

Summary

Avoiding dangerous climate change requires substantial emission reductions in the energy and the land-use sector. Within the portfolio of decarbonization options bioenergy assumes a unique role because it can reduce emissions in two special ways. First, due to its versatility it can provide low-carbon energy as substitute for fossil fuels in all energy sectors. Second, due to its carbon content bioenergy combined with carbon capture and storage (CCS) can provide negative emissions that allow compensating emissions across sectors and time, which is of special interest for achieving low-stabilization targets. However, biomass cultivation requires fertile land giving rise to concerns about adverse effects, such as land-use change emissions, biodiversity loss, and competition with food production. Scrutinizing the bioenergy assessment carried out by *The IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation* (IPCC 2011b) it became apparent that the available long-term scenarios assessing bioenergy as a mitigation option only cover these adverse effects to a minor degree. This thesis aims at improving the bioenergy assessment by addressing potential consequences of and requirements for bioenergy deployment in the energy sector *and* the land-use sector.

Using an integrated model framework of energy-economy-climate and land-use this thesis investigates the role bioenergy can play in achieving ambitious long-term climate change mitigation targets taking into account emissions from agriculture and land-use change. It explores the global biomass potential and corresponding supply prices and investigates how pricing land-use and land-use change emissions affects the biomass potential and resulting emissions. It analyzes how mitigation strategies and costs depend on constraints on the supply and demand side of bioenergy. It investigates how bioenergy contributes to the transformation and decarbonization of the energy system in general and identifies the economic drivers behind the choice of bioenergy conversion technologies in particular.

Results show that bioenergy with CCS (BECCS) is a crucial mitigation option with paramount importance particularly for achieving stringent climate change mitigation targets. If CCS is available, bioenergy is exclusively used with CCS in mitigation scenarios and it is predominantly used to produce liquid fuels for the transportation sector. Since biomass is mainly supplied by lignocellulosic perennial grassy feedstock this requires robust gasification technologies to be available that can cope with the heterogeneous grassy feedstock. Modern bioenergy deployment increases rapidly after 2030 to around 300 EJ/yr. Mitigation costs rise sharply if bioenergy or CCS is constrained. This indicates that without bioenergy or CCS, it is difficult to achieve low stabilization targets.

Grassy biomass feedstock can be produced at prices above 5 \$/GJ. Pricing emissions in the land-use sector increases bioenergy supply prices (by 5\$/GJ in 2055 and by 10 \$/GJ in 2095) due to land exclusion of high-productive forest land and due to nitrogen-emissions from bioenergy production. Carbon taxes on land-use change emissions are found to effectively prevent deforestation and thereby significantly reduce total land-use change emissions. However, land reduction due to GHG taxes is compensated by intensification and expansion into land that is not under emission control, the latter of which

increases land-use change emissions from biomass production. This indicates that bioenergy demand *and* GHG taxes at the same time (as typical for low-stabilization scenarios) put substantial pressure on the land-use sector and could induce leakage of bioenergy or food production into land with high carbon content that is not under emission control. Average yields that would be required for large-scale bioenergy production in 2095 are roughly between 500 and 600 GJ/ha for the major producer regions. Results further indicate that the competition for water between agriculture, private households, and industry is likely to increase heavily in many regions, particularly if forests are protected and bioenergy is used for climate change mitigation.

In climate mitigation scenarios, the value of bioenergy is found to be determined by both its energy value and the value of potential negative emissions. Results show, that the availability of BECCS creates a strong link between carbon prices and bioenergy prices. This lets the carbon value of biomass exceed its pure energy value in low stabilization scenarios with BECCS availability. Rising carbon prices thus induce investments in technologies that would not be built for the purpose of energy production. Furthermore, through this price link stringent climate protection targets induce a high willingness-to-pay for bioenergy that exceeds by far bioenergy supply prices identified previously.

Bioenergy is so valuable because its negative emissions increase the amount of permissible carbon emissions from fossil fuels and therefore allow postponing emissions reductions in the short-term and the preservation of some residual emissions in the long run. For a given climate target, bioenergy thus acts as a complement to fossils rather than a substitute. However, this makes the prolonged short-term deployment of fossil fuels dependent on the long-term potential of biomass and the availability of CCS. Thus, uncertainties about the long-term developments of (i) conditions in the land-use sector (land availability, yields etc.) and (ii) CCS technology are highly relevant for short-term decisions about emission reduction.

Zusammenfassung

Um gefährlichen Klimawandel zu vermeiden, werden starke Emissionsreduktionen im Energie- und Landnutzungs-Sektor benötigt. Zwischen verschiedenen Dekarbonisierungsoptionen sticht Bioenergie hervor, da sie zwei besondere Wege der Emissionsreduktion bietet. Erstens stellt sie wegen ihrer vielseitigen Einsetzbarkeit eine emissionsarme Alternative zu fossilen Brennstoffen in allen Energiesektoren dar. Zweitens kann sie aufgrund ihres Kohlenstoffgehalts in Kombination mit Kohlenstoffabscheidung (CCS) negative Emissionen erzeugen und somit Emissionen anderer Quellen über Zeit und Ort hinweg kompensieren. Diese Eigenschaft ist insbesondere für das Erreichen von Niedrig-Stabilisierungszielen interessant. Allerdings benötigt die Produktion von Biomasse fruchtbares Land, was Anlass gibt zur Sorge über nachteilige Nebeneffekte, wie z.B. zusätzliche Landnutzungs-Emissionen, Biodiversitäts-Verluste oder Nahrungsmittel-Konkurrenz.

Anahnd der im *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation* (IPCC 2011b) dargestellten Literatur wird deutlich, dass die verfügbaren Langfristszenarien zur Bewertung von Bioenergie als Klimaschutzoption diese Nebeneffekte, insbesondere die Landnutzungs-Emissionen, nur in gerigem Maße berücksichtigen. Die vorliegende Arbeit möchte die Bewertung von Biomasse insbesondere im Hinblick auf negative Nebeneffekte verbessern, indem sie Erfordernisse und Konsequenzen der Bioenergienutzung im Energie- und Landnutzungs-Sektor untersucht.

Im Rahmen dieser Dissertation wird analysiert, welche Rolle Bioenergie bei der Erfüllung ambitionierter, langfristiger Klimaschutzziele spielen kann. Dazu wird ein Modell entwickelt, das sowohl Komponenten des Energie-, Wirtschafts- und Klimasystems, als auch des Landnutzungs-Systems miteinander vereint, und dabei Landnutzungs-Emissionen berücksichtigt. Es werden das globale Biomasse-Potential und dessen Angebotspreise untersucht und wie diese durch die Bepreisung der Landnutzungs-Emissionen beeinflusst werden. Ferner wird untersucht, wie Emissions-Minderungs-Strategien und deren Kosten von Beschränkungen auf der Angebots- und Nachfrageseite der Bioenergie abhängen. Es wird der Frage nachgegangen, wie Bioenergie zur Transformation und Dekarbonisierung des Energiesystems beiträgt, und was die ökonomischen Faktoren bei der Wahl von Bioenergie-Konversions-Routen sind.

Die Ergebnisse zeigen, dass Bioenergie mit CCS (BECCS) eine entscheidende Minderungs-Option mit elementarer Bedeutung insbesondere für das Erreichen von strengen Klimaschutzzielen darstellt. Wenn CCS verfügbar ist, wird Biomasse ausschließlich mit CCS verwendet, überwiegend zur Produktion von Flüssigbrennstoffen. Da Biomasse hauptsächlich aus mehrjährigen lignozellulose-haltigen Grassorten produziert wird, setzt dies die Verfügbarkeit von robusten Vergasungstechnologien voraus, die den heterogenen Brennstoff Gras verarbeiten können. Der Einsatz moderner Biomasse beginnt nach 2030 und steigt danach rasch auf etwa 300 EJ/yr an. Beschränkungen des Bioenergiepotentials oder der CCS-Verfügbarkeit lassen die Vermeidungskosten erheblich ansteigen, was darauf hindeutet, dass ohne Biomasse oder CCS Niedrig-Stabilisierungs-Ziele schwer zu erreichen sind.

Grasartige Biomasse kann zu globalen Preisen über 5 \$/GJ produziert werden. Die

Bepreisung von Emissionen im Landwirtschaftssektor erhöht die Bioenergiepreise, da hochproduktive Waldflächen dadurch ausgeschlossen werden und Stickstoff-Emissionen aus Düngernutzung zusätzliche Kosten verursachen. Die Bepreisung von Landnutzungsänderungs-Emissionen wirken sogar vollständig schützend auf bestehenden Wald, was die globalen Landnutzungsänderungs-Emissionen erheblich reduziert. Allerdings muss diese Reduzierung der verfügbaren Landflächen kompensiert werden durch Intensivierung und Ausdehnung in Flächen, die nicht der Emissionsbepreisung unterliegen. Letzteres führt wiederum zu einer Erhöhung der mit der Biomasseproduktion verbundenen Landnutzungsänderungs-Emissionen. Das ist eine Folge des hohen Drucks aus der Kombination von hoher Biomasse-Nachfrage und Treibhausgas-Bepreisung, wie sie typisch sein kann für strenge Klimaschutz-Szenarien. Die für die groß-skalige Biomasseproduktion in 2095 benötigten Durchschnittserträge belaufen sich auf 500 bis 600 GJ/ha in den Hauptproduktions-Regionen. Die Ergebnisse zeigen des Weiteren, dass die Konkurrenz um Wasser zwischen Landwirtschaft, Haushalten und Industrie in vielen Regionen stark zunehmen könnte, insbesondere falls Wälder geschützt werden und Bioenergie nachgefragt wird.

In Klimaschutzenszenarien ergibt sich der Wert der Bioenergie sowohl aus ihrem Energiewert als auch aus dem Wert ihrer potentiellen negativen Emissionen. Die Analyse zeigt, dass die CCS-Technologie, sofern verfügbar, eine starke Bindung zwischen Kohlenstoffpreisen und Bioenergiepreisen etabliert. Dadurch dominiert in Niedrig-Stabilisierungs-Szenarien mit hohen CO₂-Preisen der Kohlenstoffwert der Biomasse ihren Energiewert. Somit veranlassen steigende CO₂-Preise Investitionen in Technologien, die nicht aus Gründen der Energieerzeugung gebaut würden. Diese Preiskopplung erzeugt in Niedrig-Stabilisierungs-Szenarien außerdem eine hohe Zahlungsbereitschaft für Biomasse, welche die zuvor genannten Angebotspreise bei weitem übersteigt.

Bioenergie ist deshalb so wertvoll, weil die negativen Emissionen, die sie ermöglicht, das Budget an noch zulässigen Emissionen aus fossilen Energieträgern erhöht und es damit erlaubt, kurzfristige Emissionsreduktionen zu verzögern und langfristige Rest-Emissionen beizubehalten. Bei einem gegebenen Klimaziel agiert Biomasse daher eher als Gegenstück denn als Ersatz von fossilen Brennstoffen. Jedoch macht dies den verlängerten Kurzfrist-Einsatz von fossilen Energieträgern abhängig von der kombinierten Langfrist-Verfügbarkeit von Biomasse *und* CCS. Somit werden Unsicherheiten über die langfristige Entwicklung des Landwirtschafts-Sektors und der CCS-Technologie relevant für kurzfristige Entscheidungen über Emissions-Reduktionen.