

## Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Biomasse kann einen Beitrag zur Vermeidung von Treibhausgas (THG) -Emissionen leisten, indem entweder herkömmliche Materialien ersetzt oder Biobrennstoffe zur Verfügung gestellt werden. In industrialisierten Ländern wird gegenwärtig jedoch nur wenig Biomasse für derartige Zwecke genutzt. Eine Hauptursache für diesen geringen Anteil von Biomassenutzungen in Europa sind ihre oft hohen Produktionskosten, welche u.a. auf die verhältnismäßig geringe Verfügbarkeit landwirtschaftlicher Flächen zurückzuführen ist. Kurz- bis mittelfristig werden daher effizientere und kostengünstigere Alternativen zur Einführung der Biomassenutzung benötigt. Solche Alternativen könnten die weitere Entwicklung multifunktionaler Biomassensysteme sowie die Verlagerung der Biomasseproduktion in vorteilhaftere Gebiete, z.B. Osteuropa, sein. Multifunktionale Biomassensysteme umfassen die Konzepte der "Mehrfachproduktnutzung" und der "Kaskadierung". Die Definition von Mehrfachproduktnutzung ist die Verwendung einer Biomasseressource für verschiedene Zwecke, während Kaskadierung die aufeinander folgende Nutzung von Biomasse für mehrere Zwecke, d.h. Materialien, Materialrecycling und Energierückgewinnung, beinhalten. Wichtige Indikatoren für die Effizienz multifunktionaler Biomassensysteme sind die Einsparung nicht erneuerbarer Energie, die Vermeidung von THG-Emissionen, der Bedarf an (landwirtschaftlicher) Fläche und die Gesamtkosten des Systems. Bisher haben jedoch nur wenige Studien zu multifunktionalen Biomassensystemen diese Parameter quantitativ analysiert. Die zentrale Frage dieser Dissertation lautet daher: *Wie groß ist das Potential multifunktionaler Biomassensysteme zur Verringerung der Kosten und zur Verbesserung der Flächennutzungseffizienz in Bezug auf sowohl die Einsparung nicht erneuerbarer Energien als auch die Verringerung von THG-Emissionen.* Zwei Aspekte spielen eine wichtige Rolle bei der Beantwortung dieser Frage. Erstens ist es nötig die Methoden zur Berechnung von Kosten, Flächennutzung, THG-Emissionen und dem Verbrauch nicht erneuerbarer Energien den Erfordernissen der Bewertung multifunktionaler Biomassensysteme anzupassen. Insbesondere Herangehensweisen zur Allokation von Umwelteinflüssen und Kosten oder der Systemerweiterung, zur Einbeziehung der Zeitdimension in die Berechnungen und zur Integration von Marktpreisveränderungen auf Grund der Einführung von Biomassensystemen in großem Maßstab verdienen besondere Aufmerksamkeit. Zweitens hängt der potenzielle Vorteil von der Art des betrachteten Biomassensystems ab. Um viel versprechende multifunktionale Biomassensysteme identifizieren zu können, müssen daher die Mechanismen dieser Abhängigkeit untersucht werden.

---

In dieser Dissertation wird die Effizienz multifunktionaler Biomassensysteme hinsichtlich der THG-Emissionen, des Verbrauchs nicht erneuerbarer Energien, des Bedarfs an landwirtschaftlichen Flächen und der Kosten quantitativ bestimmt. Hierfür werden mehrere Fallstudien zu multifunktionalen Biomassensystemen, die in einer ersten Analyse vielversprechend erschienen, ausgeführt. Die Fallstudien sind in Europa angesiedelt, wobei insbesondere die Verhältnisse in Polen näher untersucht wurden. Auf diese Weise kann das Biomasseproduktionspotenzial in Osteuropa erforscht werden, wo die Staaten über (gegenwärtig) große landwirtschaftliche Gebiete, potenziell durchschnittliche bis hohe landwirtschaftliche Erträge und vergleichsweise geringe Landnutzungs- und Arbeitskosten verfügen.

*Kapitel 2* untersucht das Konzept der Mehrfachproduktnutzung landwirtschaftlicher Pflanzen, d.h. der teilweisen Nutzung einer Pflanze als Energieträger und als Rohstoff für Materialien. Mehrfachproduktnutzung kann womöglich sowohl eine zusätzliche Einkommensquelle darstellen als auch für weitere Verminderungen von THG-Emissionen sorgen. In diesem Kapitel werden die Vorteile von Mehrfachproduktsystemen gegenüber der ausschließlichen Produktion von Bioenergie analysiert. Die Effizienzen der Mehrfachproduktsysteme werden dargestellt als Kosten primärer Biobrennstoffe und THG-Emissionsreduktionen pro Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche. Für diese Analyse wird eine Fallstudie durchgeführt und mit einer Monte-Carlo-Analyse die Sensitivität der Ergebnisse untersucht. Die betrachteten Pflanzen sind Weizen, Hanf und Pappeln in Kurzumtriebsplantagen. Die Mehrfachproduktsysteme werden für die Niederlande und Polen untersucht. Die Reduktion von THG-Emissionen dieser Mehrfachproduktnutzungssysteme betragen ca. 0,2 bis 2,4 Mg CO<sub>2</sub>-Äq per Hektar und Jahr in Polen und 0,9 bis 7,8 Mg CO<sub>2</sub>-Äq per Hektar und Jahr in den Niederlanden. Die Bereitstellungskosten primärer Biobrennstoffe liegen zwischen 0,1 und 9,8 €/GJ in Polen und -4,1 und -1,7 €/GJ in den Niederlanden. Die Ergebnisse zeigen, dass der wirtschaftliche Vorteil von Mehrfachproduktsystemen stark von den Marktpreisen für Biomaterialien, den Biomasseproduktionskosten und den Biomasseerträgen abhängt. Die Nettoerzeugung von THG-Emissionen pro Hektar und Jahr wird dagegen durch die spezifische THG-Emissionsreduktion der Materialanwendung, das Referenzenergiesystem und die THG-Emissionen der landwirtschaftlichen Produktion stark beeinflusst. Die Mehrfachproduktnutzung landwirtschaftlicher Pflanzen kann die Kosten für primäre Biobrennstoffe deutlich verringern. Dies gilt jedoch nicht im Allgemeinen, sondern hängt von der Art der Pflanze und der Materialnutzung ab. Durch die Mehrfachproduktnutzung ergibt sich keine Nettoerzeugung der THG-Emissionen für die Biomassensysteme, die in diesem Kapitel betrachtet wurden. Demnach ist die Mehrfachproduktnutzung nicht von vornherein geeignet um die Effizienz von Bioenergiesystemen zu verbessern.

*Kapitel 3* hat eine zweifache Zielsetzung: (1) die Auswahl und Entwicklung einer kohärenten Methode zum Vergleich von Biomassekaskaden im Hinblick auf den Flächenbedarf, die Potenziale zur Verminderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und die Gesamtkosten des Systems und (2) die Identifizierung wichtiger Parameter und Aspekte, die die Effizienz von Biomassekaskaden beeinflussen. Für letzteres wird die hier entwickelte Methode in einer Fallstudie angewendet, in der verschiedene Kaskaden von Pappelholz aus Kurzumtriebsplantagen auf der Grundlage von Literaturdaten miteinander verglichen werden. Die Ergebnisse für die betrachteten Kaskaden variieren stark und reichen von Gewinnen für die CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion von 200 €/Mg CO<sub>2</sub> zu Kosten für die CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion von 2200 €/Mg CO<sub>2</sub>, sowie von einer Nettoerzeugung von CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Hektar und Jahr Pappelanbau von 28 Mg CO<sub>2</sub> zu Netto-CO<sub>2</sub>-Emissionen von 8 Mg CO<sub>2</sub> pro Hektar und Jahr. Die Berechnung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und Kosten mittels Kapitalwertmethode verändert die Ergebnisse für Langzeitkaskaden deutlich. In diesem Fall verringern sich die Kosten und nehmen die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu. Im Allgemeinen kann Kaskadierung sowohl die CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion pro Hektar und Jahr Biomasseproduktion als auch die Kosten für diese CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion verbessern. Dies hängt jedoch von den Biomassenutzungen, die in der Kaskade kombiniert werden, ab. Parameter, die diese Ergebnisse stark beeinflussen, sind die Marktpreise und der kumulierte Energiebedarf der substituierten Referenzmaterialien und -energieträger und die Effizienz der Biomasseproduktion. Die Methode, die in diesem Kapitel präsentiert wird, ist geeignet, um den Bedarf an landwirtschaftlicher Fläche, die CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion und die Gesamtkosten bzw. -gewinne von Biomassekaskaden zu quantifizieren und hebt den möglichen Einfluss der Zeitdimension auf die Attraktivität einzelner Kaskaden hervor.

*Kapitel 4* vergleicht die Einsparung nicht erneuerbaren Energien und die Verminderung von THG-Emissionen der Produktion von Kunststoffen aus Biomasse mit der Produktion von Bioenergie auf der Basis des Flächenbedarfs. Angesichts der politischen Zielsetzungen zur Erhöhung des Einsatzes von Biomasse für die Energieversorgung und den gegenwärtigen Bemühungen Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen en gros zu produzieren, könnte die Verfügbarkeit landwirtschaftlicher Flächen für die Produktion von industriellen Nutzpflanzen zu einem limitierendem Faktor werden. Im Hinblick auf die Bedeutung, die der Energie- und THG-Problematik in der gegenwärtigen Umweltpolitik beigemessen wird, ist es wünschenswert, den Bedarf an landwirtschaftlicher Fläche in den Vergleich verschiedener Biomassenutzungen mit einzubeziehen. In den letzten Jahren sind zahlreiche Ökobilanzen für Kunststoffe aus Biomasse erstellt worden, von denen jedoch nur wenige die landwirtschaftliche Flächennutzung berücksichtigen. Deswegen werden in diesem Kapitel bestehende Ökobilanzen durch eine Analyse des Bedarfs an landwirtschaftlicher Fläche, bezogen auf die Einsparungen nicht erneuerbarer Energien und THG-

---

Emissionsreduktionen, erweitert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Vorzüglichkeit verschiedener Optionen der Produktion von Biokunststoffen bezüglich der Höhe der Energieeinsparungen und THG-Emissionsreduktionen eine andere Rangfolge einnimmt wenn sie auf Basis des Bedarfs an landwirtschaftlicher Fläche anstatt auf Basis einer Einheit produzierten Kunststoffes verglichen werden. Mit dem Bedarf an landwirtschaftlicher Fläche als Grundlage des Vergleiches schneiden naturfaserverstärkte Kunststoffe und thermoplastische Stärke besser, Polymilchsäure vergleichbar und Polyhydroxyalkanoate schlechter ab als die Produktion von Bioenergie. Wenn zusätzlich die bioenergetische Nutzung von Ernterückständen in die Analyse miteinbezogen wird, verbessern sich die Energieeinsparungen und THG-Emissionsreduktionen der Biokunststoffe erheblich. Auch erscheint es wahrscheinlich, dass mittelfristig die Produktion von Kunststoffen aus Biomasse effizienter wird. Daher bietet die Produktion von Kunststoffen aus Biomasse angesichts einer möglicherweise geringen Verfügbarkeit landwirtschaftlicher Flächen interessante Möglichkeiten, um zur Verminderung des Verbrauchs nicht erneuerbarer Energien und zur Reduktion von THG-Emissionen beizutragen.

*Kapitel 5* analysiert die möglichen quantitativen Vorteile multifunktionaler Bioraffineriesysteme hinsichtlich der Einsparung an Energie, der Reduktion von THG-Emissionen und der Kosten. Ebenfalls wird die Abhängigkeit dieser Vorteile vom Produktionsumfang und Marktvolumen untersucht. Für diese Analyse wird eine Fallstudie von Bioraffineriesystemen zur Produktion von Polymilchsäure durchgeführt. Die Systeme beinhalten multifunktionale Nutzungen von Biomasseressourcen, d.h. die energetische Nutzung von Ernterückständen, die Nutzung von Nebenprodukten, Materialrecycling und Energierückgewinnung aus Abfall. Die Leistung dieser Systeme wird sowohl per Kilogramm Kunststoffproduktion als auch per Hektar Biomasseproduktion betrachtet. Die Berechnungen werden auf der Grundlage von polnischen Daten und unter der Annahme, dass Biomasse- und Kunststoffproduktion in einem europäischen Energie- und Materialmarkt eingebettet sind, durchgeführt. Zuerst werden die Leistungen verschiedener Bioraffineriesysteme mit Hilfe einer Bottom-up-Analyse der einzelnen Prozessschritte untersucht. Darauf folgend werden die Marktpreise der Polymilchsäureprodukte, der Nebenprodukte und der landwirtschaftlichen Flächen, ausgehend von der Produktionskapazität, an Hand der Preiselastizität der Nachfrage bestimmt. Auf diese Weise werden die Kosten der Bioraffineriesysteme in Abhängigkeit von der Nachfrage nach landwirtschaftlicher Fläche und Materialien berechnet. Sämtliche Bioraffineriesysteme zur Produktion von Polymilchsäure führen zu Nettoeinsparungen des nicht erneuerbaren Energieverbrauchs von 70 bis 220 GJ pro Hektar und Jahr und zu Nettoerduktionen von THG-Emissionen von 3 bis 17 Mg CO<sub>2</sub>-Äq pro Hektar und Jahr. Die meisten der untersuchten Bioraffineriesysteme resultieren in Nettokosten des Gesamtsystems von bis zu 4600 € pro Hektar und Jahr. Da-

hingegen hat die Polymilchsäureproduktion aus Kurzumtriebsholz Nettogewinne des Gesamtsystems von ca. 1100 € pro Hektar und Jahr zur Folge, wenn eine relativ hochwertiges Produkt, in diesem Fall Kunstfasern, einen großen Anteil der Produktion einnimmt. Multifunktionalität ist notwendig, um Energieeinsparungen und THG-Emissionsreduktionen von Bioraffinerieanlagen zur Produktion von Polymilchsäure zu gewährleisten. An der Verringerung der Kosten hat die multifunktionale Nutzung von Biomasseressourcen jedoch nur einen kleinen Anteil. Die Preiselastizität der Nachfrage nach Materialien beeinflusst die Kosten der Bioraffinerieanlagen stark. Die Preiselastizität der Nachfrage nach Land bekäme eine große Bedeutung, wenn Biomasseressourcen in einem großen Umfang eingeführt würden.

*Kapitel 6* evaluiert den möglichen Einfluss der Einführung von Biomasse zur stofflichen und energetischen Nutzung in großem Umfang und ihrer Marktvolumen auf die Marktpreise von Land, Material und Energie. Weiterhin wird die Rückkoppelung dieser Einflüsse auf die Kosten der Verminderung von THG-Emissionen betrachtet. In diesem Kapitel werden Angebotskurven von Kosten der Verminderung von THG-Emissionen für eine Nutzung von Biomasse im großem Maßstab aufgestellt. Dies geschieht mit Hilfe einer Methode, die eine Bottom-up-Analyse von Biomassenutzungen, Angebotskurven von Biomassekosten und Marktpreise von landwirtschaftlichen Flächen, Biomaterialien und Bioenergie kombiniert. Letztere Marktpreise hängen von der Größenordnung der Biomassenutzung und vom Marktvolumen der Materialien und Energieträger ab und werden mit Hilfe Preiselastizitäten geschätzt. Die Methode wird für eine Fallstudie in Polen im Jahre 2015 demonstriert. In dieser Fallstudie werden unterschiedliche Szenarien für die ökonomische Entwicklung und den Handel in Europa, die sowohl die Angebotskurven von Biomassekosten als auch die Land-, Material- und Energiemärkte beeinflussen, untersucht. Die Technologien, die in diesem Kapitel betrachtet werden, sind die Produktion von Holzfasertafeln, Polymilchsäure, Elektrizität und Methanol. Für diese Technologien gilt, dass innerhalb der untersuchten Szenarien die Kosten von THG-Emissionsreduktionen stark mit dem Umfang der Biomasseproduktion ansteigen. Der Einfluss einer Einführung von Biomassenutzungen en gros, auf die Kosten des Biomasseangebots und die Marktpreise von Land, Material und Energieträgern, verringern das Potenzial zur Verminderung von THG-Emissionen unter Kosten von 50 €/Mg CO<sub>2</sub>-Äq um ca. 13-70% in den verschiedenen Szenarien. Die Produktion von Biomaterialien trägt nur geringfügig zum kostengünstigen Reduktionspotenzial von THG-Emissionen bei. Die Ursache hierfür ist der verhältnismäßig kleine Umfang von Materialmärkten und die daraus folgende starke Abnahme der Marktpreise von Biomaterialien mit steigendem Produktionsumfang. Die Kosten der Reduktion von Treibhausgasemissionen hängen stark von den Angebotskurven von Biomasse, der Preiselastizität der Landnachfrage und den Marktvolumen von Bioenergieträ-

---

gern ab. Unsere Analyse zeigt, dass diese Einflüsse bei der Entwicklung von Strategien zur Implementierung von Biomassenutzungen berücksichtigt werden sollten. Jedoch sind die Schätzwerte für Preiselastizitäten, welche in der wissenschaftlichen Literatur vorhanden sind, unsicher und die Marktvolumen von Biomasseprodukten hängen von ihrer jeweiligen Wettbewerbsfähigkeit ab. Um diesen Ungewissheiten entgegenzuwirken, ist eine Kombination von einer Bottom-up Analyse mit einer Analyse von Märkten zu empfehlen.

Zusammenfassend haben wir verschiedene multifunktionale Biomassensysteme und ihre potenziellen Vorteile hinsichtlich der Reduktion von THG-Emissionen, der Energieeinsparungen, des Flächenbedarfs und der Kosten analysiert. Die Ergebnisse für die unterschiedlichen Systeme variieren beträchtlich und reichen von keinen bis zu deutlichen Vorteilen multifunktionaler Biomassensysteme. Die Effizienz multifunktionaler Biomassensysteme wird durch viele Faktoren beeinflusst. Diese Faktoren hängen einerseits von der Struktur des Biomassensystems, z. B. von der Art der produzierten Materialien und Energieträger oder deren Effizienz und Kosten Produktion, und andererseits von äußeren Umständen, z.B. den Marktvolumen und Preisen von Materialien oder CO<sub>2</sub>-Intensitäten der Referenzsysteme, ab.

Die meisten multifunktionalen Biomassensysteme, die wir untersucht haben, erhöhen jedoch die mögliche Effizienz der Nutzung von Biomasse in Bezug auf die Kosten, die Reduktion von THG-Emissionen und den Bedarf an landwirtschaftlicher Fläche. Im Vergleich zur Produktion von Bioenergie verringern die Mehrfachproduktsysteme, die in Kapitel 2 betrachtet werden, die Kosten von Primärbrennstoffen um 5 bis zu mehr als 50 €/GJ<sub>LHV</sub>, wobei die größten Kostenreduktionen nur mit einer sehr hochwertigen Materialanwendung erreicht werden. (Die Kosten von Primärbrennstoffen in Bioenergiesystemen liegen vergleichsweise bei ca. 2–15 €/GJ<sub>LHV</sub>, während die Preise von Kohle bei ca. 2 €/GJ<sub>LHV</sub> liegen.) Hinsichtlich der THG-Emissionen vermindern diese Mehrfachproduktsysteme deren Reduktion um ca. 3-10 Mg CO<sub>2-Äq</sub> pro Hektar und Jahr Biomasseanbau. Die Resultate für die Kaskaden von Holz aus Kurzumtriebsplantagen, die in Kapitel 3 untersucht werden, zeigen eine sehr große Bandbreite. Im Vergleich zur alleinigen Nutzung von Biomasse für die Energieproduktion verändern sich durch die Kaskadierung die verminderten THG-Emissionen um ca. -13 bis 23 Mg CO<sub>2</sub> pro Hektar und Jahr und die Reduktionskosten von THG-Emissionen um ca. -300 bis 2000 €/Mg CO<sub>2</sub>. Im Vergleich dazu führt die Nutzung von Holz aus Kurzumtriebsplantagen zur Elektrizitätsproduktion zu einer Vermeidung von THG-Emissionen von ca. 5 Mg CO<sub>2-Äq</sub> pro Hektar und Jahr bei Kosten von ca. 100 €/Mg CO<sub>2</sub>. Die energetische Nutzung landwirtschaftlicher Reststoffe, die in Kapitel 4 betrachtet wird, erhöht den Nutzen der Herstellung von Kunststoffen aus Biomasse, so erhöht sich die Reduktion von THG-Emissionen um ca. 15 Mg CO<sub>2-Äq</sub>

pro Hektar und Jahr. Schließlich führt die multifunktionale Biomassenutzung in Bioraffineriesystemen zur Polymilchsäureproduktion, die in Kapitel 5 analysiert werden, zu Vorteilen von ca. 4-12 Mg CO<sub>2</sub>-Äq pro Hektar und Jahr und 0-200 €/Mg Biomasseinput gegenüber der nicht multifunktionalen Biomassenutzung.

Weiterhin kann geschlossen werden, dass ausgehend von der Struktur der Biomassensysteme, die materielle Hauptanwendung den größten Einfluss auf die Effizienz multifunktionaler Biomassensysteme hat. Außerdem kann die energetische Nutzung landwirtschaftlicher Reststoffe zur Energieproduktion die Effizienz der Biomassensysteme erheblich verbessern. Die Bewertung multifunktionaler Biomassensysteme hängt natürlich stark von den alternativen Referenzsystemen ab. Sowohl die Art der Materialien und Energieträger, die substituiert werden, als auch das Abfallwirtschaftssystem sind entscheidend für die durch Biomassensysteme entstandenen Kosten und erzielten THG-Emissionsreduktionen.

Bei Biomaterialien mit einer verhältnismäßig langen Lebensdauer kann die Zeitdimension der temporären Speicherung von Kohlenstoff in diesen Materialien eine wichtige Rolle spielen. Wenn die Zeitdimension zum Beispiel durch die Anwendung einer Kapitalwertmethode berücksichtigt wird, sinken die Nettoerduktionen von THG-Emissionen durch die Kaskadierung. Marktpreise von Land, Materialien und Energieträgern beeinflussen die ökonomische Effizienz von multifunktionalen Biomassensystemen ebenfalls stark. Die Analyse in Kapitel 6 deutet darauf hin, dass sich mit einer zunehmenden Verwendung von Biomasse für Materialien und Energie die Kosten von THG-Emissionsreduktionen erhöhen können. Während viele multifunktionale Biomassensysteme bereits recht hohe Reduktionskosten von THG-Emissionen mit sich mitbringen, könnte ihr ökonomisches Potenzial zur Reduktion von THG-Emissionen hierdurch zusätzlich eingeschränkt werden. Dies gilt insbesondere für Biomaterialien, die durch vergleichsweise kleine Märkte charakterisiert sind. Außerdem sollte zur Kenntnis genommen werden, dass Marktmechanismen auch die Art der substituierten Referenzmaterialien und -energieträger, z.B. die Art fossiler Brennstoffe, beeinflussen.

Auch methodische Lektionen können aus den Analysen in dieser wissenschaftlichen Arbeit gelernt werden. Es kann geschlossen werden, dass die Einbeziehung der Nutzung landwirtschaftlicher Flächen in den Vergleich von Biomassensystemen wertvolle Erkenntnisse über deren relative Vorzüglichkeit verschaffen kann. Da häufig Biomaterialien im Referenzsystem substituiert werden, ist es notwendig, auch die Landnutzung für deren Produktion im Referenzsystem zu berücksichtigen. Die Methode, die in dieser Dissertation verwendet wird, nämlich die Annahme, dass alternativ Biomasse für die Energieproduktion auf diesen Flächen produziert wird, ist für den Vergleich von Biomassensystemen ge-

---

eignet. Jedoch wäre ein Einvernehmen über eine standardisierte Methode, für den Umgang mit dieser Problemstellung, in der wissenschaftlichen Forschung wünschenswert. Auch ist die Entwicklung einer Standardmethode für die Einbeziehung der Zeitdimension in die Berechnung von THG-Emissionsbilanzen erforderlich, weil Biomaterialsysteme Kohlenstoff für verhältnismäßig lange Zeiträume speichern können. Unsere Analyse, die eine Kapitalwertmethode verwendet, zeigt den potenziell großen Einfluss der Zeitdimension auf die Ergebnisse. Schließlich beeinflusst die Größenordnung der Biomasseproduktion und -nutzung sowohl die Systemkosten als auch die THG-Emissionsbilanzen durch die Veränderung von Marktpreisen und Referenzsystemen. Die Kombination einer Bottom-up-Analyse mit einer einfachen Analyse der Nachfrage nach Land, Material und Energieträgern, wie sie in dieser Dissertation vorgestellt wird, zeigt bedeutende Tendenzen der Abhängigkeit von Biomassetssystemen von der Größenordnung der Biomassenutzung.

Abschließend kann geschlossen werden, dass multifunktionale Biomassetssysteme eine gute Alternative sind um Biomasse effizient im Hinblick auf die Reduktion von THG-Emissionen, den Bedarf an (landwirtschaftlicher) Fläche und die Gesamtkosten des Systems zu nutzen, sofern sie sorgfältig unter Berücksichtigung der Referenzsysteme und der Land-, Material- und Energiemärkten ausgewählt werden. Die besten der hier untersuchten multifunktionalen Biomassetssysteme erhöhen die Reduktion von THG-Emissionen pro Einheit landwirtschaftlicher Fläche bis zu einem Faktor fünf verglichen mit einfachen Biomassenutzungen. Ebenfalls verringern sie die Gesamtkosten der Biomassetssystem um bis das Fünffache. Um jedoch (multifunktionale) Biomassetssysteme für großangelegte Biomassenutzungen bewerten zu können, müssten die Wechselwirkungen zwischen der Biomassenutzung und den Land-, Material- und Energiemärkten besser verstanden werden. Weitergehende Untersuchungen über optimale Biomassetssysteme für die Verminderung von THG-Emissionen sollten daher Informationen aus Bottom-up-Analysen komplexer Biomassetssysteme mit Erkenntnissen über Marktmechanismen aus Top-down-Analysen kombinieren.

