

**D. Möst
W. Fichtner
A. Grunwald
(Hrsg.)**



Workshop

Energie- systemanalyse



**Karlsruhe, 27. November 2008
am KIT Zentrum Energie**



Energiesystemanalyse

Tagungsband des Workshops „Energiesystemanalyse“
vom 27. November 2008 am KIT Zentrum Energie, Karlsruhe

D. Möst
W. Fichtner
A. Grunwald
(Hrsg.)



universitätsverlag karlsruhe

Impressum

Universitätsverlag Karlsruhe
c/o Universitätsbibliothek
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe
www.uvka.de



Dieses Werk ist unter folgender Creative Commons-Lizenz
lizenziert: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/>

Universitätsverlag Karlsruhe 2009
Print on Demand

ISBN: 978-3-86644-389-1

Inhaltsverzeichnis

Energiesystemanalyse

<i>Armin Grunwald, Dominik Möst, Wolf Fichtner</i> Energiesystemanalyse im KIT-Zentrum Energie	1
<i>Dominik Möst, Wolf Fichtner</i> Einführung zur Energiesystemanalyse	11
<i>Armin Grunwald</i> Energiezukünfte vergleichend bewerten – aber wie?	33
<i>Christian Dieckhoff</i> Modelle und Szenarien – Die wissenschaftliche Praxis der Energiesystemanalyse	49
<i>Dogan Keles, Dominik Möst, Wolf Fichtner</i> Die Entwicklung der Energiemärkte bis 2050 – Ein Überblick über ausgewählte Szenarien	61
<i>Tobias Jäger, Susanne Schmidt, Ute Karl</i> Ein System Dynamics Modell des deutschen Strommarkts – Modellentwicklung und Anwendung in der Unternehmenspraxis	79
<i>Jürgen Kopfmüller, Volker Stelzer</i> Energieszenarien für Megacities – Konzept und erste Ergebnisse des HGF-Verbundprojekts „Risk Habitat Megacity“	99
<i>Heidi Gerbracht, Robert Kunze, Dominik Möst, Wolf Fichtner</i> Optimierung urbaner Energiesysteme	117
<i>Massimo Genoese, Dominik Möst, Wolf Fichtner</i> Agentenbasierte Simulation zur Messung von Marktmacht – Eine Analyse für den deutschen Strommarkt	139

Enrique Kremers, Pablo Viejo

Untersuchung des Einsatzes von agentenbasierten Modellen zur Simulation
dezentraler Energiesysteme am Beispiel von Guadeloupe..... 169

Christoph Nolden, Dominik Möst, Wolf Fichtner

Zur Analyse der Auswirkungen brennstoffabhängiger Benchmarks auf Strom-
gestehungskosten und Investitionsentscheidungen in der Elektrizitätswirtschaft.... 183

Anne Held, Heike Krause, Mario Ragwitz

Kostenpotenzialkurven für Onshore-Windstromerzeugung in der EU basierend
auf einem geografischen Informationssystem..... 195

Gunnar Kappler, Stefan Kälber, Ludwig Leible

Stroh und Waldrestholz – Ergebnisse einer Standortanalyse für das bioliq®-
Konzept..... 211

Witold-Roger Poganietz

Consequential LCA – eine notwendige Weiterentwicklung des LCA? Eine
Diskussion am Beispiel des lignozellulosebasiertem Bioethanols..... 223

Autorenverzeichnis 241

Consequential LCA – eine notwendige Weiterentwicklung des LCA?

Eine Diskussion am Beispiel des lignozellulosebasiertem Bioethanols

Witold-Roger Poganietz

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS), Zentralabteilung Technikbedingte Stoffströme (ITAS-ZTS), 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland

E-Mail: Witold-Roger.Poganietz@itas-zts.fzk.de , Telefon: +49(0)7247 /82-8180

Kurzfassung

Die lebenswegbezogene Berücksichtigung von Umweltwirkungen in Entscheidungskontexten ist Sinn und Zweck der Lebenszyklusanalyse. Damit kann sie prinzipiell zur Bewertung von Verfahren und Produkten hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit beitragen, verbleibt aber in einem technisch-naturwissenschaftlichen Raum. Die Berücksichtigung von Veränderungen, die durch eine Entscheidung möglicherweise in der Zukunft eintreten werden, erfordert gänzlich neue Informationen, bspw. hinsichtlich der Funktionsweise von (zukünftigen) Märkten. Diese stehen allerdings nicht im gewünschten Maße zur Verfügung. Die grundsätzlich stärkere Beachtung von nicht-technischen Transmissionsmechanismen und Randbedingungen vermindert aber auch die Attraktivität eines solchen Instrumentes in der betrieblichen Praxis.

Stichworte

Lebenszyklusanalyse, consequential LCA, lignozellulosebasiertes Bioethanol

1 Einleitung

Die Lebenszyklusanalyse zielt auf eine umfassende Bewertung möglicher Umweltwirkungen von Produkten¹ über den gesamten Lebensweg. Damit ist sie ein idealer Bestandteil eines Vorgehens, um Entscheidungen zwischen alternativen Produkten zu treffen und mögliche umweltrelevante Konsequenzen menschlichen

¹ Im Folgenden wird der Begriff weit interpretiert und umfasst Produkte im engeren Sinne, Dienstleistungen sowie Verfahren im Sinne von Techniken.

Handeln in den Entscheidungsprozess einzubeziehen. Tatsächlich untersucht die Lebenszyklusanalyse nicht einzelne Produkte, sondern quantifiziert die Aufwendungen, die zur Erfüllung der Funktion eines Produktes erforderlich sind. Auf diese Weise lassen sich auch gänzlich unterschiedliche Systeme in einem vergleichenden Kontext abbilden.

Die Erstellung einer Lebenszyklusanalyse in Form einer „Ökobilanz“ greift auf die Normenserie ISO 14040 ff. zurück. Die Anwendung der Methodik des LCA² beruht auf der Bildung eines Prozesskettenmodells entlang der Wertschöpfungskette, welches hinreichend detailliert ein Produktsystem abbildet. Im Ergebnis erhält man die in und aus dem Produktsystem fließende Stoffe (bspw. Primärenergieträger als Inputs, Emissionen in die Luft als Output) bezogen auf die relevante funktionelle Einheit. Letztere ist die strukturierende Einheit der LCA-Methode in der sie den Nutzen des Produktes ausdrückt, den sämtliche zur Entscheidung stehenden Alternativen erfüllen.

Durch ein solches Vorgehen erhält man Bilanzen, die einem Produkt diejenigen Wechselwirkungen mit der Umwelt zuordnen, die aus der eingesetzten Technik und den betrachteten Marktbeziehungen resultieren. Dabei wird der Umstand, dass die Einführung eines neuen Produktes die Marktbeziehungen verändern kann genauso wenig berücksichtigt, wie die Möglichkeit, dass, über die geänderten Marktbeziehungen hinaus, die Markteinführung auch Änderungen im Technologie- und Energiemix einer Volkswirtschaft nach sich ziehen kann. Beide Effekte können weitere Umweltwirkungen bewirken. Diese Einschränkungen verhindern einen breiteren Einsatz dieser Methode insbesondere dort, wo resultierende Veränderungen ergebnisrelevant werden und das Bewertungsergebnis beeinflussen.

Gegenstand der folgenden Ausführungen ist die Frage ob eine Berücksichtigung von Markteffekten eine notwendige Weiterentwicklung des LCA darstellt, um so Entscheidungen zwischen alternativen Produkten auf eine breitere Basis zu stellen und damit mögliche Unsicherheiten bei Entscheidungen zu vermindern. Ansätze, die Marktbeziehungen in das LCA implementieren werden in der Literatur auch *consequential LCA*³ genannt [1].

² Als treffendere Bezeichnung gegenüber dem Terminus Produkt-Ökobilanz wird im Folgenden der umfanglichere englische Fachbegriff *Life Cycle Assessment* (LCA) verwendet.

³ Folgt man [2], so ist für den Begriff „consequential“ kein deutschsprachiges Gegenstück gebräuchlich. „Consequential“ kann man mit „daraus folgend“ übersetzen und damit wäre ein „consequential LCA“ ein LCA welches Folgen einer Handlung bilanziert und bewertet.

Im folgenden Kapitel 2 soll zunächst der Umgang mit möglichen Veränderungen des Produktsystems aufgrund eines neuen Produktes im LCA charakterisiert und mögliche Erweiterungen diskutiert werden. In Kapitel 3 erfolgt eine Diskussion des Themas am Fallbeispiel Ligno-Bioethanol. Nach einer kurzen Einordnung von Ligno-Bioethanol in Energiestrategie der Bundesregierung und einer Charakterisierung möglicher Prozessrouten (Kapitel 3.1) folgt eine Analyse von Ligno-Bioethanol auf Basis einer möglichen Variante des consequential LCA (Kapitel 3.2-3.3). Eine Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse erfolgt in Kapitel 4.

2 Die Bewertung von Produkten im Kontext des LCA⁴

Das primäre Ziel des LCA ist die Identifizierung und Quantifizierung der Wechselwirkungen zwischen Produkt und Umwelt. Die Methodik wurde dazu entwickelt, den vorsorgenden Umweltschutz in Entscheidungen zwischen Produkten oder auch Produktvarianten zu verankern und mögliche Wirkungen auf die Umwelt über global vernetzte Wertschöpfungsketten hinweg zu minimieren. Das Wissen um diese Wechselwirkungen entstammt der wissenschaftlichen Untersuchung von Wirkungspfaden wie bspw. der globalen Erwärmung infolge der Treibhausgasemissionen. Die anteilige Zuordnung der Flüsse und ihrer Wirkungen zu einem Produkt bzw. seiner funktionellen Einheit wird als „attributional LCA“⁵ bezeichnet.

Die Erweiterung des Betrachtungshorizonts innerhalb der Modellbildung des LCA um weitergehende Konsequenzen erscheint insbesondere bei der Markteinführung neuer Produkte oder Technologien opportun. Die erfolgreiche Markteinführung von Produkten kann und wird i.a. zu einer Verdrängung etablierter Produkte auf demselben Markt und/oder auf vorgelagerten Märkten führen. Mit der Implementierung neuer Technologien ist auch eine Änderung des gesamtwirtschaftlichen Technologiemies möglich. Die sich ergebenden umweltrelevanten Konsequenzen werden aber im traditionell engen Rahmen eines attributiven LCA nicht modelliert.

In der wissenschaftlichen Literatur wurde daher das Konstrukt des „consequential LCA“ eingeführt, das Wirkungen von Produkten durch die Änderung von Marktprozessen erfasst (Vgl. bspw. [3, 4]). Consequential LCA zielt auf die Beschreibung

⁴ Die Ausführungen in Kapitel 2 basieren wesentlich auf [2].

⁵ Eine Übersetzung von „attributional“ könnte „attributiv“ sein, d.h. etwas wird dem zu untersuchenden System zugeordnet. Für diesen Beitrag wird dieser Begriff verwendet.

genau der physischen Flüsse von und zur Technosphäre die sich verändern wenn es zu Änderungen innerhalb eines Produktlebenszyklus kommt [4].

Tatsächlich lassen sich in Anlehnung an [1], grundsätzlich vier Ebenen von möglichen Wirkungen neuer Produkten als Folge von Handlungen klassifizieren (Vgl. a. [5]):

1. „Erstrundeneffekte“ beschreiben die proportionale deterministische Beziehung zwischen der Ursache, z.B. der Nutzung des Produkts, und den induzierten Stoffströmen, die wiederum Umwelteffekte generieren („cause-effects chains“). Im LCA wird diese Perspektive in der Wirkungsabschätzung und in der Modellierung von Umweltschäden verfolgt.

Die folgenden drei Effektebenen werden in einem attributiven LCA nicht erfasst. Sie können Teil eines consequential LCA sein:

2. „Zweitrundeneffekte“: Die Einführung eines Gutes auf dem Markt kann (wird i. a.) zu Substitutionseffekten führen, die sich auf die Inputseite eines Produktionsprozesses auswirken können. Das heißt, die Nachfrage nach einem Gut kann aufgrund bestehender Budget- und Kapazitätsrestriktionen zu einer Veränderung existierender Stoffströme führen oder neue generieren und hierdurch die Proportionalität der cause-effects chains auflösen.
3. „Struktureffekte“: Zweitrundeneffekte ergeben sich i.a. aus dem Spannungsfeld von Technik, Umwelt und Ökonomie, lassen aber mögliche Effekte auf die Sachkapitalstruktur von Volkswirtschaften weitgehend unberücksichtigt. Die durch ein neues Produkt induzierten Investitionen können auf vor- und nachgelagerten Sektoren zum Einsatz neuer Technologien führen. Die Folge kann eine weitere Änderung der Struktur der Stoffströme oder die Generierung neuer Stoffflüsse sein.
4. „Diffusionseffekte“: Zweitunden- und Struktureffekte unterstellen immer auch einen gegebenen rechtlichen, politischen und gesellschaftlichen Rahmen. Investitionen sowie Innovationen sind Teil von (formalen und informellen) institutionellen Regeln, die das Handeln von Individuen – die Bereitschaft zu investieren oder innovativ tätig zu werden – steuern.

So gesehen nimmt die enge und singuläre Verknüpfung einer Ursache mit entsprechenden Wirkungen von Ebene zu Ebene ab.

Akzeptiert man, dass in die Bewertung eines Produktes auch mögliche Effekte auf das Produktsystem berücksichtigt werden sollten, vermindert sich die Stringenz zwischen

Ursache und Umwelteffekt. Je geringer die Stringenz ist, d.h. je höher man sich auf den Effektebenen befindet, desto diffuser wird das Bild über die Wirkungen und damit die Möglichkeit diese zu analysieren. Die Analyse von Wirkungen von Produkten in unterschiedlichen Kontexten erfordert eine systemische und systematische Erfassung von Interdependenzen zwischen Produkten aber auch zwischen den Wirtschaftssubjekten als Agierende und Reagierende. Eine Möglichkeit diese zu erfassen bilden Modelle.

Die Nutzung von Modellen zur systemischen Darstellung von Wirkungszusammenhängen ist in der LCA-Methodik üblich. LCA-Modelle unterstellen aber, wie oben angesprochen, eine Proportionalität zwischen Ursache und Wirkung. Komplexere Wirkungen, wie sie auf den höheren Effektebenen beschrieben werden, erfordern anders strukturierte Modelle. Die Transmission von Zweitunden- und Struktureffekten erfolgt im Allgemeinen über Marktprozesse, während bei Diffusionsprozessen häufig nicht-marktmäßige Transmissionsmechanismen, wie z.B. Netzwerke, eine wichtige Rolle spielen.

Während in den Diskussionen innerhalb der LCA-Wissensgemeinschaft die Bedeutung aller Effektebenen akzeptiert wird [1, 5], dominieren in den wenigen bisherigen Anwendungen Marktmodelle, die an sich nur Zweitunden-Effekte adäquat erfassen können (Vgl. bspw. [4]).

Typisch für die Modelle ist die Annahme einer gegebenen Sachkapitalstruktur sowie gegebenen gesellschaftlichen und wirtschaftspolitischen Rahmenbedingungen. Die Wirkungen von neuen Produkten auf Sachkapitalstrukturen werden bisher vielfach noch ad hoc in das jeweilige Modell eingeführt (s. bspw. [4], s.a. [6]). Soziale Transmissionsmechanismen, bspw. Netzwerke, werden bisher ebenso wenig implementiert wie sich ändernde wirtschaftspolitische und rechtliche Randbedingungen. Gerade letzteres kann durch Änderung relevanter Parameterwerte relativ leicht in bestehende Modellansätze eingeführt werden.

Die Berücksichtigung wirtschaftspolitischer Rahmenbedingungen ist aber für verzerrte Märkte bzw. für Produkte, die als gesellschaftlich gewollt aber nach derzeitigem Kenntnisstand noch nicht wettbewerbfähig sind, von zentraler Bedeutung.

Die Komplexität von Modellen, aber auch die Unsicherheit über die Qualität der generierten Ergebnisse wird cet. par. durch den abzubildenden Zeithorizont bestimmt. Eine weitverbreitete Methode Wissen über zukünftige Entwicklungen zu generieren ist der Szenarioansatz.

Ein Szenario (in dem LCA) ist damit „eine Beschreibung einer möglichen zukünftigen Situation, die relevant für eine spezifische LCA-Anwendung ist, basierend auf spezifische Annahmen über die Zukunft, und – wenn relevant – die Entwicklung von der Gegenwart zur Zukunft beinhaltet“ ([7]; Übersetzung durch [2]). Ein Szenario beschreibt somit ein mögliches Bild über eine Situation in der Zukunft, dass der Komplexität heutiger Systeme Rechnung trägt, diese aber auch auf die wesentlichen Elemente reduziert [8].

Die hinreichende Komplexität sowohl von Szenarien als auch von Modellen nimmt i.a. mit der zu betrachtenden Effektebene und mit der Ferne der Zukunft zur Gegenwart zu. Diese kann die Anzahl der zu berücksichtigen Einflussgrößen nennenswert verändern, da die zu erwartende Variabilität von Randbedingungen mit der zeitlichen Entfernung relativ zum Heute tendenziell zunimmt. Damit erhöhen sich auch die Anforderungen an die Datengrundlage eines LCA, die sich in der Sachbilanz bzw. Life Cycle Inventory (LCI) manifestiert. In einer Sachbilanz werden i.a. nur die Material- und Energiegebräuche relativ zur funktionalen Einheit als Bezugspunkt eines LCA modelliert. Nicht-technische oder nicht-naturwissenschaftliche Beziehungen zwischen Stoffströmen bleiben als gegeben außen vor. Sie müssten aber zusätzlich berücksichtigt werden.

Fasst man die bisherigen Diskussionen um das consequential LCA zusammen, so besteht hinreichende Übereinstimmung über die Anforderungen an ein solches LCA. Die bisherigen Fallbeispiele zeigen aber auch die Schwierigkeiten die Anforderungen tatsächlich in adäquate Modellstrukturen umzusetzen.

Im Folgenden soll ein Ansatz diskutiert werden, der sich ein Stückweit von dem traditionellen Ansatz eines LCA entfernt, um die angesprochenen Implementierungsschwierigkeiten umgehen zu können. So wird bspw. das Konzept der funktionalen Einheit als strukturierendes Element aufgegeben und anstelle dessen ein „Kostenkonzept“ eingeführt (s. Kapitel 3.2.).

3 Das Fallbeispiel Ligno-Bioethanol

3.1 Lignozellulosebasierter Bioethanol

Biokraftstoffen wird von vielen Anspruchsgruppen eine Reihe von Vorteilen zugeschrieben. Neben ihrem Beitrag zur Reduzierung der Umweltbelastung von Mobilität durch verminderte Treibhausgasemissionen und verminderten Bedarf an fossilen

Rohstoffen wird auch die Reduzierung der inländischen Abhängigkeit von ausländischen Energielieferungen gesehen [9].

Andererseits kann eine zunehmende Attraktivität von Biokraftstoffen nicht nur zu einer Verdrängung des Nahrungs- und Futtermittelanbaus [10], sondern auch zu einer Ausweitung des Anbaus auf Marginalböden führen [11]. Ersteres hat schon soziale Spannungen induziert [12]; mit letzterem sind entsprechende möglicherweise negative Wirkungen auf das Ökosystem verbunden [11].

Als einen Weg insbesondere aus dem Dilemma der „Tank oder Teller-Diskussion“ wird die Nutzung von zellulose- und lignozellulosehaltigen Pflanzen gesehen. Diese fallen i.a. als pflanzliche Reststoffe, bspw. Stroh, an oder sind Energiepflanzen, bspw. Chinaschilf, die keiner oder geringen intensiven landwirtschaftlichen Bewirtschaftung bedürfen und auch auf minderwertigen Böden wachsen. Diese biogenen Stoffe stehen in keinem primären Konkurrenzverhältnis zu Pflanzen, die auch zu Nahrungszwecken genutzt werden können. Zellulose- und lignozellulosehaltigen Pflanzen sind als Teil der sog. Biokraftstoffe der zweiten Generation ein wesentlicher Eckstein der Kraftstoffstrategie der Bundesregierung [9].

Ethanol, umgangssprachlich als Alkohol bezeichnet, wird durch Fermentierung von Zuckern mit Hilfe von Mikroorganismen gewonnen. Die durch die Fermentierung gewonnene alkoholhaltige Maische wird destilliert. Um reinen Alkohol zu erhalten, wird das hierbei entstandene Konzentrat mit 90+% Ethanol und Wasser dehydriert. Als Nebenprodukt entsteht Schlempe, die i.a. in gereinigter und getrockneter Form als Futtermittel veräußert werden kann. Alternativ kann die Schlempe durch Verbrennung zur Dampferzeugung genutzt werden [13].

Zuckerhaltige Pflanzen, wie Zuckerrohr oder Zuckerrüben, können direkt in Bioethanol konvertiert werden. Stärkehaltige Saaten wie Weizen oder Kartoffeln müssen i.a. zunächst gemahlen, hydrolysiert und verzuckert werden, um die gewünschten Zuckermonomere zu erhalten.

Im Gegensatz zu zuckerbasiertem Bioethanol ist die Prozessroute von Bioethanol, das auf Zellulose oder Lignozellulose basiert, recht komplex. Dies liegt daran, dass lignin- und zellulosehaltige Stoffe zunächst aufgeschlossen werden müssen, bevor diese für die Hydrolyse genutzt werden können [14].

Es existieren grundsätzlich zwei Wege um Alkohol aus Zellulose oder Lignozellulose herstellen zu können:

- biochemisch-zellulotischer Prozess, der einfache Zucker durch Hydrolyse von Zellulose oder vorbehandelter Lignozellulose formt, das dann fermentiert und destilliert wird;
- thermo-chemische Vergasung, das die Zellulose oder Lignozellulose in gasförmige Kohlenstoffmonoxide und Wasserstoff transformiert. Das Gas kann zu Ethanol mit Hilfe von Fermentation oder chemischer Katalyse konvertiert werden. Diese Möglichkeit wird im folgenden Ansatz aufgrund fehlender Informationen nicht berücksichtigt.

Bisher wird lignozellulosebasierter Bioethanol noch nicht industriell produziert. Mit einer breiten Markteinführung ist vorerst nicht zu rechnen [15].

3.2 Das Modell

Das Modell verknüpft den in dem LCA üblichen Prozesskettenansatz mit aus der Investitionstheorie und aus der allgemeinen Gleichgewichtsmodellierung bekannten Ansätzen. Diese Verknüpfung erlaubt eine simultane Erklärung einer marktbasierten Allokation von Biomasse zu den modellierten Technologien. Auf Basis der Ergebnisse kann man die Inputerfordernisse jeder Technologie sowie die Emissionen umweltrelevanter Substanzen herleiten. Das Modell kombiniert ökonomische Überlegungen mit technologischen Restriktionen um so umweltrelevante Aspekte zu bilanzieren.

Der Ansatz baut auf CarboMoG – einem prozessbasierten Materialflussmodell für Deutschland – auf [16] und ist in seinem Ansatz mit GlobAl vergleichbar, einem Modell, das den globalen Primäraluminiummaterialfluss erfasst [17].

Im Gegensatz zum LCA, in dem die Material- und Energieflüsse auf eine explizite funktionelle Einheit, bspw. TJ Bioethanol, bezogen werden, ist im gewählten Ansatz der im Zieljahr zu erwartende Aufwand zur Realisierung eines gegebenen Konsums die relevante Bezugsgröße.

Das Modell unterscheidet vier Typen von Biokraftstoffen: Bioethanol, BtL-Kraftstoff, Biodiesel und komprimiertes Biogas (CBG). Für jeden Biokraftstoff werden unterschiedliche Inputs und damit unterschiedlichen Technologien modelliert (Tabelle 1).

Die Auswahl der modellierten Konsumgüter richtet sich nach der Konkurrenzsituation dieser Güter zu Bioethanol. Die einzelnen möglichen Prozesse zur Herstellung von lignozellulosebasierten Bioethanol konkurrieren nicht nur miteinander, sondern auch zu

traditionellen Prozessrouten von Bioethanol sowie zu Ottokraftstoff. Weiterhin konkurriert lignozellulosebasiertes Bioethanol direkt und indirekt mit anderen Verwendungen biogener Stoffe, d.h. bspw. mit Biodiesel oder sonstiger Bioenergie aber auch mit Nahrungsmitteln sowie sonstigen stofflichen Nutzungsformen von biogenen Stoffen, bspw. Papier und Möbeln (Tabelle 2). Als gemeinsame Ressource setzen alle biogenen Produkte Land ein (Abb. 1).

Tabelle 1: Biogene Inputs modellierter Kraftstoffe

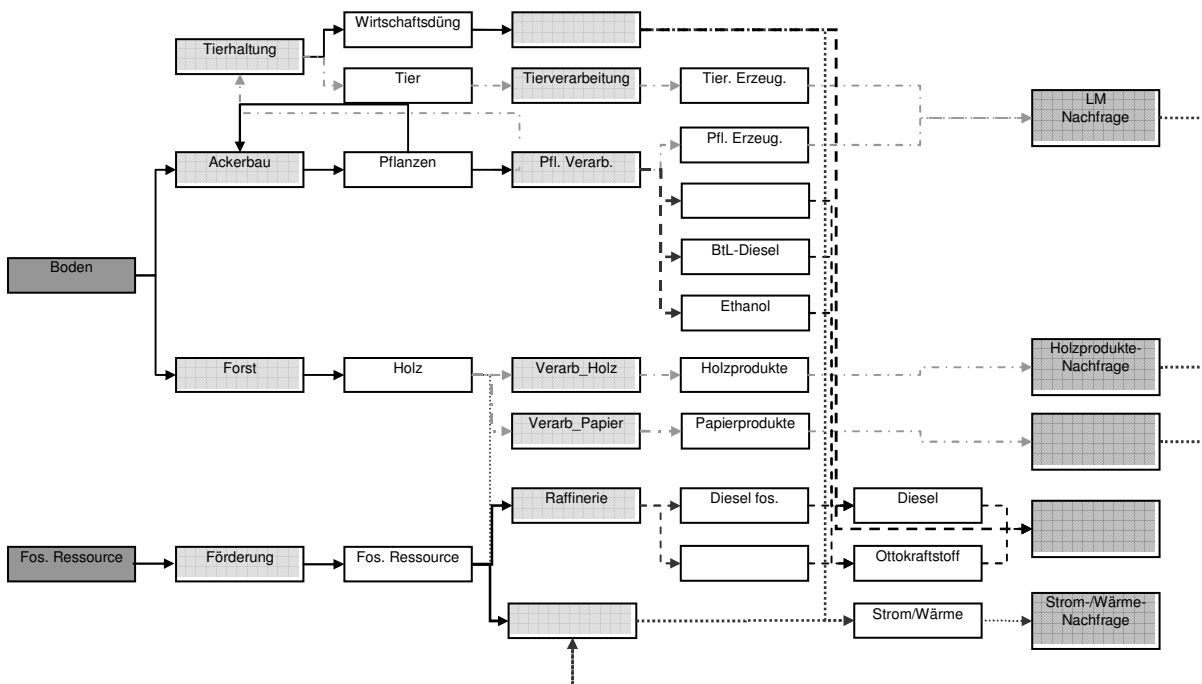
Biokraftstoffe	Biogener Input	
Biodiesel	Palmöl	Rapsöl
	Sojaöl	Sonnenblumenöl
Bioethanol	Mais	Futtermübe
	Topinambur	Chinaschilf
	Pappel	Kartoffeln
	Zuckerhirse	Sudangras
	Weizenstroh	Zuckerrübe
	Zuckerrohr	Switchgrass
	Weizen	
BtL-Kraftstoff	Waldrestholz	Chinaschilf
	Pappel	Weizenstroh
	Switchgrass	
CBG	Mais	Topinambur
	Rindergülle	Schweinegülle
	Kartoffeln	Zuckerhirse
	Sudangras	Weizenstroh
	Weizen	

Die Herstellung der beschriebenen Güter wird mit Hilfe typisierter Verfahren modelliert.

Grundsätzlich wird für jedes modellierte Endprodukt der vollständige Lebenszyklus abgebildet, beginnend mit dem Anbau bei pflanzlichen Produkten und dem Abbau bei fossilen Rohstoffen, endend mit der Nachfrage nach dem Endprodukt („cradle-to-gate“). Die Nutzungsphase wird nicht erfasst (Abb. 1).

Tabelle 2: Sonstige modellierte biogene Produkte

Produktgruppe	Produkt		
Sonstige Bioenergie	Wärme	Elektrizität	
	Nahrungsmittel	Rapsöl	Sonnenblumenöl
		Sojaöl	Palmöl
		Getreide	Hülsenfrüchte
		Kartoffelprodukte	Zucker
		Rindfleisch	Schweinefleisch
		Geflügel	Schaffleisch
Sonst. Fleisch			
Holz	Schnittholz	Sperrholz	
	Spanplatten		
	Sonst. Holzprodukte	Holzverpackungen	
	Möbel	Bauholz	
	Pfosten u.ä.		
Papier	Halbstoff	Zellstoff	
	Druckpapier	Hygienepapier	
	Kartonagen	Spezialpapier	



Anm.: KW = Kraftwerk; LM = Lebensmittel.

Abb. 1: Vereinfachte Darstellung der modellierten Material- und Energieflüsse

Das Modell stellt die Situation Deutschland dar. Zusätzlich werden Im- und Exporte erfasst. Mit Ausnahme von zuckerrohr- und palmölbasiertem Bioethanol werden für die importierten Produkte mit Deutschland vergleichbare Produktionsprozesse angenommen.

Der gewählte Gleichgewichtsansatz impliziert, dass für alle modellierten Märkte die Markträumungsbedingung als erfüllt gilt. In das Modell ist ein vereinfachter Investitionsentscheidungsprozess implementiert, als notwendige Voraussetzung um eine Nachfragesteigerung nach einem Produkt befriedigen zu können, aber auch als eine Möglichkeit die Diffusion von technischem Fortschritt zu erfassen. Es sind im Modell nur solche Technologien erfolgreich, die eine positive Rendite erwirtschaften. Im Zeitablauf können sich die Parameterwerte aufgrund technischen Fortschritts ändern. Zwei Arten von technischen Fortschritt sind hierbei zu unterscheiden: Learning-by-doing-Typ für etablierte Prozesse und investitionsgetriebener technischer Fortschritt. Damit letzterer seine Wirkung entfalten kann, muss im Rahmen einer Ersatz- oder Neuinvestition eine „neue“ Technologie in den Markt eingeführt werden.

Das Modell ist nachfragedeterminiert sowie komparativ-statisch: Zieljahr ist 2020; Referenzjahr 2005.

3.3 Das Szenario

Mit dem folgenden Szenario soll eine mögliche Entwicklung der deutschen Volkswirtschaft und der modellierten Technologien bis zum Jahr 2020 beschrieben werden.

Aufgrund der Energiestrategie der deutschen Regierung wird der Markteintritt von Biokraftstoffen durch Mindestquoten unterstützt. In Anlehnung an das Energiesteuer-gesetz (EnergieStG) wird für das Szenario angenommen, dass biogene Kraftstoffe im Jahr 2020 einen Marktanteil von mindestens 8,0 % (gemessen am Heizwert) am Markt für Diesel und Ottokraftstoffen aufweisen müssen. Gleichzeitig muss annahmegemäß der Anteil von biogenem Diesel sowie BtL-Kraftstoff⁶ am Gesamtdieselabsatz mindestens 4,4 % und von Bioethanol am Benzinmarkt mindestens 3,6 % betragen, jeweils gemessen am Heizwert.

⁶ Die alleinige Zuweisung von BtL-Kraftstoff zum Dieselmärkte ist eine vereinfachende Annahme.

Planmäßig sollen bis 2016 alle Steuervorteile für biogene Kraftstoffe aufgehoben werden. Daher wird für das Jahr 2020 eine gleichmäßige Besteuerung unterstellt. Im Gegensatz zu der heutigen Gesetzeslage soll die Besteuerung aber auf Basis des Heizwertes erfolgen. Auf Grundlage der heutigen Besteuerung von fossilem Diesel und Ottokraftstoffen ergeben sich im Modell für das Zieljahr 2020 folgende Steuersätze, in Eurocent je Liter (ct/l):

Tabelle 3: Modellierte Steuersätze, 2020

Fossiler Diesel	Biodiesel	BtL-Kraftstoff	Ottokraftstoff	Bioethanol
ct/l	ct/l	ct/l	ct/l	ct/l
47,04	44,90	44,90	65,45	42,43

Zusätzlich wird im Modell das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) berücksichtigt. Das EEG unterstützt das Angebot an erneuerbaren Energieträgern durch eine spezifische Kostenerstattung, die u.a. von der gewählten Technologie, dem Jahr der Installation sowie der Größe der Anlage abhängt. Für das Modell werden typisierte Vergütungssätze angenommen.

Die Produktion von landwirtschaftlicher Biomasse wird durch die Europäische Union unterstützt. Planmäßig soll für alle in dieser Arbeit relevanten Pflanzen bis zum Jahr 2013/15 eine vollständige Abkopplung des Umfangs der Unterstützungszahlungen von der produzierten Menge erfolgen. In Anlehnung an [18] werden für das Jahr 2020 Unterstützungszahlungen in Höhe von 328 €/ha angenommen. Bei einer energetischen Verwendung der Ernte werden zusätzlich 45 €/ha gezahlt.

Für den Import landwirtschaftlicher Produkte in die Europäische Union wird keine Änderung gegenüber 2005 unterstellt. Der Import von Bioethanol aus Nicht-EU-Ländern und Staaten ohne vereinfachten Zugang zur EU (bspw. Brasilien) wird verzollt. Die Verhandlungen über eine weitere Liberalisierung des Welthandels (die sog. Doha-Runde) befinden sich seit längerer Zeit in einer Sackgasse und ein Ende ist nicht absehbar ist.

Bezüglich der Technologien wird angenommen, dass sich, ausgehend von 2005, die Produktivität der Biomasse nutzende Technologien bis 2020 um bis zu 20 % erhöht [19, 20]. Für die fossile Rohstoffe nutzende Technologien wird kein technischer Fortschritt unterstellt.

Für die Entwicklung der Endnachfrage nach einzelnen Konsumgütern werden folgende Veränderungen geschätzt bzw. aus der Literatur entnommen:

Tabelle 4: Erwartete Entwicklung der Endnachfrage zwischen 2005 und 2020, gegliedert nach Produktgruppen

Produktgruppe	Veränderung der Nachfrage
Nahrungsmittel	- 5,1 % bis + 6,1%
Papier- und Holzprodukte (Basisjahr 2000)	+ 35,8 %
Kraftstoffe	
Diesel	- 13,2 %
Benin	- 39,4 %
Gas	+ 1200,0 %
Wärme sowie Elektrizität	- 0,5 %

Quelle: [20]

Neben den wirtschaftspolitischen Rahmenbedingungen ist die Kostenentwicklung zu beachten. Für die exogenen Kostengrößen – Gemeinkosten, Arbeitskosten, u.a. – wird eine jährliche Erhöhung von 1,5 % angenommen.

Die Kosten für fossile Rohstoffe – Rohöl, Erdgas und Kohle – werden wesentlich durch die Weltmärkte bestimmt, wobei die Entwicklung des Rohölpreises hier eine dominierende Rolle aufweist. Daher wurden für den Rohölpreis unterschiedliche Varianten berechnet. In dieser Arbeit werden vier Varianten präsentiert: Rohölpreis in Höhe von 75 \$/bbl., 95 \$/bbl., 115 \$/bbl. und 135 \$/bbl. Zur Umrechnung des Rohölpreises wird ein konstanter Wechselkurs in Höhe von 1,20\$/€ angenommen. Die Preise für biogene Inputs und Outputs sowie für fossile Sekundärenergieträger sind modellendogen.

3.4 Diskussion der Ergebnisse

Unter Berücksichtigung der o.g. Restriktionen werden im Jahr 2020 sowohl traditioneller als auch Ligno-Bioethanol am Markt reüssieren (Abb. 2). Hierbei wird es aber zu einer relativen Verdrängung des traditionellen Bioethanols durch Ligno-Bioethanol kommen. Der relative Wettbewerbsvorteil von Ligno-Bioethanol nimmt mit steigendem Rohölpreis zu und erreicht bei einem Rohölpreis von 135 \$/bbl. einen Marktanteil am Bioethanolmarkt von ca. 80 % (Abb. 2). Der wesentliche Grund hierfür ist die relativ geringere Energiepreissensitivität von Ligno-Bioethanol. Im Modell wird unterstellt, dass das beim Aufschluss der Pflanze freiwerdende Lignin bei der Dehydrierung als Energieträger eingesetzt wird. Der Bedarf an „externer“ Energie vermindert sich hierdurch nennenswert. Die Marktverdrängung trifft im Wesentlichen heimische Produzenten, während sich zuckerrohrbasiertes Bioethanol am Markt behaupten kann.

Ein Rohölpreis jenseits von 115 \$/bbl. würde heimische Anbieter von traditionellem Bioethanol komplett vom Markt verdrängen.

Betrachtet man die Kohlenstoffdioxidemissionen als ein Beispiel für die Diskussion umweltrelevanter Wirkungen eines Marktzutritts von Ligno-Bioethanol, so folgen diese nicht der Gesamtproduktion von Bioethanol. Bis zu einem Rohölpreis bis 95 \$/bbl. nehmen die gesamten Kohlenstoffdioxidemissionen ab, trotz zunehmender Produktion. Erst ab 95 \$/bbl. kommt es zu einem Anstieg der Emissionen, der aber relativ zur Produktion gering ausfällt (Abb. 3).

Inwieweit Ligno-Bioethanol eine wünschenswerte Alternative zu traditionellem Bioethanol ist, kann mit Hilfe der spezifischen Emissionen analysiert werden. Grundsätzlich sind die spezifischen Emissionen von Ligno-Bioethanol ab einem Rohölpreis von 95 \$/bbl geringer. Es zeigt sich aber auch, dass zwischen 75 \$/bbl. und 95 \$/bbl. der spezifische Wert preissensitiv reagiert, während sich ab 95 \$/bbl. kaum nennenswerte Änderungen ergeben. Der Grund hierfür liegt in der unterschiedlichen Wettbewerbsfähigkeit der einzelnen Prozesse zur Herstellung von Ligno-Bioethanol.

Aus ökonomischer Sicht scheint Ligno-Bioethanol eine interessante Alternative zur traditionellen Herstellung von Bioethanol zu sein – bei Zugrundelegung des heutigen Wissens über die zukünftige Entwicklung der Kosten und Prozesse von Ligno-Bioethanol.

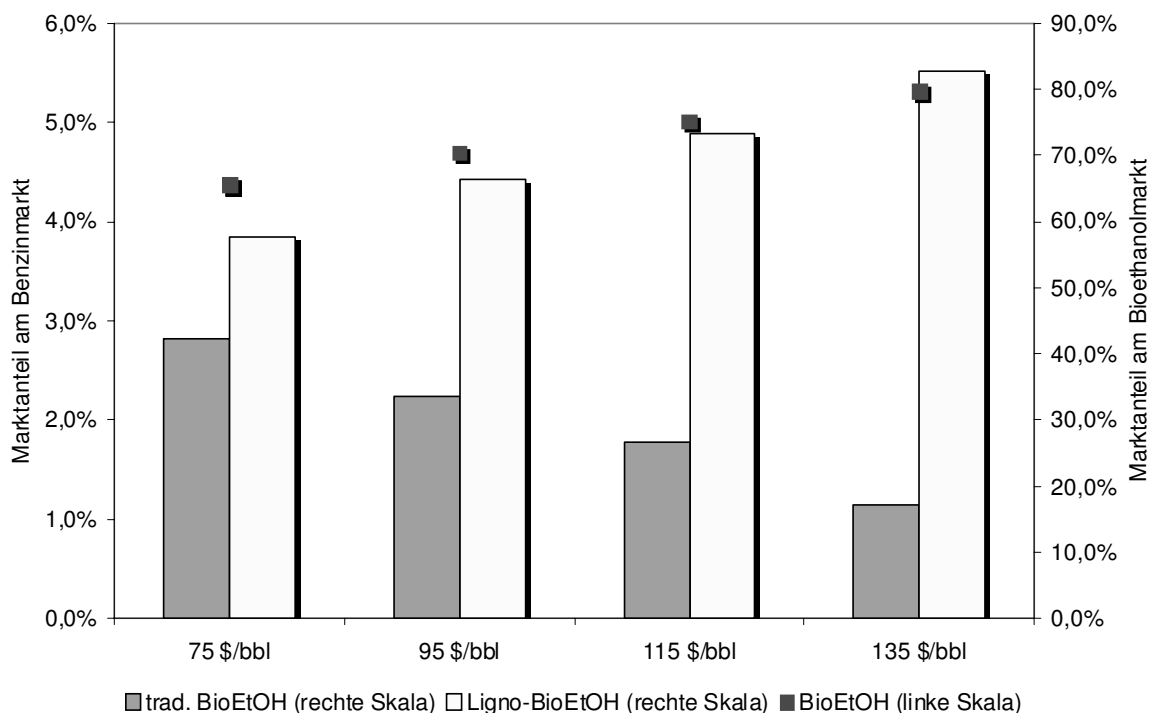


Abb. 2: Produktion und Marktanteile von Bioethanol, 2020

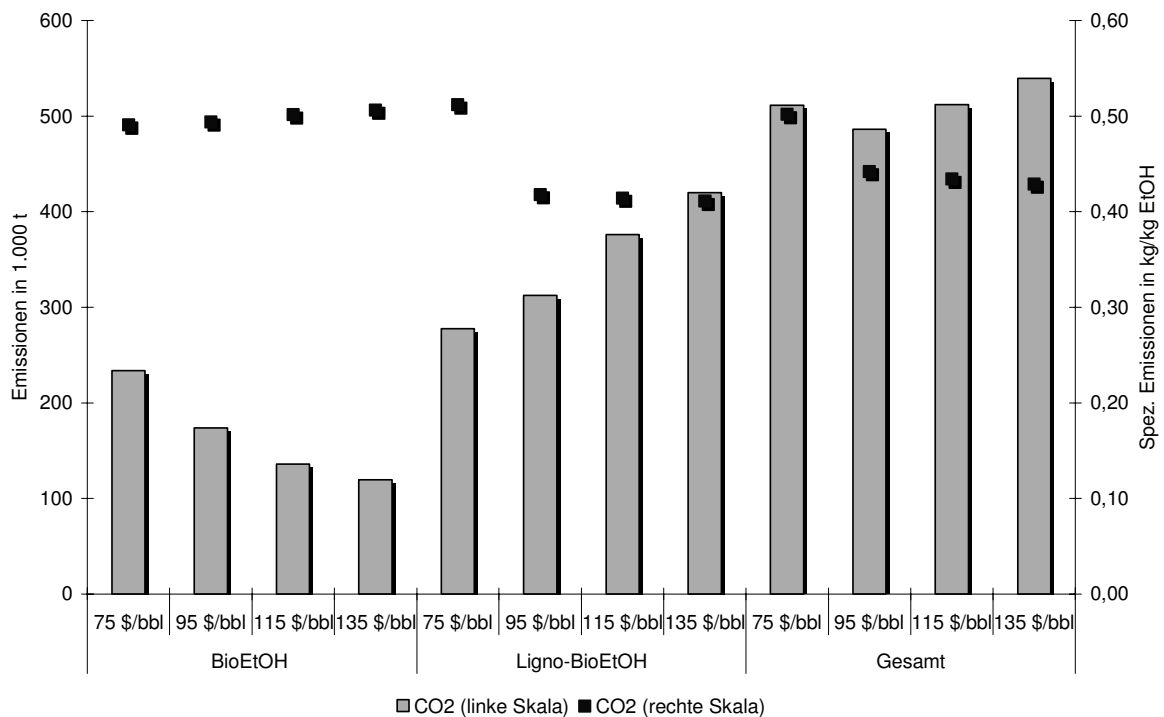


Abb. 3: Kohlenstoffdioxidemissionen, 2020

Betrachtet man die Umweltinanspruchnahme, so ist ein ähnliches Bild festzustellen. Man muss aber beachten, dass dieses Ergebnis nur auf Kohlenstoffdioxidemissionen fußt. Andere umweltrelevante Einwirkungen wurden in diesem Beitrag nicht diskutiert. Tatsächlich würde dieses Bild der relativen Begünstigung von Ligno-Bioethanol bei Einbeziehung anderer Treibhausgase nicht mehr so eindeutig ausfallen [21].

Unabhängig davon, zeigen die Ergebnisse, dass der umweltrelevante Erfolg von Ligno-Bioethanol wesentlich vom Markterfolg abhängt, da dieser den Marktanteil der einzelnen möglichen Ligno-Bioethanolvarianten und damit das Emissionsvolumen bestimmt. Der Markterfolg hängt unter Berücksichtigung der angenommenen wirtschaftspolitischen Rahmenbedingungen nach diesen Berechnungen wesentlich von der Preisentwicklung des Rohöls ab. Darüber hinaus spielt auch die Entwicklung des US-Dollar-Euro Wechselkurses eine wesentliche Rolle, da dieser den in Deutschland relevanten Abnahmepreis bestimmt.

Die Ausweitung der Systemgrenzen – im Vergleich zu einem attributiven LCA – beeinflusst nennenswert die Umweltinanspruchnahme von Biokraftstoffen.

4 Schlussbemerkungen

Als ein in der Umweltbewertung eingeführtes Instrumentarium erfasst ein attributives LCA die umweltrelevanten physischen Flüsse von und zu einem Produktsystem. Die Berücksichtigung möglicher zukünftiger Effekte bleibt der Interpretationsphase vorbehalten; mögliche Wirkungen auf das gewählte Produktsystem bleiben außen vor. Dies ist problematisch, wenn neue Produkte am Markt eingeführt werden und weitergehende umweltrelevante Wirkungen vom Erfolg des Produktes abhängen. Daher müssten aus methodischer Sicht die diskutierten Erweiterungen diese Mängel beheben.

Es zeigt sich aber auch, dass durch die Erweiterung des Betrachtungshorizontes die Komplexität des zu analysierenden Systems und damit auch der Bedarf an Daten zunehmen. Die sich hierdurch ergebenden Risiken insbesondere hinsichtlich der Verlässigkeit der Ergebnisse sind nicht abschätzbar, vermindern aber die Attraktivität des Instrumentariums für die betriebliche Praxis.

Literatur

- [1] B.A. Sandén und M. Karlström. *Positive and negative feedback in consequential life-cycle assessment*, *Journal of Cleaner Production* **15** (2007) 1469-1481.
- [2] C. Bauer und W.R. Pogonietz. *Prospektive Lebenszyklusanalyse in der Anwendung oder die Zukunft in der Ökobilanz*, *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis* **16** (2007) 17-23.
- [3] M.A. Curran, M.K. Mann und G. Norris. *Report on the International Workshop on Electricity Data for Life Cycle Inventories*. US-EPA (Hg.): *Electricity Data for Life Cycle Inventories*, Cincinnati, USA. 2002
- [4] T. Ekvall und A.S.G. Andrae. *Attributional and consequential environmental assessment of the shift to lead-free solders*, *International Journal of LCA* **11**(5) (2006) 161-171.
- [5] G. Huppes. *Framing the research agenda for new LCA. Relations to governance. Presentation, presented at the workshop "Governance & Life Cycle Analysis", Brussels, 27.09.2007.*
- [6] T. Ekvall und B.P. Weidema. *System boundaries and input data in consequential Life Cycle Inventory Analysis*, *International Journal of LCA* **9**(3) (2004) 161-171.
- [7] H.L. Pesonen, T. Ekvall, G. Fleischer, G. Huppes, C. Jah, Z. Klos, G. Rebitzer, G.W. Sonnemann, A. Tintinelli, B.P. Weidema und H. Wenzel. *Framework for Scenario Development in LCA*. *International Journal of LCA* **5**(1) (2000) 21-30.

- [8] J. Gausemeier, A. Fink und O. Schlake. *Szenario-Management. Planen und Führen mit Szenarien. 2. bearb. Aufl., München Wien. 1996.*
- [9] Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. *Warum brauchen wir Biokraftstoffe?* www.bmelv.de, 30.06.2008.
- [10] U.N.'s Pachauri urges caution in biofuel use, *Reuters*, 26.03.2008.
- [11] J. Fargione, J. Hill, D. Tilman, S. Polasky und P. Hawthorne P. *Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt, Science* (2008) www.sciencemag.org/, veröffentl. 07.02.2008.
- [12] Angola-Burkina Faso. Put your money where your mouth is, *Reuters*, 03.06.2008.
- [13] C. Hamilton. *Biofuels made easy*, (Lurgi Pacific Pty Ltd, Melbourne), 2004.
- [14] A. Demirbas. *Bioethanol from cellulosic materials. A renewable motor fuel from biomass, Energy Sources* **27** (2005) 327-337.
- [15] European Commission. *Report on the hearing of the Biofuels European Technology Platform.* 03. Mai 2007. http://www.biofuelstp.eu/downloads/hearing_report_biofuels_final.pdf.
- [16] A. Uihlein, W.R. Poganietz und L. Schebek. *Carbon flows and carbon use in the German anthroposphere. An inventory, Resources, Conservation and Recycling* **46** (2006) 410-429.
- [17] W.R. Poganietz und P. Zapp, Perfluorinated hydrocarbons in the primary aluminium processing – Trends in the current decade. In: J. van Ham, A.P.M. Baede, R. Guicherit und J. G. F. M. Williams-Jacobse (Hrsg.). *Non-CO₂ Greenhouse Gases. Scientific Understanding, Control Options and Policy Aspects*, (Millpress, Rotterdam) 2002, 213-218.
- [18] BStLF. *Europäische Agrarreform 2005 – Nationale Umsetzung* (BStLF, München) 2004.
- [19] M. Baitz und S. Deimling. *LCA study on bio-ethanol from straw in relation to fossil gasoline* (PE Europe GmbH, Leinfelden-Echterdingen) 2006.
- [20] W.R. Poganietz, T. Reinhardt und C. Bauer. *Lignocellulosics-to-bioethanol in the context of Germany: Modelling life cycle implications of policy options. Journal of Scientific & Industrial Research* **67**(November 2008) 908-917.