulation sind sieben Ablaufschritte durchzuführen, die nachfolgend erläutert werden.

Zuerst sind die mit Risiko behafteten disaggregierten Zufallsvariablen – ergo die Unsicherheitsgrößen, wie beispielsweise Erträge, Erzeugerpreise und Erntekosten – auszumachen. Im zweiten Schritt werden geeignete Daten für die statistische Untersuchung der disaggregierten Zufallsvariablen beschafft. Die Daten können auf historischen Zeitreihen, Experteninterviews oder Literaturangaben beruhen, wobei Besonderheiten, wie namentlich Trends oder saisonale Schwankungen, zu berücksichtigen sind. Zu den beschafften Daten werden in Schritt drei die bestpassenden parametrischen Verteilungen für die disaggregierten Zufallsvariablen geschätzt, wodurch jeder Ausprägung der Variablen Eintrittswahrscheinlichkeiten zugeordnet werden. Eventuell bestehende Korrelationen zwischen den einzelnen Zufallsvariablen sind gegebenenfalls zu berechnen, da ansonsten ein falsches Risikoprofil der entsprechenden Anbaualternative bestimmt wird. So führt beispielsweise eine negative Korrelation zwischen zwei Leistungsgrößen – wie den Erträgen und den Produktpreisen – zu einer reduzierten Streuung der relevanten Zielgröße. Bei Nichtbeachtung der stabilisierenden Wirkung durch den natürlichen Hedge wird das Risikoprofil der entsprechenden Alternative riskanter spezifiziert, als es tatsächlich ist. In Ablaufschritt vier wird unter Berücksichtigung der etwaigen Korrelationen und in Abhängigkeit der geschätzten Verteilung für jede disaggregierte Zufallsvariable computergestützt eine Zufallszahl gezogen. Die Berechnung der aggregierten Zielgröße folgt mithilfe der simulierten Werte der disaggregierten Zufallsvariablen in Schritt fünf. Der sechste Ablaufschritt besteht in einer sehr häufigen Wiederholung der Schritte vier und fünf; gemäß dem Gesetz der großen Zahl werden mindestens 10.000 Simulationsläufe durchgeführt. Abschließend wird in Schritt sieben das Risikoprofil der betrachteten Anbaualternative in Form einer kumulierten relativen Wahrscheinlichkeits- bzw. Häufigkeitsverteilung der aggregierten Zielgröße erstellt. Anhand des Risikoprofils können letztlich Aussagen hinsichtlich der Höhen des Erwar-

tungswertes sowie der Standardabweichung bezüglich der Zielgröße getätigt werden und es können die Wahrscheinlichkeiten ermittelt werden, mit denen die Zielgröße bestimmte Werte unter- oder überschreitet (WOLBERT-HAVERKAMP, 2012; MUBHOFF und HIRSCHAUER, 2016).

Ein risikoneutraler Entscheider zieht als alleiniges Entscheidungskriterium die zu erwartende Höhe der Zielgröße heran und entscheidet zugunsten der Anbaualternative mit dem höchsten Erwartungswert, da diese Option im Mittel den größten wirtschaftlichen Nutzen verspricht. Indes haben u.a. REYNAUD und COUTURE (2012) sowie MAART-NOELCK und MUBHOFF (2014) gezeigt, dass Landwirte in der Regel über eine risikoaverse und nicht über eine risikoneutrale Einstellung verfügen. Für Landwirte ist demnach neben der zu erwartenden Höhe der Zielgröße auch deren Schwankungsbreite relevant, wodurch sich eine reziproke Proportionalität und damit ein Zielkonflikt zwischen den Zielen Einkommenshöhe und Einkommenssicherheit ergibt. Aufgrund der Austauschbeziehung beider Ziele werden die Risikoprofile der Anbaualternativen mithilfe der Monte-Carlo-Simulation berechnet und anhand des Konzeptes der stochastischen Dominanz interpretiert. Das Konzept der stochastischen Dominanz ermöglicht es, effiziente von ineffizienten Handlungsalternativen zu differenzieren, auch ohne Kenntnis der exakten Risikoeinstellung des Entscheiders, sprich des Grades seiner Risikoaversion. So kann anhand des Vergleichs der Verteilungsfunktionen – den Risikoprofilen – zweier Anbaualternativen für risikoaverse Entscheider eine eindeutige Handlungsempfehlung ausgesprochen werden, sofern beide Anbaualternativen das gleiche Risiko aufweisen, aber eine Alternative eine höhere Einkommenserwartung zeigt. Eine eindeutige Handlungsempfehlung lässt sich ebenfalls aussprechen, wenn eine Anbaualternative bei geringerem Risiko eine mindestens genauso hohe Einkommenserwartung hat wie die andere (BRANDES und ODENING, 1992; WOLBERT-HAVERKAMP, 2012).

Im Fall der absoluten stochastischen Dominanz ist das schlechteste Ergebnis der dominierenden Alternative mindestens genauso gut wie das beste Ergebnis der unterlegenen Alternative. Darüber hinaus unterscheiden BENÍTEZ et al. (2006) die Kriterien stochastische Dominanz erster Ordnung und stochastische Dominanz zweiter Ordnung, um Investitionsalternativen zu bewerten. Ähnlich wie bei BENÍTEZ et al. (2006) hat der Entscheider die Wahl, ob er in ein Agroforstsystem f investieren oder ganzflächigen

Ackerbau g betreiben möchte. Die Investition in das Agroforstsystem würde eine kumulative Verteilung der jährlichen Gewinnbeiträge $F(x)$ bedeuten und $G(x)$ für den klassischen Ackerbau. Aus dieser Überlegung heraus würde die Investition in ein Agroforstsystem den klassischen Ackerbau nach der ersten Ordnung stochastisch dominieren, wenn folgendes gilt:

$$G(x) - F(x) \geq 0 \quad (1)$$

Eine stochastische Dominanz erster Ordnung liegt somit vor, wenn beide Handlungsalternativen das gleiche Risiko aufweisen, jedoch bei einer Alternative – der dominierenden – die Einkommenserwartung höher ist.

Sofern Risikoaversion vorliegt, sind die Verteilungen hinsichtlich der stochastischen Dominanz zweiter Ordnung zu bewerten. Die Investition in das Agroforstsystem dominiert den klassischen Ackerbau nach der zweiten Ordnung, wenn die folgende Beziehung zwischen den kumulierten Verteilungen bezüglich des jährlichen Gewinnbeitrags gegeben ist:

$$\int_{-\infty}^x (G(z) - F(z)) dz \geq 0 \quad (2)$$

Insofern (1) nicht gegeben ist, heißt das grafisch gesprochen, die Verteilungsfunktionen beider Alternativen schneiden sich und die Fläche zwischen den Funktionen unterhalb des Schnittpunktes ist größer als die Fläche oberhalb des Schnittpunktes. In vielen praktisch relevanten Situationen ist dagegen die Fläche oberhalb des Schnittpunktes größer als die Fläche unterhalb des Schnittpunktes. In diesem Fall geht die Anbaualternative mit der höheren Einkommenserwartung auch mit dem höheren Risiko einher und eine Handlungsempfehlung ist ohne genaue Kenntnis der Stärke der Risikoaversion nicht möglich (HADAR und RUSSELL, 1969; BRANDES und ODENING, 1992; EDER, 1993; MUBHOFF und HIRSCHAUER, 2016).

4 Modellannahmen

4.1 Standortansprüche, Standortbeschreibung und Bewirtschaftung

Bei den Agroforstflächen der Versuchsstandorte Dornburg und Forst handelt es sich, wie eingangs erwähnt, um silvoarable Alley-Cropping-Systeme, deren Gehölzstreifen überwiegend aus Pappeln im Kurzumtrieb bestehen. Kurzumtriebspappeln eignen sich besonders zur Hackgutproduktion und weisen insgesamt geringe Standortansprüche auf. Dabei soll-

ten die Bodenverhältnisse jedoch ohne Gefahr von Staunässe sein und es sollte ein Durchwurzelungshorizont von mindestens 30 cm bestehen, um eine gute Nährstoffverfügbarkeit zu gewährleisten. Pappeln bevorzugen neutrale bis leicht saure Böden mit einem pH-Wert von 5,5 bis 6,5 und wachsen auf leichten und schweren Standorten gleichermaßen. Die Ackerwertzahl sollte mindestens 25 bis 30 Bodenpunkte betragen. Eine erforderliche Jahresdurchschnittstemperatur von mindestens 7,6 °C erlaubt den Pappelanbau faktisch nur bis zu einer Höhenlage von 400 m über Normalhöhennull. Die jährlich notwendige Niederschlagsmenge von mindestens 600 l/m² wird etwa zur Hälfte während der Wachstumsphase benötigt (LIEBHARD, 2010; SCHMIDT, 2011; V. BEHR et al., 2012).

Das Agroforstsystem in Dornburg mit einer Gesamtgröße von 51,3 ha wurde im März 2007 durch das Thüringer Lehr-, Prüf- und Versuchsgut angelegt. Dornburg liegt im Südosten des Thüringer Beckens und der Versuchsstandort befindet sich auf einer Hochfläche ca. 260 m über Normalhöhennull zwischen Saale und Ilm. Die vorherrschende Bodenart ist toniger Schluff mit einer Bodenwertzahl zwischen 40 bis 50 Punkten; der Untergrund wird durch eine mittlere Muschelkalkschicht mit Lößauflage geprägt. Auf dem Versuchsschlag wurden insgesamt sieben jeweils zwölf Meter breite Gehölzstreifen implementiert, die alle parallel zueinander angelegt worden sind, deren Innenabstände jedoch mit 48 m, 96 m und 144 m teilweise unterschiedlich sind. Die Ausrichtung der Gehölzstreifen erfolgte von Nordnordwest nach Südsüdost, womit sie nahezu senkrecht zur vorherrschenden Hauptwindrichtung Südwest stehen und bestmöglichen Schutz gegen Winderosion sowie Evapotranspiration bieten bei gleichzeitig geringem Schattenwurf auf die zwischenstehenden Feldfrüchte. Die Umtriebszeiten der Gehölze betragen je nach Streifen vier oder acht Jahre, mit einer Pflanzdichte von 10.000 Pflanzen pro Hektar für den vierjährigen Umtrieb bzw. 2.220 Pflanzen pro Hektar für den achtjährigen Umtrieb. Die annualen Ackerkulturen zwischen den Gehölzstreifen bestehen aus einer sich wiederholenden Fruchtfolge von Sommergerste, Winterraps und Winterweizen (VETTER et al., 2016).

Die Versuchsfläche in Forst (Lausitz) liegt östlich der Stadt Cottbus und befindet sich somit nahe der deutsch-polnischen Neißegrenze. Der insgesamt 78 ha umfassende Schlag wird durch die Agrargesellschaft Forst bereitgestellt und bewirtschaftet. Die Etablierung des Agroforstsystems an diesem Standort fand 2010 statt. Die Versuchsfläche ist durch lehmigen

Sand mit einer Bodenwertzahl von 45 Bodenpunkten gekennzeichnet und die Bodentypen sind Gley und Pseudogley. In Forst wurden ebenfalls sieben Gehölzstreifen mit Innenabständen von 24 m, 48 m und 96 m parallel zueinander in die Ackerfläche implementiert. Die Streifen sind in Nord-Süd-Ausrichtung angelegt, wodurch ein optimaler Lichteinfall für die zwischenstehenden Ackerkulturen gewährleistet ist. Die vorherrschende Hauptwindrichtung in Forst ist ebenfalls Südwest, sodass die Gehölze nicht senkrecht, sondern etwa in einem Winkel von 45° bis 55° zur Hauptwindrichtung stehen. Die Ernte der Gehölzstreifen erfolgte bisher im vierjährigen oder fünfjährigen Umtrieb bei einer Pflanzdichte der Pappelbestände von etwa 9.000 bis 10.000 Pflanzen pro Hektar. Die Fruchtfolge zwischen den Gehölzstreifen ist zweigeteilt und besteht zum einen aus Silomais, Silomais und Luzerne sowie zum anderen aus dem Anbau einer Zwischenfruchtmischung Kartoffeln und Winterweizen (PACHOLKE, 2011; KANZLER und BÖHM, 2015).

Zur Etablierung eines Agroforstsystems sind mehrere Bewirtschaftungsschritte erforderlich, die teilweise einheitlich und ganzflächig durchgeführt werden, jedoch überwiegend hinsichtlich Gehölzstreifen und Ackerfläche variieren. Die Bodenvorbereitung wird im Herbst durchgeführt, wozu anfänglich der Altaufschlag mit einem Breitband- bzw. Totalherbizid behandelt wird. Die Ackerfruchtfolge sollte dann mit einer Sommerung starten, da die Pflanzung der Gehölze im Frühling dadurch erleichtert wird (HOFMANN, 2008; LIEBHARD, 2010). Die anschließende Saatbettbereitung erfolgt mittels Kreisel- oder Federzinkenegge, sodass der Boden feinkrümlig und rückverfestigt für die Aussaat bzw. Anpflanzung vorbereitet ist. Eine Düngung ist vor Anpflanzung der Pappeln in der Regel nicht notwendig, da ein hinreichend ausgewogener Nährstoffhaushalt vorliegt (V. BEHR et al., 2012). Die Anpflanzung der schnellwachsenden Kurzumtriebsgehölze im Frühling kann je nach Pflanzgut entweder manuell oder mechanisch mit einer Pflanzmaschine erfolgen. Für die Energiegewinnung werden in erster Linie qualitativ hochwertige Stecklinge verwendet, die sich aufgrund der übersichtlichen Abmessungen im Vergleich zu Steckruten, Setzstangen und Ganzpflanzen problemlos maschinell pflanzen lassen und zudem verhältnismäßig kostengünstig sind (LIEBHARD, 2010). Die bereits erwähnte Pflanzenschutzmaßnahme vor der Pflanzung reicht nicht aus, um die Begleitvegetation umfänglich und langfristig zu unterdrücken, sodass im ersten Jahr der Anpflan-

zung eine weitere Maßnahme mit einem selektiven Herbizid durchzuführen ist. Anschließend drängt die Pappeln die Begleitvegetation selbst zurück. Die Gehölzstreifen müssen auch während der Standzeit nicht gedüngt werden, da hinsichtlich der Stickstoffverfügbarkeit die Eintragungen durch die Atmosphäre, durch den Laubfall und durch die zwischenstehenden annuellen Kulturen sowie die Nährstoffvorräte in tieferliegenden Bodenschichten zur Versorgung der Bäume ausreichen (SCHILDBACH et al., 2010).

Der optimale Erntezeitpunkt der Gehölze befindet sich während der Monate November bis März, da die Vitalität der Bäume bei einer Ernte im unbelaubten Zustand nur wenig beeinflusst wird und zudem der Wiederaustrieb des Stockes am besten gewährleistet wird. Zur Vermeidung von Strukturschäden und Bodenverdichtung durch die Erntemaschinen empfehlen sich Frosttage oder Trockenphasen zum Holzeinschlag der Kurzumtriebspappeln. Die Ernte kann im einphasigen oder im zweiphasigen Verfahren durchgeführt werden. Im einphasigen Verfahren werden die Gehölze mit einem Feldhäcksler in einem Arbeitsgang abgeschnitten, zu Hackgut zerkleinert und direkt auf ein Transportfahrzeug gefördert. Im zweiphasigen Verfahren werden die Bäume abgeschnitten, anschließend zu einer Sammelstelle transportiert und dort letztlich mit einem Forsthacker zu Hackschnitzeln verarbeitet. Das einphasige Ernteverfahren ist in der Regel kostengünstiger, jedoch nur bis zu einem Baumalter von vier Jahren möglich, da die Pappeln bei längeren Umtriebszeiten einen zu großen Stammdurchmesser für den Feldhäcksler entwickeln (SCHOLZ et al., 2009). Die erntefrischen Hackschnitzel haben einen Wassergehalt von 50 % bis 60 %, womit sie nicht lagerfähig und damit schwer zu vermarkten sind. In einer Miete unter Vliesabdeckung lässt sich das Hackgut mittels Dombelüftung indes kostengünstig trocknen (BRUMMACK, 2010). Die Rekultivierung der Gehölzstreifen zu Ackerland erfolgt nach der letzten Holzernte mithilfe einer Forstfräse. Damit wird das bis dahin im Boden verbliebene Stockholz sehr stark zerkleinert, sodass die Fläche anschließend problemlos wieder mit annuellen oder Dauerkulturen bestellt werden kann (HOFMANN, 2008; LIEBHARD, 2010).

4.2 Datengrundlage

Die Wirtschaftlichkeit eines Agroforstsystems wird durch vielzählige Parameter beeinflusst, die bei den Berechnungen zu berücksichtigen sind. Dabei handelt es sich einerseits um Größen, die bekannt sind bzw.

festgelegt werden, und andererseits um unsichere Größen, die lediglich abgeschätzt und überschlägig kalkuliert werden können (KRÖBER et al., 2008). Zur Erstellung der Risikoprofile ist in Bezug auf die bekannten bzw. festzulegenden Größen eine Modellfläche konstruiert worden, um sowohl für den Standort Dornburg als auch für den Standort Forst die Vergleichbarkeit zwischen dem Agroforstsystem und dem klassischen Ackerbau auf der Referenzfläche zu gewährleisten. Die rechteckige Modellfläche umfasst bei einer Breite von 324 m und einer Länge von 771,6 m eine Größe von 25 ha und wird im Fall des reinen Ackerbaus ganzfächig bewirtschaftet. Im Fall des Agroforstsystems werden in die Modellfläche Gehölzstreifen implementiert, wobei die Ackerfläche zwischen den Gehölzstreifen jeweils mit der gleichen Kultur bewirtschaftet wird wie die Ackerfläche im Falle des reinen Ackerbaus. In Tabelle 1 sind die angenommenen Parameter für die Modellfläche angegeben.

Tabelle 1. Bekannte und festgelegte Parameter hinsichtlich der Modellfläche

Parameter	Wert
Agroforstfläche	25 ha
<i>davon Ackerfläche</i>	22,395 ha
<i>davon Gehölzfläche</i>	2,605 ha
Flächenbreite	324 m
Flächenlänge	771,6 m
Anzahl Gehölzstreifen	3 Streifen
Streifenbreite	12 m
Streifenlänge	723,6 m
Innenabstand der Gehölzstreifen zueinander	96 m
Abstand der Gehölzstreifen zum Feldrand	48 m
Vorgewendeabstand der Gehölzstreifen	24 m
Fahrgassenabstand	24 m
Pappel-Pflanzdichte	10.000 Pflanzen/ha
Nutzungsdauer	24 Jahre
Umtrieb/Erntezyklus	4 Jahre
Kalkulationszinssatz	3,5 %

Quelle: eigene Darstellung

In der Agroforstmodellfläche werden drei jeweils zwölf Meter breite Pappelstreifen parallel zueinander angelegt. Die Gehölzstreifen stehen 96 m auseinander und die äußeren Streifen weisen einen Abstand von 48 m zur Längsseite des Feldes auf. Zudem werden die Gehölzstreifen nur bis auf einen Abstand von 24 m an die kurzen Feldseiten heran gepflanzt, sodass die Vorgewende nicht durch die Gehölze unterbrochen werden. Damit ergibt sich eine Pappelstreifenlänge von

723,6 m und bei einer Breite von zwölf Metern eine Fläche von 8.683 m² je Gehölzstreifen. Die Flächen der einzelnen Parzellen mit Niederwald im Kurzumtrieb liegen somit über 0,3 ha, wodurch sie im Rahmen der EU-Agrarförderung beihilfefähig sind (vgl. Kapitel 2). Die Fahrgassenabstände und damit einhergehend die Arbeitsbreiten für die Dünge- und Pflanzenschutzmittelapplikation betragen 24 m. Die Arbeitsbreiten der weiteren landwirtschaftlichen Maschinen hinsichtlich Bodenbearbeitung, Aussaat und Ernte sind mit vier, drei bzw. sechs Metern angenommen, sodass keine Überschneidungen in der Bewirtschaftung des Agroforstsystems entstehen. Die mit 10.000 Pflanzen pro Hektar angelegten Pappelstreifen werden im vierjährigen Umtrieb geerntet, 24 Jahre genutzt und anschließend rekultiviert. Der Kalkulationszinssatz für die Berechnungen der Leistungskosten-Differenz ist mit 3,5 % veranschlagt.

Neben den zuvor erläuterten bekannten Größen existieren hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit von Agroforstsystemen eine Reihe von unsicheren Zufallsvariablen, die die Erstellung eines Risikoprofils überhaupt erst erforderlich machen (KRÖBER et al., 2008). Zur Durchführung der Monte-Carlo-Simulation ist es notwendig, geeignete Daten für die Zufallsvariablen zu beschaffen (vgl. Kapitel 3). Die erforderlichen Daten für die Berechnungen sind zum einen durch umfangreiche Literaturrecherchen und zum anderen auf Grundlage der Ertragsmessungen der beiden Versuchsstandorte ermittelt worden. Anhand der so beschafften Datengrundlage sind die Verteilungen für die jeweiligen Zufallsvariablen mit dem Microsoft

Excel Add In @RISK bestimmt worden. Es wurden dazu mittels Kolmogorov-Smirnov-Test die Verteilungen ermittelt, die am besten zu den Werten der Datengrundlage passen. Während zum Beispiel KRÖBER et al. (2008) ausschließlich die Dreiecksverteilung berücksichtigt haben, sind für die vorliegenden Berechnungen neben der Dreiecksverteilung (RiskTriang) auch die Normalverteilung (RiskNormal) und die Gleichverteilung (RiskUniform) berücksichtigt worden. Die Normalverteilung lässt zwar theoretisch negative Werte zu, was in Bezug auf Preise und Erträge als unrealistisch einzustufen ist, jedoch spielen negative Werte bei der vorliegenden Datengrundlage hinsichtlich des Verhältnisses von Mittelwert zur Standardabweichung eine untergeordnete Rolle. In Tabelle 2 sind – beispielhaft für den Versuchsstandort Dornburg – die Daten hinsichtlich der unsicheren Zufallsvariablen, die sich im Rahmen der Anlage von Gehölzen innerhalb eines Agroforstsystems ergeben (vgl. Kapitel 4.1), abgebildet. Die Daten in Bezug auf den Versuchsstandort Forst, für den aufgrund unvollständiger Ertragsdaten die gleiche Fruchtfolge wie in Dornburg angenommen worden ist, sind im Anhang zu finden.

Die Flächenkosten wurden anhand von 20 Literaturdaten aus dem Bundesland Thüringen ermittelt. Die Datenspanne reicht von 200 € bis 477 € je Hektar und die Verteilung der Daten kommt einer Normalverteilung am nächsten. Es ergibt sich ein Erwartungswert von 323,05 €/ha und eine Standardabweichung von 76,46 €/ha. Die Gemeinkosten mit einer Spanne von 100 €/ha bis 215 €/ha basieren auf 14 Daten und fol-

Tabelle 2. Datengrundlage für die Gehölzstreifen des Agroforstsystems Dornburg

Annahmen	Mw. ^a	Sta. ^b	Min.	Max.	Anzahl Daten	Dichtefunktion
Flächenkosten ¹ [€/ha]	323,05	76,46	200,00	477,00	20	RiskNormal
Gemeinkosten ² [€/ha]			100,00	215,00	14	RiskTriang
Kosten Herbizidmaßnahme ³ [€/ha]			29,22	85,99	11	RiskTriang
Kosten Pflügen ⁴ [€/ha]	87,96	24,03	47,00	151,93	15	RiskNormal
Kosten Saatbettbereitung ⁵ [€/ha]	38,82	15,20	12,00	78,14	15	RiskNormal
Kosten Pflanzgut ⁶ [€/ha]	1.808,33	418,78	1.200,00	2.500,00	12	RiskNormal
Kosten Pflanzung ⁷ [€/ha]			264,00	635,00	9	RiskUniform
Kosten Bestandspflege ⁸ [€/ha]	108,40	50,85	49,00	176,60	6	RiskNormal
Kosten Ernte ⁹ [€/ha]	466,60	102,21	350,00	600,00	6	RiskNormal
Kosten Transport ¹⁰ [€/t _{atro}]			3,58	15,00	5	RiskUniform
Kosten Trocknung ¹¹ [€/t _{atro}]	9,13	4,23	4,50	15,00	5	RiskNormal
Kosten Rekultivierung ¹² [€/ha]			500,00	2.500,00	11	RiskTriang
Ertrag ¹³ [t _{atro} /ha]			26,52	69,79	18	RiskTriang
Hackschnitzelpreis ¹⁴ [€/t _{atro}]			87,00	155,00	17	RiskTriang

^aMittelwert

^bStandardabweichung

Quelle: eigene Darstellung nach ¹⁻¹⁴BEIMGRABEN (2009), ¹⁻¹⁴KTBL (2009), ^{1,3-7,12-14}SCHILDBACH et al. (2010), ³⁻¹⁴SCHWEINLE und FRANKE (2010), ^{1-10,12-14}UNSELD et al. (2010), ⁹V. BEHR et al. (2012), ^{1-10,12-14}WAGNER et al. (2012), ^{1-7,12-14}WOLBERT-HAVERKAMP (2012), ^{1,2,4-7,11-14}REINHOLD und HERING (2013), ¹³VETTER (2016), ¹⁴BZA (2017), ¹⁴C.A.R.M.E.N. (2017) und ^{13,14}LWK-NRW (2017b)

gen am ehesten einer Dreiecksverteilung. Für die Herbizidmaßnahme vor der Gehölzpflanzung entstehen je Hektar Kosten zwischen 29,22 € und 85,99 €, die ebenfalls am ehesten dreiecksverteilt sind. Die annähernd normalverteilten Kosten für das Pflügen liegen – mit einem Erwartungswert von 87,96 €/ha – zwischen 47 €/ha und 151,93 €/ha. Für die Saatbettbereitung entstehen im Mittel Kosten von 38,82 €/ha. Der finanzielle Aufwand für das Pflanzgut liegt zwischen 1.200 €/ha und 2.500 €/ha, woraus sich ein Erwartungswert von 1.808,33 €/ha und damit ein wesentlicher Kostenfaktor der Gehölzstreifenanlage ergibt. Der Aufwand für die Pflanzung selbst liegt zwischen 264 €/ha und 635 €/ha und die Datengrundlage weist die Struktur einer Gleichverteilung auf. Die Bestandspflege beläuft sich im Mittel auf 108,40 €/ha und die Erntekosten betragen im Mittel 466,60 €. Für den Transport der Hackschnitzel wurden Kosten zwischen 3,58 €/t_{atro} und 15 €/t_{atro} angenommen. Der Aufwand für die Trocknung des Hackgutes liegt im Mittel bei 9,13 €/t_{atro}. Die Rekultivierung am Ende der Nutzungsdauer des Agroforstsystems verursacht Aufwendungen zwischen 500 €/ha und 2.500 €/ha. Die Ertragsdaten wurden im Gegensatz zu den anderen Größen nicht allein auf Grundlage von Literaturdaten gewonnen, sondern stammen zusätzlich aus der Ertragerfassung am Versuchsstandort Dornburg. Die Erträge liegen somit zwischen 26,52 t_{atro}/ha sowie 69,79 t_{atro}/ha und es sind – in Bezug auf die Modellfläche – alleinig die Erträge der Pappelstreifen und keiner anderen dort ebenfalls angelegten Gehölze berücksichtigt worden. Zudem sind in Anlehnung an

die Beobachtungen von WAGNER et al. (2012), dass der physische Ertrag der Gehölze bei steigenden Umtrieben zunimmt, entsprechende Faktoren für die Holzerträge berücksichtigt worden. Für den ersten Umtrieb ist ein Ertragsfaktor von 0,495, für den zweiten von 1,000, für den dritten und vierten von jeweils 1,120, für den fünften von 1,125 und für den sechsten von 1,130 hinterlegt worden. Die Preise für Hackschnitzel bewegen sich auf Grundlage der herangezogenen Datenbasis zwischen 87 €/t_{atro} und 155 €/t_{atro} (vgl. Tabelle 2).

Simultan zu dem Agroforstsystem sind für die Ackerfläche entsprechende Daten hinsichtlich der Zufallsvariablen beschafft sowie deren Verteilungen bestimmt worden. In Tabelle 3 ist die Datengrundlage für die Ackerfläche sowie für die Ackerstreifen zwischen den Gehölzen innerhalb des Agroforstsystems – ebenfalls auf den Standort Dornburg bezogen – dargestellt.

Die Datenbasis hinsichtlich der Flächen- und Gemeinkosten für die Ackerreferenzfläche und die Ackerfläche innerhalb des Agroforstsystems entspricht folgerichtig exakt der Datengrundlage bezüglich der Kosten für die Gehölzstreifen. Somit ergeben sich im Mittel Flächenkosten von 323,05 €/ha und die annähernd einer Dreiecksverteilung entsprechenden Gemeinkosten liegen zwischen 100 €/ha und 215 €/ha. Die weiteren Kosten für die Ackerkulturen sind zu Durchschnittskosten (DK) und Arbeiterledigungskosten (AEK) zusammengefasst. Zu den Durchschnittskosten zählen die Aufwendungen für das Saatgut sowie für die Dünge- und Pflanzenschutzmittel; die Arbeiterledigungskosten umfassen die Lohn- und

Tabelle 3. Datengrundlage für die Ackerfläche und die Ackerstreifen des Agroforstsystems Dornburg

Annahmen	Mw. ^a	Sta. ^b	Min.	Max.	Anzahl Daten	Dichtefunktion
Flächenkosten ¹ [€/ha]	323,05	76,46	200,00	477,00	20	RiskNormal
Gemeinkosten ² [€/ha]			100,00	215,00	14	RiskTriang
DK Sommergerste ³ [€/ha]	310,67	49,96	247,00	384,00	6	RiskNormal
AEK Sommergerste ⁴ [€/ha]			418,00	506,00	6	RiskTriang
Ertrag Sommergerste ⁵ [dt/ha]	51,56	5,14	39,30	59,60	11	RiskNormal
Preis Sommergerste ⁶ [€/dt]	19,16	2,37	16,30	22,60	5	RiskNormal
DK Winterraps ⁷ [€/ha]			469,00	711,00	6	RiskTriang
AEK Winterraps ⁸ [€/ha]			377,00	512,00	6	RiskUniform
Ertrag Winterraps ⁹ [dt/ha]	37,05	7,63	25,00	45,00	7	RiskNormal
Preis Winterraps ¹⁰ [€/dt]	39,82	5,19	33,00	49,00	6	RiskNormal
DK Winterweizen ¹¹ [€/ha]	543,33	72,14	441,00	652,00	6	RiskNormal
AEK Winterweizen ¹² [€/ha]			417,00	562,00	9	RiskTriang
Ertrag Winterweizen ¹³ [dt/ha]	89,69	16,05	40,10	106,90	25	RiskNormal
Preis Winterweizen ¹⁴ [€/dt]	17,29	2,32	13,80	19,00	5	RiskNormal

^aMittelwert

^bStandardabweichung

Quelle: eigene Darstellung nach ^{1,2,7-10,13}GRAF et al. (2004), ^{1,11-14}CHRISTEN (2009), ¹⁻¹⁴KTBL (2009), ¹⁻¹⁴KTBL (2010), ^{1,2,7-10}DEGNER (2011), ¹⁻⁶DEGNER (2012), ^{1,2,7-9,11-13}WOLBERT-HAVERKAMP (2012), ^{1,2,11-14}DEGNER (2015), ^{5,9,13}VETTER (2016), ¹¹⁻¹⁴LFL (2017a), ³⁻⁶LFL (2017b) und ⁷⁻¹⁰LFL (2017c)

Maschinenkosten. Entsprechend der Fruchtfolge ergeben sich anhand der Literaturdaten Durchschnittskosten für die Sommergerste zwischen 247 €/ha und 384 €/ha, die einer Normalverteilung am nächsten kommen und einen Erwartungswert von 310,67 €/ha sowie eine Standardabweichung von 49,96 €/ha aufweisen. Die Arbeitserledigungskosten für die Sommergerste liegen zwischen 418 €/ha und 506 €/ha und die zugrundeliegenden Daten sind am ehesten dreiecksverteilt. Die Erträge der annuellen Ackerkulturen beziehen sich – wie auch die Holzerträge – zu etwa zwei Drittel auf Literaturdaten und zu etwa einem Drittel auf die Daten der Ertragsbefragung am Versuchsstandort Dornburg. Für die Sommergerste ergibt sich somit hinsichtlich des Ertrags ein Erwartungswert von 51,56 dt/ha. Der Sommergerstenpreis lässt einen Betrag von 19,16 €/dt erwarten und die dazugehörige Datengrundlage kommt der Normalverteilung sehr nahe. Hinsichtlich des Winterrapses reicht die Spanne der Durchschnittskosten von 469 €/ha bis 711 €/ha und die der Arbeitserledigungskosten von 377 €/ha bis 512 €/ha. Der Rapspreis sowie der Rapserttrag sind auf Grundlage der Datenbasis normalverteilt und liegen in dem Wertebereich zwischen 25 dt/ha und 45 dt/ha bzw. zwischen 33 €/dt und 49 €/dt. Beim Weizen sind Durchschnittskosten von 543,33 €/ha zu erwarten und die Arbeitserledigungskosten liegen zwischen 417 €/ha und 562 €/ha. Der Weizen lässt einen Ertrag von 89,69 dt/ha erwarten; der Wertebereich reicht von 40,10 dt/ha bis 106,90 dt/ha, woraus sich eine Standardabweichung von 16,05 dt/ha ergibt. Der Winterweizenpreis weist bei einer Spanne von 13,80 €/dt und 19 €/dt einen Erwartungswert von 17,29 €/dt auf (vgl. Tabelle 3).

Neben den unsicheren Zufallsvariablen sind die Direktzahlungen als Fixbetrag berücksichtigt worden. Aufgrund der Beihilfefähigkeit der Gehölzstreifen (vgl. Kapitel 2) sind auf Grundlage der aktuellen Regelungen im Bereich der EU-Agrarförderung sowohl für die Ackerfläche als auch für das Agroforstsystem Transferzahlungen – bestehend aus Basisprämie, Greeningprämie und Umverteilungsprämie – in Höhe von 284,26 €/ha berücksichtigt worden.

5 Ergebnisse

Wie anfangs erwähnt, werden mit Dornburg und Forst zwei Standorte betrachtet, an denen jeweils das Agroforstsystem mit der Ackerfläche verglichen wird. Die Gegenüberstellung der Anbaualternativen „Agroforst“ und „annuelle Ackerkultur“ wird diesbezüglich für

jeden Standort separat durchgeführt, da für die Standorte unterschiedliche Erträge und Flächenkosten angenommen werden. Zur Erstellung der Risikoprofile mittels Monte-Carlo-Simulation wurden für beide Anbaualternativen an beiden Standorten jeweils 10.000 Simulationsläufe mit dem Microsoft Excel Add In @RISK durchgeführt. Es liegen demnach auch 10.000 Einzelergebnisse der betrachteten Zielgröße vor, da deren Anzahl den Wiederholungen der Simulationsläufe entspricht (KRÖBER et al., 2008). Als Zielgröße wurde – wie in Kapitel 3 angemerkt – die Leistungs-Kosten-Differenz gewählt.

5.1 Modellergebnisse für den Standort Dornburg

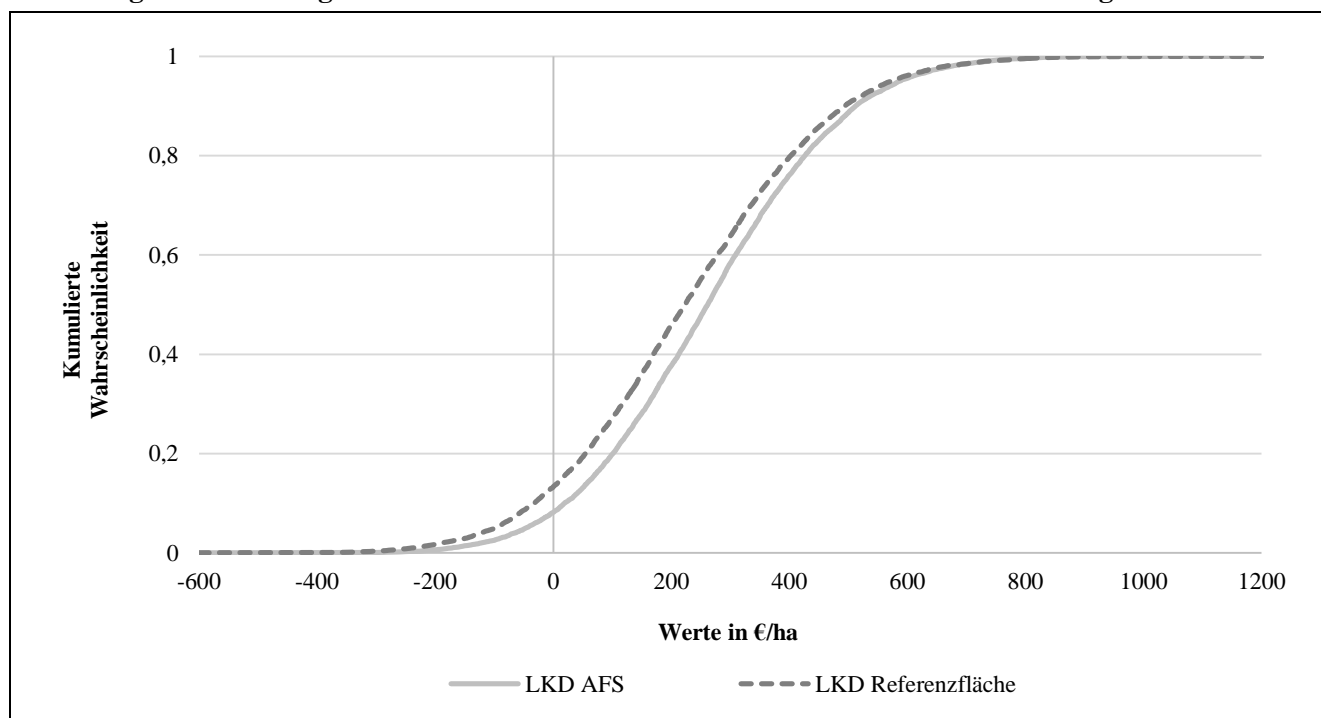
In Tabelle 4 sind die Ergebnisse der Berechnungen für das Agroforstsystem und für die Ackerreferenzfläche dargestellt. Das Agroforstsystem erreicht mit 264,12 €/ha im Vergleich zur Referenzfläche (228,07 €/ha) den höheren Erwartungswert der Leistungs-Kosten-Differenz. Gleichzeitig weist das Agroforstsystem eine Standardabweichung von 193,73 €/ha auf, die damit unterhalb der Standardabweichung der Ackerfläche von 207,68 €/ha liegt. Das 5 % Perzentil zeigt an, dass es mit einer Wahrscheinlichkeit von 5 % beim Agroforstsystem zu einer LKD von unter -48,84 €/ha kommt und mit gleicher Wahrscheinlichkeit bei der Referenzfläche zu einer LKD von unter -107,40 €/ha. Weiterhin gibt das 95 % Perzentil an, dass beim Agroforstsystem eine LKD oberhalb von 584,41 €/ha mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % nicht erreicht wird. Bei der Referenzfläche liegt die LKD mit 95 %iger Wahrscheinlichkeit nicht über 573,42 €/ha.

Tabelle 4. Ergebnisse für den Standort Dornburg

Parameter	LKD Agroforstsystem	LKD Referenzfläche
Erwartungswert [€/ha]	264,12	228,07
Standardabweichung [€/ha]	193,73	207,68
5 % Perzentil [€/ha]	-48,84	-107,40
95 % Perzentil [€/ha]	584,41	573,42

Quelle: eigene Berechnung

Ergänzend zu den Daten aus Tabelle 4 sind in Abbildung 1 die Verteilungsfunktionen der Anbaualternativen „Agroforstsystem“ und „annuelle Ackerkultur“ abgebildet. Anhand der Funktionsgraphen ist zu erkennen, dass die Fläche zwischen den Verteilungsfunktionen unterhalb des Schnittpunktes größer ist als die Fläche oberhalb des Schnittpunktes. Daher ist

Abbildung 1. Verteilungsfunktionen für die Anbaualternativen am Standort Dornburg

Quelle: eigene Berechnung

sowohl an der Abbildung als auch an dem höheren Erwartungswert hinsichtlich der LKD bei gleichzeitig niedrigerer Standardabweichung unter Rückgriff auf das Konzept der stochastischen Dominanz (vgl. Kapitel 3) erkennbar, dass an dem Standort Dornburg das Agroforstsystem gegenüber der Referenzfläche stochastisch dominant zweiter Ordnung ist.

5.2 Modellergebnisse für den Standort Forst

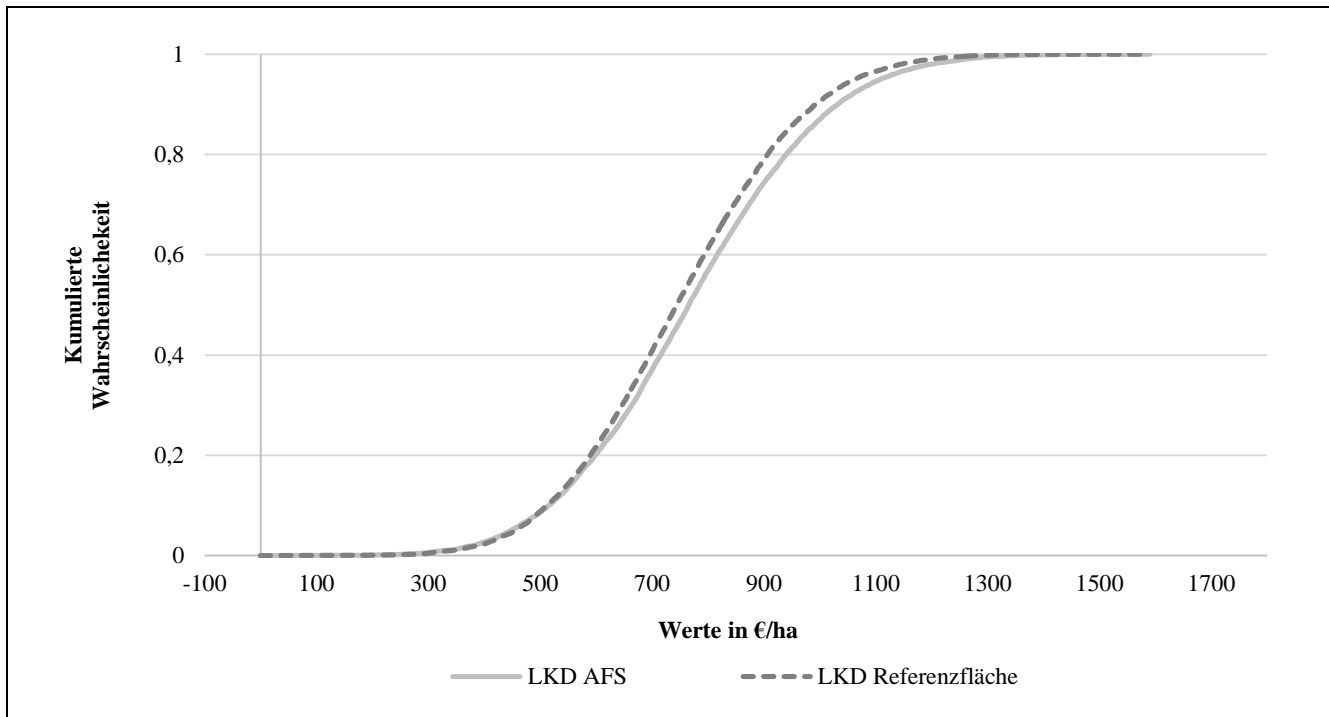
Die Ergebnisse der Berechnungen für den Standort Forst sind in Tabelle 5 wiedergegeben. Der Erwartungswert der LKD für das Agroforstsystem beträgt 770,88 €/ha und der Erwartungswert für die Referenzfläche liegt bei 749,56 €/ha. Beim Agroforstsystem ergibt sich eine Standardabweichung von 200,79 €/ha und bei der Referenzfläche von 186,06 €/ha. Wie das 5 % Perzentil anzeigt, liegt die LKD beim Agroforstsystem mit einer Wahrscheinlichkeit von 5 % unterhalb von 447,66 €/ha; bei der Ackerfläche liegt die LKD mit einer 5%igen Wahrscheinlichkeit unter 455,49 €/ha. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % liegt die LKD des Agroforstsystems unter 1.108,07 €/ha und die LKD der Referenzfläche unterhalb von 1.061,21 €/ha.

Tabelle 5. Ergebnisse für den Standort Forst

Parameter	LKD Agroforstsystem	LKD Referenzfläche
Erwartungswert [€/ha]	770,88	749,56
Standardabweichung [€/ha]	200,79	186,06
5 % Perzentil [€/ha]	447,66	455,49
95 % Perzentil [€/ha]	1.108,07	1.061,21

Quelle: eigene Berechnung

Die zugehörigen Verteilungsfunktionen zu den Berechnungen für den Standort Forst sind in Abbildung 2 dargestellt. Die Verteilungsfunktionen der Anbaualternative „Agroforstsystem“ und der Alternative „annuelle Ackerkultur“ verlaufen so, dass die Fläche zwischen den Funktionsgraphen oberhalb des Schnittpunktes der Graphen größer ist als die Fläche unterhalb der Graphen. Im Gegensatz zu den Ergebnissen des Standortes Dornburg ergibt sich damit für den Standort Forst unter Rückgriff auf das Konzept der stochastischen Dominanz eine sogenannte praxisrelevante Situation. Das ist zum einen an den Verteilungsfunktionen zu erkennen und andererseits wird es daran deutlich, dass mit dem höheren Erwartungswert beim Agroforstsystem auch die höhere Standardabweichung einhergeht.

Abbildung 2. Verteilungsfunktionen für die Anbaualternativen am Standort Forst

Quelle: eigene Berechnung

6 Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl für den Standort Dornburg als auch für den Standort Forst das Agroforstsystem hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit einen höheren Erwartungswert aufweist als die Ackerreferenzfläche. Ein risikoneutraler Entscheider würde sich unter Rentabilitäts Gesichtspunkten somit in beiden Fällen für das Agroforstsystem entscheiden. Da Landwirte jedoch in der Regel nicht risikoneutral, sondern risikoavers sind (vgl. Kapitel 3), ist für sie neben der zu erwartenden Höhe auch die Schwankungsbreite der wirtschaftlichen Zielgröße relevant. Am Standort Dornburg ist die Schwankungsbreite, gemessen an der Standardabweichung, für das Agroforstsystem geringer als für die Referenzfläche, wodurch das Agroforstsystem bei gleichzeitig höherem Erwartungswert für diesen Standort eine Dominanz zweiter Ordnung aufweist. Auch für risikoaverse Entscheider kann daher hinsichtlich der Rentabilität eine eindeutige Handlungsempfehlung zu Gunsten des Agroforstsystems gegeben werden. Für den Standort Forst kann hingegen für risikoaverse Entscheider ohne weiteres keine eindeutige Handlungsempfehlung ausgesprochen werden, da dort beim Agroforstsystem mit dem höheren Erwartungswert auch die höhere Standardabweichung und damit das höhere Risiko zu be-

obachten ist. Um in diesem Fall eine individuelle Entscheidungsunterstützung liefern zu können, müsste der Grad der Risikoaversion bzw. die Risikonutzenfunktion des risikoaversen Entscheiders bekannt sein. Dann ließe sich mithilfe des Erwartungsnutzen-Prinzips oder des Erwartungswert-Varianz-Kriteriums die Risikonutzenfunktion des Entscheiders mit den Verteilungsinformationen der Zielgröße verknüpfen. Durch die Berücksichtigung der Risikonutzenfunktion sowie der Verteilungsinformationen ließe sich letztlich – bezüglich der Handlungsalternativen „Agroforstsystem“ und „klassischer Ackerbau“ – eine Rangfolge bilden, die aus Rentabilitäts Gesichtspunkten die Wahl des risikoaversen Entscheiders unterstützen würde (MUBHOFF und HIRSCHAUER, 2016).

Vor dem Hintergrund der Ergebnisse – besonders derjenigen für den Standort Dornburg – stellt sich die Frage, warum Agroforstsysteme von Landwirten in Deutschland keine Berücksichtigung bei der Anbauplanung finden. Gründe für die Zurückhaltung der Umsetzung des kombinierten Anbausystems sehen SPIECKER et al. (2009) vor allem in fehlendem Wissen der Landwirte über Bäume und deren Kultivierung. Darüber hinaus wird der Boden sehr lange gebunden, weshalb der Anbau im Grunde nur auf Eigentumsflächen umgesetzt werden kann, da die Nutzungsdauer von Agroforstsystemen den durchschnittlichen Pacht-

zeitraum deutlich überschreitet. Ein weiterer Grund könnten die lange Bindung des Kapitals und die irreversiblen Investitionskosten sein. Die Investitionskosten eines Agroforstsystems bestehen hauptsächlich aus den Kosten für Pflanzgut und Pflanzung, die im Fall einer Rückumstellung nicht zurückzuerlangen sind und somit versunken wären (DIEKMANN et al., 2015). Angesichts der hohen Volatilität der Preise für Agrarprodukte könnten Landwirte dies als Nachteil betrachten. Zudem haben WAGNER et al. (2012) gezeigt, dass bei den ersten Umtrieben der Gehölze noch mit niedrigeren Biomasserträgen zu rechnen ist, wodurch es zu Liquiditätsengpässen bei den Betrieben mit Agroforstsystem kommen kann. Im Gegensatz zur Ackerfläche sind die Rückflüsse auch deutlich unregelmäßiger verteilt und nicht gleichmäßig, wie es die Annuität suggeriert. In den durchgeführten Berechnungen sind die genannten Aspekte der Irreversibilität und zeitlichen Flexibilität der Investition in ein Agroforstsystem nicht berücksichtigt worden, da die Hinzunahme dieser Aspekte in das aufgestellte Modell aufgrund der hohen Zahl an Zufallsvariablen die verfügbaren Rechenkapazitäten überschritten hätte. Der Wert des Wartens – in Bezug auf die Möglichkeit, auch zu einem späteren Zeitpunkt investieren zu können und keine „Jetzt oder nie“-Entscheidung treffen zu müssen – wird somit nicht berücksichtigt. Jedoch könnte der Wert des Wartens die Investitionszurückhaltung der Landwirte in ein Agroforstsystem, wie FEIL und MÜBHOFF (2018) es für Kurzumtriebsplantagen bereits gezeigt haben, trotz möglicher Rentabilitätsvorteile erklären.

Den Berechnungen lag ferner eine aus Sicht der Arbeitserledigung bestmögliche Modellfläche zugrunde. Die rechteckige Grundfläche und vor allem die ganzzahligen Vielfachen der landwirtschaftlichen Arbeitsbreiten als Abstände zwischen den Gehölzstreifen führen zu keinen nennenswerten Beeinträchtigungen bei der Bewirtschaftung. Die dadurch minimierten Arbeitserledigungskosten können jedoch deutlich ansteigen, wenn sich die Arbeitsbreiten und vor allem die Fahrgassenabstände während der Nutzungsdauer ändern, da das zu Bewirtschaftungsüberschneidungen und somit zu kostenintensiven Doppelüberfahrten führt. Mit einem Anstieg der Arbeitserledigungskosten können sich die Ergebnisse hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit von Agroforstsystemen im Vergleich zur Ackerfläche zu Lasten des streifenförmigen Anbaus von Agrarholz verändern.

In Agroforstsystemen entstehen, wie eingangs erläutert, zwischen den Ackerkulturen und den Gehöl-

zen der Kurzumtriebsstreifen Interaktionen, die teils synergetischen (z. B. Windschutz), teils aber auch konkurrierenden (z. B. Nährstoffkonkurrenz) Charakter haben. Im Fall überwiegend synergetischer Effekte und damit höherer Feldfruchterträge im Agroforstsystem würde – vor dem Hintergrund der vorliegenden Berechnungen – der Erwartungswert der Leistungskosten-Differenz des Agroforstsystems ansteigen und weiterhin den Erwartungswert der Referenzfläche übersteigen. Für den Fall, dass die konkurrierenden Effekte überwiegen, würde das Agroforstsystem bis zu einem Ertragsrückgang der Feldfrüchte von 2,4 % (Dornburg) bzw. 1,6 % (Forst) einen höheren Erwartungswert aufweisen als die Referenzfläche. Bei stärkeren durch die Gehölze verursachten Ertragsdepressionen würde die Referenzfläche einen höheren Erwartungswert aufweisen, wodurch sich die Rangfolge umkehren würde und die Referenzfläche gegenüber dem Agroforstsystem aus Rentabilitätsgesichtspunkten vorzuziehen wäre.

Eine Möglichkeit, etwaigen konkurrierenden Effekten zu entgehen, zeigen beispielsweise PAUL et al. (2017) auf, indem sie Agroforstwirtschaft mit einer flächig getrennten Mischung aus Acker- und Kurzumtriebsfläche vergleichen. Ein flächig getrennter Anbau von Ackerkultur und Agrarholz mit dem gleichen Mischungsverhältnis wie in den vorliegenden Berechnungen hätte zu den gleichen Auswirkungen auf die Rentabilität und das Risiko geführt. Der Verzicht des kombinierten Anbaus im Mischkultursystem ermöglicht indes auch nicht die Nutzung der vielfältigen Vorzüge eines Agroforstsystems.

Hinsichtlich des Kalkulationszinsfußes hat sich gezeigt, dass die Ergebnisse bezüglich einer Variation robust sind. Eine Erhöhung der Diskontrate um 1,5 Punkte von 3,5 auf 5 % begünstigt zwar das Ergebnis der Referenzfläche im Vergleich zum Agroforstsystem, jedoch nicht annähernd in dem Maße, als dass die Rangfolge sich ändert. Eine Reduzierung des Zinsfußes auf 2 % führt entsprechend zu einem relativen Anstieg des Erwartungswertes der Agroforstfläche gegenüber der Referenzfläche.

7 Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse lassen erkennen, dass Agroforstsysteme unter bestimmten Bedingungen wirtschaftlich attraktiv sein können und Vorzüge gegenüber dem klassischen Ackerbau aufweisen. Die Vorteile hinsichtlich der Rentabilität scheinen Landwirten jedoch

nicht auszureichen, um diese Form der Landnutzung umzusetzen. In zukünftigen Untersuchungen gilt es daher mittels Realoptionsansatz zu analysieren, ob die Irreversibilität und die zeitliche Flexibilität der Investition in ein Agroforstsystem die Zurückhaltung bei der Umsetzung der simultanen Gehölz- und Feldfruchtproduktion erklären können. Die Anwendung des Realoptionsansatzes könnte mithilfe einer Kombination aus stochastischer Simulation und genetischem Algorithmus erfolgen. Damit die Umsetzung gelingt, wäre es jedoch notwendig, die Zahl der Zufallsvariablen zu reduzieren, sodass nur eine unsichere Zufallsvariable – z.B. die Leistungs-Kosten-Differenz – je Anbauoption vorliegt (FEIL et al., 2013). Ferner empfiehlt sich eine differenzierte Betrachtung des Risikos über die Standardabweichung hinaus. Beispielsweise könnten weitere Risikomaße, wie der Value at Risk, zur Anwendung kommen.

Um die ökologischen Vorteile der Agroforstwirtschaft dennoch gesamtgesellschaftlich nutzen zu können, wären flankierende Maßnahmen, wie eine höhere ökologische Wertigkeit im Rahmen der ökologischen Vorrangfläche oder eine finanzielle Unterstützung der Landwirte im Zuge der Anlage von Agroforstsystemen, denkbar (EMMANN et al., 2013). Insofern haben die Ergebnisse der Analyse interessante Implikationen sowohl für die europäische wie die nationale Agrarpolitik. Zudem sollten in zukünftigen Versuchsreihen präzise Ertragsmessungen unter gleichen Witterungs- und Bodenbedingungen zwischen den Ackerkulturen in Agroforstsystemen und den großflächig angebauten Ackerkulturen durchgeführt werden. Anhand der Ergebnisse kann letztlich analysiert werden, welche Auswirkungen die Gehölzstreifen auf die zwischenstehenden Ackerkulturen ausüben und ob die synergetischen oder die konkurrierenden Effekte überwiegen. Es bieten sich weiterhin auch Berechnungen für zusätzliche Standorte mit Eigenschaften, die sich von denen der Standorte Dornburg und Forst unterscheiden, sowie Sensitivitätsanalysen mit dem Ziel an, die Bedingungen, unter denen Agroforstsysteme wettbewerbsfähig gegenüber klassischen Ackerkulturen sind, zu spezifizieren. Schließlich empfiehlt sich für zukünftige ökonomische Untersuchungen der Agroforstwirtschaft, insbesondere im Hinblick auf Liquiditätsaspekte, Agroforstsysteme in gängige landwirtschaftliche Nutzungsportfolios einzubetten und nicht nur Handlungsalternativen heranzuziehen, die ausschließlich Agroforst oder klassischen Ackerbau betrachten.

Literatur

- BÄRWOLFF, M. (2013): Streifenanbau in Agroforstsystemen. In: Bemann, A. und D. Butler Manning (Hrsg.): Energieplantagen in der Landwirtschaft – Eine Anleitung zur Bewirtschaftung von schnellwachsenden Baumarten im Kurzumtrieb für den Praktiker. Erling Verlag, Clenze: 150-154.
- BÄRWOLFF, M., G. REINHOLD, C. FÜRSTENAU, T. GRAF, L. JUNG und A. VETTER (2013): Gewässerrandstreifen als Kurzumtriebsplantagen oder Agroforstsysteme. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- BÄRWOLFF, M. und A. VETTER (2011): Mehr Struktur auf großen Schlägen – Agroforstwirtschaft auf ausgeräumter Agrarfläche Thüringens. AgroForstEnergie – Forum Agroforstsysteme, Dornburg. In: http://www.agroforstenergie.de/_publikationen/vortraege/V_25_Baerwolff_2011_2.Forum_AFE_TP1.pdf, Abruf: 28.04.2017.
- BEIMGABEN, T. (2009): Kostensätze und Leistungspotenziale bei der Bewirtschaftung von Kurzumtriebsplantagen. 9. Biomasse-Tagung Rheinland-Pfalz, 5.11.2009. In: http://www.stoffstrom.org/fileadmin/userdaten/bilder/Veranstaltungen/Biomasse/2009-11-05_Kosten-Leistung-KUP-Beimgaben_5.pdf, Abruf: 13.04.2017.
- BENDIX, J., H. BEHLING, T. PETERS, M. RICHTER und E. BECK (2010): Functional biodiversity and climate change along an altitudinal gradient in a tropical mountain rainforest. In: Tschardtke, T., C. Leuschner, E. Veldkamp, H. Faust, E. Guhardja und A. Bidin (Hrsg.): Tropical Rainforests and Agroforests under Global Change - Ecological and Socio-economic Valuations. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg: 239-268.
- BENÍTEZ, P.C., T. KUOSMANEN, R. OLSCHESKI und G.C. VAN KOOTEN (2006): Conservation Payments under Risk: A Stochastic Dominance Approach. In: American Journal of Agricultural Economics 88 (1): 1-15.
- BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2015): Umsetzung der EU-Agrarreform in Deutschland. Ausgabe 2015. Bonn.
- BMJV (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz) (2017): Gesetz zur Erhaltung des Waldes und zur Förderung der Forstwirtschaft (Bundeswaldgesetz – BWaldG). In: <http://www.gesetze-im-internet.de/bwaldg/>, Abruf: 07.05.2017.
- BÖHM, C. (2013): Effekte agroforstlicher Landnutzung auf Mikroklima, Bodenfruchtbarkeit und Wasserqualität. In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.): Gülzower Fachgespräche 43: 46.
- BRANDES, W. und M. ODENING (1992): Investition, Finanzierung und Wachstum in der Landwirtschaft. Ulmer, Stuttgart.
- BRUMMACK, J. (2010): Aufbereitung von Hackschnitzeln für eine energetische Nutzung. In: Bemann, A. und C. Knust (Hrsg.): Agrowood – Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven. Technische Universität Dresden, Institut für Internationale Forst- und Holzwirtschaft. Weißensee Verlag, Berlin: 117-129.
- BZA (Brennholz Zentrum Altdorf) (2017): Solar Energie & Biowärme. In: <http://www.solare-holztrocknung.de/41306/home.html>, Abruf: 20.04.2017.

- C.A.R.M.E.N. (Centrales- Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e. V.) (2017): Preisentwicklung bei Waldhackschnitzeln – der Energieholz-Index und Preisindex für KUP-Hackschnitzel. In: <https://www.carmen-ev.de/>, Abruf: 20.04.2017.
- CHRISTEN, O. (2009): Winterweizen – Das Handbuch für Profis. DLG-Verlag, Frankfurt/Main.
- COUTO, P.R.G., J.C. DAMASCENO und S.P. DE OLIVEIRA (2013): Monte Carlo Simulations Applied to Uncertainty in Measurement. In: Chan, W.K. (Hrsg.): Theory and Applications of Monte Carlo Simulations. InTech, Rijeka: 27-51.
- DEGNER, J. (2011): Richtwerte für Leistungen und Kosten der Winterrapsproduktion in drei Ertragsstufen. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. In: <http://www.tll.de/ainfo/archiv/wrar0811.pdf>, Abruf: 20.04.2017.
- (2012): Richtwerte für Leistungen und Kosten der Sommergerstenproduktion in drei Ertragsstufen. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft In: http://www.tll.de/ainfo/pdf/sg3_rw.pdf, Abruf: 20.04.2017.
- (2015): Richtwerte für Leistungen und Kosten der Produktion von Winterweizen. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft 2015. In: http://www.tll.de/www/daten/publikationen/richtwerte/brw_ww_1215.pdf, Abruf: 16.04.2017.
- DIEKMANN, A., M. HAVERKAMP und O. MÜBHOFF (2015): Die Bewertung der Umstellung von einer jährlichen Ackerkultur auf den Anbau von Miscanthus – Eine Anwendung des Realoptionsansatzes. In: German Journal of Agricultural Economics 64 (1): 16-32.
- EDER, M. (1993): Risikoanalyse mit Hilfe der stochastischen Dominanz – Fallbeispiel mit Versuchsdaten ausgewählter Marktfrüchte. In: Die Bodenkultur 44 (3): 275-288.
- EICHHORN, M.P., P. PARIS, F. HERZOG, L.D. INCOLL, F. LIAGRE, K. MANTZANAS, M. MAYUS, G. MORENO, V.P. PAPANASTASIS, D.J. PILBEAM, A. PISANELLI und C. DUPRAZ (2006): Silvoarable systems in Europe – past, present and future prospects. In: Agroforestry Systems 67 (1): 29-50.
- EMMANN, C., C. PANNWITZ, C. SCHAPER und L. THEUVSEN (2013): Ökonomische Bewertung eines Alley-Cropping-Systems zur Nahrungsmittel- und Energieholzproduktion in Brandenburg. In: Bahrs, E., T. Becker, R. Birner, M. Brockmeier, S. Dabbert, R. Doluschitz, H. Grethe, C. Lippert und E. Thiele (Hrsg.): Herausforderungen des globalen Wandels für Agrarentwicklung und Weltenergie. Landwirtschaftsverlag, Münster: 60-71.
- FEIL, J.-H., O. MÜBHOFF und A. BALMANN (2013): Policy impact analysis in competitive agricultural markets: a real options approach. In: European Review of Agricultural Economics 40 (4): 633-658.
- FEIL, J.-H. und O. MÜBHOFF (2018): Modelling investments in short rotation coppice under uncertainty: A value chain perspective. In: Biomass and Bioenergy 108 (1): 224-235.
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe) (2017): Anbau nachwachsender Rohstoffe in Deutschland. In: <https://mediathek.fnr.de/grafiken/daten-und-fakten.html>, Abruf: 20.04.2017.
- GRAF, T., J. DEGNER, R. GÖTZ und W. ZORN (2004): Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Winterraps. 4. Auflage. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. In: <http://www.tll.de/ainfo/archiv/wrap0104.pdf>, Abruf: 15.04.2017.
- GRÜNEWALD, H. (2005): Anbau schnellwachsender Gehölze für die energetische Verwertung in einem Alley-Cropping-System auf Kippsubstraten des Lausitzer Braunkohlereviere. Dissertation. Brandenburgische Technische Universität, Cottbus-Senftenberg.
- GRÜNEWALD, H. und T. REEG (2009): Überblick über den Stand der Forschung zu Agroforstsystemen in Deutschland. In: Reeg, T., A. Bemann, W. Konold, D. Murach und H. Spiecker (Hrsg.): Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Flächen. Wiley-VCH Verlag, Weinheim.
- HADAR, J. und W.R. RUSSELL (1969): Rules for Ordering Uncertain Prospects. In: American Economic Review 59 (1): 25-34.
- HEAVEY, J. P. und T. A. VOLK (2014): Living snow fences show potential for large storage capacity and reduced drift length shortly after planting. In: Agroforestry Systems 88 (5): 803-814.
- HENKE, S. und L. THEUVSEN (2014): Regional differenzierte Bewertung von Biogasanlagen und Kurzumtriebsplantagen. In: Jahrbuch der Österreichischen Gesellschaft für Agrarökonomie 23: 81-90.
- HERZOG, F. (1997): Konzeptionelle Überlegungen zu Agroforstwirtschaft als Landnutzungsalternative in Europa. In: Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung 38 (1): 32-35.
- HOFMANN, M. (2008): Energieholzproduktion in der Landwirtschaft. 2. Auflage. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. Media Cologne Kommunikationsmedien, Hürth.
- KANZLER, M. und C. BÖHM (2015): Nachhaltige Erzeugung von Energieholz in Agroforstsystemen. Teilvorhaben 2: Bodenschutz und Bodenfruchtbarkeit, Wasserhaushalt und Mikroklima. Schlussbericht, FKZ: 22000312. Brandenburgische Technische Universität, Cottbus-Senftenberg.
- KRÖBER, M., K. HANK, J. HEINRICH und P. WAGNER (2008): Ermittlung der Wirtschaftlichkeit des Energieholzbaus in Kurzumtriebsplantagen – Risikoanalyse mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation. GEWISOLA-Jahrestagung: Risiken in der Agrar- und Ernährungswirtschaft und ihre Bewältigung, Bonn.
- KRÖGER, R., J.R. KONERDING und L. THEUVSEN (2016): Identifikation von Einflussfaktoren auf die Nutzung von Güllefeststoffen als Gärsubstrat in Biogasanlagen. In: German Journal of Agricultural Economics 65 (2): 112-131.
- KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft) (2009): Faustzahlen für die Landwirtschaft. 14. Auflage. Scheuermann Druck, Gernsheim.
- (2010): KTBL-Datensammlung. Betriebsplanung Landwirtschaft 2010/11. Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft. 22. Auflage. Druckerei Lokay, Reinheim.
- LANGENBERG, J., L. DRITTLER, T. VON BIERBRAUER, C. SCHAPER und L. THEUVSEN (2017): Der Markt für Bioenergie. In: German Journal of Agricultural Economics 66 (Supplement): 107-125.
- LfL (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft) (2017a): LfL-Deckungsbeiträge und Kalkulationsdaten – Winter-

- weizen. In: <https://www.stmelf.bayern.de/idb/winterweizen.html>, Abruf: 22.04.2017.
- (2017b): LfL-Deckungsbeiträge und Kalkulationsdaten – Sommergerste. In: <https://www.stmelf.bayern.de/idb/sommergerste.html>, Abruf: 22.04.2017.
- (2017c): LfL-Deckungsbeiträge und Kalkulationsdaten – Winterraps. In: <https://www.stmelf.bayern.de/idb/winterraps.html>, Abruf: 22.04.2017.
- LIEBHARD, P. (2010): Energieholz im Kurzumtrieb: Rohstoff der Zukunft. 2. Auflage. Stocker Verlag, Graz.
- LWK-NRW (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen) (2017a): Greeningprämie. In: <https://www.landwirtschaftskammer.de/foerderung/direktzahlungen/greeningpraemie.htm>, Abruf: 08.05.2017.
- (2017b): Kurzumtriebsplantagen. In: <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/nawaro/kurzumtriebsplantagen.htm>, Abruf: 20.04.2017.
- MAART-NOELCK, S.C. und O. MUBHOFF (2014): Measuring the risk attitude of decision-makers: are there differences between groups of methods and persons? In: *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* 58 (3): 336-352.
- MOSQUERA-LOSADA, M.R., J. MCADAM, R. ROMERO-FRANCO, J.J. SANTIAGO-FREIJANES und A. RIGUEIRO-RODRÍGUEZ (2009): Definitions and Components of Agroforestry Practices in Europe. In: Rigueiro-Rodríguez, A., J. McAdam und M.R. Mosquera-Losada (Hrsg.): *Agroforestry in Europe. Current Status and Future Prospects*. Springer, Dordrecht: 3-19.
- MUBHOFF, O. und N. HIRSCHAUER (2016): *Modernes Agrarmanagement – Betriebswirtschaftliche Analyse- und Planungsverfahren*. 4. Auflage. Verlag Franz Vahlen, München.
- NAIR, P.K.R. (1993): *An Introduction to Agroforestry*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- OLI, B.N., T. TREUE und O. LARSEN (2015): Socio-economic determinants of growing trees on farms in the middle hills of Nepal. In: *Agroforestry Systems* 89 (5): 765-777.
- OPPERMANN, R., N. KASPERCZYK, B. MATZDORF, M. REUTTER, C. MEYER, R. LUICK, S. STEIN, K. AMESKAMP, J. GELHAUS und R. BLEIL (2013): *Reform der Gemeinsamen Agrarpolitik 2013 und Erreichung der Biodiversitäts- und Umweltziele*. Bundesamt für Naturschutz, Bonn.
- PACHOLKE, K. (2011): *Standortskundliche und ertragskundliche Untersuchung in einem einjährigen Alley-Cropping-System Südostbrandenburgs*. Studienarbeit. BTU Cottbus.
- PAUL, C., M. WEBER und T. KNOKE (2017): Agroforestry versus farm mosaic systems - Comparing land-use efficiency, economic returns and risks under climate change effects. In: *Science of the Total Environment* 587-588 (1): 22-35.
- POULTER, S.R. (1998): Monte Carlo Simulation in Environmental Risk Assessment--Science, Policy and Legal Issues. In: *RISK: Health, Safety & Environment* 9 (1): 7-26.
- PRETZSCH, J. und C. SKODAWESSELY (2010): Sozio-ökonomische und ethische Aspekte der Kurzumtriebswirtschaft. In: Bemann, A. und C. Knust (Hrsg.): *Agrowood – Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven*. Technische Universität Dresden, Institut für Internationale Forst- und Holzwirtschaft. Weißensee Verlag, Berlin: 230-242.
- REINHOLD, G. und T. HERING (2013): *Betriebswirtschaftliche Richtwerte für die Produktion von Holzhackschnitzeln – 4-jähriger Umtrieb*. 2. Auflage 2013. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. In: <http://www.tll.de/ainfo/pdf/brh40513.pdf>, Abruf: 14.04.2017.
- REYNAUD, A. und S. COUTURE (2012): Stability of risk preference measures: results from a field experiment on French farmers. In: *Theory and Decision* 73 (2): 203-221.
- SCHILDBACH, M., M. HOFMANN und H. WOLF (2010): *Anlage und Etablierung von Kurzumtriebsplantagen*. In: Bemann, A. und C. Knust (Hrsg.): *Agrowood – Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven*. Technische Universität Dresden, Institut für Internationale Forst- und Holzwirtschaft. Weißensee Verlag, Berlin: 65-73.
- SCHMIDT, C. (2011): *Zur ökonomischen Bewertung von Agroforstsystemen*. Dissertation. Justus-Liebig-Universität, Gießen.
- SCHOLZ, V., F.R. LORBACHER und H. SPIKERMANN (2009): *Technologien der Ernte und Rodung von Kurzumtriebsplantagen*. In: Reeg, T., A. Bemann, W. Konold, D. Murach und H. Spiecker (Hrsg.): *Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Flächen*. Wiley-VCH Verlag, Weinheim: 99-112.
- SCHWEINLE, J. und E. FRANKE (2010): *Betriebswirtschaft*. In: Skodawessely, C., J. Pretzsch und A. Bemann (Hrsg.): *Beratungshandbuch zu Kurzumtriebsplantagen – Entscheidungsgrundlagen zur Etablierung von Kurzumtriebsplantagen in Deutschland*. Verlag Hille, Dresden: 8.1-8.9.
- SPIECKER, H., M. BRIX, B. BENDER, A. CHALMIN, A. MÖNDEL, K. MASTEL, R. VETTER, R. UNSELD, U. KRETSCHMER, T. REEG, M. OELKE, W. KONOLD, J. HAMPPEL, C. HEINDORF, F. HOHLFELD, S. JÄGER, G. MAHIK, E. RUSDEA, A. SCHÄFER und S. WEISSENBURGER (2009): *Neue Optionen für eine nachhaltige Landnutzung – Schlussbericht des Projektes agroforst*, Förderkennzeichen: 0330621. Bundesministerium für Bildung und Forschung, Berlin.
- UNSELD, R., A. MÖNDEL, B. TEXTOR, F. SEIDL, K. STEINFATT, M. KAROPKA und M. NAHM (2010): *Anlage und Bewirtschaftung von Kurzumtriebsflächen in Baden-Württemberg*. Ministerium für Ländlichen Raum, Ernährung und Verbraucherschutz Baden-Württemberg. 2. Auflage. In: http://www.fva-bw.de/publikationen/sonstiges/kup_broschuere.pdf, Abruf: 18.04.2017.
- UNSELD, R., N. REPPIN, K. ECKSTEIN, W. ZEHLIUS-ECKERT, H. HOFFMANN und T. HUBER (2011): *Leitfaden Agroforstsysteme – Möglichkeiten zur naturschutzgerechten Etablierung von Agroforstsystemen*. MEOX Druck, München.
- V. BEHR, W., A. BEMMANN, K. MICHALK, W. GROBE, T. EHM, G. GERDES, H.M. V. HARLING, M. HOFMANN, C. V. KÖNIG, W. KUDLICH, D. LANDGRAF, M. LIESEBACH, J. PLÖTZ, F. SETZER, S. WIEDEMANN, D. BUTLER MANNING und M. DAWID (2012): *DLG-Merkblatt 371: Kurzumtriebsplantagen – Anlage, Pflege, Ernte und Wertschöpfung*. DLG-Verlag, Frankfurt/Main.

- VETTER, A., M. BÄRWOLFF, L. JUNG, D. HARZENDORF, M. PRÜFER und S. MÜRTER (2016): Verbundprojekt: Nachhaltige Erzeugung von Energieholz in Agroforstsystemen – Teilvorhaben I: Ertragseffekte und Ökonomie. Standort Thüringen, Gesamtkoordination. Abschlussbericht. Projekt-Nr. 99.08. FKZ: 22 01 66 11. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena.
- WAGNER, P., J. SCHWEINLE, F. SETZER, M. KRÖBER und M. DAWID (2012): DLG-Standard zur Kalkulation einer Kurzumtriebsplantage. DLG-Merkblatt 372. DLG-Verlag, Frankfurt/Main.
- WOLBERT-HAVERKAMP, M. (2012): Miscanthus und Pappelplantagen im Kurzumtrieb als Alternative zum klassischen Ackerbau – Eine Risikoanalyse mittels Monte-Carlo Simulation. In: Berichte über Landwirtschaft 90 (2): 302-316.
- ZEHLIUS-ECKERT, W. (2010): Agroforstwirtschaft in der europäischen Forschung – mit einem Schwerpunkt auf der ökologischen Nachhaltigkeit. Agrarholz 2010. Technische Universität, München.

Danksagung

Die Förderung des Vorhabens erfolgt aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF). Im Rahmen der Förderinitiative BonaRes (Boden als nachhaltige Ressource für die Bioökonomie) wird das Projekt SIGNAL (Sustainable intensification of agriculture through agroforestry) unterstützt.

Kontaktautor:

JOSEF LANGENBERG

Georg-August-Universität Göttingen

Department für Agrarökonomie und Rurale Entwicklung,

Arbeitsbereich Betriebswirtschaftslehre des Agribusiness

Platz der Göttinger Sieben 5, 37073 Göttingen

E-Mail: josef.langenberg@agr.uni-goettingen.de

Anhang

Datengrundlage für die Gehölzstreifen des Agroforstsystems Forst

Annahmen	Mw. ^a	Sta. ^b	Min.	Max.	Anzahl Daten	Dichtefunktion
Flächenkosten [€/ha]	137,44	54,04	86,00	227,00	9	RiskNormal
Gemeinkosten [€/ha]	97,58	38,37	61,06	161,17	9	RiskNormal
Kosten Herbizidmaßnahme [€/ha]			29,22	85,99	11	RiskTriang
Kosten Pflügen [€/ha]	87,96	24,03	47,00	151,93	15	RiskNormal
Kosten Saatbettbereitung [€/ha]	38,82	15,20	12,00	78,14	15	RiskNormal
Kosten Pflanzgut [€/ha]	1.808,33	418,78	1.200,00	2.500,00	12	RiskNormal
Kosten Pflanzung [€/ha]			264,00	635,00	9	RiskUniform
Kosten Bestandspflege [€/ha]	108,40	50,85	49,00	176,60	6	RiskNormal
Kosten Ernte [€/ha]	466,60	102,21	350,00	600,00	6	RiskNormal
Kosten Transport [€/t _{atro}]			3,58	15,00	5	RiskUniform
Kosten Trocknung [€/t _{atro}]	9,13	4,23	4,50	15,00	5	RiskNormal
Kosten Rekultivierung [€/ha]			500,00	2.500,00	11	RiskTriang
Ertrag [t _{atro} /ha]	46,27	1,95	42,89	48,00	18	RiskNormal
Hackschnitzelpreis [€/t _{atro}]			87,00	155,00	17	RiskTriang

^aMittelwert

^bStandardabweichung

Quelle: eigene Berechnungen

Datengrundlage für die Ackerfläche und die Ackerstreifen des Agroforstsystems Forst

Annahmen	Mw. ^a	Sta. ^b	Min.	Max.	Anzahl Daten	Dichtefunktion
Flächenkosten [€/ha]	137,44	54,04	86,00	227,00	9	RiskNormal
Gemeinkosten [€/ha]	97,58	38,37	61,06	161,17	9	RiskNormal
DK Sommergerste [€/ha]	258,80	25,23	234,00	293,00	5	RiskNormal
AEK Sommergerste [€/ha]	282,50	8,62	240,00	320,00	8	RiskNormal
Ertrag Sommergerste [dt/ha]	45,14	9,82	28,00	59,60	9	RiskNormal
Preis Sommergerste [€/dt]	19,06	2,54	15,78	22,60	5	RiskNormal
DK Winterraps [€/ha]			278,00	711,00	10	RiskTriang
AEK Winterraps [€/ha]			252,00	335,00	7	RiskTriang
Ertrag Winterraps [dt/ha]			22,00	45,00	12	RiskUniform
Preis Winterraps [€/dt]			28,00	49,00	7	RiskTriang
DK Winterweizen [€/ha]	336,86	63,54	252,00	436,00	7	RiskNormal
AEK Winterweizen [€/ha]	299,14	30,91	255,00	347,00	7	RiskNormal
Ertrag Winterweizen [dt/ha]	112,47	19,61	83,00	159,00	17	RiskNormal
Preis Winterweizen [€/dt]	17,55	2,04	14,08	19,00	6	RiskNormal

^aMittelwert

^bStandardabweichung

Quelle: eigene Berechnungen