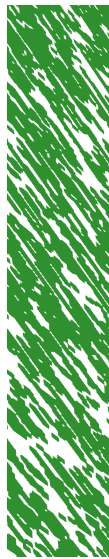




ifeu -  
Institut für Energie-  
und Umweltforschung  
Heidelberg gGmbH



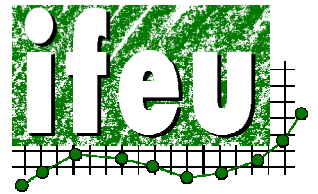
## **Bioenergie aus Getreide und Zuckerrübe: Energie- und Treibhausgasbilanzen**

**Endbericht (Kurzversion)**

**Im Auftrag des  
Verbandes Landwirtschaftliche  
Biokraftstoffe e.V. (LAB), Berlin**

**Heidelberg, 13. August 2008**





## **Bioenergie aus Getreide und Zuckerrübe: Energie- und Treibhausgasbilanzen**

**Im Auftrag des  
Verbandes Landwirtschaftliche  
Biokraftstoffe e.V. (LAB), Berlin**

Nils Rettenmaier

Dr. Guido Reinhardt

Sven Gärtner

Julia Münch

**IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH**

Wilckensstraße 3

D-69120 Heidelberg

Tel.: +49 (0)6221 47 67-0; Fax: -19

<http://www.ifeu.de>

Heidelberg, 13. August 2008



# Inhalt

<b>Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>4</b>
<b>2 Vorgehensweise</b>	<b>6</b>
<b>3 Analytierte Bioenergiepfade und Szenarien</b>	<b>9</b>
3.1 Auswahl der Bioenergiepfade	9
3.1.1 Bioenergie aus Triticale	9
3.1.2 Bioenergie aus Weizen	10
3.1.3 Bioenergie aus Zuckerrübe	13
3.2 Betrachtete Kuppelproduktszenarien	14
3.2.1 Basisszenario	14
3.2.2 Erweitertes Szenario	16
3.2.3 Alle Szenarien im Überblick	19
3.3 Sensitivitätsanalysen	20
<b>4 Ergebnisse</b>	<b>22</b>
4.1 Vergleiche: Basisszenario	22
4.1.1 Bioethanol aus Zuckerrübe im Detail (Basisszenario)	22
4.1.2 Basisszenario	23
4.1.3 Sensitivitätsanalysen	26
4.2 Vergleiche: Erweitertes Szenario	28
4.2.1 Bioethanol aus Zuckerrübe im Detail (erweitertes Szenario)	28
4.2.2 Erweitertes Szenario	29
4.2.3 Flächeninanspruchnahme	32
4.3 Zusammenführung der Ergebnisse	34
4.4 Exkurs: Vergleich mit BTL aus Pappel	36
<b>5 Schlussfolgerungen</b>	<b>38</b>
<b>6 Literatur und Abkürzungen</b>	<b>40</b>
<b>7 Anhang</b>	<b>42</b>
7.1 Betrachtete Kuppelproduktszenarien	42
7.2 Sensitivitätsanalysen	44
7.2.1 Bioenergie aus Weizen und Zuckerrübe	44
7.2.2 Bioenergie aus Triticale	52
7.3 Exkurs: Vergleich mit BTL aus Pappel	53
7.4 Vergleiche: Erweitertes Szenario	54



# Zusammenfassung

## Hintergrund und Ziel der Untersuchung

Steigende Preise für Agrarrohstoffe, zunehmende Flächen- und Nutzungskonkurrenzen sowie für Klima- und Artenschutz nachteilige Landnutzungsänderungen führten dazu, dass das Thema Nachhaltigkeit in den Mittelpunkt der Diskussion über Bioenergie rückte. Als Interessenvertreter der deutschen Bioethanolwirtschaft will sich der LAB e.V. dieser Diskussion stellen und beauftragte das IFEU-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Energie- und Treibhausgasbilanzen für dreizehn ausgewählte Pfade zur Bioenergiegewinnung aus Getreide und Zuckerrüben mit unterschiedlichen Kombinationen aus Biokraftstoff- und Bioenergieproduktion (grüner Strom und grüne Wärme) zu erstellen.

Hauptziel der Studie ist es, vor dem Hintergrund zunehmender Flächenkonkurrenzen zu analysieren, welcher der ausgewählten Bioenergiepfade den größten Beitrag zur Schonung erschöpflicher Energieressourcen und zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen leistet und damit die unter diesen Gesichtspunkten „optimale“ Flächennutzung darstellt. Die Auswahl der Pfade umfasst u. a. zwei etablierte sowie ein innovatives Verfahren zur Bioethanolherstellung, wobei in einem Verfahren (etabliert) *nur* Zuckerrüben als Rohstoff verwendet werden, in den beiden anderen Verfahren (etabliert / innovativ) dagegen Weizenkorn *und* Zuckerrüben. Die beiden letztgenannten Verfahren wurden im Sinne einer vollständigen Nutzung der Weizenpflanze mit jeweils vier Verfahren zur Bioenergiegewinnung aus Weizenstroh kombiniert. Diese neun kombinierten Bioethanol- und Bioenergiepfade wurden noch um vier Bioenergiepfade aus Triticale, einem als Ganzpflanze genutzten Getreide, ergänzt.

Als ein weiteres Ziel gilt es im Rahmen dieser Studie zu bewerten, wie sich unterschiedliche Flächeneffekte, die mit den Kuppelprodukten aus der Bioethanolherstellung verbunden sind, auf die Ergebnisse auswirken. Solche Flächeneffekte kommen dadurch zustande, dass Kuppelprodukte wie Rübenschnitzel, Vinasse, Dickschlempe oder DDGS (Distiller's Dried Grains with Solubles) anstelle von herkömmlichen Futtermitteln wie Gerste oder Sojaschrot verwendet werden und infolgedessen Anbauflächen für deren Produktion nicht benötigt werden. Diese Flächen werden bisher in Ökobilanzen als Brachland behandelt – so auch im Basisszenario dieser Untersuchung. Sie könnten aber potenziell auch für den Anbau von Energiepflanzen für eine zusätzliche Bioenergiebereitstellung genutzt werden, was hier in „erweiterten“ Szenarien betrachtet wurde.

## Methodische Vorgehensweise

Die Energie- und Treibhausgasbilanzen wurden für vollständige Lebenswegvergleiche durchgeführt, wie sie z. B. in den Ökobilanz-Normen DIN 14040 und 14044 vorgeschrieben sind. Dabei werden die potenziellen Umweltwirkungen der Bioenergeträger entlang ihres gesamten Lebensweges vom Anbau der Biomasse über die Verarbeitung zu Biokraftstoffen und -brennstoffen bis hin zu deren energetischer Nutzung betrachtet und mit denen herkömmlicher Energieträger verglichen. Bei der Verarbeitung von Biomasse fallen in der Regel Kuppelprodukte an, die herkömmliche Produkte gleichen Nutzens substituieren. Da bei deren Herstellung ebenfalls Umweltwirkungen entstanden wären, werden diese vermiedenen Umweltwirkungen dem Bioenergeträger gutgeschrieben.

## Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Untersuchung zeigt, dass die dreizehn analysierten Bioenergiepfade im Vergleich zu einer konventionellen Energiegewinnung in allen Szenarien und unter allen Randbedingungen erschöpfliche Energieressourcen schonen und zum Klimaschutz beitragen können.

- Die Ergebnisse der drei untersuchten Verfahren zur Bioethanolherstellung, davon eines aus Zuckerrüben und zwei aus Weizenkorn *und* Zuckerrüben, sind im Basisszenario vergleichbar mit denen der Verfahren zur Bioenergiegewinnung aus Triticale. Damit zeigt sich, dass es mehrere Möglichkeiten für eine im Hinblick auf Ressourcenschonung und Klimaschutz „optimale“ Flächennutzung gibt und keiner der untersuchten Bioenergiepfade genuine Vorteile aufweist. Pro Hektar und Jahr können so zwischen 36 und 110 GJ erschöpfliche Primärenergie eingespart und zwischen 3,8 und 8,1 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente vermieden werden. Bei einer Anbaufläche von 1000 ha entspricht dies pro Jahr dem Primärenergieverbrauch von 220 – 670 Bundesbürgern und den von 330 – 690 Bundesbürgern verursachten Treibhausgasemissionen.
- Die Analyse zeigt des Weiteren, dass viele der Pfade optimiert werden können, u. a. in den Bereichen Energiepflanzenanbau und Biomassekonversion. Beispielsweise könnte die Prozessenergie auch aus nachwachsenden Rohstoffen wie Stroh oder Kurzumtriebsholz bereitgestellt werden. Aber auch das Zielprodukt kann sich entscheidend auf die Ergebnisse auswirken: So führt die im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse untersuchte Weiterverarbeitung von Bioethanol zum Kraftstoffadditiv Ethyl-Tertiär-Butyl-Ether (ETBE) stets zu den mit Abstand besten Bilanzergebnissen. Trotz des begrenzten technischen Potenzials von ETBE sollte dieses vollständig ausgeschöpft werden und erst anschließend Ottokraftstoff durch Bioethanol ersetzt werden.
- Die Einbeziehung von Flächeneffekten, die mit den als Futtermittel verwendeten Kuppelprodukten aus der Bioethanolherstellung verbunden sind, kann sich erheblich auf die Ergebnisse der Energie- und Treibhausgasbilanzen auswirken:
  - Alleine bei den hier beispielhaft ausgewählten erweiterten Szenarien für eine zusätzliche Bioenergieproduktion auf Flächen, die nicht mehr für eine Futtermittelproduktion benötigt werden, können fünfmal mehr Energie und viermal mehr Treibhausgase als im Basisszenario eingespart werden.
  - Sämtliche Verfahren zur Bioethanolherstellung aus Weizen und Zuckerrübe schneiden im erweiterten Szenario wesentlich besser ab als die Bioenergiegewinnung aus Triticale oder auch BTL aus Pappel-Kurzumtriebsholz, wobei die Bioethanolherstellung aus Zuckerrübe tendenziell die besten Ergebnisse liefert. Auch das innovative Verfahren zur Herstellung von Bioethanol aus Weizenkorn *und* Zuckerrüben (Weizen I-Verfahren) führt zu sehr vorteilhaften Ergebnissen, allerdings wird hierbei deutlich mehr Fläche in Anspruch genommen, als der eigentlich zur Verfügung stehende Hektar Brachland. Insgesamt folgt daraus, dass die so genannten Biokraftstoffe der 2. Generation wie BTL (Biomass-to-Liquid) oder Bioethanol aus Lignozellulose (LCF-Ethanol) keine systemimmanenten Vorteile gegenüber den herkömmlichen Biokraftstoffen wie beispielsweise Bioethanol aus Zuckerrüben oder Weizen haben.

Dies zeigt zum einen, dass Bioenergiepfade mit Kuppelprodukten, die sich auf Flächenbelegungen auswirken, unter bestimmten Randbedingungen mehr als bisher angenommen erschöpfliche Energieressourcen schonen und Treibhausgasemissionen vermeiden können.



Zum zweiten zeigt dies aber auch, dass die bei Ökobilanzen zu betrachtenden Bioenergieszenarien mit besonderer Sorgfalt ausgewählt bzw. entsprechende Fragestellungen ausführlich ausformuliert werden müssen und die Ergebnisse ausschließlich im Kontext des Untersuchungsrahmens gültig sind. Insofern ist diese Studie sehr hilfreich für die weitere Diskussion über Ökobilanzen zu Bioenergie im Allgemeinen und zu Biokraftstoffen im Speziellen.

### **Einschränkungen**

Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen gelten ausschließlich für die dreizehn betrachteten Pfade zur Bioenergiegewinnung und könnten unter Einbeziehung anderer Bioethanol-Verfahren oder weiterer Bioenergiepfade wie Biodiesel aus Raps oder Biogas aus Mais eventuell deutlich unterschiedlich ausfallen. Die hier ermittelten *qualitativen* Ergebnisse können dennoch als sehr robust angesehen werden, wohingegen die *quantitativen* Ergebnisse in hohem Maße von den o.g. Flächeneffekten sowie den gewählten Kuppelproduktsubstituten abhängig sind. Ebenso können die Ergebnisse und Schlussfolgerungen für die Energie- und Treibhausgasbilanzen nicht auf andere Umweltwirkungen wie Versauerung, Nährstoffeintrag oder Photosmog übertragen werden. Diese müssten im Rahmen einer gesamtökologischen Bewertung zusätzlich untersucht werden.

# 1 Einführung

## Hintergrund und Erkenntnisinteresse

In der jüngsten Vergangenheit avancierte der Klimaschutz zu einem der wichtigsten umweltpolitischen Themen auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene. Dazu trug nicht zuletzt auch der aktuelle Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) bei, demzufolge eine Begrenzung des Anstiegs der globalen Mitteltemperatur nur durch eine deutliche Verminderung der Treibhausgasemissionen erreicht werden kann.

Auf europäischer Ebene war der Klimaschutz – neben der Erhöhung der Versorgungssicherheit und der Schaffung von Arbeitsplätzen u. a. im ländlichen Raum – das Hauptmotiv, die Substitution von fossilen durch erneuerbare Energien zu fördern. Deren Anteil am Primärenergieverbrauch soll bis zum Jahr 2020 auf 20% steigen. Die Bundesregierung hat dieses Ziel in einer Erklärung vom April 2007 durch spezifische Zielvorgaben für den Anteil erneuerbarer Energien in den Sektoren Wärme, Kraftstoffe und Strom konkretisiert. Innerhalb der erneuerbaren Energien hat die Biomasse mit derzeit etwa 70% Anteil die größte Bedeutung.

Die Biomassenutzung kann jedoch aufgrund der begrenzten Potenziale für biogene Reststoffe und nachwachsende Rohstoffe nicht beliebig ausgeweitet werden, insbesondere da landwirtschaftliche Flächen zum Anbau von nachwachsenden Rohstoffen begrenzt sind. Bereits heute konkurriert der Biomasseanbau mit anderen *Flächennutzungen* wie Nahrungs- und Futtermittelproduktion oder auch dem Naturschutz. Ebenso gibt es eine Konkurrenz zwischen Energieproduktion und anderen *Biomassenutzungen* wie der stofflichen Nutzung.

Darüber hinaus wird die Biomasse – und damit verbunden auch die Fläche – derzeit aufgrund von sektorspezifischen politischen Zielvorgaben und der zu ihrer Erfüllung gesetzten Rahmenbedingungen eher suboptimal genutzt: Sie ist weder unter ökologischen (größtmöglicher Beitrag zum Klimaschutz) noch unter ökonomischen Gesichtspunkten (kostengünstigste Verminderung der Treibhausgasemissionen) effizient. Dies geht beispielsweise aus wissenschaftlichen Studien der letzten Jahre hervor, die mit Hilfe von Ökobilanzen u. a. das Treibhausgasverminderungspotenzial zahlreicher Bioenergiepfade untersuchten.

Vor diesem Hintergrund beauftragte der Verband Landwirtschaftliche Biokraftstoffe e.V. (LAB) das IFEU-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Energie- und Treibhausgasbilanzen für einige ausgewählte Pfade zur Bioenergiegewinnung aus Getreide und Zuckerrüben mit unterschiedlichen Kombinationen aus Kraftstoff- und Energieproduktion zu erstellen.

## Ziel der Untersuchung

Ziel der Studie ist die übersichtsartige Bestimmung des Energieeinsparungs- und Treibhausgasverminderungspotenzials verschiedener Pfade zur Bioenergiegewinnung aus Getreide und Zuckerrüben, jeweils im Vergleich zu einer konventionellen Energiegewinnung aus fossilen Energieträgern. Im Rahmen der Studie, die in erster Linie dem allgemeinen Erkenntnisgewinn des Auftraggebers dienen soll, werden u. a. drei Verfahren zur Ethanolherstellung untersucht, davon eines aus Zuckerrüben und zwei aus Weizenkorn *und* Zuckerrüben. Die beiden letztgenannten Verfahren werden jeweils mit vier Varianten der energetischen Strohnutzung kombiniert. Zusammen mit den vier analysierten Varianten der Bioenergiegewinnung aus Triticale, einem Ganzpflanzen-Getreide, ergeben sich insgesamt dreizehn Pfade.

Insbesondere soll analysiert werden:

- welche Pfade zur Bioenergiegewinnung aus Getreide und Zuckerrüben hinsichtlich ihres flächenbezogenen Potenzials zur Einsparung fossiler Energieträger und zur Verminderung von Treibhausgasemissionen besonders vorteilhaft sind und somit eine unter diesen Gesichtspunkten „optimale“ Flächennutzung darstellen,
- wie diese Pfade im Vergleich zu einer BTL-Produktion (Biomass-to-Liquid) aus schnell wachsenden Hölzern (hier: Pappel-Kurzumtriebsholz) abschneiden,
- welche Prozesse innerhalb der einzelnen Bioenergiepfade besonders ergebnisrelevant sind und damit ggf. Möglichkeiten für ökologische Optimierungen bieten und
- wie sich unterschiedliche Flächeneffekte, die mit den Kuppelprodukten aus der Ethanolherstellung verbunden sind, auf die Ergebnisse der Energie- und Treibhausgasbilanzen auswirken.

### Grundsätzliche Vorgehensweise

Die Untersuchung wird in Anlehnung an die Vorgehensweise bei Ökobilanzen durchgeführt, welche in Kapitel 2 ausführlich beschrieben wird. Dieser Vorgehensweise zufolge sind die gesamten Lebenswege der Bioenergieträger vom Anbau der Biomasse über die Verarbeitung zu Biokraftstoffen oder -brennstoffen bis hin zu deren energetischer Nutzung im Vergleich zu fossilen Energieträgern zu betrachten. Einen solchen vereinfachten Lebenswegvergleich zeigt Abb. 1-1.

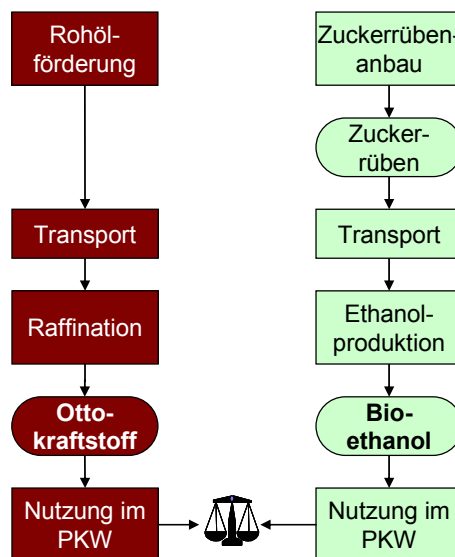


Abb. 1-1 Vereinfachter schematischer Lebenswegvergleich zwischen fossilem Ottokraftstoff und Bioethanol aus Zuckerrüben

Entlang dieser Lebenswege entsteht zusätzlich eine Reihe von Kuppelprodukten (hier nicht dargestellt). Diese sowie die im Rahmen dieser Studie analysierten Bioenergiepfade und Kuppelproduktszenarien werden im folgenden Kapitel (Kapitel 3) erläutert. Anschließend werden in Kapitel 4 die Ergebnisse für die dreizehn ausgewählten Bioenergiepfade präsentiert, interpretiert und daraus in Kapitel 5 Schlussfolgerungen abgeleitet.

## 2 Vorgehensweise

Die Energie- und Treibhausgasbilanzen wurden in Anlehnung an die Vorgehensweise bei Produkt-Ökobilanzen nach DIN 14040 und 14044 durchgeführt. Aufgrund der Art des Erkenntnisinteresses wurden nur übersichtsartige Bilanzen angefertigt, die keiner (wie in den Normen vorgeschriebenen) externen Begutachtung unterzogen wurden, dennoch aber aufgrund der engen Anlehnung an die Normen als sehr belastbar angesehen werden können.

Im Folgenden werden die wesentlichen Details zur grundsätzlichen Vorgehensweise dargestellt, allgemeine Festlegungen sowie die analysierten Umweltwirkungen beschrieben und die Ableitung der Basisdaten dokumentiert. Details finden sich in der angegebenen Literatur.

### Methodische Vorgehensweise

Das Vorgehen zur Erstellung einer Produkt-Ökobilanz ist in den DIN-Normen 14040 und 14044 geregelt. Betrachtet werden insbesondere

- die Input- und Outputflüsse (Roh- und Werkstoffe, Energie bzw. Abfälle, Abwasser, Emissionen etc.) und
- potenziellen Umweltwirkungen (z. B. Treibhauseffekt, Versauerung) des betrachteten Produktsystems (Produkt oder Dienstleistung)
- entlang seines gesamten Lebensweges („Wiege bis zur Bahre“, von der Rohstoffförderung bis zur Entsorgung).

Damit liefern die Produkt-Ökobilanzen umfassende Informationen zu den ökologischen Wirkungen sowohl über einzelne Produktionsstufen als auch über den gesamten Lebensweg von Produkten und Dienstleistungen. Über Sensitivitätsanalysen lassen sich insbesondere auch Optimierungspotenziale und über die Interpretationen Informationen für Entscheidungsprozesse ableiten.

### Allgemeine Festlegungen

Die Erstellung der Energie- und Treibhausgasbilanzen orientiert sich weitgehend an den Ökobilanznormen /DIN 14040 & 14044/. Die wesentlichen Festlegungen in dieser Studie sind:

- Funktionelle Einheit: Als spezifische Produktmenge oder -dienstleistung, die zur Erzeugung des betrachteten Produktnutzens benötigt wird (= funktionelle Einheit), wird der Produktnutzen gewählt, der sich aus der Nutzung eines nachwachsenden Roh- oder Reststoffs von einem Hektar in einem Durchschnittsjahr ergibt.
- Geografischer und zeitlicher Bezug: Der Bezugsraum für die Produktion und Nutzung der Bioenergieträger ist zunächst die Bundesrepublik Deutschland / Mitteleuropa. Ausgehend davon wird er für Rohstoffe aus anderen Ländern (z. B. importiertes Sojaschrot oder auch Erdöl) entsprechend erweitert. Der Bezugszeitraum ist etwa 2020, in der Annahme, dass die Verfahren zur Produktion von Biokraftstoffen der so genannten 2. Generation wie BTL (Biomass-to-Liquid) und Ethanol aus Lignozellulose erst dann technisch ausgereift sein werden. Details zu Bezugsraum und -zeitraum finden sich in /Borken et al. 1999/.

- Systemgrenzen: Grundsätzlich wird der Systemraumerweiterung Vorrang vor der Allokation eingeräumt (Näheres siehe /Borken et al. 1999/). Die Umweltwirkungen des gesamten Produktsystems müssen anteilig auch den Kuppelprodukten wie beispielsweise Rübenschnitzel oder Vinasse zugeordnet werden. Dies erfolgt über die Äquivalenzprozessbilanzierung, bei der Gutschriften für vermiedene Äquivalenzprozesse bzw. deren Umweltwirkungen erteilt werden, z. B. für die vermiedene herkömmliche Futtermittelproduktion aus Gerste oder Sojaschrot.
- Bilanzierungstiefe: Sämtliche stofflichen und energetischen Inputs und Outputs sowie die potenziellen Umweltwirkungen des betrachteten Produktsystems werden entlang des gesamten Lebensweges bilanziert. Lediglich die Infrastruktur (Bau von Konversionsanlagen, Fahrzeugen und Verkehrswegen) wird nicht berücksichtigt.

### Analysierte Umweltwirkungen

Die hier bilanzierten Umweltwirkungen „Energieeinsparung“ und „Treibhauseffekt“ sind in Tabelle 2-1 beschrieben. In Tabelle 2-2 sind für diese Wirkungen die Indikatoren, Sachbilanzgrößen und Äquivalenzfaktoren für die einzelnen Umweltwirkungen zusammengestellt.

**Tabelle 2-1** Untersuchte Umweltwirkungen

Umweltwirkung	Beschreibung
Energieeinsparung	Energieverbrauch bzw. -einsparung sind Unterkategorien der Kategorie Ressourceninanspruchnahme. Dargestellt sind die nicht erneuerbaren Energieträger Erdöl, Erdgas und Kohle sowie Uranerz. Da Bioenergieträger in der Regel zu einer Ressourcenschonung beitragen, wird diese Umweltwirkung im Folgenden der einfacheren Formulierung wegen mit „Energieeinsparung“ bezeichnet.
Treibhauseffekt	Erwärmung der Atmosphäre in Folge der Freisetzung klimawirksamer Gase, wobei hier nur der anthropogene Treibhauseffekt betrachtet wird. Neben Kohlenstoffdioxid (CO <sub>2</sub> ) wird eine Reihe weiterer Spurengase wie Methan (CH <sub>4</sub> ) und Lachgas (Distickstoffoxid, N <sub>2</sub> O) erfasst. Da diese Klimagase unterschiedlich stark zum Treibhauseffekt beitragen, wird ihr Treibhauspotenzial mittels Äquivalenzfaktoren in Kohlenstoffdioxid-Äquivalente (CO <sub>2</sub> -Äquivalente) umgerechnet.

**Tabelle 2-2** Indikatoren, Sachbilanzgrößen und Äquivalenzfaktoren zu den untersuchten Umweltwirkungen

Umweltwirkung	Indikator	Sachbilanzgröße	Formel	Äquivalenzfaktor
Energieeinsparung	Kumulierter Primärenergieaufwand aus erschöpflichen Quellen in GJ	Erdöl	-	-
		Erdgas		
		Steinkohle		
		Braunkohle		
		Uranerz		
Treibhauseffekt	CO <sub>2</sub> -Äquivalent	Kohlenstoffdioxid	CO <sub>2</sub>	1
		Lachgas (Distickstoffoxid)	N <sub>2</sub> O	298
		Methan fossil*	CH <sub>4</sub>	27,75
		Methan biogen**	CH <sub>4</sub>	25

\* inkl. CO<sub>2</sub>-Wirkung nach der CH<sub>4</sub>-Oxidation in der Atmosphäre

\*\* ohne CO<sub>2</sub>-Wirkung nach der CH<sub>4</sub>-Oxidation in der Atmosphäre

## Basisdaten

Die verwendeten Basisdaten stammen aus unterschiedlichen Quellen und lassen sich in folgende Kategorien unterteilen:

- Daten zur Bereitstellung von Biomasse bzw. von fossilen Energieträgern (inklusive der dazu benötigten Hilfs- und Betriebsstoffe), zu deren energetischer Nutzung, zu Transportprozessen sowie zur Bereitstellung und Nutzung von Äquivalenzprodukten.
- Daten zur Konversion von Triticale und Weizenstroh zu BTL (thermochemische Verfahren), zu Ethanol aus Lignozellulose (innovative Fermentation), zu Strom bzw. zu Strom und Wärme (direkte thermische Nutzung)
- Daten zur Konversion von Getreidekorn und Zuckerrüben zu Ethanol (herkömmliche Fermentation) sowie zum Futterwert der dabei anfallenden Kuppelprodukte.

Die Daten der ersten beiden Kategorien werden im Wesentlichen aus der IFEU-internen Datenbank entnommen. Sie wurden im Laufe der Jahre für diverse Ökobilanzstudien des IFEU erarbeitet, validiert und fortgeschrieben (/Kaltschmitt & Reinhardt 1997/, /Fritsche et al. 2004/, /Reinhardt et al. 2006/, /Reinhardt et al. 2007/ und /Bringezu et al. 2008/) und sind allgemein anerkannt. Lediglich für den Düngemittleinsatz beim Zuckerrübenanbau wird auf Daten von /efma 2007/ zurückgegriffen. Die Daten zur Bereitstellung und Nutzung fossiler Energieträger stammen aus /ecoinvent 2007/ und /GEMIS 2006/.

Die Daten für die dritte Kategorie wurden von der Südzucker AG bereitgestellt (/Südzucker 2007-08/) und durch das IFEU auf Vollständigkeit und Konsistenz überprüft. Auf Wunsch des Auftraggebers wurde als Energieträger für alle Konversionsverfahren einheitlich Erdgas angesetzt, um so einen Technologievergleich zu ermöglichen. Die Proteinfuttermittel Vinasse, Dickschlempe und DDGS (Distiller's Dried Grains with Solubles), die sich aus den einzelnen Verfahren ergeben, wurden auf Basis des nutzbaren Proteins (nXP) bewertet (/CropEnergies 2007/, /Weber 2007/ und /DLG 1997/), das Kraftfutter Rübenschnitzel auf Basis der Netto-Energie-Laktation (NEL) (KTBL 2005).

## Ergebnisdarstellung

In den Ergebnisgrafiken werden jeweils die Differenzen zwischen dem Saldo aus Aufwendungen und Gutschriften der Bioenergieträger-Nutzung und den Gutschriften aus den ersetzten fossilen Energieträgern dargestellt und – orientiert an den Bedürfnissen eines „schnellen“ Lesers – kurz diskutiert. Die grafische Darstellung erfolgt in der für die jeweilige Umweltwirkung gebräuchlichen Einheit.

Bei der Beschreibung der Umweltwirkungen (siehe u. a. Tabelle 2-1) sowie der Ergebnisse wird einfach verständlichen Begriffen Vorrang gegenüber wissenschaftlich exakten Darstellungen eingeräumt, beispielsweise „Energieeinsparung“ anstelle von „Ressourceninanspruchnahme der erschöpflicher Energieträger auf der Basis des kumulierten Primärenergieaufwands“.

### 3 Analyisierte Bioenergiepfade und Szenarien

In diesem Kapitel werden die betrachteten Bioenergiepfade (Lebenswege) und Szenarien zur Bewertung der Kuppelprodukte im Detail beschrieben.

#### 3.1 Auswahl der Bioenergiepfade

Im Folgenden werden die Lebenswege der drei nachwachsenden Rohstoffe Triticale, Weizen und Zuckerrübe samt Verwendung der Kuppelprodukte, dem Verarbeitungsprozess und der Art der energetischen Nutzung der Biomasse vorgestellt. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass es sich bei den angesetzten Substitutionen und Äquivalenzprozessen um ein Szenario unter vielen handelt, das zwar realistisch sein mag, aber aufgrund der Unsicherheit bezüglich zukünftiger Entwicklungen die Realität nicht zwingend widerspiegeln muss.

##### 3.1.1 Bioenergie aus Triticale

Triticale, eine Kreuzung aus Winterweizen (*Triticum aestivum* L.) und Winterroggen (*Secale cereale* L.), kann auf verschiedene Weise energetisch genutzt werden. Das in der Regel als Ganzpflanze geerntete Getreide kann zum einen zur Produktion so genannter Biokraftstoffe der 2. Generation wie BTL (Biomass-to-Liquid) oder Ethanol aus Lignozellulose (LCF-Ethanol) eingesetzt werden. Zum anderen kann Triticale auch direkt als Brennstoff in einem Kraftwerk (KW) zur Stromproduktion oder in einem Blockheizkraftwerk (BHKW) zur kombinierten Strom- und Wärmeproduktion mittels Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) genutzt werden. In Abb. 3-1 werden diese vier genannten Nutzungsvarianten für Triticale-Ganzpflanzen schematisch dargestellt. Sie bilden die Lebenswege 1-4 (LW 1-4).

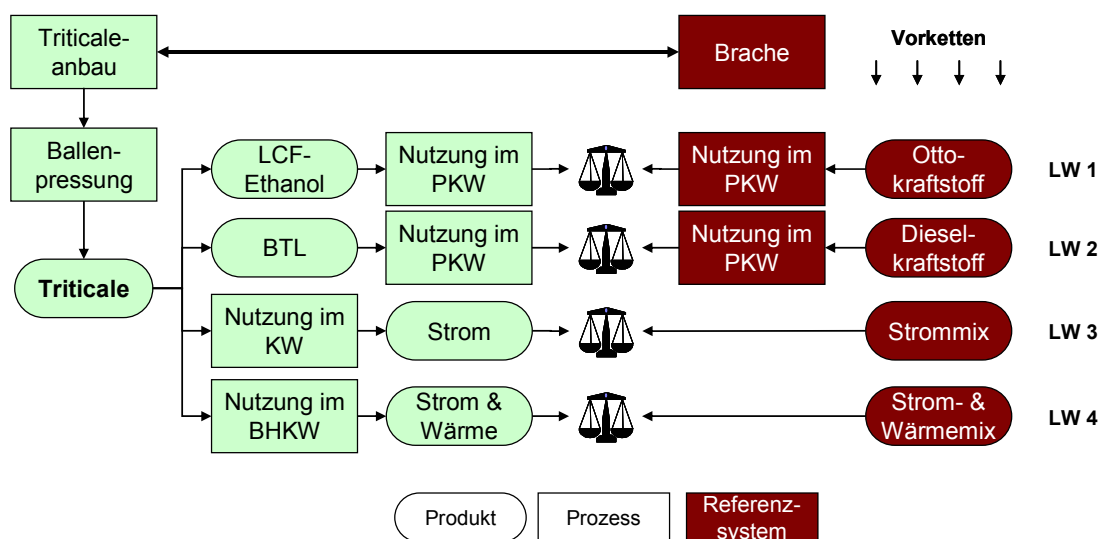


Abb. 3-1 Lebenswegvergleich zwischen herkömmlicher Energiegewinnung und Bioenergiegewinnung aus Triticale-Ganzpflanzen mit jeweils vier Varianten

### 3.1.2 Bioenergie aus Weizen

Bei der Weizenernte wird das Korn in der Regel vom Stroh getrennt. Aus dem stärkehaltigen Korn kann beispielsweise Ethanol hergestellt werden. Da hierfür ein herkömmliches Verfahren angewandt wird, bezeichnet man dieses Ethanol auch als Biokraftstoff der 1. Generation. Das Stroh kann auf verschiedene Weise energetisch genutzt werden, sowohl im Bereich der Biokraftstoffe der 2. Generation als auch im Bereich der Strom- und/oder Wärmegewinnung.

Im Folgenden werden zwei Verfahren zur Ethanolherstellung aus Weizenkorn beschrieben, zunächst das innovative „Weizen I“-Verfahren und anschließend das etablierte „Weizen II“-Verfahren. Bei beiden Verfahren wird zusätzlich zum Weizenkorn auch Dicksaft aus Zuckerrüben eingesetzt, d. h. es handelt sich eigentlich um Ethanol aus Weizenkorn *und* Zuckerrübe. Danach werden vier Möglichkeiten der energetischen Weizenstroh-Nutzung vorgestellt.

#### Bioethanol aus Weizenkorn: Weizen I

Bei diesem Verfahren besteht der Biomasseinput zu 72 Gew.-% aus Weizen und zu 28 Gew.-% aus Zuckerrüben. Zu den Besonderheiten dieses Verfahrens zählen die Energiegewinnung aus Kleie sowie die Abtrennung des Glutens, welches als Lebensmittel genutzt wird und hier herkömmlichen Weizenkleber ersetzt. Die Rübenschnitzel aus der Dicksaftproduktion werden getrocknet, pelletiert und als Trockenschnitzel verkauft, wodurch herkömmliches Kraftfutter (z. B. Gerste) ersetzt wird. Die bei der Ethanolherstellung anfallende Dünnschlempe wird zu Dickschlempe eingedampft und substituiert als Proteinfuttermittel hier herkömmliches Sojaschrot. Sämtliche Kuppelprodukte und die dazugehörigen Äquivalenzprodukte sind in Abb. 3-2 dargestellt.

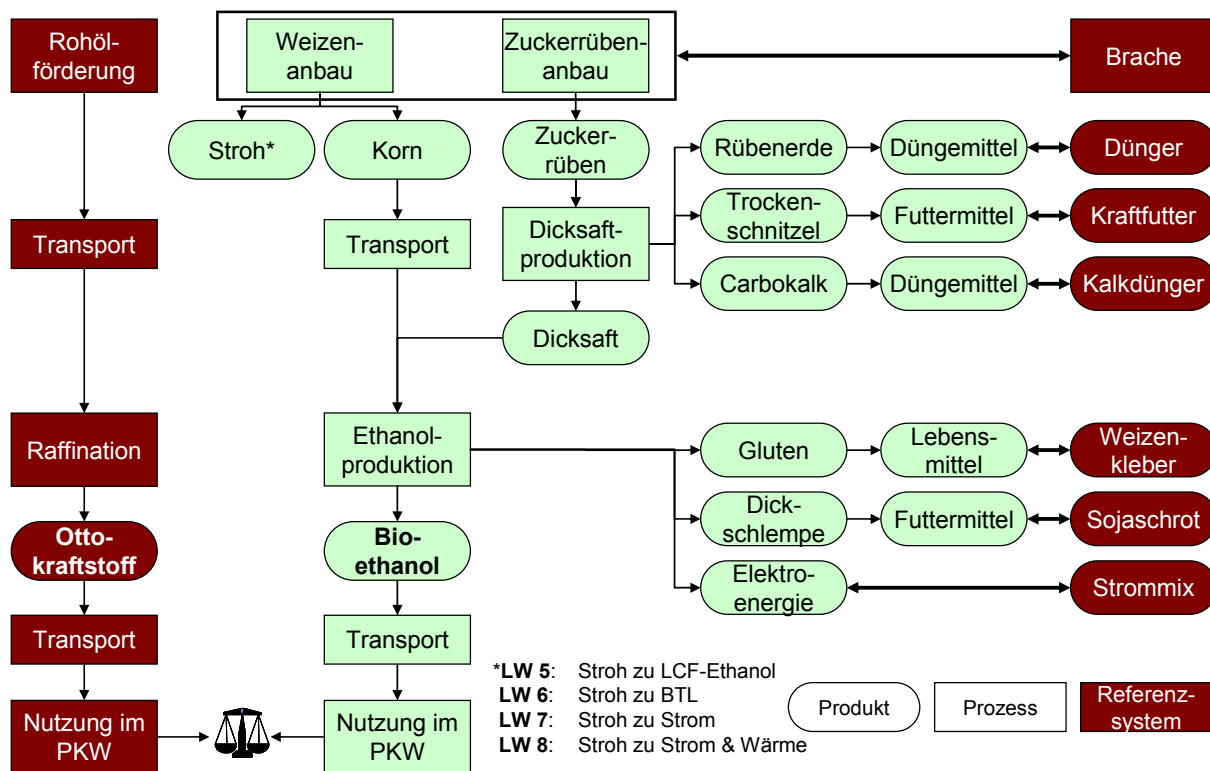


Abb. 3-2 Lebenswegvergleich zwischen Ottokraftstoff und Bioethanol, das nach dem „Weizen I“-Verfahren hergestellt wird.



### Bioethanol aus Weizenkorn: Weizen II

Bei diesem Verfahren wird Ethanol ebenfalls aus Weizen und Zuckerrüben hergestellt, allerdings besteht der Biomasseinput hier zu 78 Gew.-% Weizen und zu 22 Gew.-% aus Zuckerrüben. Im Unterschied zum Weizen I-Verfahren erfolgt hier keine Glutenabtrennung. Das Kuppelprodukt Rübenschnitzel aus der Dicksaftproduktion wird ohne Trocknung und Pelletierung direkt als Krafffutter (Pressschnitzel) eingesetzt und substituiert beispielsweise Gerste. Die bei der Ethanolherstellung anfallende Dünnschlempe wird eingedampft, getrocknet und pelletiert. Dieses als DDGS (Distiller's Dried Grains with Solubles) bezeichnete Kuppelprodukt ersetzt als Proteinfuttermittel hier herkömmliches Sojaschrot. Sämtliche Kuppelprodukte und die dazugehörigen Äquivalenzprodukte sind in Abb. 3-3 dargestellt.

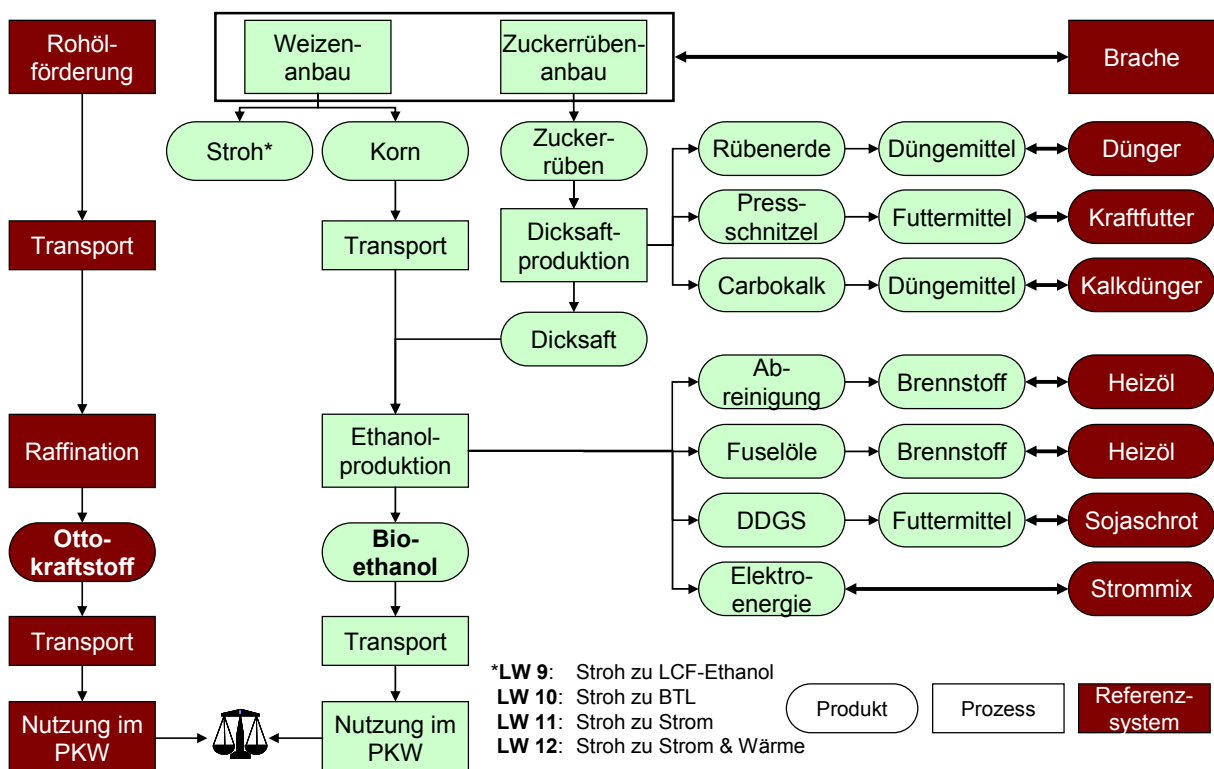


Abb. 3-3 Lebenswegvergleich zwischen Ottokraftstoff und Bioethanol, das nach dem „Weizen II“-Verfahren hergestellt wird.

### Bioenergie aus Weizenstroh

Wie bereits erwähnt, kann neben dem Weizenkorn auch das Stroh energetisch genutzt werden. Dabei wird zugrunde gelegt, dass ein Großteil des bei der Ernte anfallenden Strohs für die Humusreproduktion, d.h. zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit, entweder auf dem Feld verbleibt oder nach einer Nutzung als Einstreu bei der Tierhaltung in Form von Wirtschaftsdünger wieder auf das Feld zurückgebracht wird. Das IFEU begrenzt daher den für energetische Zwecke nutzbaren Strohanteil auf ein Drittel der Gesamtmenge /Münch 2008/. Für die zusammen mit dem Reststroh vom Feld abgefahrenen Nährstoffe ist zusätzlich eine Ausgleichsdüngung erforderlich.

In Abb. 3-4 sind vier Nutzungsvarianten für Weizenstroh schematisch dargestellt, wobei dieselben Nutzungsvarianten wie für Triticale angesetzt werden: LCF-Ethanol (Ethanol aus Lignozellulose), BTL (Biomass-to-Liquid), Strom sowie Strom und Wärme (KWK).

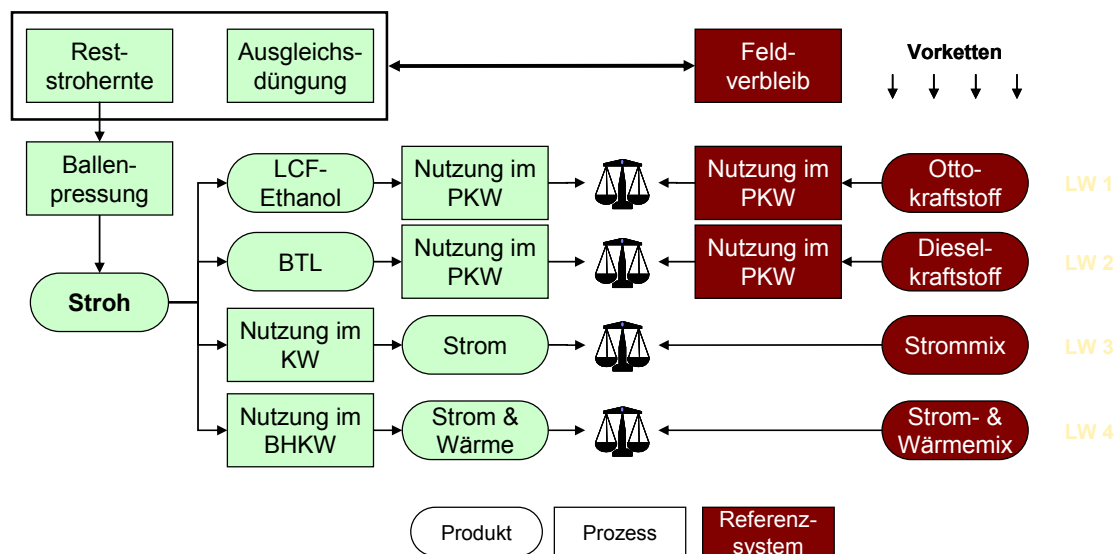


Abb. 3-4 Lebenswegvergleich zwischen herkömmlicher Energiegewinnung und Bioenergiegewinnung aus Reststroh mit jeweils vier Varianten

### Bioenergie aus Weizen

Aus der Kombination der beiden Verfahren zur Ethanolherstellung aus Weizenkorn mit diesen vier Strohnutzungen ergeben sich die Lebenswege 5-8 (Weizen I) und 9-12 (Weizen II). Tabelle 3-1 listet diese Lebenswege übersichtsartig auf.

**Tabelle 3-1** Übersicht über die sich aus der getrennten Nutzung von Weizenkorn und -stroh ergebenden Kombinationsmöglichkeiten (Lebenswege 5-8 und 9-12)

Nr.	Lebensweg	
<b>Weizen I: Kombinierte Nutzung von Korn und Stroh</b>		
	Korn	Stroh
5	Ethanol-Produktion	LCF-Ethanol-Produktion
6	"	BTL-Produktion
7	"	Stromproduktion
8	"	Strom- und Wärmeproduktion (KWK)
<b>Weizen II: Kombinierte Nutzung von Korn und Stroh</b>		
	Korn	Stroh
9	Ethanol-Produktion	LCF-Ethanol-Produktion
10	"	BTL-Produktion
11	"	Stromproduktion
12	"	Strom- und Wärmeproduktion (KWK)

### 3.1.3 Bioenergie aus Zuckerrübe

Zuckerrüben werden als Energiepflanzen in der Regel zur Herstellung von Ethanol angebaut. Dieses Ethanol zählt zu den Biokraftstoffen der 1. Generation, da der Rübenzucker mit einem herkömmlichen Verfahren zu Alkohol vergoren wird.

#### Bioethanol aus Zuckerrübe

Bei diesem Verfahren wird Ethanol nur aus Zuckerrüben gewonnen. Als wichtigste Kuppelprodukte fallen dabei Rübenschnitzel, Carbokalk und Vinasse an. Die Rübenschnitzel werden in Form von Pressschnitzeln direkt als Krafftutter genutzt und substituieren beispielsweise Gerste (vgl. Weizen II). Die bei der Ethanolherstellung anfallende Vinasse wird eingedampft und als proteinreiches Futtermittel verkauft und ersetzt hier herkömmliches Sojaschrot. Sämtliche Kuppelprodukte und die dazugehörigen Äquivalenzprodukte dieses Verfahrens (Lebensweg 13) sind in Abb. 3-5 dargestellt.

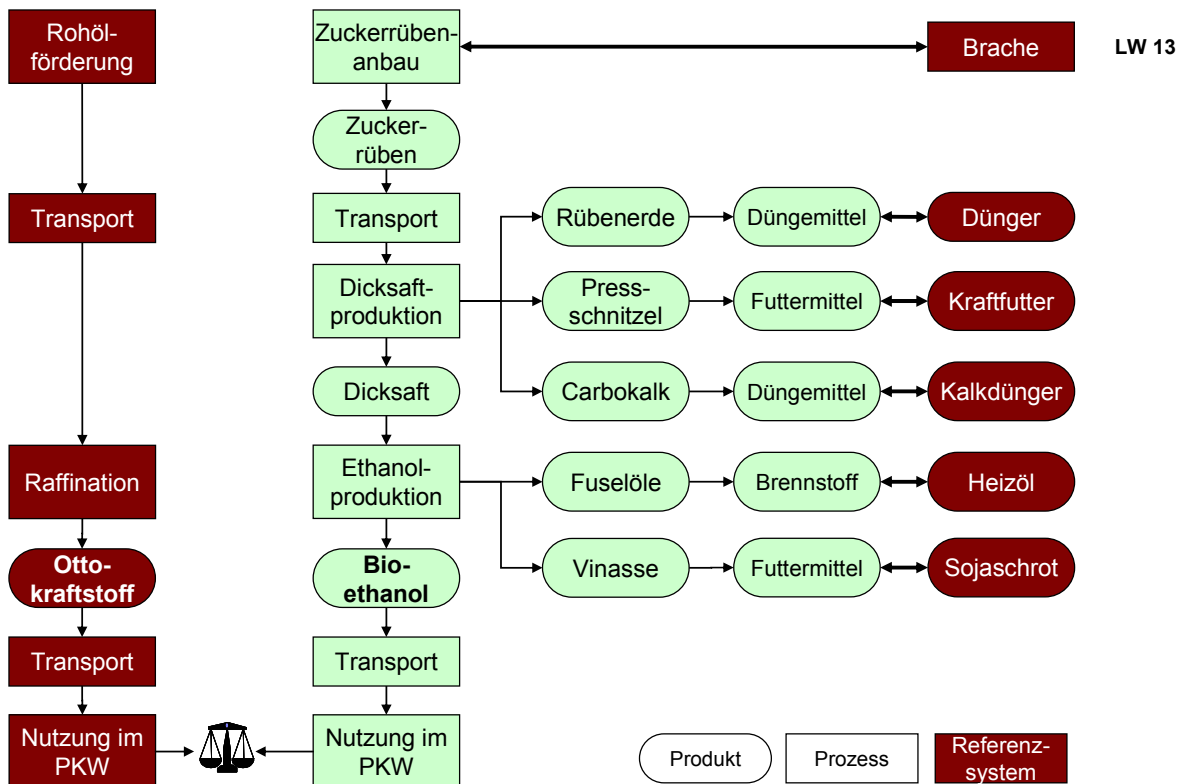


Abb. 3-5 Lebenswegvergleich zwischen Ottokraftstoff und Bioethanol aus Zuckerrüben

## 3.2 Betrachtete Kuppelproduktszenarien

Ziel der Studie ist es u. a. herauszufinden, welche Bioenergiepfade hinsichtlich ihres flächenbezogenen Potenzials zur Einsparung fossiler Energieträger und zur Verminderung von Treibhausgasemissionen besonders vorteilhaft sind und somit eine unter diesen Gesichtspunkten „optimale“ Flächennutzung darstellen.

Grundlage für alle untersuchten Szenarien ist die Hypothese, dass die zum Energiepflanzenanbau (in dieser Studie: Getreide und Zuckerrüben) erforderliche Fläche zur Verfügung steht, da sie aktuell oder zukünftig nicht (mehr) zum Anbau von Nahrungs- und Futtermitteln oder stofflich genutzten nachwachsenden Rohstoffen benötigt wird. Würden auf dieser Fläche keine Energiepflanzen angebaut, bliebe sie ungenutzt, d. h. eine Brache.

Wie viel Fläche zukünftig z. B. für energetische Zwecke verfügbar sein wird, hängt – einmal abgesehen von politischen Entscheidungen wie beispielsweise der Reform der europäischen Zuckermarktordnung – maßgeblich vom technischen und züchterischen Fortschritt in der Landwirtschaft (Stand der Technik und Ertragssteigerungen), der Bevölkerungsentwicklung sowie der Entwicklung des Pro-Kopf-Verbrauchs an Nahrungsmitteln ab. Da die zum Thema zukünftig verfügbare Flächen veröffentlichten Studien deutliche Unterschiede aufweisen, werden die Ergebnisse dieser Studie immer auf einen Hektar Fläche bezogen.

Im Folgenden werden ein Basisszenario (a) und erweitertes Szenario mit zwei Varianten (b / c) erläutert, die sich hinsichtlich des Umgangs mit durch die Kuppelprodukterzeugung „frei werdenden“ Flächen unterscheiden. Darunter sind Flächen zu verstehen, die in Deutschland / Mitteleuropa oder auch beispielsweise in Brasilien nicht mehr zum Anbau von Futtermitteln wie Gerste oder Soja benötigt werden, da diese durch Kuppelprodukte aus der Ethanolherstellung wie Rübenschnitzel, Vinasse, Dickschlempe oder DDGS ersetzt werden.

### 3.2.1 Basisszenario

Im Basisszenario wird davon ausgegangen, dass die aufgrund der bei der Ethanolherstellung anfallenden Kuppelprodukte frei werdende Fläche ungenutzt bleibt, d. h. bei gleich bleibender Nachfrage nicht mehr zum Anbau von herkömmlichen Nahrungs- oder Futtermitteln benötigt wird und daher brach fällt. Das landwirtschaftliche Referenzsystem ist in diesem Fall also eine Brache.

Abb. 3-6 stellt dies beispielhaft für die Ethanolproduktion aus Zuckerrüben dar. Der gelblich hinterlegte Teil der Abbildung zeigt den bereits aus Abb. 3-5 bekannten Lebensweg in vereinfachter Form und enthält nur die „Flächen freisetzenden“ Kuppelprodukte Pressschnitzel und Vinasse. Diese Futtermittel ersetzen Gerste und Sojaschrot, die nun nicht mehr angebaut werden müssen.

Im grau hinterlegten Teil der Abbildung ist die alternative Nutzung dieser Flächen dargestellt: Im Basisszenario ist dies eine Brache. Im Fall des Sojaanbaus ergibt sich eine Besonderheit: Da durch den Wegfall des Anbaus neben dem Sojaschrot auch das bislang ebenfalls erzeugte Sojaöl nicht mehr produziert wird, muss dieses durch ein äquivalentes Produkt ersetzt werden. Für diese Studie wird eine Substitution durch erdölbasiertes technisches Öl angesetzt (hier nicht dargestellt).

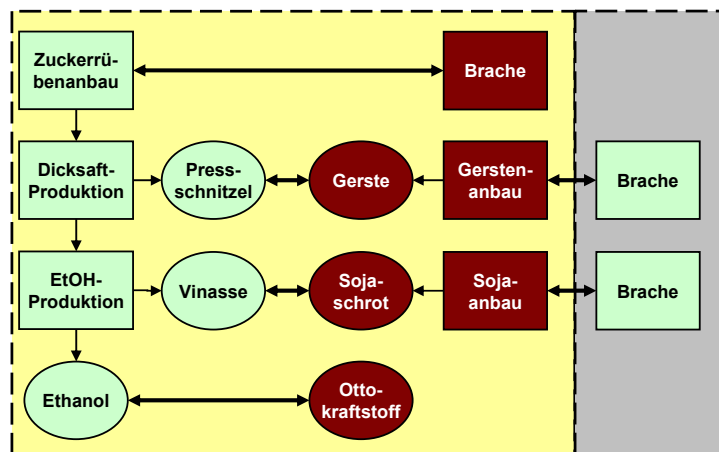


Abb. 3-6 Alternative Flächennutzung im Basisszenario „Brache“. Darstellung für Ethanol aus Zuckerrübe (Lebensweg 13a)

Die entsprechende Darstellung für die Ethanolproduktion aus Weizen ist im Anhang (Abb. 7-1) zu finden. Beim Weizen I-Verfahren entsteht ein zusätzliches, Flächen freisetzendes Kuppelprodukt: Gluten. Dieses ersetzt herkömmlichen Weizenkleber, für den dann kein Weizen mehr angebaut werden muss. Auch hier ist das Referenzsystem eine Brache. Da aber durch den Wegfall des Weizenanbaus neben dem Weizenkleber auch die bislang erzeugte Weizenstärke nicht mehr hergestellt wird, muss diese durch ein Äquivalenzprodukt substituiert werden. Dies geschieht über Kartoffelstärke, deren Produktion einen zusätzlichen Flächenbedarf für den Kartoffelanbau nach sich zieht (siehe Abb. 7-1).

Tabelle 3-2 zeigt für alle 13 Lebenswege die Flächen freisetzenden Kuppelprodukte, deren Äquivalenzprodukte sowie die alternative Flächennutzung der frei werdenden Flächen. Im Basisszenario (a) wird als landwirtschaftliches Referenzsystem (alternative Flächennutzung) eine Brache angesetzt.

**Tabelle 3-2** Alternative Flächennutzung im Basisszenario „Brache“ (a)

LW-Nr.	Rohstoff	Kuppelprodukt	Äquivalenzprodukt	Alt. Flächennutzung
1-4	Triticale	–	–	–
5a-8a	Weizen I	Trockenschnitzel	Gerste	Brache
		Gluten	Weizenkleber	Brache / Kartoffel
		Dickschlempe	Sojaschrot	Brache
9a-12a	Weizen II	Pressschnitzel	Gerste	Brache
		DDGS	Sojaschrot	Brache
13a	Zuckerrübe	Pressschnitzel	Gerste	Brache
		Vinasse	Sojaschrot	Brache

Bei der energetischen Nutzung von Triticale entstehen keinerlei Flächen freisetzende Kuppelprodukte, so dass sich hier das Basisszenario nicht von dem im folgenden Abschnitt beschriebenen erweiterten Szenario unterscheidet.

### 3.2.2 Erweitertes Szenario

Da die in Deutschland und ganz Europa zur Verfügung stehenden Flächen begrenzt sind und eine Nutzungskonkurrenz zwischen Nahrungs- und Futtermittelproduktion, Naturschutz, dem Anbau von Energiepflanzen und dem Anbau von stofflich genutzten nachwachsenden Rohstoffen herrscht (siehe auch /Oertel 2007/), wird ein „erweitertes Szenario“ analysiert, das davon ausgeht, dass die frei werdenden Flächen nicht mehr – wie im Basisszenario angesetzt – brach fallen, sondern für den Anbau von Energiepflanzen für die Ethanolproduktion genutzt werden.

Im Folgenden werden diese alternativen Flächennutzungen für zwei Szenarien präsentiert, die sich durch die Wahl des Äquivalenzprodukts für das Kuppelprodukt Rübenschnitzel unterscheiden: Im einem Fall ersetzen die Rübenschnitzel herkömmliches Kraftfutter aus Gerste (b), im anderen Fall ersetzen sie Rübenschnitzel aus der Zuckerproduktion (c). An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass es sich bei den angesetzten Substitutionen und Äquivalenzprozessen um ein Szenario unter vielen handelt, das zwar realistisch sein mag, aber die zukünftige Realität nicht zwingend widerspiegeln muss.

#### Kraftfutter: Gerste

Abb. 3-7 zeigt wiederum beispielhaft für die Ethanolproduktion aus Zuckerrüben, wie die durch die Kuppelprodukte Pressschnitzel und Vinasse frei werdenden Flächen im erweiterten Szenario „Gerste“ genutzt werden.

Anstelle der nicht mehr benötigten Gerste wird Zuckerrübe für die Ethanolproduktion angebaut. Dabei fallen wiederum Pressschnitzel an, die Gerste ersetzen. Auf der dadurch frei werdenden Fläche werden wiederum Zuckerrüben für die Ethanolproduktion angebaut usw. Diese Reihenentwicklung wird fortgesetzt und nach Änderungen kleiner 1% abgeschnitten.

Anstelle des nicht mehr benötigten Sojas wird Zuckerrohr für die Ethanolproduktion angebaut. Die Ethanolproduktion erfolgt aufgrund der Bagassennutzung energieautark. Das bislang ebenfalls erzeugte Sojaöl wird wie im Basisszenario durch erdölbasiertes technisches Öl substituiert (nicht dargestellt).

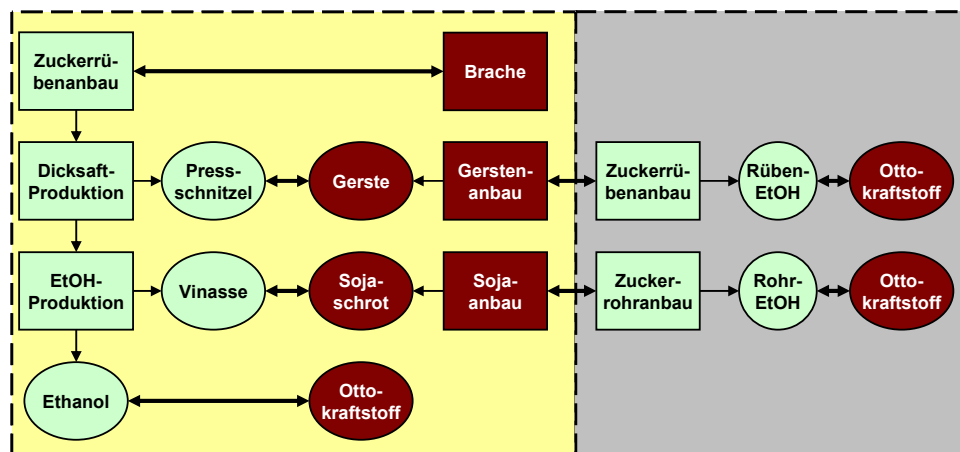


Abb. 3-7 Alternative Flächennutzung im erweiterten Szenario „Gerste“. Darstellung für Ethanol aus Zuckerrübe (Lebensweg 13b)

Die entsprechende Darstellung für die Ethanolproduktion aus Weizen ist im Anhang (Abb. 7-2) zu finden. Beim Weizen I-Verfahren entsteht mit Gluten ein Flächen freisetzendes Kuppelprodukt. Dadurch muss kein Weizen mehr für die Produktion von Weizenkleber angebaut werden; stattdessen kann er für die Ethanolproduktion nach demselben Verfahren genutzt werden. Da dabei wiederum Gluten anfällt, ergibt sich auch hier eine Reihenentwicklung, die bis zu einer Änderung kleiner 1% fortgesetzt wird. Die bislang ebenfalls erzeugte Weizenstärke wird wie im Basisszenario durch Kartoffelstärke ersetzt, deren Produktion wiederum einen zusätzlichen Flächenbedarf für den Kartoffelanbau nach sich zieht.

Tabelle 3-3 zeigt für alle 13 Lebenswege die Flächen freisetzenden Kuppelprodukte, deren Äquivalenzprodukte sowie die alternative Flächennutzung der frei werdenden Flächen.

**Tabelle 3-3** Alternative Flächennutzung für das erweiterte Szenario „Gerste“ (b)

LW-Nr.	Rohstoff	Kuppelprodukt	Äquivalenzprodukt	Alt. Flächennutzung	Äquivalenzprodukt
1-4	Triticale	–	–	–	–
5b-8b	Weizen I	Trockenschnitzel	Gerste	Zuckerrübe → Ethanol	Ottokraftstoff
		Gluten	Weizenkleber	Weizen → Ethanol	Ottokraftstoff
		Dickschlempe	Sojaschrot	Zuckerrohr → Ethanol	Ottokraftstoff
9b-12b	Weizen II	Pressschnitzel	Gerste	Zuckerrübe → Ethanol	Ottokraftstoff
		DDGS	Sojaschrot	Zuckerrohr → Ethanol	Ottokraftstoff
13b	Zuckerrübe	Pressschnitzel	Gerste	Zuckerrübe → Ethanol	Ottokraftstoff
		Vinasse	Sojaschrot	Zuckerrohr → Ethanol	Ottokraftstoff

**Kraftfutter: Rübenschnitzel aus der Zuckerherstellung**

Abb. 3-8 zeigt wiederum beispielhaft für die Ethanolproduktion aus Zuckerrüben, wie die durch die Kuppelprodukte Pressschnitzel und Vinasse frei werdenden Flächen im erweiterten Szenario „Rübenschnitzel“ genutzt werden.

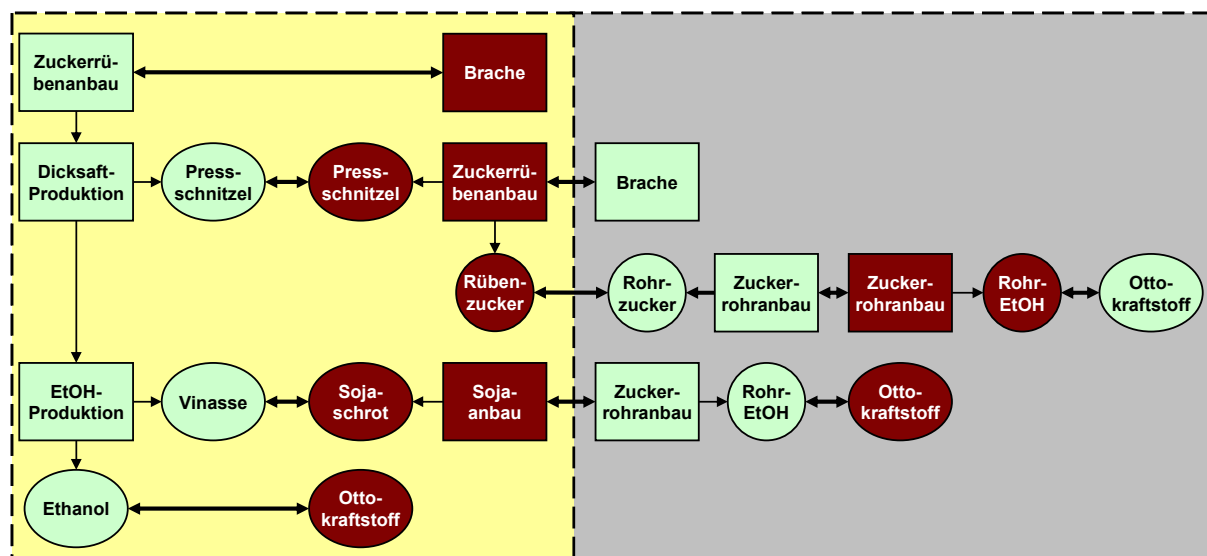


Abb. 3-8 Alternative Flächennutzung im erweiterten Szenario „Rübenschnitzel“. Darstellung für Ethanol aus Zuckerrübe (Lebensweg 13c)

Die Pressschnitzel aus der Ethanolherstellung ersetzen Pressschnitzel aus der Zuckerproduktion. Durch den Wegfall dieser Zuckerproduktion werden Flächen frei, die brach fallen. Auf diesen wird aber im Gegensatz zum Szenario „Gerste“ hier keine Zuckerrübe für die Ethanolproduktion angebaut, da die dabei anfallenden Pressschnitzel wiederum solche aus der Zuckerproduktion ersetzen würden. Diese Kette würde sich dann quasi ad infinitum fortsetzen, d. h. es würde bei jedem Schritt ein weiterer Hektar Anbaufläche in Anspruch genommen. Aus diesem Grund können die frei werdenden Flächen im Szenario „Rübenschnitzel“ nicht für den Anbau von Zuckerrübe für die Ethanolproduktion genutzt werden.

Der bislang aus den Zuckerrüben erzeugte Zucker wird durch Rohrzucker aus Brasilien ersetzt, wodurch dort weniger Zuckerrohrflächen für die Ethanolproduktion zur Verfügung stehen. Infolgedessen kann in Brasilien weniger Ottokraftstoff ersetzt werden, was zu einer „Schlechtschrift“ für die Rübenschnitzel aus der Dicksaftproduktion führt. Analog zum Szenario „Gerste“ wird auch hier anstelle des nicht mehr benötigten Sojas nun Zuckerrohr für die Ethanolproduktion angebaut. Die entsprechende Darstellung für die Ethanolproduktion aus Weizen ist im Anhang (Abb. 7-3) zu finden. Auch hier wird wie im Szenario „Gerste“ anstelle der Produktion von Weizenkleber eine Ethanolproduktion angesetzt.

Anstelle der Substitution von Pressschnitzeln aus der Zuckerproduktion mit solchen aus der Ethanolherstellung könnte man auch direkt den Zuckerrübenanbau für Zucker demjenigen für Ethanol gegenüberstellen, da sich die beiden Brachen in der Bilanz gegenseitig aufheben (braune Brache = Gutschrift, grüne Brache = „Schlechtschrift“). Dies entspräche dann einer Situation, die sich möglicherweise aus der Reform der europäischen Zuckermarktordnung ergibt, allerdings würde diesem möglichen Szenario dann eine andere Fragestellung zugrunde liegen.

Tabelle 3-4 zeigt für alle 13 Lebenswege die Flächen freisetzenden Kuppelprodukte, deren Äquivalenzprodukte sowie die alternative Flächennutzung der frei werdenden Flächen.

**Tabelle 3-4** Alternative Flächennutzung für das erweiterte Szenario „Rübenschnitzel“ (c)

LW-Nr.	Rohstoff	Kuppelprodukt	Äquivalenzprodukt	Alt. Flächennutzung	Äquivalenzprodukt
1-4	Triticale	–	–	–	–
5c-8c	Weizen I	Trockenschnitzel	Rübenschnitzel	Zuckerrohr	Ottokraftstoff
		Gluten	Weizenkleber	Weizen → Ethanol	Ottokraftstoff
		Dickschlempe	Sojaschrot	Zuckerrohr → Ethanol	Ottokraftstoff
9c-12c	Weizen II	Pressschnitzel	Rübenschnitzel	Brache / Zuckerrohr	Ottokraftstoff
		DDGS	Sojaschrot	Zuckerrohr → Ethanol	Ottokraftstoff
13c	Zuckerrübe	Pressschnitzel	Rübenschnitzel	Zuckerrohr	Ottokraftstoff
		Vinasse	Sojaschrot	Zuckerrohr → Ethanol	Ottokraftstoff



### 3.2.3 Alle Szenarien im Überblick

Zur Beantwortung der Frage, welche Bioenergiepfade eine optimale Flächennutzung für einen Hektar Brachfläche darstellen, müssen im Rahmen dieser Studie eine möglichst realitätsnahe Bewertung der Kuppelprodukte vorgenommen und geeignete Systemgrenzen gewählt werden. Aufgrund der Unsicherheit bezüglich zukünftiger Entwicklungen, kann die Realität aber nur bedingt abgebildet werden. Dies geschieht daher anhand von Szenarien, wie sie in den vorigen Abschnitten 3.2.1 und 3.2.2 dokumentiert sind. Dabei muss klar sein, dass es sich hierbei jeweils nur um eine mögliche Kuppelproduktbewertung handelt, d. h. jedem Kuppelprodukt wird nur ein mögliches Äquivalenzprodukt mit einer möglichen Nutzung der ggf. freigesetzten Flächen gegenübergestellt. Diese Szenarien führen somit zu spezifischen Ergebnissen, die nicht verallgemeinert werden können. Gleiches gilt auch für den Fall einer anderen Fragestellung, bei der ggf. andere Systemgrenzen zum Tragen kommen, welche wiederum zu unterschiedlichen Ergebnissen führen.

In Tabelle 3-5 sind alle Kombinationen aus den dreizehn betrachteten Bioenergiepfade (Lebenswege) und den drei Szenarien zur Bewertung der Kuppelprodukte übersichtsartig zusammengefasst. Darin sind allerdings die jeweiligen Äquivalenzprodukte aus Tabelle 3-2 bis Tabelle 3-4 nicht aufgeführt. Insgesamt werden also 31 Kombinationen betrachtet, wobei für die Lebenswege 5-13 drei verschiedene Szenarien zur Auswahl stehen, die auf einer unterschiedlichen Bewertung der Kuppelprodukte beruhen. In Ermangelung von Flächen freisetzenden Kuppelprodukten kommt bei den Lebenswegen 1-4 nur das Szenario „Brache“ in Frage.

**Tabelle 3-5** Übersicht über die betrachteten Lebenswege und Kuppelproduktszenarien

Lebensweg	Referenzsystem		
	Basisszenario a: „Brache“	Erweiterung b: „Gerste“	Erweiterung c: „Rübenschnitzel“
<b>Triticale: Ganzpflanzennutzung</b>			
LCF-Ethanol	1		
BTL	2		
Strom	3		
Strom und Wärme	4		
<b>Weizen I: Kombinierte Nutzung von Korn und Stroh</b>			
<b>Korn</b>		<b>Stroh</b>	
Ethanol	5a	LCF-Ethanol	5b
“	6a	BTL	6b
“	7a	Strom	7b
“	8a	Strom und Wärme	8b
			5c
			6c
			7c
			8c
<b>Weizen II: Kombinierte Nutzung von Korn und Stroh</b>			
<b>Korn</b>		<b>Stroh</b>	
Ethanol	9a	LCF-Ethanol	9b
“	10a	BTL	10b
“	11a	Strom	11b
“	12a	Strom und Wärme	12b
			9c
			10c
			11c
			12c
<b>Zuckerrübe</b>			
Ethanol	13a		13b
			13c

### 3.3 Sensitivitätsanalysen

Zur Analyse des Einflusses einzelner Parameter auf die Ergebnisse der Lebenswegvergleiche werden Sensitivitätsanalysen vorgenommen. Nachfolgend werden diese Analysen für (1) die Ethanolproduktion aus Weizenkorn und Zuckerrüben, (2) die Bioenergiegewinnung aus Triticale und Weizenstroh und (3) die Bereitstellung von Biomasse dargestellt.

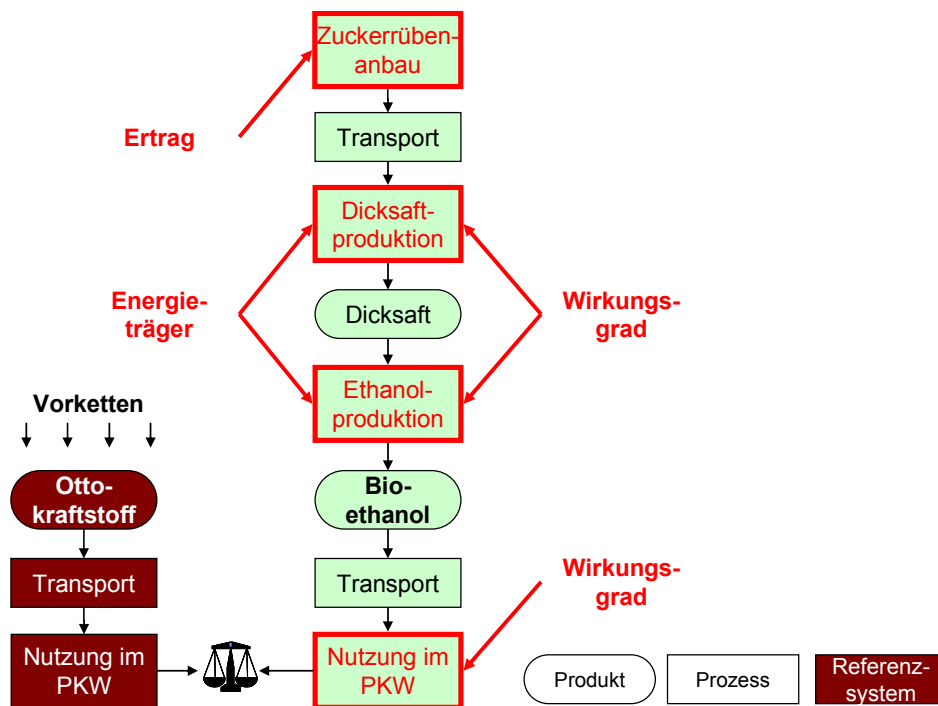


Abb. 3-9 Sensitivitätsanalysen bei Nutzung von Zuckerrübe und Weizenkorn zur Ethanolproduktion

Für die Ethanolproduktion aus Weizenkorn und Zuckerrüben werden drei verschiedene Sensitivitätsanalysen durchgeführt (siehe Abb. 3-9):

- Bei der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) können verschiedene **Energieträger** zum Einsatz kommen. Um einen Technologievergleich zu ermöglichen, wurde für die Berechnungen einheitlich der Energieträger Erdgas angesetzt. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wird geprüft, wie sich der aus Sicht des Klimaschutzes ungünstigste Energieträger – Braunkohle – auf die Ergebnisse auswirkt.
- Der **Wirkungsgrad** der fossilen Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wird zunächst brennstoffunabhängig gleich hoch angesetzt /Südzucker 2007-08/. In der Regel lassen sich gasförmige Brennstoffe jedoch mit einem höheren Wirkungsgrad in Energie umwandeln als Festbrennstoffe, was bei gleichem Energiebedarf einen geringeren Brennstoffverbrauch bedeutet. Daher wird in einer Sensitivitätsanalyse untersucht, wie sich unterschiedlich hohe Wirkungsgrade (82% für Braunkohle und 92% für Erdgas) auf die Ergebnisse auswirken.

- Die Substitution von Ottkraftstoff durch Ethanol erfolgt normalerweise im Verhältnis 1 : 1 auf Basis des unteren Heizwerts. Neueste wissenschaftliche Studien deuten jedoch auf eine Erhöhung der Fahrleistung von ethanolbetriebenen Fahrzeugen hin (z. B. /List et al. 2007/ und /Geringer et al. 2008/). Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wird daher exemplarisch ein 6% höherer **Wirkungsgrad** für Ethanol angesetzt (Substitution 1 : 0,94).

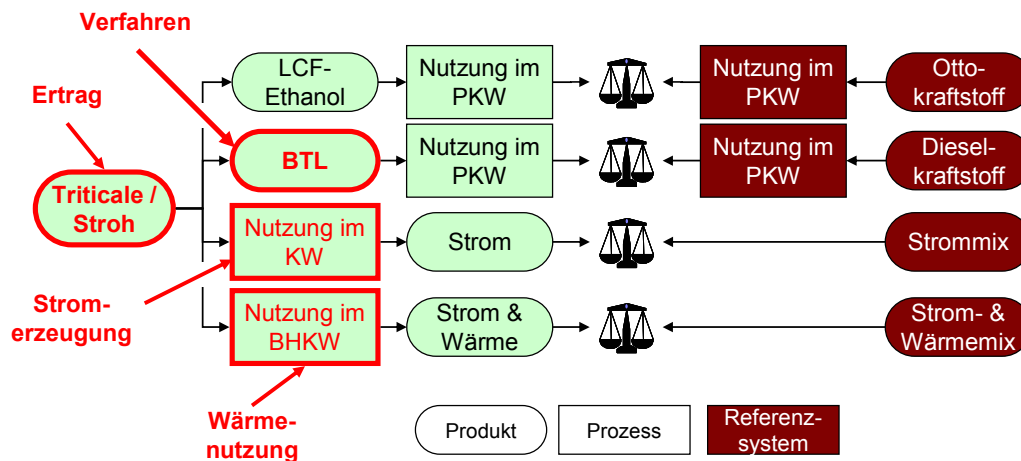


Abb. 3-10 Sensitivitätsanalysen bei Nutzung von Triticale-Ganzpflanze und Weizenstroh zur Energieproduktion

Für die Biokraftstoff- und Bioenergieproduktion aus Triticale und Weizenstroh werden drei verschiedene Parametervariationen durchgeführt (siehe Abb. 3-10):

- Bei der **BTL-Produktion** gibt es verschiedene Verfahren, die unterschiedliche Auswirkungen auf Energieeinsparung und Treibhauseffekt haben. Die Unterschiede resultieren im Wesentlichen aus verschiedenen Wirkungsgraden und unterschiedlicher Anlagentechnik. Beides wird im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse variiert.
- Die **Stromerzeugung** aus Triticale oder Weizenstroh wird im Standardfall in einem Biomasse-Kraftwerk erfolgen. In einer Variation wird untersucht, wie sich eine Mitverbrennung der Biomasse in einem Steinkohle-Kraftwerk auf die Bilanzergebnisse auswirken kann.
- Oftmals ist bei einem Blockheizkraftwerk (BHKW) keine signifikante **Wärmenutzung** möglich, da sich keine Abnehmer für die Wärme finden. Daher wurde generell nur eine 20%-ige Wärmenutzung angesetzt. Als Variation wird gezeigt, welche Folgen hinsichtlich Ressourcenschonung und Klimaschutz eine 80%-ige Wärmenutzung hat.

Bei der Bereitstellung von Biomasse kommt den Flächenerträgen eine große Bedeutung zu. Durch den technischen und züchterischen Fortschritt in der Landwirtschaft konnten sie in der Vergangenheit kontinuierlich gesteigert werden.

- Da der für die Studie gewählte zeitliche Bezug (2020) in der Zukunft liegt, werden die Erträge entsprechend höher angesetzt. Um die Auswirkungen dieser gesteigerten Erträge zu verdeutlichen, werden sie im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse den Erträgen für die Jahre 2005 und 2010 gegenübergestellt.

## 4 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Energie- und Treibhausgasbilanzen für die in Kapitel 3 beschriebenen Bioenergiepfade und Fragestellungen präsentiert. Zunächst werden die Ergebnisse für das Basisszenario vorgestellt, danach die erweiterten Szenarien analysiert und abschließend wird ein Vergleich aller Szenarien vorgenommen.

### 4.1 Vergleiche: Basisszenario

Wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben, wird im Basisszenario zugrunde gelegt, dass die Fläche, die aufgrund der bei der Ethanolherstellung anfallenden Kuppelprodukte frei wird, brach fällt. Nachfolgend wird am Beispiel von Ethanol aus Zuckerrübe das Zustandekommen der Ergebnisbalken detailliert erläutert. Anschließend werden die Ergebnisse für alle 13 Lebenswege präsentiert. Der letzte Abschnitt widmet sich dann den Sensitivitätsanalysen und gibt Auskunft darüber, wie sich einzelne variierte Parameter auf das Ergebnis auswirken.

#### 4.1.1 Bioethanol aus Zuckerrübe im Detail (Basisszenario)

Abb. 4-1 zeigt die Vor- und Nachteile von Ethanol aus Zuckerrüben gegenüber fossilem Ottokraftstoff für die Umweltwirkung Treibhauseffekt, ausgedrückt in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Hektar und Jahr. Dazu sind zunächst im ersten Balken die Aufwendungen (rechts des Ursprungs) und Gutschriften (links des Ursprungs) für Ethanol aus Zuckerrüben dargestellt. Der zweite Balken zeigt die Aufwendungen für das Äquivalenzprodukt, fossilen Ottokraftstoff. Der darunter abgebildete Ergebnissaldo (Saldo 13a) ist die Differenz zwischen dem biogenen und fossilen Kraftstoff und damit das Gesamtergebnis für diesen Lebenswegvergleich. Er gibt an, wie viele CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Hektar und Jahr durch den Einsatz von Ethanol aus Zuckerrüben anstelle von Ottokraftstoff vermieden werden können.

#### Ergebnisse

- Durch den Einsatz von Ethanol aus Zuckerrüben anstelle von fossilem Ottokraftstoff können CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von ca. 8 t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Hektar und Jahr vermieden werden.
- Die Aufwendungen für die Ethanolproduktion aus Zuckerrüben ergeben sich im Wesentlichen aus dem Zuckerrübenanbau und dem Konversionsprozess. Dabei trägt besonders der Einsatz fossiler Energieträger bei der Dicksaft- und Ethanolproduktion zu Emission von Treibhausgasen bei. Hilfsstoffe wie Salzsäure oder Schwefelsäure spielen dagegen eher eine untergeordnete Rolle.
- Die Gutschriften werden vor allem durch die Pressschnitzel und die Vinasse bestimmt, die als Futtermittel für Rinder eingesetzt werden.

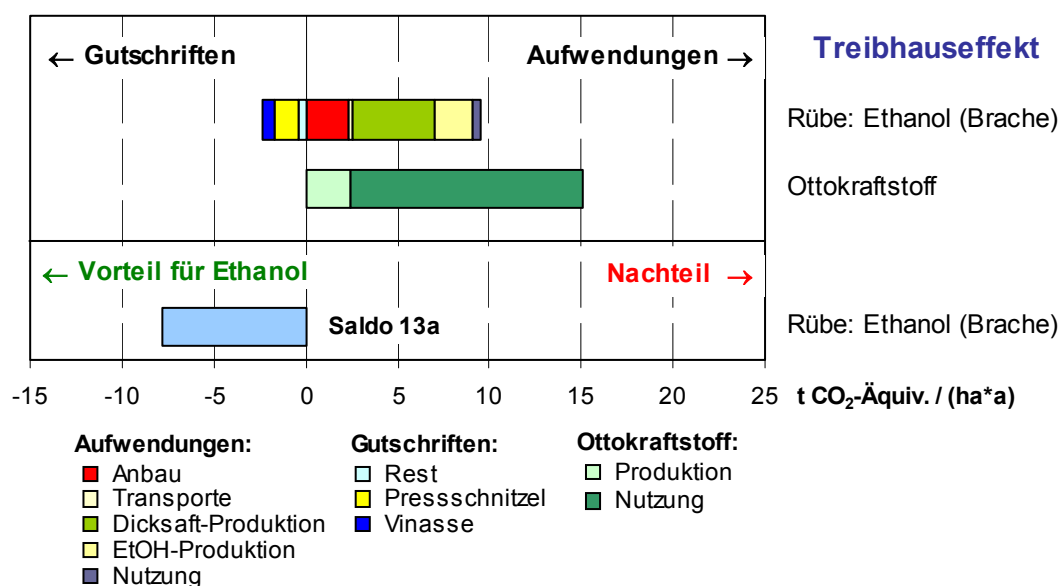


Abb. 4-1 Detailliertes Ergebnis des Lebenswegvergleichs zwischen Ethanol aus Zuckerrübe und Ottokraftstoff für das Basisszenario „Brache“

**Lesebeispiel für den Balken „Rübe: Ethanol (Brache)“ für Treibhauseffekt:**

Bei der Produktion und Nutzung von Ethanol aus Zuckerrübe werden einerseits ca. 9,5 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Hektar und Jahr emittiert, andererseits etwa 2,3 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Hektar und Jahr durch die Nutzung der Kuppelprodukte vermieden. Die Aufwendungen für die Produktion und Nutzung von Ottokraftstoff ergeben Emissionen von ca. 15 t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Hektar und Jahr. Im Saldo ergibt sich so durch die Nutzung von Ethanol aus Zuckerrüben anstelle von Ottokraftstoff eine Vermeidung von 7,8 t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Hektar und Jahr.

**4.1.2 Basisszenario**

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse aller 13 Lebenswegvergleiche für das Basisszenario präsentiert. Abb. 4-2 zeigt die Vor- und Nachteile aller Bioenergieträger gegenüber ihren jeweiligen fossilen Äquivalenzprodukten für die Umweltwirkungen Energieeinsparung und Treibhauseffekt.

Die grafische Ergebnisdarstellung erfolgt dabei in Form von Salden, die auf die in Abschnitt 4.1.1 beschriebene Weise ermittelt wurden. Der letzte Balken in Abb. 4-2, der die vermiedenen Treibhausgasemissionen für Ethanol aus Zuckerrübe zeigt, ist daher mit dem Saldo aus Abb. 4-1 (Saldo 13a) identisch. Die Balken für die Ethanolproduktion aus Weizenkorn nach dem Weizen I-Verfahren sind nochmals unterteilt, um den Beitrag der Gutschrift für Gluten (linker Teilbalken) hervorzuheben.

Anhand dieser Abbildung können eine Reihe von Einzelergebnissen abgeleitet werden, wobei verschiedene Biomasserohstoffe, Konversionsverfahren und Zielprodukte hinsichtlich Energieeinsparung und Treibhauseffekt verglichen werden können.

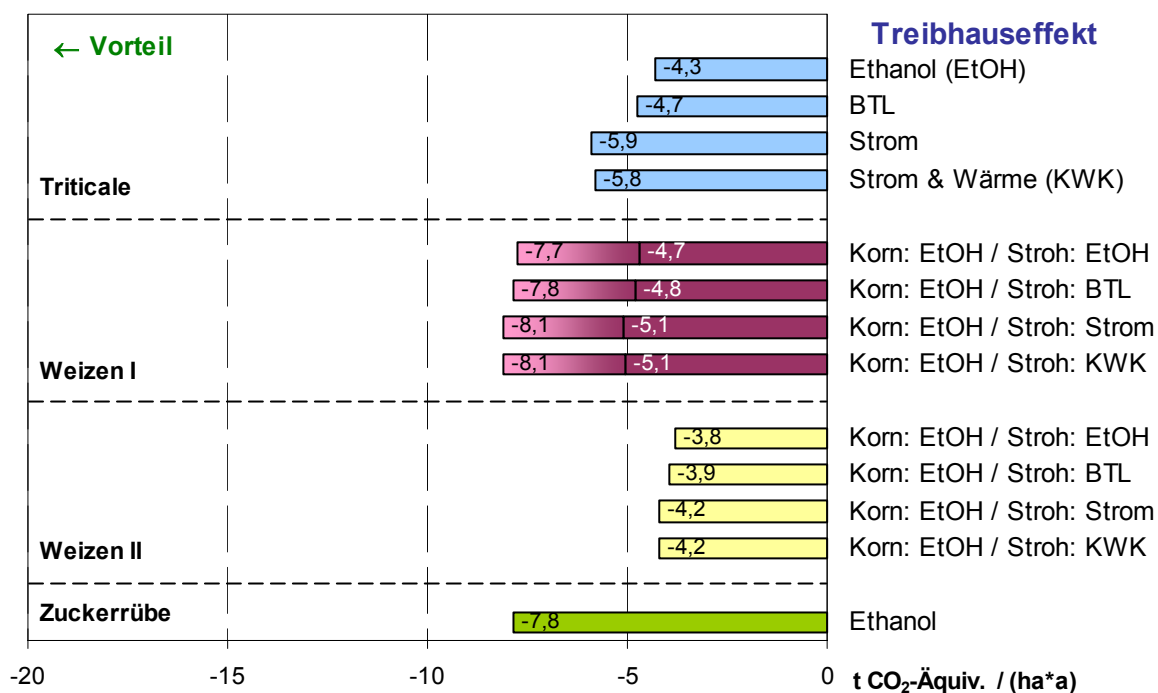
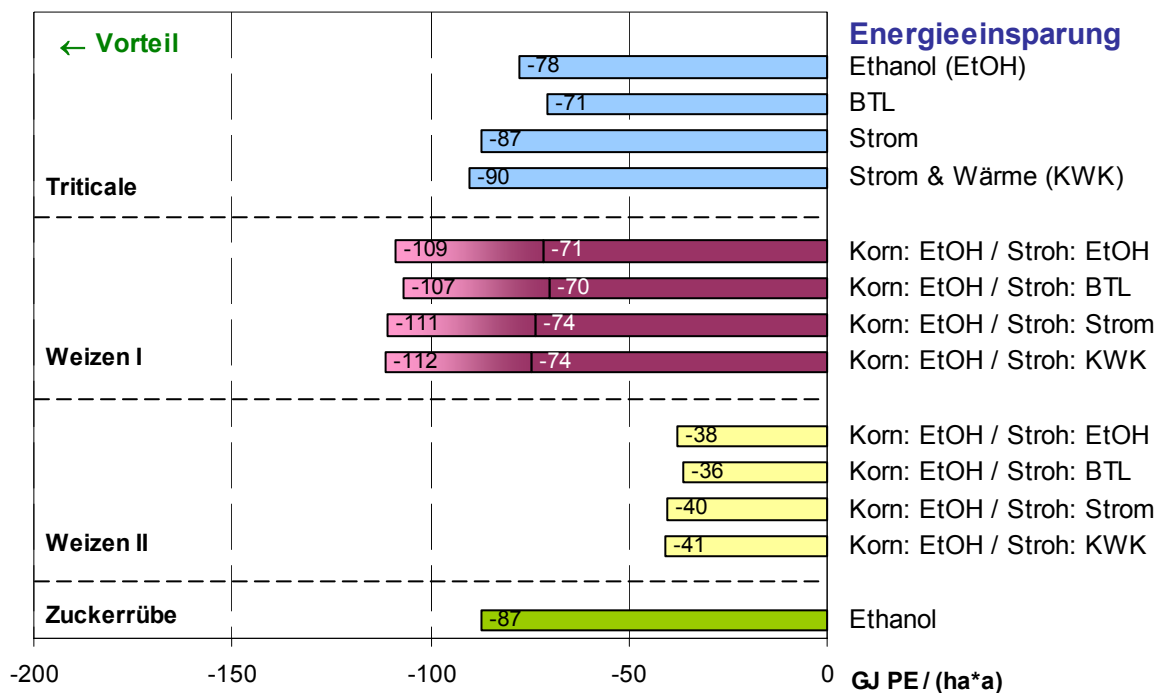


Abb. 4-2 Ergebnisse aller Lebenswegvergleiche für das Basisszenario „Brache“. Linker Teilbalken bei Weizen I = Gutschrift für Gluten; PE = Primärenergie

**Lesebeispiel für den ersten blauen Balken „Ethanol – Triticale“ für Treibhauseffekt:**

Wird Ethanol aus Triticale-Ganzpflanze anstelle von Ottokraftstoff verwendet, können ca. 4,3 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Hektar und Jahr eingespart werden.

## Ergebnisse

Sämtliche Lebenswegvergleiche der untersuchten Bioenergieträger mit ihrem fossilen Pendant führen zu einer Einsparung von fossilen Energieressourcen und einer Vermeidung von Treibhausgasemissionen, wobei sich die Höhe der Einsparung bzw. Vermeidung jedoch deutlich unterscheidet. Folgende Einzelergebnisse können festgehalten werden:

- **Vergleich der Rohstoffe:** Bei der Ethanolherstellung führt die Verwendung von Weizen mit dem Weizen I-Verfahren zur höchsten Energieeinsparung, gefolgt von Zuckerrübe und Triticale. Dasselbe Muster zeigt sich auch beim Treibhauseffekt, wobei hier kein Unterschied zwischen Weizen I und Zuckerrübe festzustellen ist. Da die Ergebnisse jedoch in hohem Maße szenarienabhängig sind (siehe schlechtes Abschneiden des Weizen II-Verfahrens), lässt sich daraus kein genereller Vorteil für Zucker- und Stärkepflanzen (Zuckerrübe und Weizen) gegenüber Lignozellulosepflanzen (Triticale) ableiten.
- **Vergleich der Verfahren:** Der Vergleich der beiden untersuchten Verfahren zur Ethanolherstellung aus Weizenkorn zeigt deutliche Vorteile für das Verfahren mit Kleie- und Glutenabtrennung (Weizen I), die aber nur zum Teil verfahrensbedingt sind, und u. a. auf die energieintensive Trocknung der Schlempe zu DDGS beim Weizen II-Verfahren sowie den weitgehenden Ersatz fossiler Energieträger durch die energetische Nutzung der Kleie beim Weizen I-Verfahren zurückzuführen sind. Der weitaus größere Teil ist szenarienabhängig: So kommt beispielsweise die hohe Gutschrift für Gluten, dessen Flächenertrag nur ca. 700 kg / (ha\*a) beträgt, dadurch zustande, dass für die Produktion von Kartoffelstärke (als Ersatz für die nicht mehr erzeugte Weizenstärke) Äquivalenzprozesse mit Stoffströmen im Tonnenmaßstab verursacht, die letztendlich die Bilanz dominieren (linke Teilbalken). Weitere Details finden sich in Abschnitt 3.2.1 sowie im Anhang (Abb. 7-1).
- **Vergleich der Produkte:** Sowohl bei Triticale als auch bei Stroh lässt sich bei stationärer Nutzung zur Strom- bzw. Strom- und Wärmeenergiegewinnung mehr Energie einsparen und Treibhausgasemissionen vermeiden als bei mobiler Nutzung in Form von flüssigen Biokraftstoffen. Innerhalb des Energiesektors spielt es bei geringer Wärmenutzung jedoch keine große Rolle, ob nur Strom oder Strom und Wärme produziert werden, ebenso im Verkehrssektor, wo Ethanol aus Lignozellulose und BTL ähnliche Ergebnisse aufweisen.

## Fazit

Die Vorteile der Bioenergieträger gegenüber ihren fossilen Pendanten können nur teilweise auf die Kombination aus Biomasserohstoff, Konversionsverfahren und Zielprodukt zurückgeführt werden und sind in hohem Maße abhängig von den zugrunde gelegten Kuppelprodukt-szenarien und sonstigen Randbedingungen. Wie hier anhand der angesetzten Gutschrift für Gluten zu sehen, können einzelne Systeme bei der Äquivalenzprozessbilanzierung extreme Auswirkungen auf die Ergebnisse verursachen.

Unter den hier gewählten Randbedingungen schneidet die Ethanolherstellung aus Weizen (nach dem Weizen I-Verfahren) und Zuckerrüben besser ab als die Bioenergiegewinnung aus Triticale. Inwiefern sich daraus jedoch allgemeingültige, belastbare Aussagen ableiten lassen, muss durch Sensitivitätsanalysen (siehe folgender Abschnitt 4.1.3) abgesichert werden, bei denen Variationen einzelner Randbedingungen durchgeführt werden. Ebenso müssen sie noch vor dem Hintergrund der tatsächlichen Flächeninanspruchnahme diskutiert werden (siehe Abschnitt 4.2.3).

### 4.1.3 Sensitivitätsanalysen

Im Rahmen von Sensitivitätsanalysen (siehe Kapitel 3.3) werden hier *einzelne* Parameter, d.h. keine Parameter-Kombinationen, variiert. Dies führt zu Ergebnis-Bandbreiten für das Basisszenario, die in Abb. 4-3 mit schwarzen Balken dargestellt sind (ohne Variation des Ertrags). Ihr Zustandekommen ist im Anhang (Kapitel 7.2) ausführlich dokumentiert.

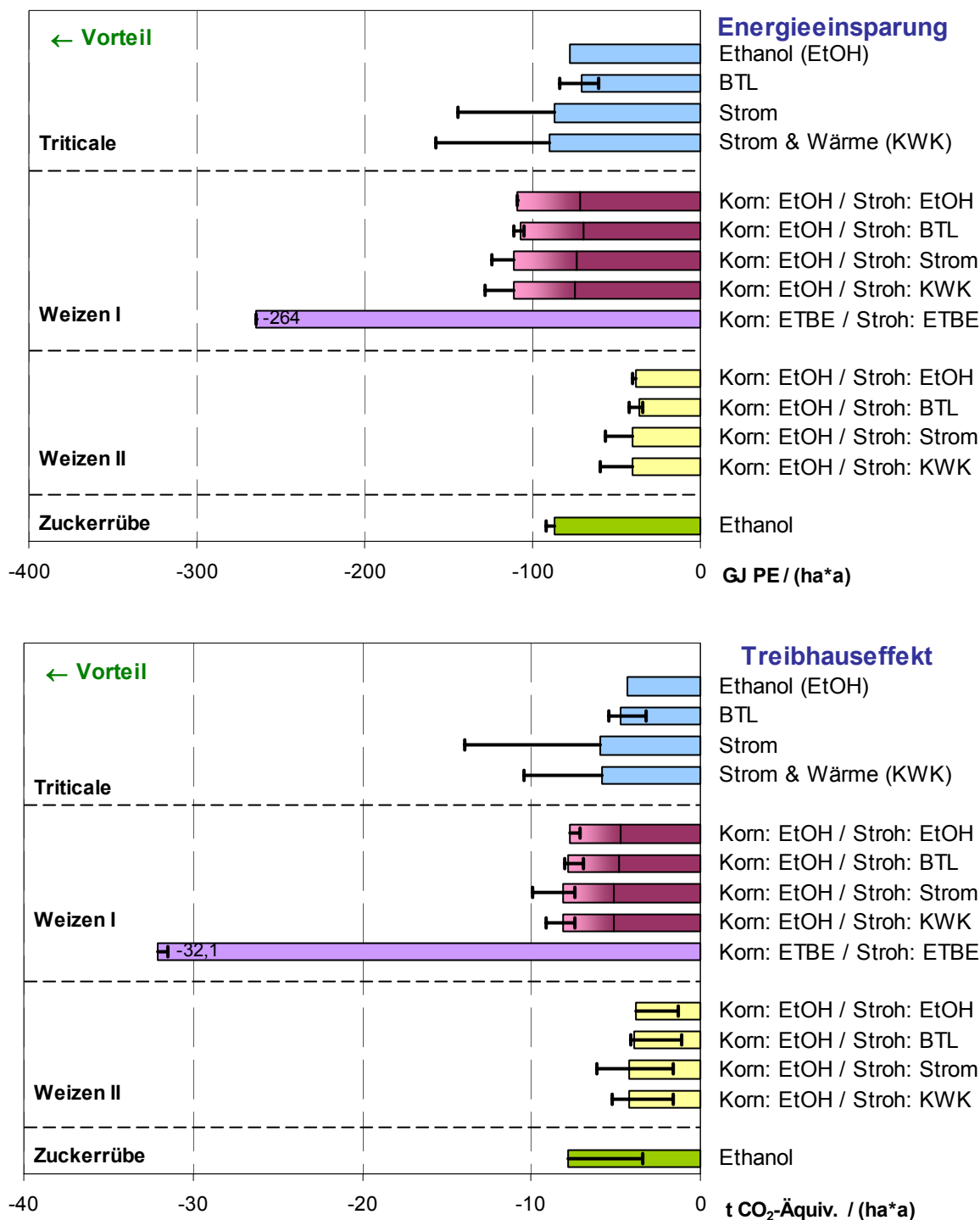


Abb. 4-3 Ergebnisse aller Lebenswegvergleiche für das Basisszenario „Brache“ mit Bandbreiten aus allen Einzel-Sensitivitätsanalysen (ohne Variation des Ertrags). Linker Teilbalken bei Weizen I = Gutschrift für Gluten; PE = Primärenergie



**Lesebeispiel für den dritten blauen Balken „Strom – Triticale“ für Treibhauseffekt:**

Wird durch eine energetische Nutzung von Triticale im Kraftwerk Strom erzeugt und anstelle von Strom-Marginalmix genutzt, so können ca. 5,9 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Hektar und Jahr vermieden werden. Der schwarze Balken gibt die Menge an Treibhausgasen an, die durch eine Mitverbrennung der Triticale-Ganzpflanze in einem Steinkohle-Kraftwerk vermieden werden können, nämlich 13,9 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Hektar und Jahr.

**Ergebnisse**

- Die Bandbreite für BTL ergibt sich aus verschiedenen Verfahren, die sich im Wesentlichen durch unterschiedliche Wirkungsgrade und Kuppelprodukte auszeichnen. Je nach Verfahren schneidet die BTL-Produktion besser oder schlechter ab.
- Die Bandbreite für die Stromproduktion ergibt sich aus der Art der Stromproduktion: die Biomasse kann entweder in einem reinen Biomasse-Kraftwerk eingesetzt oder in einem Steinkohle-Kraftwerk mitverbrannt werden. Bei ersterem wird Marginalstrom (50% Steinkohle / 50% Erdgas) ersetzt, bei letzterem dagegen wird Steinkohle als Brennstoff direkt substituiert, was v. a. in puncto Klimaschutz zu wesentlich besseren Ergebnissen führt.
- Die Bandbreite für die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ergibt sich aus dem Anteil der genutzten Wärme. Werden 80% der Wärme statt nur 20% genutzt, können bei Triticale doppelt so viele fossile Ressourcen eingespart und Treibhausgase vermieden werden.
- Ein Sonderfall ist der lila Balken: Ethanol wird hier zu ETBE (Ethyl-Tertiär-Butyl-Ether, ein Kraftstoffadditiv) weiterverarbeitet und ersetzt fossiles MTBE (Methyl-Tertiär-Butyl-Ether). Da die Herstellung von MTBE sehr energieaufwändig ist, kann durch den Einsatz von ETBE die vierfache Menge an Primärenergie eingespart werden.
- Wird Braunkohle als fossiler Energieträger eingesetzt, verschlechtern sich die Treibhausgasbilanzen des Weizen II- und Zuckerrüben-Verfahrens deutlich, bleiben aber positiv.
- Die Variation des Wirkungsgrades bei der fossilen KWK sowie die Erhöhung der Fahrleistung für Ethanol durch einen höheren Wirkungsgrad führen zu Ergebnissen, die innerhalb der o. g. Bandbreiten liegen, d. h. der Einfluss dieser Parameter ist vergleichsweise gering.

**Fazit**

Die Ergebnisse der Variation einzelner Randbedingungen zeigen, dass Aussagen zur Vorteilhaftigkeit einzelner Pfade (wie beispielsweise in Abschnitt 4.1.2) nicht verallgemeinert werden können, da sie in hohem Maße vom betrachteten System abhängig sind. So schneidet die stationäre Energiegewinnung aus Triticale unter Berücksichtigung einer höheren Wärmenutzung bei der biogenen KWK mindestens genauso gut ab wie die Ethanolherstellung aus Weizen nach dem Weizen I-Verfahren.

Daneben können aber auch eine Reihe von spezifischen Ergebnissen und Einzelzusammenhängen abgeleitet werden: So führt beispielsweise die Weiterverarbeitung des Ethanol zum Kraftstoffadditiv ETBE, welches fossiles MTBE ersetzt, zu den mit Abstand besten Bilanzergebnissen. Allerdings ist das technische Potenzial zum Einsatz von ETBE aufgrund geltender Kraftstoffnormen begrenzt. Dennoch sollte dieses Potenzial vollständig ausgeschöpft werden und erst anschließend Ottokraftstoff durch Ethanol ersetzt werden.

## 4.2 Vergleiche: Erweitertes Szenario

Wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben, wird im erweiterten Szenario zugrunde gelegt, dass die Fläche, die aufgrund der bei der Ethanolherstellung anfallenden Kuppelprodukte frei wird, zur Produktion von Bioenergieträgern genutzt wird. Die Auswirkungen dieses Ansatzes werden nachfolgend wiederum am Beispiel von Ethanol aus Zuckerrübe detailliert erläutert. Anschließend werden die Ergebnisse für alle 13 Lebenswege präsentiert. Der letzte Abschnitt beschäftigt sich mit der Flächeninanspruchnahme der einzelnen Szenarien.

### 4.2.1 Bioethanol aus Zuckerrübe im Detail (erweitertes Szenario)

Analog zu Abb. 4-1 zeigt Abb. 4-4 die Vor- und Nachteile von Ethanol aus Zuckerrüben gegenüber fossilem Ottokraftstoff für die Umweltwirkung Treibhauseffekt, ausgedrückt in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Hektar und Jahr. Dabei werden zwei Varianten für das Kuppelprodukt Rübenschnitzel unterschieden, die – wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben – als Kraftfutter eingesetzt zum einen Gerste und zum anderen Rübenschnitzel aus der Zuckerproduktion substituieren können.

Die ersten beiden Balken in Abb. 4-4 stellen wiederum die Aufwendungen und Gutschriften für Ethanol aus Zuckerrüben dar, jeweils mit einer unterschiedlichen Gutschrift für das Kuppelprodukt Rübenschnitzel. Der dritte Balken zeigt wiederum die Aufwendungen für das Äquivalenzprodukt, fossilen Ottokraftstoff. Die darunter abgebildeten Ergebnissalden (Saldo 13b und 13c) ergeben sich durch die Subtraktion des fossilen Lebenswegs von den biogenen Lebenswegen und bilden die Gesamtergebnisse für diese beiden Lebenswegvergleiche.

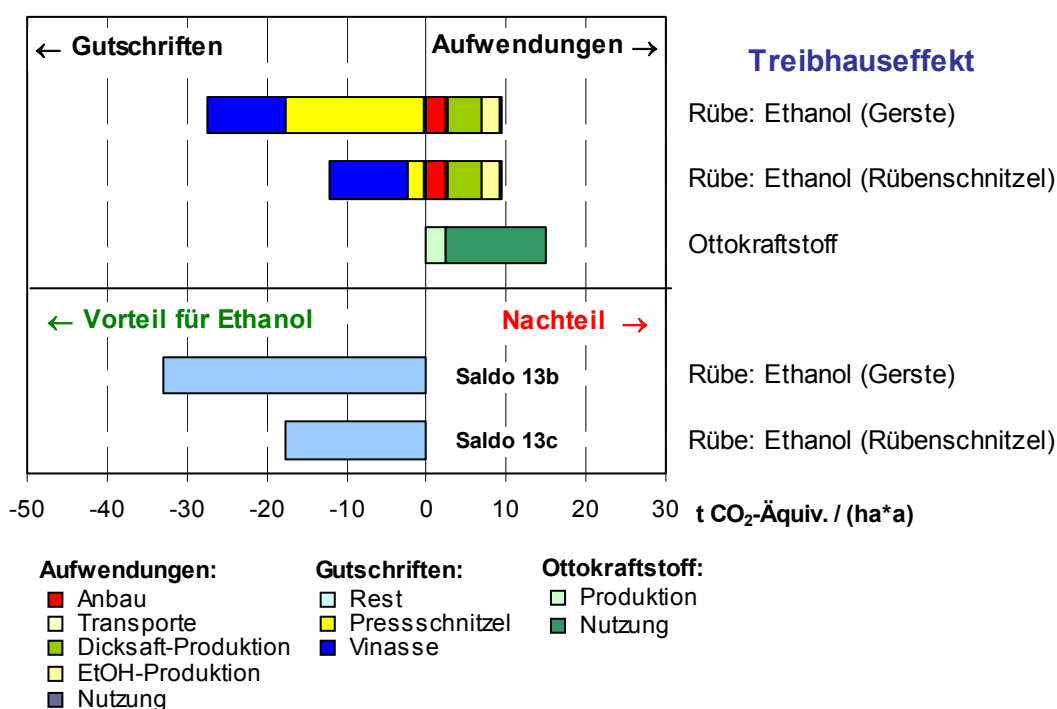


Abb. 4-4 Detaillierte Ergebnisse des Lebenswegvergleichs zwischen Ethanol aus Zuckerrübe und Ottokraftstoff für die Szenarien „Gerste“ und „Rübenschnitzel“

**Lesebeispiel für den Balken „Rübe: Ethanol (Gerste)“ für Treibhauseffekt:**

Wird Ethanol aus Zuckerrübe anstelle von Ottokraftstoff verwendet und durch das Kuppelprodukt Rübenschnitzel herkömmliches Gerste-Krafftfutter ersetzt, können bei Berücksichtigung einer alternativen Flächennutzung (Produktion von Bioenergieträgern) ca. 33 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Hektar und Jahr vermieden werden. Ersetzen alternativ dazu die Pressschnitzel Rübenschnitzel aus der Zuckerproduktion (alle anderen Rahmenbedingungen bleiben gleich), können ca. 18 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Hektar und Jahr vermieden werden.

**Ergebnisse**

Die Änderungen in den Ergebnissen sind sichtbar an den gelben Balkenabschnitten: ersetzen die Pressschnitzel Gerste als Krafftfutter und wird auf der frei werdenden Fläche wiederum Zuckerrüben für eine Produktion von Ethanol angebaut, der Ottokraftstoff ersetzt, so ergibt sich alleine dadurch eine Gutschrift von 17,3 t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Hektar und Jahr. Werden dagegen Pressschnitzel aus der Zuckerproduktion durch die Pressschnitzel aus der Ethanolproduktion und der fehlende Zucker durch Rohrzucker ersetzt, so erhält man lediglich noch eine Gutschrift von 1,9 t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Hektar und Jahr.

**Fazit**

Die Ergebnisse der Energie- und Treibhausgasbilanz werden im erweiterten Szenario maßgeblich durch die Gutschriften derjenigen Kuppelprodukte, die Flächen freisetzen, bestimmt. Je nach Wahl des Szenarios kann sich die vermiedene Menge an Treibhausgasen nahezu verdoppeln. Eine genaue Dokumentation sämtlicher Randbedingungen ist daher bei der Anwendung des Gutschriftsverfahrens unverzichtbar.

**4.2.2 Erweitertes Szenario**

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse exemplarisch anhand von vier ausgewählten Lebenswegvergleichen mit dem Zielprodukt Ethanol für das erweiterte Szenario präsentiert. Dabei handelt es sich um die Lebenswege 1, 5, 9 und 13, für die Abb. 4-5 die Vor- und Nachteile aller Bioenergieträger gegenüber ihren jeweiligen fossilen Äquivalenzprodukten für die Umweltwirkungen Energieeinsparung und Treibhauseffekt zeigt. Die Ergebnissalden für diese vier sowie alle weiteren Lebenswegvergleiche sind im Anhang (Kapitel 7.3) in Abb. 7-15 und Abb. 7-16 nochmals ausführlich dargestellt.

Die grafische Ergebnisdarstellung erfolgt wiederum in Form von Salden, die auf die in Abschnitt 4.2.1 beschriebene Weise ermittelt wurden. Der beiden grünen Balken im unteren Bereich der Abb. 4-5, die die vermiedenen Treibhausgasemissionen für Ethanol aus Zuckerrübe darstellen, sind daher mit den Salden aus Abb. 4-4 (Saldo 13b und 13c) deckungsgleich. Die Balken für die Ethanolproduktion aus Weizenkorn nach dem Weizen I-Verfahren sind nochmals unterteilt, um den Beitrag der Gutschrift für Gluten (linker Teilbalken) hervorzuheben.

Anhand dieser Abbildung können eine Reihe von Einzelergebnissen abgeleitet werden, wobei verschiedene Biomasserohstoffe, Konversionsverfahren oder Zielprodukte hinsichtlich Energieeinsparung und Treibhauseffekt einander gegenübergestellt werden.

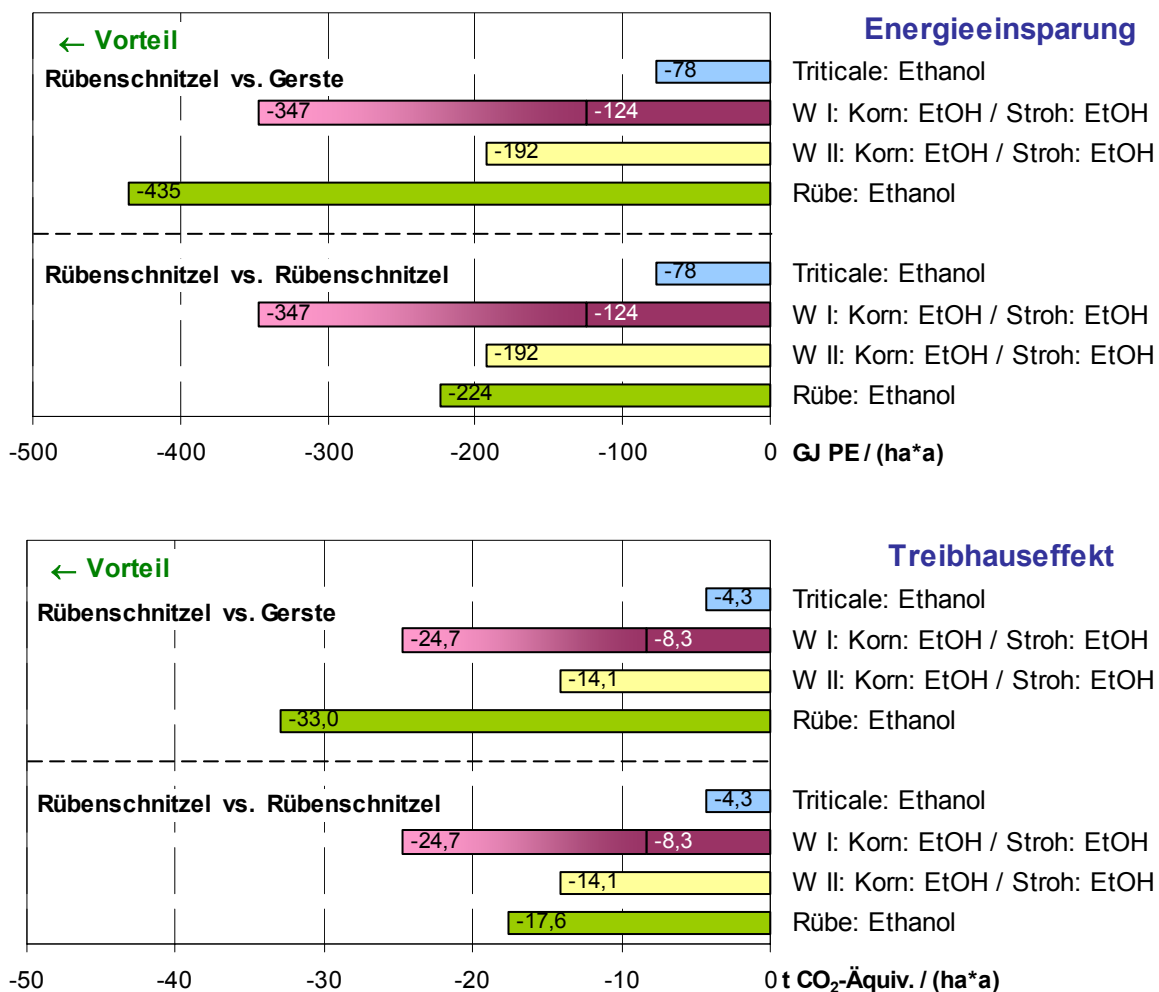


Abb. 4-5 Ergebnisse von vier ausgewählten Lebenswegvergleichen für die erweiterten Szenarien „Gerste“ und „Rübenschnitzel“. Linker Teilbalken bei Weizen I: Gutschrift für Gluten; PE = Primärenergie

**Lesebeispiel für den Balken „W II: Korn: EtOH / Stroh: EtOH – Gerste“ für Treibhauseffekt:**

Wird Ethanol aus Weizen aus dem Weizen II-Verfahren anstelle von Ottokraftstoff verwendet und durch das Kuppelprodukt Rübenschnitzel herkömmliches Gerste-Kraftfutter ersetzt, können bei Berücksichtigung einer alternativen Flächennutzung (Produktion von Bioenergieträgern) ca. 14 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Hektar und Jahr vermieden werden.

**Ergebnisse**

Sämtliche Lebenswegvergleiche der untersuchten Bioenergieträger mit ihrem fossilen Pendant führen zu einer Einsparung von fossilen Energieressourcen und einer Vermeidung von Treibhausgasemissionen, die aufgrund der alternativen Flächennutzung zur Produktion von Bioenergieträgern im Vergleich zu den Ergebnissen in Abschnitt 4.1.2 deutlich größer ausfallen. Folgende Einzelergebnisse können festgehalten werden:

- **Vergleich der Rohstoffe:** Bei der Ethanolherstellung führt die Verwendung von Triticale zur geringsten Energieeinsparung. Die Ergebnisse zeigen dabei im erweiterten Szenario keine Änderung gegenüber denen des Basisszenarios, da hier keinerlei Flächen freisetzende Kuppelprodukte anfallen. Bei Verwendung von Weizen und Zuckerrübe fallen die Ergebnisse deutlich besser aus, wobei die absolute Höhe der Einsparung von der für die Rübenschnitzel angesetzten Gutschrift abhängt, d. h. dass auch hier die Ergebnisse in hohem Maße szenarienabhängig sind.
- **Vergleich der Gutschriften:** Die für die Rübenschnitzel angesetzte Gutschrift macht sich nur bei der Ethanolherstellung aus Zuckerrübe deutlich bemerkbar: Hier schneidet das Szenario „Gerste“ wesentlich besser ab als das Szenario „Rübenschnitzel“. Dies liegt v. a. daran, dass im letzteren Fall die frei werdenden Flächen szenarienbedingt nicht mehr zum Anbau von Energiepflanzen genutzt werden können (siehe Abschnitt 3.2.2). Bei den Verfahren Weizen I und Weizen II dagegen wirkt sich die für die Rübenschnitzel angesetzte Gutschrift kaum aus, da die Zuckerrübe bei diesen Verfahren im Hinblick auf die Anbaufläche nur einen geringen Teil (< 5%) ausmacht.
- **Vergleich der Verfahren:** Der Vergleich der beiden untersuchten Verfahren zur Ethanolherstellung aus Weizenkorn zeigt immer noch Vorteile für das Verfahren mit Energiegewinnung aus Kleie und Abtrennung des Glutens (Weizen I), allerdings sind die Unterschiede hier weniger groß ausgeprägt. Die Unterschiede sind aber auch hier in erster Linie szenarienabhängig, was v. a. auf die höhere Gutschrift zurückzuführen ist, die das DDGS (Weizen II) gegenüber der Dickschlempe (Weizen I) erhält, wenn die frei werdende Soja-Fläche zum Zuckerrohranbau für die Ethanolproduktion genutzt wird. Der Einfluss der hohen Gutschrift für Gluten vergrößert sich im erweiterten Szenario aufgrund der alternativen Flächennutzung zur Produktion von Bioenergieträgern sogar noch gegenüber dem Basisszenario.
- **Vergleich der Produkte:** Hier gelten dieselben Aussagen wie in Abschnitt 4.1.2.

## Fazit

Es zeigt sich erneut, dass die Ergebnisse in hohem Maße von den zugrunde gelegten Kuppelproduktszenarien und sonstigen Randbedingungen abhängig sind. Generell kann jedoch festgehalten werden, dass die Vorteile für die Bioenergieträger im erweiterten Szenario deutlich größer als im Basisszenario ausfallen. Der Effekt der für das Gluten angesetzten Gutschrift vergrößert sich dabei im erweiterten Szenario nochmals deutlich.

Unter den hier gewählten Umständen schneidet die Ethanolherstellung aus Zuckerrüben im erweiterten Szenario „Gerste“ in puncto Energieeinsparung und Klimaschutz am besten ab, gefolgt von der aus Weizen. Da das Ergebnis im Szenario „Rübenschnitzel“ aber genau umgekehrt ausfällt, lassen sich auch hier kaum allgemeingültige, belastbare Aussagen ableiten. Ebenso muss auch dieses Ergebnis noch vor dem Hintergrund der tatsächlichen Flächeninanspruchnahme diskutiert werden (siehe folgender Abschnitt 4.2.3).

### 4.2.3 Flächeninanspruchnahme

Ausgehend von der Hypothese, dass die zum Energiepflanzenanbau erforderliche Fläche in Form von Brachen zur Verfügung steht (siehe Kapitel 3.2), wird für den Anbau von Getreide und Zuckerrüben zunächst ein Hektar Fläche in Anspruch genommen. Durch die Erzeugung von Kuppelprodukten wie Rübenschnitzel, Vinasse, Dickschlempe oder DDGS bei der Ethanolherstellung werden dann meist wieder Flächen freigesetzt. Im Fall des Glutens, welches herkömmlichen Weizenkleber ersetzt, kommt es jedoch zu einer zusätzlichen Flächeninanspruchnahme für den Kartoffelanbau. Dieser wird für die Produktion von Kartoffelstärke benötigt, welche die bislang ebenfalls erzeugte Weizenstärke substituiert. Hinsichtlich des Umgangs mit den frei werdenden Flächen wird im Basisszenario davon ausgegangen, dass diese ungenutzt bleiben und brach fallen. Im erweiterten Szenario wird dagegen angesetzt, dass sie für den Anbau von Energiepflanzen für die Ethanolproduktion genutzt werden.

Aufgrund der angesetzten Bewertung der Kuppelprodukte kommt es je nach Lebensweg und Szenario zu einer unterschiedlichen Flächeninanspruchnahme bzw. -freisetzung. Tabelle 4-1 summiert diese getrennt für Deutschland / Mitteleuropa und Brasilien auf, da sie aufgrund unterschiedlicher Qualitäten nur bedingt miteinander verrechnet werden können.

**Tabelle 4-1** Flächeninanspruchnahme [ha] bei den betrachteten Lebenswegen und Kuppelproduktszenarien. Schwarz: Flächeninanspruchnahme zwischen 0 und 1 ha; rot: Flächeninanspruchnahme > 1 ha; grün: Flächenfreisetzung

Lebensweg		Referenzsystem		
		Basisszenario a: „Brache“	Erweiterung b: „Gerste“	Erweiterung c: „Rübenschnitzel“
<b>Triticale: Ganzpflanzennutzung</b>				
Anbau	Deutschland	-1,00		
	<b>Summe</b>	<b>-1,00</b>		
<b>Weizen I: Kombinierte Nutzung von Korn und Stroh</b>				
Anbau	Deutschland	-1,00	-1,00	-1,00
Trockenschnitzel	Deutschland	0,03	0,00	0,05
Gluten	Deutschland	0,47	-0,48	-0,48
	<b>ZWS</b>	<b>-0,50</b>	<b>-1,48</b>	<b>-1,43</b>
Dickschlempe	Brasilien	0,41	0,00	0,00
	<b>Summe</b>	<b>-0,09</b>	<b>-1,48</b>	<b>-1,43</b>
<b>Weizen II: Kombinierte Nutzung von Korn und Stroh</b>				
Anbau	Deutschland	-1,00	-1,00	-1,00
Pressschnitzel	Deutschland	0,02	0,00	0,03
	<b>ZWS</b>	<b>-0,98</b>	<b>-1,00</b>	<b>-0,97</b>
DDGS	Brasilien	1,30	0,00	0,00
	<b>Summe</b>	<b>0,32</b>	<b>-1,00</b>	<b>-0,97</b>
<b>Zuckerrübe</b>				
Anbau	Deutschland	-1,00	-1,00	-1,00
Pressschnitzel	Deutschland	0,49	0,00	1,00
	<b>ZWS</b>	<b>-0,51</b>	<b>-1,00</b>	<b>0,00</b>
Vinasse	Brasilien	1,18	0,00	0,00
	<b>Summe</b>	<b>0,67</b>	<b>-1,00</b>	<b>0,00</b>

## Ergebnisse

- Da bei der Nutzung von Triticale keine Nebenprodukte anfallen, deren Substitution weitere Flächeninanspruchnahme oder -freisetzung nach sich ziehen könnten, fällt die Flächenbilanz wie erwartet aus: genau ein Hektar Brachfläche wird genutzt.
- Anders sieht es dagegen bei Weizen I aus: Während im Basisszenario „Brache“ (a) weltweit gesehen eine fast ausgeglichene Flächenbilanz erreicht wird, d. h. der zur Verfügung stehende Hektar kaum in Anspruch genommen wird, wird in den erweiterten Szenarien „Gerste“ und „Rübenschnitzel“ (b / c) über den zur Verfügung stehenden Hektar hinaus noch knapp ein weiterer halber Hektar Fläche belegt. Damit wird mehr Fläche benutzt, als nach Hypothese überhaupt zur Verfügung steht.
- Bei Weizen II dagegen wird in den erweiterten Szenarien weltweit gesehen ca. ein Hektar Anbaufläche belegt, im Basisszenario „Brache“ dagegen sogar 0,3 ha freigesetzt.
- Die Zuckerrübe weist je nach Szenario sehr unterschiedliche Flächenbilanzen auf. Im Basisszenario „Brache“ wird weltweit gesehen ca. 0,7 ha Anbaufläche freigesetzt, wohingegen das erweiterte Szenario „Rübenschnitzel“ eine ausgeglichene Flächenbilanz aufweist. Dies liegt daran, dass im letzteren Fall über die in Deutschland bestehenden Zuckerrübenflächen hinaus keine zusätzlichen Anbauflächen benötigt werden, da die Rüben statt zur Zuckerproduktion zukünftig zur Ethanolherstellung genutzt werden. Lediglich im erweiterten Szenario „Gerste“ wird genau ein Hektar Anbaufläche in Deutschland belegt.
- Die weltweit gesehen ausgeglichenen bis positiven Flächenbilanzen im Basisszenario „Brache“ kommen meist nur durch große Flächenfreisetzungen in Brasilien zustande, die aufgrund unterschiedlicher Flächenqualitäten nur bedingt mit denen in Deutschland verrechnet werden können.

## Fazit

Die in den Kapiteln 4.1 und 4.2 getroffenen Aussagen zu den Vor- und Nachteilen einzelner Bioenergiepfade müssen aufgrund der teilweise deutlich unterschiedlichen Flächeninanspruchnahme relativiert werden. Es zeigt sich, dass insbesondere diejenigen Bioenergiepfade besonders gut in den o. g. Kapiteln abschneiden, die tatsächlich mehr Fläche als den eigentlich zur Verfügung stehenden Hektar in Anspruch nehmen. Dies trifft insbesondere für die erweiterten Szenarien bei Weizen I zu, die wesentlich bessere Ergebnisse als bei Weizen II zur Folge haben, wohingegen im letzteren Fall maximal ein Hektar belegt wird. Weiterhin ist es aus demselben Grund auch nicht verwunderlich, dass bei der Zuckerrübe die Ergebnisse für das erweiterte Szenario „Gerste“ deutlich besser ausfallen als die für das erweiterte Szenario „Rübenschnitzel“, weil im letzteren Fall schlichtweg mehr Fläche zur Bioenergieproduktion genutzt wird.

Anhand dieser Beispiele zeigt sich erneut, wie sehr die Ergebnisse von den zugrunde gelegten Koppelproduktszenarien und der daraus resultierenden tatsächlichen Flächeninanspruchnahme abhängig sind. Vergleiche zwischen den einzelnen Bioenergiepfaden oder gar allgemeingültige, belastbare Aussagen zu deren Vor- und Nachteilen sind daher nur eingeschränkt möglich.

## 4.3 Zusammenführung der Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Basisszenarios aus Kapitel 4.1 mit denen des erweiterten Szenarios aus Kapitel 4.2 zusammengeführt. Abb. 4-6 zeigt dazu die Vor- und Nachteile aller Bioenergieträger gegenüber ihren jeweiligen fossilen Äquivalenzprodukten für die Umweltwirkungen Energieeinsparung (blaue Balken) und Treibhauseffekt (violette Balken). Dargestellt sind die Bandbreiten der Ergebnisse für alle 13 Lebenswegvergleiche, die aufgrund der Berücksichtigung der alternativen Flächennutzung im erweiterten Szenario zustande kommen.

### Ergebnisse

- Bei Berücksichtigung einer alternativen Nutzung für die frei werdenden Flächen fallen die Energie- und Treibhausgasbilanzen für die Lebenswege 5-13 deutlich positiver aus, da bei diesen Pfaden Flächen freisetzende Koppelprodukte auftreten. Im Fall der Zuckerrübe vervielfacht sich die Energieeinsparung pro Hektar gegenüber dem Basisszenario. Die Ergebnisse für die Bioenergieproduktion aus Triticale-Ganzpflanzen (Lebenswege 1-4) zeigen dagegen im erweiterten Szenario keine Änderung gegenüber denen des Basisszenarios, da hier keinerlei Flächen freisetzende Koppelprodukte anfallen.
- Während die Energie- und Treibhausgasbilanzen im Basisszenario im Wesentlichen von den Aufwendungen beim Energiepflanzenanbau sowie bei der Dicksaft- und Ethanolproduktion dominiert werden, spielen im erweiterten Szenario die Gutschriften für die vermiedenen Äquivalenzprodukte eindeutig die größere Rolle, d.h. die Systeme werden nicht durch das vermeintliche Hauptprodukt sondern durch die Koppelprodukte bestimmt.
- Die in Abb. 4-6 dargestellten Bandbreiten fallen im Vergleich zu denen der Sensitivitätsanalysen (siehe Abb. 4-3) wesentlich größer aus, d.h. die Berücksichtigung einer alternativen Flächennutzung wirkt sich viel stärker auf die Ergebnisse aus als etwaige Datenunsicherheiten.

### Fazit

Wie bei zahlreichen Ökobilanzstudien bereits festgestellt, zeigt sich auch hier, dass die Ergebnisse je nach zugrunde gelegtem Szenario deutlich unterschiedlich ausfallen. Dabei ist es für die abgeleiteten Aussagen absolut ausschlaggebend, ob eine alternative Flächennutzung auf frei werdenden Flächen mitberücksichtigt wird oder nicht. Beispielsweise schneiden sämtliche Bioenergiepfade mit Triticale, die im Basisszenario noch vergleichsweise gute Ergebnisse hinsichtlich der Einsparung von Energie und der Vermeidung von Treibhausgasemissionen aufweisen, im erweiterten Szenario wesentlich schlechter ab, da bei diesen Pfaden keine Flächen freisetzenden Koppelprodukte auftreten.

Der im erweiterten Szenario auf den frei werdenden Flächen angesetzte Energiepflanzenanbau zur Ethanolproduktion ist eine Möglichkeit unter vielen. Eine tendenziell positivere Abschätzung der möglichen Flächennutzung würde beispielsweise der Anbau von Kurzumtriebsholz zur Mitverbrennung in einem Steinkohlekraftwerk darstellen. Umgekehrt ist die Analyse ohne Berücksichtigung der alternativen Flächennutzung tendenziell eine Abschätzung nach unten.



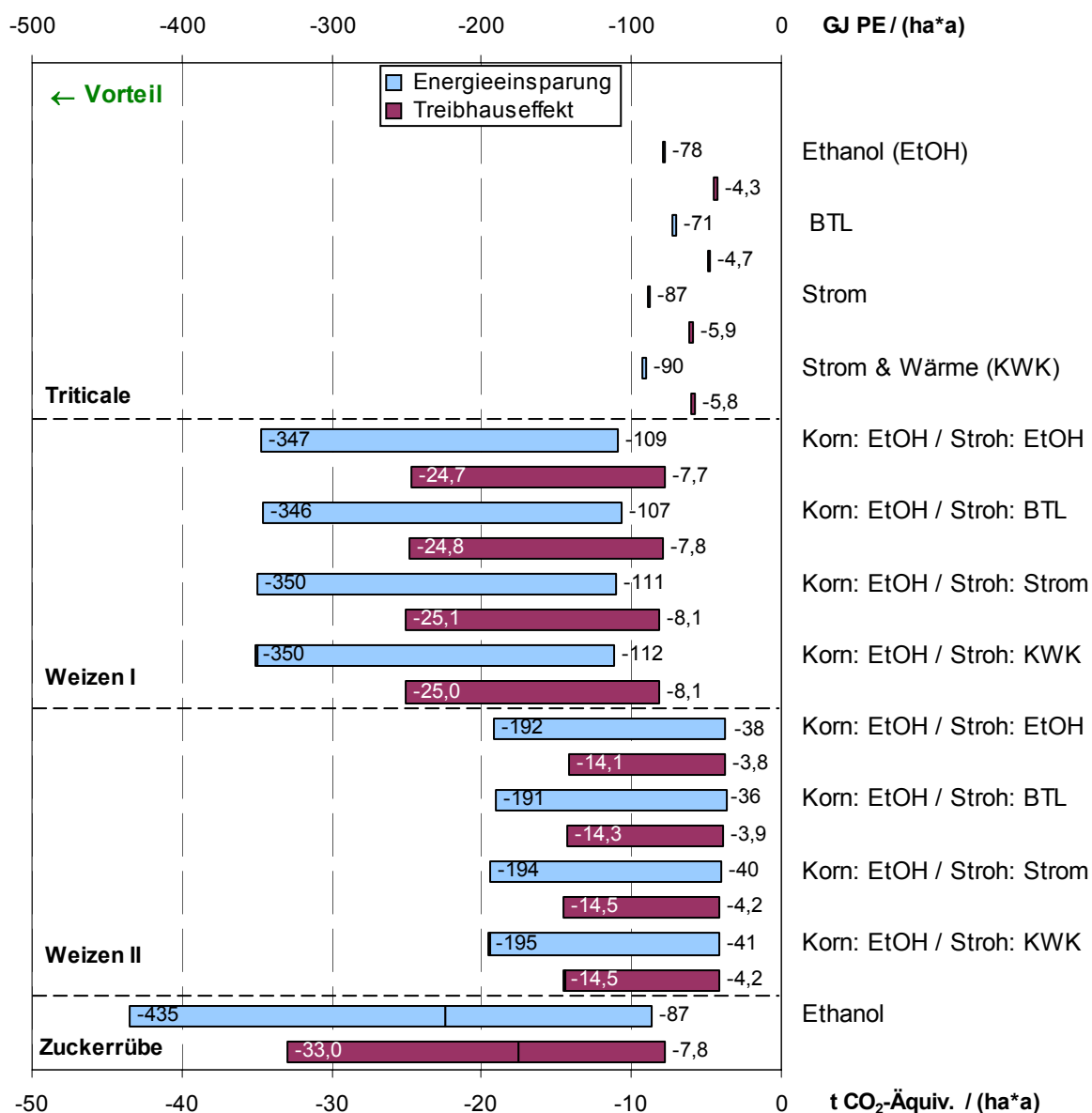


Abb. 4-6 Ergebnisse aller Lebenswegvergleiche zwischen konventioneller Energie und Bioenergie aus Getreide und Zuckerrübe. Dargestellt sind die Bandbreiten zwischen Basisszenario und erweitertem Szenario; PE = Primärenergie

**Lesebeispiel für den Balken „Rübe: Ethanol“ für Energieeinsparung:**

Wird Ethanol aus Zuckerrübe anstelle von Ottokraftstoff verwendet, so ergeben sich unterschiedliche Einsparungen an Primärenergie, je nachdem, wie die Systemgrenzen gesetzt werden. Die Einsparungen liegen zwischen 87 GJ Primärenergie pro Hektar und Jahr im Basisszenario und 435 GJ Primärenergie pro Hektar und Jahr bei alternativer Flächenbelegung und dem Ersatz von Gerste durch Pressschnitzel.



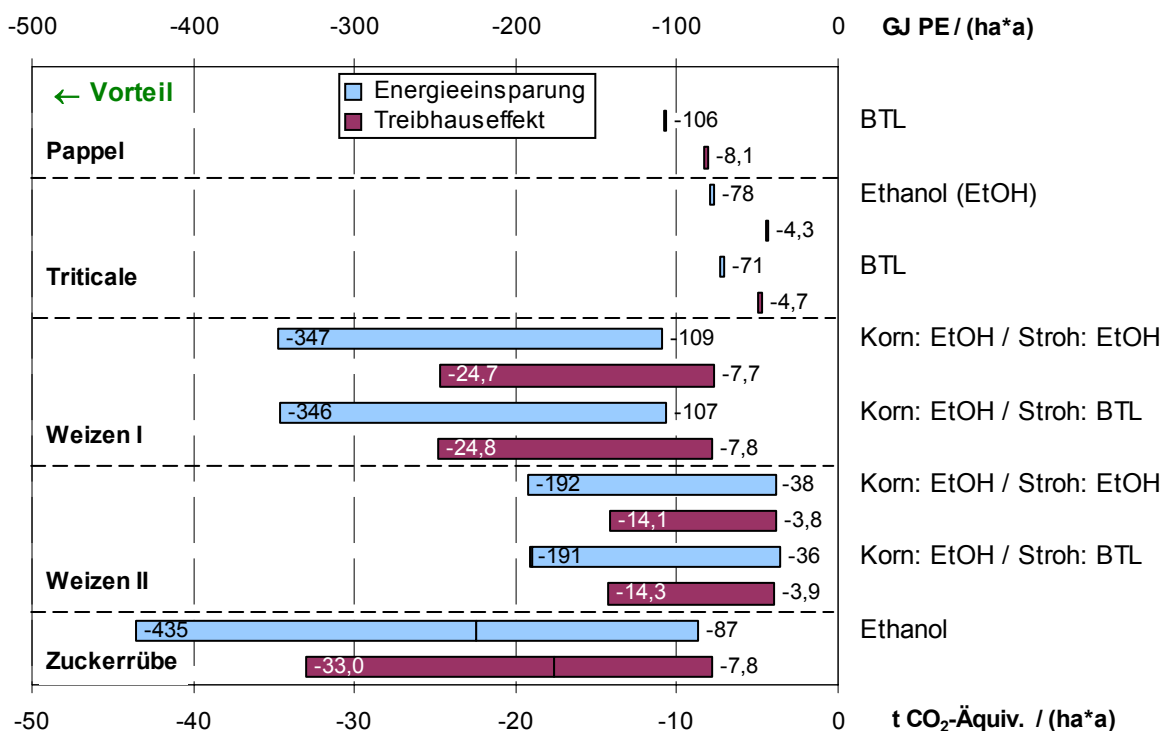


Abb. 4-8 Ergebnisse ausgewählter Lebenswegvergleiche zwischen konventionellen Kraftstoffen und Biokraftstoffen aus Getreide und Zuckerrüben sowie aus Pappel-Kurzumtriebsholz (nur BTL). Dargestellt sind die Bandbreiten zwischen Basis-szenario und erweitertem Szenario; PE = Primärenergie

**Lesebeispiel für den Balken „Pappel: BTL“ für Energieeinsparung:**  
 Wird BTL aus Pappel-Kurzumtriebsholz anstelle von Dieselkraftstoff eingesetzt, können 106 GJ Primärenergie pro Hektar und Jahr eingespart werden.

**Fazit**

Der etwa 25% höhere Flächenertrag von Pappel-Kurzumtriebsholz im Vergleich zu Triticale macht sich bei den Ergebnissen der Energie- und Treibhausgasbilanzen für BTL aus Pappel-Kurzumtriebsholz deutlich bemerkbar. Allerdings schneidet die im Basisszenario noch vergleichsweise gute BTL-Produktion im erweiterten Szenario wesentlich schlechter als die Ethanolherstellung nach den beiden Weizen- oder dem Zuckerrüben-Verfahren.

Unter Berücksichtigung von Flächeneffekten, die mit den Kuppelprodukten aus der Ethanolherstellung verbunden sind, tragen die hier betrachteten zucker- und stärkebasierten Biokraftstoffe der 1. Generation deutlich mehr zur Schonung erschöpflicher Energieressourcen und zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen bei als die der 2. Generation auf Lignozellulosebasis. Im Hinblick auf die Frage nach der „optimalen“ Flächennutzung könnten aber noch weitere Bioenergiepfade wie beispielsweise Pflanzenöl und Biodiesel aus Raps oder Biogas und Biomethan aus Mais untersucht werden, bei denen sich die Berücksichtigung von Flächeneffekten (z. B. Raps-Extraktionsschrot versus Sojaschrot) ebenfalls bemerkbar machen dürfte.

## 5 Schlussfolgerungen

Im Rahmen dieser Studie wurde das Energieeinsparungs- und Treibhausgasverminderungspotenzial von verschiedenen Pfaden zur Bioenergiegewinnung aus Getreide und Zuckerrüben bestimmt. Die Untersuchung zeigt, dass alle dreizehn analysierten Bioenergiepfade im Vergleich zu einer konventionellen Energiegewinnung aus fossilen Energieträgern in allen Szenarien und unter allen Randbedingungen zur Schonung erschöpflicher Energieressourcen und zum Klimaschutz beitragen können:

- Die Ergebnisse der drei untersuchten Verfahren zur Bioethanolherstellung, davon eines aus Zuckerrüben und zwei aus Weizenkorn *und* Zuckerrüben, sind im Basisszenario vergleichbar mit denen der Verfahren zur Bioenergiegewinnung aus Triticale. Damit zeigt sich, dass es eine Reihe von Möglichkeiten für eine im Hinblick auf Ressourcenschonung und Klimaschutz „optimale“ Flächennutzung gibt und keiner der untersuchten Bioenergiepfade genuine Vorteile aufweist. Innerhalb der untersuchten Bioethanolverfahren schneidet das Weizen I-Verfahren mit Kleie- und Glutenabtrennung deutlich besser ab als das Weizen II-Verfahren, was u. a. auf die energieintensive Trocknung der Schlempe zu DDGS beim Weizen II-Verfahren und den weitgehenden Ersatz fossiler Energieträger durch die energetische Nutzung der Kleie beim Weizen I-Verfahren zurückzuführen ist.
- Der Vergleich mit BTL aus Pappel-Kurzumtriebsholz ändert nichts an dieser Aussage. Aufgrund der höheren Flächenerträge sind die Umweltvorteile zwar einerseits größer als bei BTL aus Triticale, andererseits können mit diesem Pfad auch nicht mehr erschöpfliche Energieressourcen geschont und Treibhausgasemissionen eingespart werden als mit Bioethanol aus Weizen *und* Zuckerrüben nach dem Weizen I-Verfahren.
- Die Analyse zeigt des Weiteren, dass viele der Pfade optimiert werden können, u. a. in den Bereichen Energiepflanzenanbau und Biomassekonversion. Beispielsweise könnte die Prozessenergie auch aus nachwachsenden Rohstoffen wie Stroh oder Kurzumtriebsholz bereitgestellt werden. Aber auch das Zielprodukt kann sich entscheidend auf die Ergebnisse auswirken: So führt die im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse untersuchte Weiterverarbeitung von Bioethanol zum Kraftstoffadditiv Ethyl-Tertiär-Butyl-Ether (ETBE), welches fossiles MTBE ersetzt, stets zu den mit Abstand besten Bilanzergebnissen. Trotz des begrenzten technischen Potenzials von ETBE sollte dieses vollständig ausgeschöpft werden und erst anschließend Ottokraftstoff durch Bioethanol ersetzt werden.
- Daneben konnten noch einige allgemeingültige Zusammenhänge abgeleitet werden: Beispielsweise lässt sich sowohl bei Triticale als auch bei Stroh bei stationärer Nutzung zur Strom- bzw. Strom- und Wärmeenergiegewinnung mehr Energie einsparen und Treibhausgasemissionen vermeiden als bei mobiler Nutzung in Form von Biokraftstoffen der 2. Generation. Innerhalb des Verkehrssektors spielt es dabei keine große Rolle, ob nun Bioethanol aus Lignozellulose oder BTL hergestellt werden, wohingegen innerhalb des Energiesektors – abgesehen von der Biomasse-Mitverbrennung in Kohlekraftwerken – die besten Ergebnisse durch die Kraft-Wärme-Kopplung mit hoher Wärmenutzung erzielt werden.

- Die Einbeziehung von Flächeneffekten, die mit den als Futtermittel verwendeten Kuppelprodukten aus der Bioethanolherstellung verbunden sind, kann sich erheblich auf die Ergebnisse der Energie- und Treibhausgasbilanzen auswirken:
  - Alleine bei den hier beispielhaft ausgewählten erweiterten Szenarien für eine zusätzliche Bioenergieproduktion auf Flächen, die nicht mehr für eine Futtermittelproduktion benötigt werden, können fünfmal mehr Energie und viermal mehr Treibhausgase als im Basisszenario eingespart werden.
  - Sämtliche untersuchten Verfahren zur Bioethanolherstellung aus Weizen und Zuckerrübe schneiden im erweiterten Szenario wesentlich besser ab als die Bioenergiegewinnung aus Triticale oder auch BTL aus Pappel-Kurzumtriebsholz, wobei die Bioethanolherstellung aus Zuckerrübe tendenziell die besten Ergebnisse liefert. Auch das innovative Verfahren zur Herstellung von Bioethanol aus Weizenkorn *und* Zuckerrüben (Weizen I-Verfahren) führt zu sehr vorteilhaften Ergebnissen, allerdings wird hierbei deutlich mehr Fläche in Anspruch genommen, als der eigentlich zur Verfügung stehende Hektar Brachland. Insgesamt folgt daraus, dass die so genannten Biokraftstoffe der 2. Generation wie BTL (Biomass-to-Liquid) oder Bioethanol aus Lignozellulose (LCF-Ethanol) keine systemimmanenten Vorteile gegenüber den herkömmlichen Biokraftstoffen wie beispielsweise Bioethanol aus Zuckerrüben oder Weizen haben.

Dies zeigt zum einen, dass Bioenergiepfade mit Kuppelprodukten, die sich auf Flächenbelegungen auswirken, unter bestimmten Randbedingungen mehr als bisher angenommen erschöpfliche Energieressourcen schonen und Treibhausgasemissionen vermeiden können. Zum zweiten zeigt dies aber auch, dass die bei Ökobilanzen zu betrachtenden Bioenergieszenarien mit besonderer Sorgfalt ausgewählt bzw. entsprechende Fragestellungen ausführlich ausformuliert werden müssen und die Ergebnisse ausschließlich im Kontext des Untersuchungsrahmens gültig sind. Insofern ist diese Studie sehr hilfreich für die weitere Diskussion über Ökobilanzen zu Bioenergie im Allgemeinen und zu Biokraftstoffen im Speziellen.

Die o.g. Ergebnisse und Schlussfolgerungen gelten jedoch ausschließlich für die dreizehn betrachteten Pfade zur Bioenergiegewinnung und könnten unter Einbeziehung anderer Bioethanol-Verfahren oder weiterer Bioenergiepfade wie Biodiesel aus Raps oder Biogas aus Mais eventuell deutlich unterschiedlich ausfallen. Die hier ermittelten *qualitativen* Ergebnisse können dennoch als sehr robust angesehen werden, wohingegen die *quantitativen* Ergebnisse in hohem Maße von den o.g. Flächeneffekten sowie den gewählten Kuppelproduktsubstituten abhängig sind. Ebenso können die Ergebnisse und Schlussfolgerungen für die Energie- und Treibhausgasbilanzen nicht auf andere Umweltwirkungen wie Versauerung, Nährstoffeintrag oder Photosmog übertragen werden. Diese müssten im Rahmen einer gesamtökologischen Bewertung zusätzlich untersucht werden.

## 6 Literatur und Abkürzungen

### Literatur

- /Borken et al. 1999/ Borken, J., Patyk, A. & Reinhardt, G.A.: Basisdaten für ökologische Bilanzierungen. Einsatz von Nutzfahrzeugen in Transport, Landwirtschaft und Bergbau. Vieweg, Braunschweig / Wiesbaden, 1999
- /Bringezu et al. 2008/ Bringezu, S. (Wuppertal Institut) und 16 weitere Autoren: Optionen einer nachhaltigen Flächennutzung und Ressourcenschutzstrategien unter besonderer Berücksichtigung der nachhaltigen Versorgung mit nachwachsenden Rohstoffen. Wuppertal Institut, FhI UMSICHT & IFEU. Wuppertal / Oberhausen / Heidelberg, 2008
- /CropEnergies 2007/ CropEnergies AG: ProtiGrain – Das Plus fürs Protein. Ochsenfurt, 2007
- /DIN 14040 & 14044/ DIN EN ISO 14040 & 14044. Deutsches Institut für Normung e.V.. Beuth Verlag, Berlin, 2006
- /DLG 1997/ Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft (DLG e.V.): DLG-Futterwerttabellen – Wiederkäuer. DLG-Verlag, Frankfurt (Main), 1997
- /ecoinvent 2007/ Frischknecht, R. et al.: ecoinvent Data v2.0 – Ökoinventare für Energiesysteme. ESU-services, Uster (Schweiz), 2007
- /efma 2007/ European Fertilizer Manufacturers Association (EFMA): Fertilizer application in EU 15 & EFMA 17 in 2004/05. EFMA-JRC (IES) meeting, Brussels, 04/09/2007
- /Fritsche et al. 2004/ Fritsche, U. (Öko-Institut) und 25 weitere Autoren: Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse. Öko-Institut, FhI UMSICHT, Institut für Energetik und Umwelt (IE), IFEU, Institut für ZukunftsEnergieSysteme (I-ZES), TU Braunschweig & TU München. Darmstadt / Oberhausen / Leipzig / Heidelberg / Braunschweig / München, 2004
- /Geringer et al. 2007/ Geringer, B., Holub, F. & Urbanek, M.: Bioethanol – Alltagstauglichkeit und weiteres Potenzial im motorischen Einsatz. Vortrag im Rahmen des ÖAMTC-Experten Forums Umwelt „Bioethanol als Kraftstoff“, Wien, 21.05.2008
- /GEMIS 2007/ Fritsche, U. et al.: Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS), Version 4.4. Ökoinstitut, Darmstadt, 2007
- /IFEU 2008/ Institut für Energie- und Umweltforschung: IFEU-interne Berechnungen und Abschätzungen. Heidelberg, 2008
- /Jungk & Reinhardt 2000/ Jungk, N. & Reinhardt, G.A.: Landwirtschaftliche Referenzsysteme in ökologischen Bilanzierungen. Eine Basisanalyse. IFEU, Heidelberg, 2000
- /Kaltschmitt & Reinhardt 1997/ Kaltschmitt, M. & Reinhardt, G.A. (Hrsg.): Nachwachsende Energieträger. Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung. Vieweg, Braunschweig / Wiesbaden, 1997
- /KTBL 2005/ Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL): Faustzahlen für die Landwirtschaft. Landwirtschaftsverlag, Münster, 2005

- /List et al. 2007/ List, R., Hofmann, P. & Urbanek, M.: The Effects of Bio-Ethanol Mixtures on the SI-Engine Operation. Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Colloquium Fuels, Stuttgart / Ostfildern, January 10-11, 2007
- /Münch 2008/ Münch, J.: Nachhaltig nutzbares Getreidestroh in Deutschland. Positionspapier des Instituts für Energie- und Umweltforschung. IFEU, Heidelberg, 2008
- /Oertel 2007/ Oertel, D.: Industrielle stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), Karlsruhe, 2007
- /Reinhardt et al. 2006/ Reinhardt, G.A., Gärtner, S., Patyk, A. & Rettenmaier, N.: Ökobilanzen zu BTL: Eine ökologische Gesamteinschätzung. IFEU, Heidelberg, 2006
- /Reinhardt et al. 2007/ Reinhardt, G.A., Detzel, A., Gärtner, S., Rettenmaier, N. & Krüger, M.: Nachwachsende Rohstoffe für die chemische Industrie: Optionen und Potenziale für die Zukunft. IFEU, Heidelberg, 2007
- /Südzucker 2007-08/ Wach, W. & Klenk, I.D.: Persönliche Mitteilungen. Südzucker AG, Mannheim / Ochsenfurt, 2007/2008
- /Weber 2007/ Weber, M.: Ethanol-schlempe in der Tierfütterung. Landesanstalt für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau (LLFG) Sachsen-Anhalt, Vortrag im Rahmen der 9. Tagung Thüringer Landwirtschaft, Erfurt, 15.02.2007

## Abkürzungen

a	annum (lat. für Jahr)
Äquiv.	Äquivalent(e)
BHKW	Blockheizkraftwerk
BK	Braunkohle
BTL	Biomass-to-Liquid
CH <sub>4</sub>	Methan
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
DDGS	Distiller's Dried Grains with Solubles
EG	Erdgas
ETBE	Ethyl-Tertiär-Butyl-Ether
EtOH	Ethanol
GJ	Gigajoule (10 <sup>9</sup> J)
ha	Hektar (10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup> )
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change, Weltklimarat
KW	Kraftwerk
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LCF	Lignocellulose feedstock (engl. für lignozellulosehaltiger Rohstoff)
MTBE	Methyl-Tertiär-Butyl-Ether
N <sub>2</sub> O	Distickstoffoxid, Lachgas
OK	Otto-Kraftstoff, Benzin
PE	Primärenergie
SK	Steinkohle
η	Wirkungsgrad

# 7 Anhang

## 7.1 Betrachtete Kuppelproduktszenarien

### Basisszenario: Brache

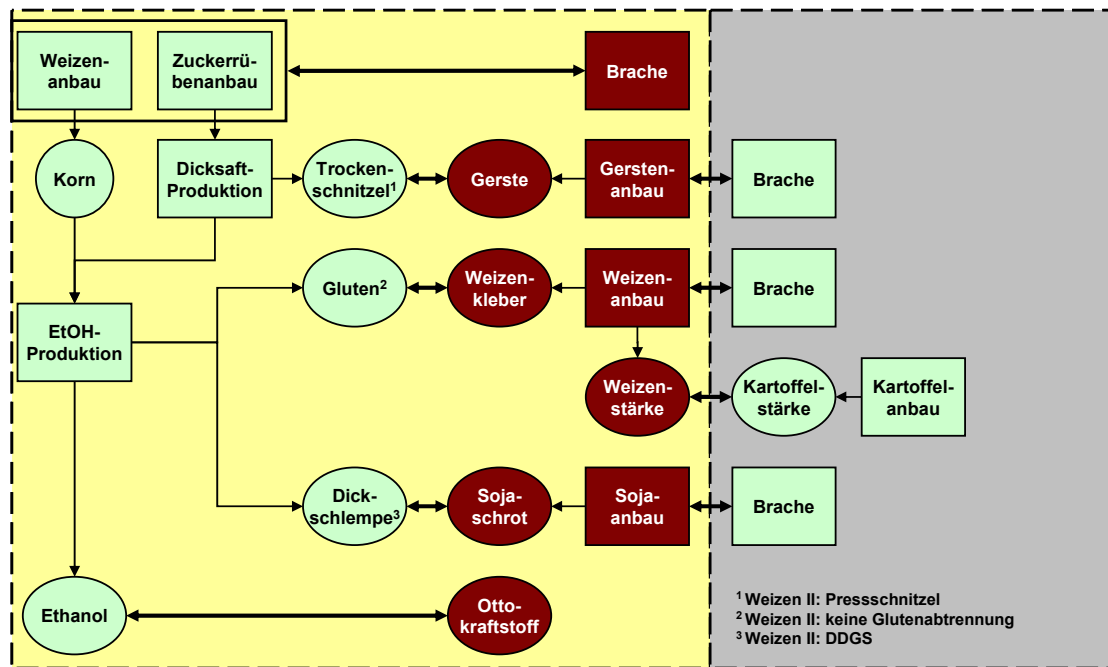


Abb. 7-1 Alternative Flächennutzung im Basisszenario „Brache“. Kombinierte Darstellung für Ethanol aus Weizen nach den Verfahren Weizen I und Weizen II



**Erweitertes Szenario: Kraftfutter Gerste**

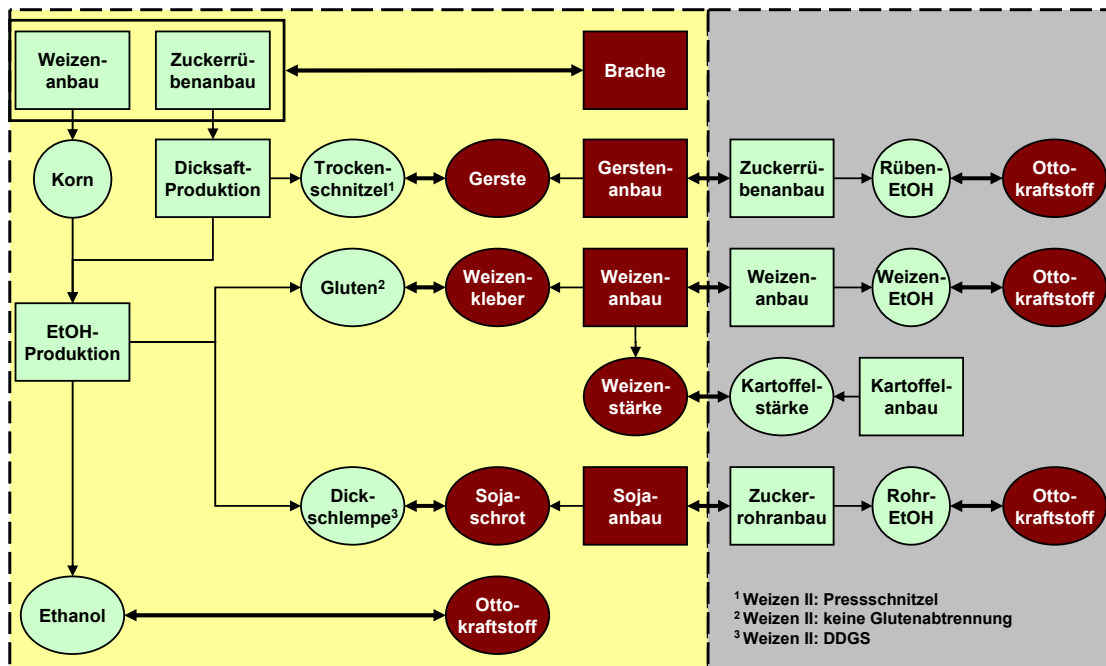


Abb. 7-2 Alternative Flächennutzung im erweiterten Szenario „Gerste“. Kombinierte Darstellung für Ethanol aus Weizen nach den Verfahren Weizen I und Weizen II

**Erweitertes Szenario: Kraftfutter Rübenschnitzel aus der Zuckerherstellung**

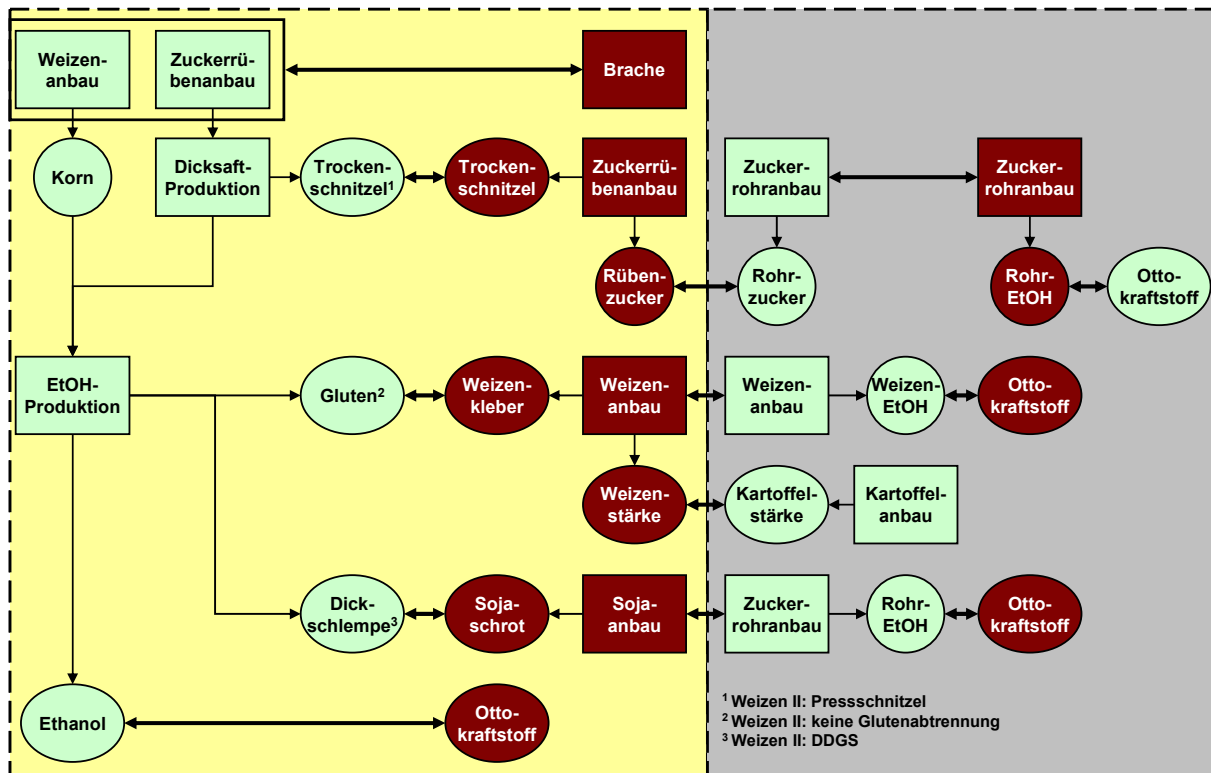


Abb. 7-3 Alternative Flächennutzung im erweiterten Szenario „Rübenschnitzel“. Kombinierte Darstellung für Ethanol aus Weizen nach den Verfahren Weizen I und Weizen II

## 7.2 Sensitivitätsanalysen

### 7.2.1 Bioenergie aus Weizen und Zuckerrübe

#### Wirkungsgrad der fossilen Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) bei Energieträger Erdgas

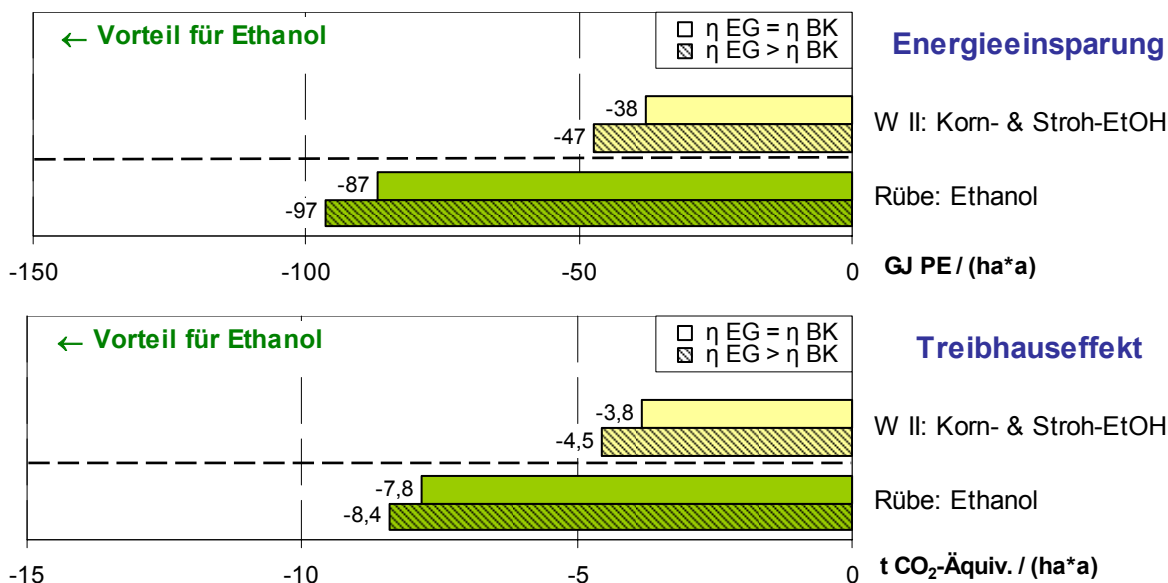


Abb. 7-4 Umweltwirkungen von Ethanol nach dem Weizen II- und Zuckerrüben-Verfahren gegenüber Ottokraftstoff. Variation des Wirkungsgrads der fossilen KWK bei Einsatz von Erdgas als Energieträger. Einfarbige Balken: gleicher Wirkungsgrad ( $\eta$ ) für Erdgas (EG) und Braunkohle (BK); schraffierte Balken:  $\eta_{EG} = 92\%$  und  $\eta_{BK} = 82\%$ ; W II = Weizen II; PE = Primärenergie

#### Lesebeispiel für den Balken „Rübe: EtOH – $\eta_{EG} > \eta_{BK}$ “ für Treibhauseffekt:

Wird statt Ottokraftstoff Ethanol aus Zuckerrübe eingesetzt und dabei zugrunde gelegt, dass Erdgas einen höheren Wirkungsgrad als Energieträger hat als Braunkohle, so können 8,4 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Hektar und Jahr eingespart werden, 0,6 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Hektar und Jahr mehr als unter Zugrundelegen des gleichen Wirkungsgrades von Erdgas und Braunkohle als Energieträger.

**Energieträger: Erdgas oder Braunkohle**

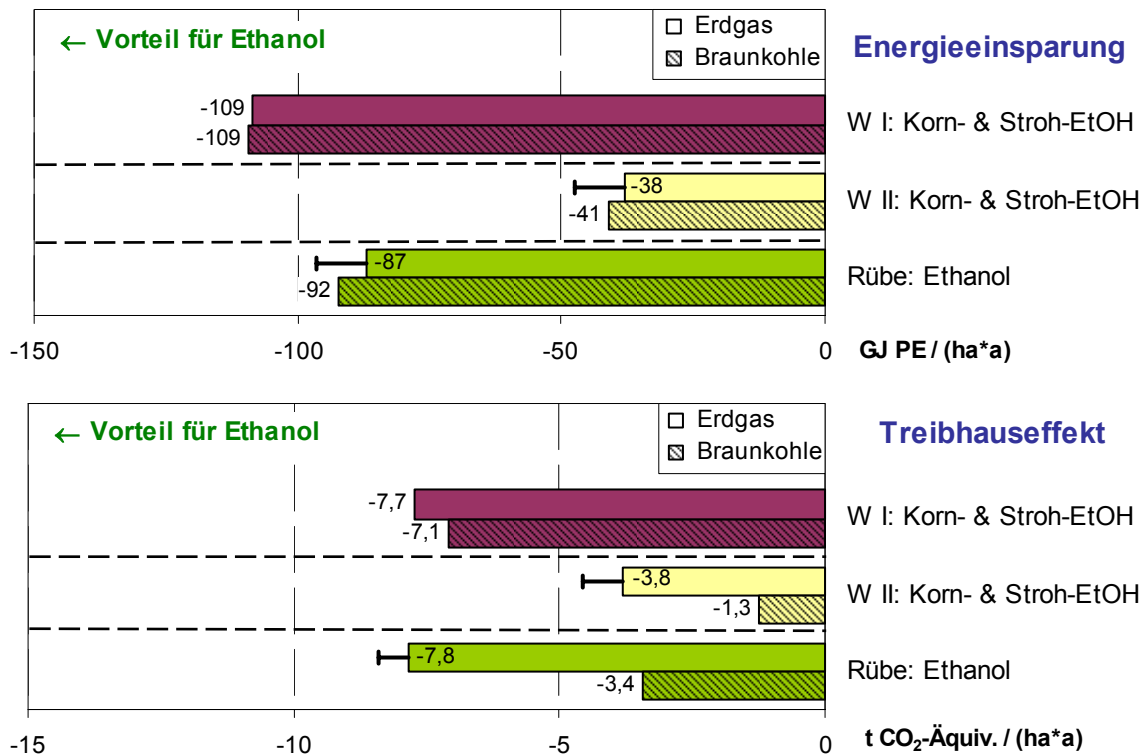


Abb. 7-5 Umweltwirkungen von Ethanol nach den drei untersuchten Ethanol-Herstellungsverfahren gegenüber Ottokraftstoff. Variation des im Produktionsprozess eingesetzten Energieträgers. Einfarbige Balken: Energieträger Erdgas; schraffierte Balken: Energieträger Braunkohle; schwarze Balken: Wirkungsgrad-Bandbreite bei Erdgas; W I = Weizen I; W II = Weizen II; PE = Primärenergie

**Lesebeispiel für den Balken „W II: Korn- & Stroh-EtOH – Erdgas“ für Treibhauseffekt:**

Wenn statt Ottokraftstoff Ethanol aus dem Weizen II-Verfahren eingesetzt wird und für die Produktion des Ethanols Erdgas als Energieträger für die Prozessenergie verwendet wurde, können 3,8 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Hektar und Jahr eingespart werden. Wird dagegen Braunkohle als Energieträger für die Prozessenergie verwendet, so reduziert sich die Einsparung aus der Nutzung von Ethanol aus dem Weizen II-Verfahren demgegenüber um 2,5 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Hektar und Jahr auf nur 1,3 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Hektar und Jahr.

### Höherer Wirkungsgrad durch Bioethanol

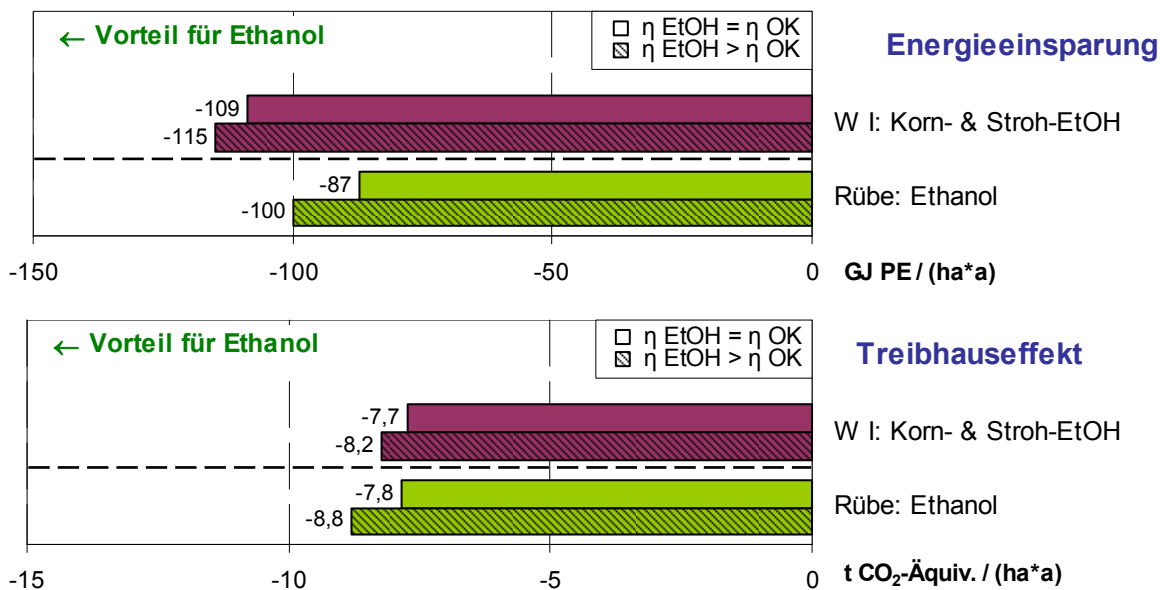


Abb. 7-6 Umweltwirkungen von Ethanol nach dem Weizen I- und Zuckerrüben-Verfahren gegenüber Ottokraftstoff. Einfarbige Balken: Substitution von Ottokraftstoff (OK) durch Ethanol (EtOH) im Verhältnis 1 : 1 auf Basis des unteren Heizwerts; schraffierte Balken: Substitution von Ottokraftstoff durch Ethanol im Verhältnis 1 : 0,94 auf Basis des unteren Heizwerts.  $\eta$  = Wirkungsgrad; W I = Weizen I; PE = Primärenergie

#### Lesebeispiel für den Balken „W I: Korn- & Stroh-EtOH – $\eta_{\text{EtOH}} > \eta_{\text{OK}}$ “ für Treibhauseffekt:

Wird statt Ottokraftstoff Ethanol aus dem Weizen I-Verfahren eingesetzt und dabei zugrunde gelegt, dass Ethanol den Wirkungsgrad des Motors gegenüber Ottokraftstoff um 6% steigert, so können 8,4 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Hektar und Jahr eingespart werden, 0,7 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente mehr pro Hektar und Jahr als unter Zugrundelegen des gleichen Motor-Wirkungsgrades von Ethanol und Ottokraftstoff.

Variation des Ertrags

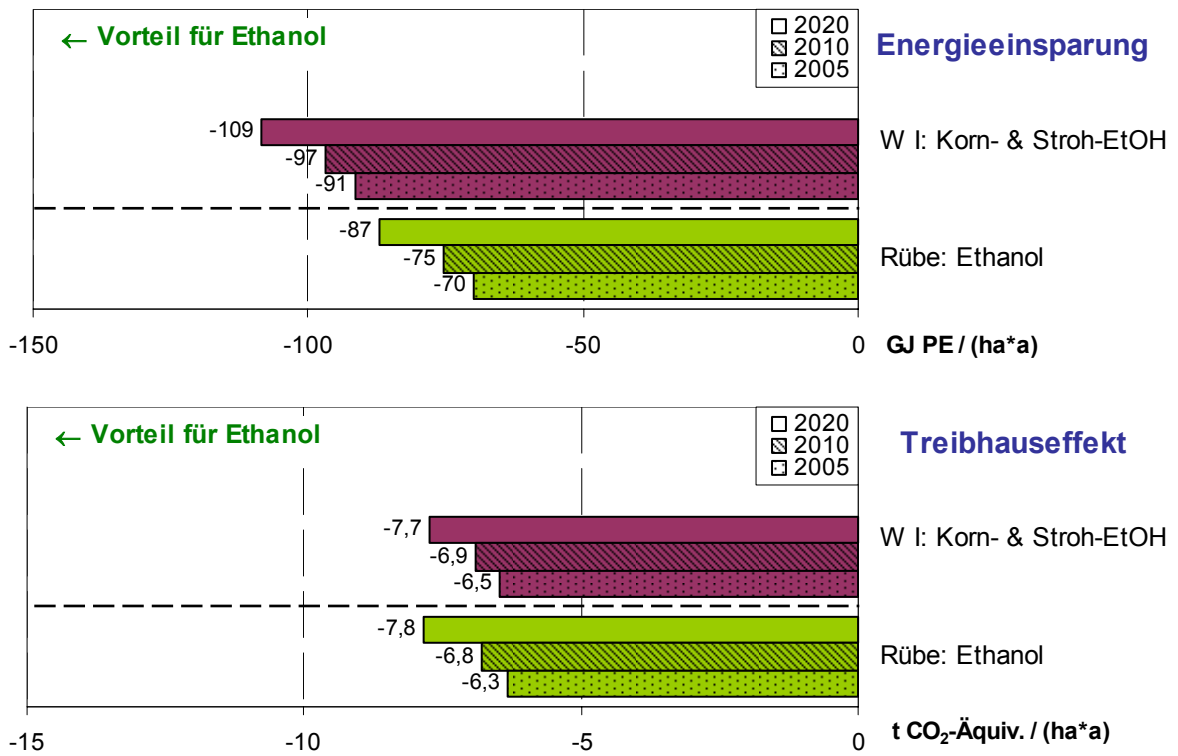


Abb. 7-7 Umweltwirkungen von Ethanol nach dem Weizen I- und Zuckerrüben-Verfahren gegenüber Ottokraftstoff. Variation der Weizen- und Zuckerrübenerträge für die Jahre 2005 (gepunktete Balken), 2010 (schraffierte Balken) und 2020 (einfarbige Balken). W I = Weizen I; PE = Primärenergie

**Lesebeispiel für den Balken „Rübe: Ethanol – 2020“ für Treibhauseffekt:**

Wird statt Ottokraftstoff Ethanol aus Zuckerrübe eingesetzt, können 7,8 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Hektar und Jahr eingespart werden, wenn eine Ertragssteigerung von 24% im Jahre 2020 im Vergleich zum Jahre 2005 zugrunde gelegt wird.

## BTL-Verfahren

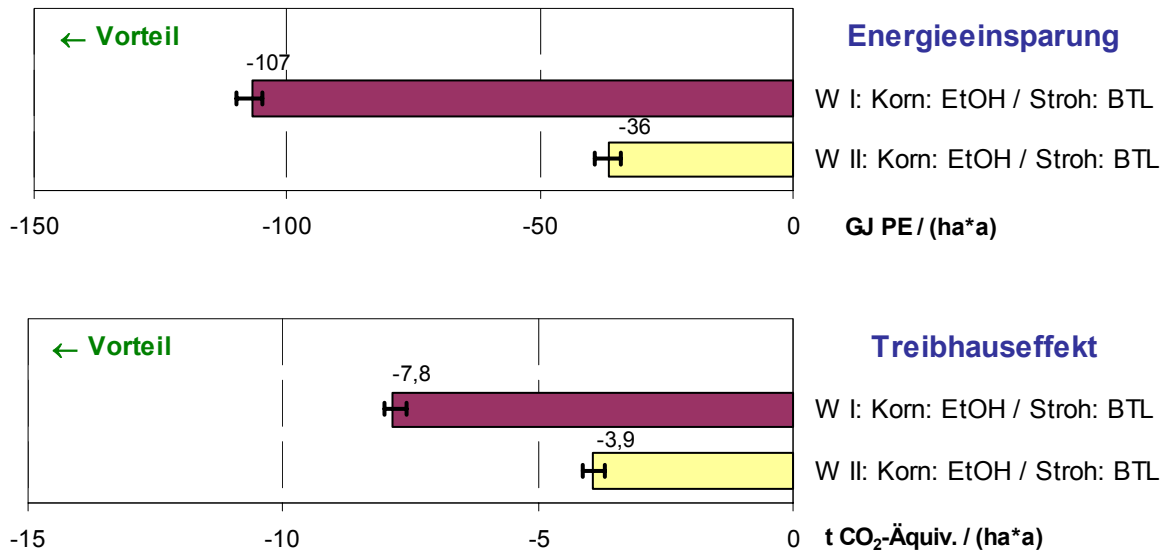


Abb. 7-8 Umweltwirkungen von Ethanol aus Weizenkorn und BTL aus Weizenstroh gegenüber Otto- und Dieseldieselkraftstoff. Variation der BTL-Verfahren; W I = Weizen I, W II = Weizen II; PE = Primärenergie

### Lesebeispiel für den Balken „W I: Korn: EtOH / Stroh: BTL“ für Treibhauseffekt:

Wird statt Ottokraftstoff Ethanol aus dem Weizenkorn und statt Dieseldieselkraftstoff BTL aus dem Weizenstroh eingesetzt, so können je nach angesetzttem BTL-Verfahren zwischen 7,6 und 8,0 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Hektar und Jahr eingespart werden.

**Stroh-Mitverbrennung im Steinkohle-Kraftwerk**

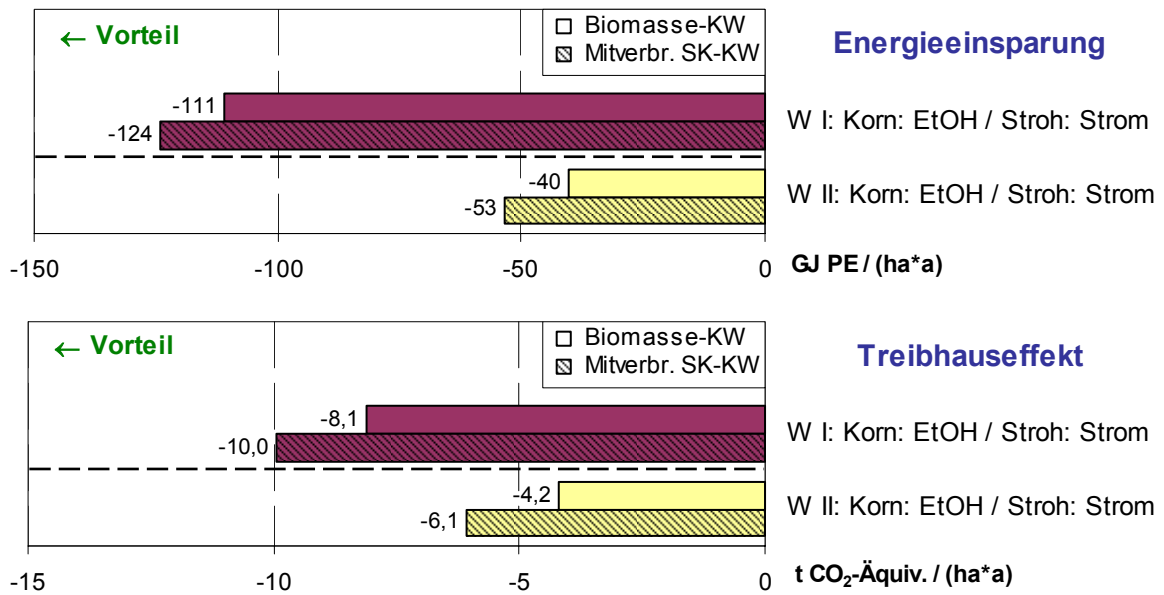


Abb. 7-9 Umweltwirkungen von Ethanol aus Weizenkorn und Strom aus Weizenstroh gegenüber Ottokraftstoff und Strom-Marginalmix bei Variation der Strohverbrennung. Einfarbige Balken: Strohverbrennung in einem Biomasse-Kraftwerk (Biomasse-KW); schraffierte Balken: Stroh-Mitverbrennung in einem Steinkohle-Kraftwerk (SK-KW); PE = Primärenergie

**Lesebeispiel für den Balken „W II: Korn: EtOH / Stroh: Strom – Mitv.“ für Treibhauseffekt:**

Wird statt Ottokraftstoff Ethanol aus Weizenkorn eingesetzt und das Weizenstroh zur Stromproduktion in einem Steinkohle-Kraftwerk mit verwertet, so können 6,1 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Hektar und Jahr eingespart werden, 1,9 t mehr als bei energetischer Nutzung des Strohs im reinen Biomasse-Kraftwerk.

### Wärmenutzung bei der biogenen Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

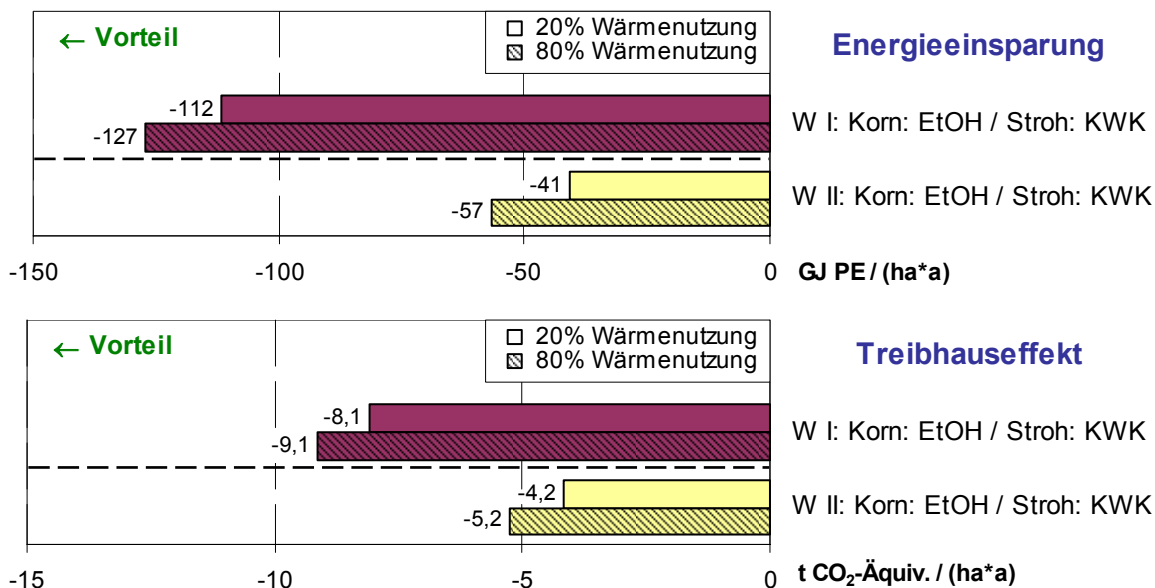


Abb. 7-10 Umweltwirkungen von Ethanol aus Weizenkorn und Strom und Wärme (KWK) aus Weizenstroh gegenüber Ottokraftstoff und Strom- und Wärme-Marginalmix bei Variation der Wärmenutzung. Einfarbige Balken: 20%-ige Wärmenutzung; schraffierte Balken: 80%-ige Wärmenutzung; PE = Primärenergie

#### Lesebeispiel für den Balken „W I: Korn: EtOH / Stroh: KWK – 80%“ für Treibhauseffekt:

Wird statt Ottokraftstoff Ethanol aus Weizenkorn eingesetzt und das Weizenstroh zur Produktion von Strom und Wärme anstelle des Strom- und Wärme-Marginalmixes verwendet, so können 5,2 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Hektar und Jahr eingespart werden, wenn die Wärmen zu 80% genutzt werden kann.

### Weiterverarbeitung des Bioethanols zu ETBE (nächste Seite)

#### Lesebeispiel für den Balken „Korn- & Stroh-ETBE“ für Treibhauseffekt:

Wird statt MTBE ETBE aus der Ethanolproduktion des Weizen I-Verfahrens eingesetzt, so können ca. 32 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Hektar und Jahr eingespart werden, 24,4 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Hektar und Jahr mehr als bei einem Einsatz von Ethanol aus Weizenkorn und -stroh anstelle von Ottokraftstoff.



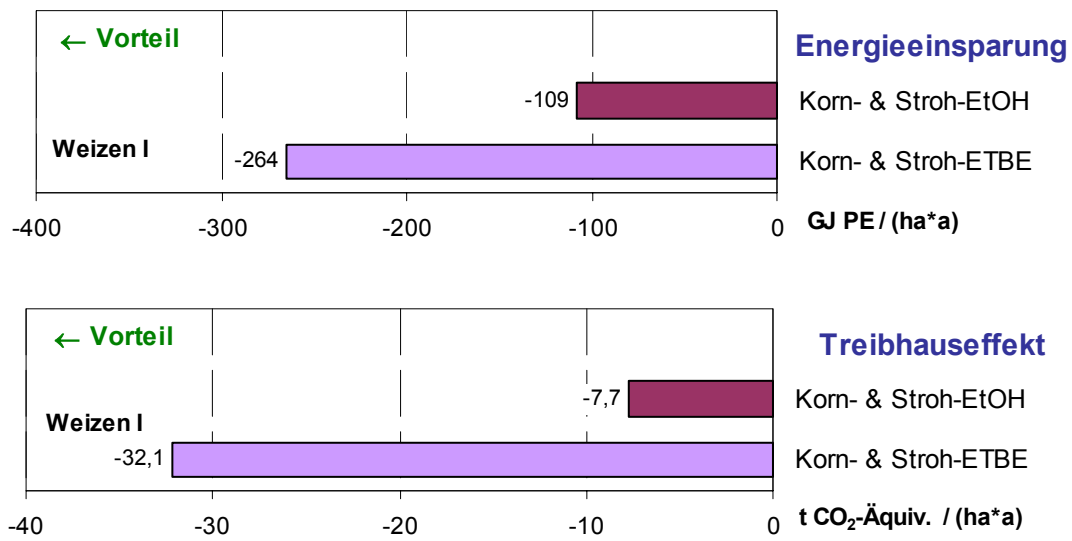


Abb. 7-11 Umweltwirkungen von Ethanol bzw. ETBE aus Weizen gegenüber Ottokraftstoff bzw. MTBE; PE = Primärenergie

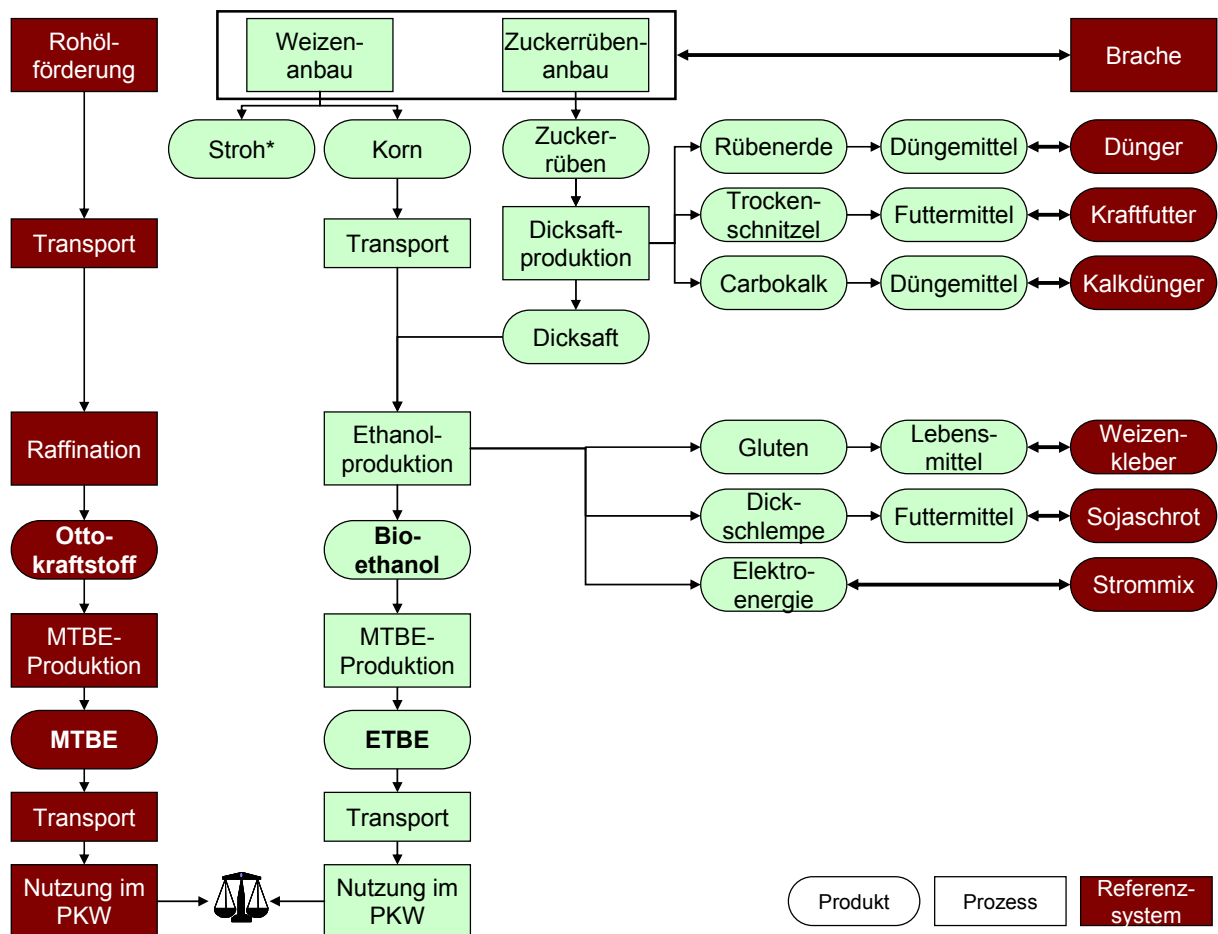


Abb. 7-12 Lebenswegvergleich zwischen MTBE und ETBE. Das zur ETBE-Produktion benötigte Bioethanol wird dabei nach dem Weizen I-Verfahren hergestellt.

## 7.2.2 Bioenergie aus Triticale

### BTL-Verfahren, Mitverbrennung und KWK-Wärmenutzung

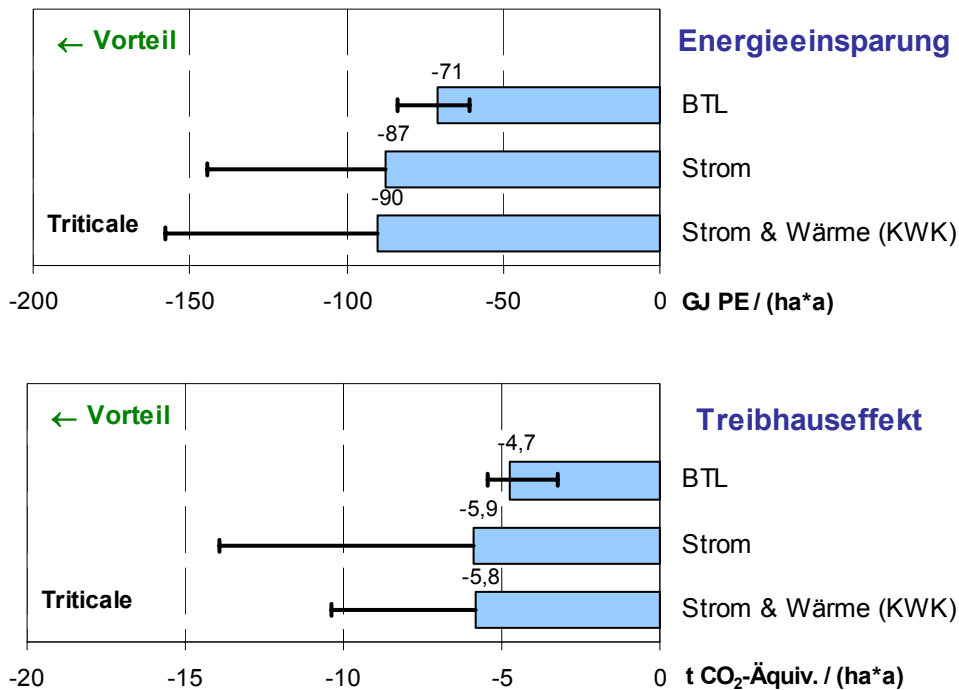


Abb. 7-13 Umweltwirkungen verschiedener Produkte aus Triticale; PE = Primärenergie

#### Lesebeispiel für den Balken „Strom“ für Treibhauseffekt:

Wird statt Strom-Marginalmix Strom eingesetzt, der durch die energetische Nutzung von Triticale-Ganzpflanze in einem Biomasse-Kraftwerk gewonnen wurde, so können 5,9 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Hektar und Jahr eingespart werden. Wird dagegen die Triticale-Ganzpflanze in einem Steinkohlekraftwerk zur Stromproduktion mit verwertet, so ersetzt sie praktisch reine Kohle, so dass 13,9 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Hektar und Jahr vermieden werden können. Dieses Potenzial ist durch den schwarzen Balken dargestellt.

### 7.3 Exkurs: Vergleich mit BTL aus Pappel

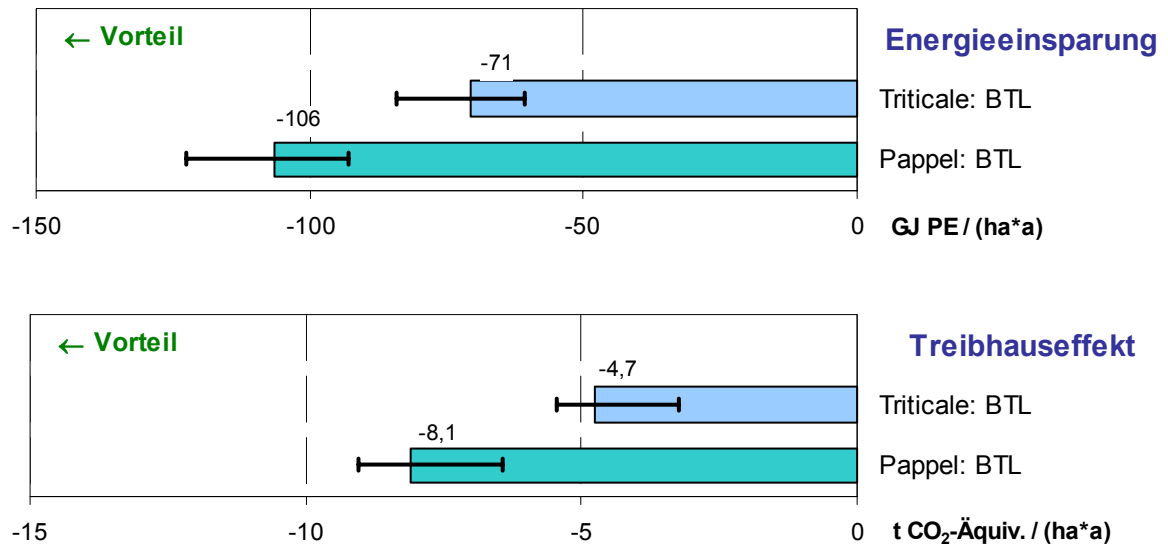


Abb. 7-14 Umweltwirkungen von BTL aus Triticale bzw. Pappel gegenüber Dieselkraftstoff; PE = Primärenergie

**Lesebeispiel für den Balken „Pappel: BTL“ für Treibhauseffekt:**

Wird BTL aus Pappel anstelle von Dieselkraftstoff eingesetzt, so können 8,1 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Hektar und Jahr eingespart werden und damit 70% mehr als bei BTL aus Triticale.

### 7.4 Vergleiche: Erweitertes Szenario

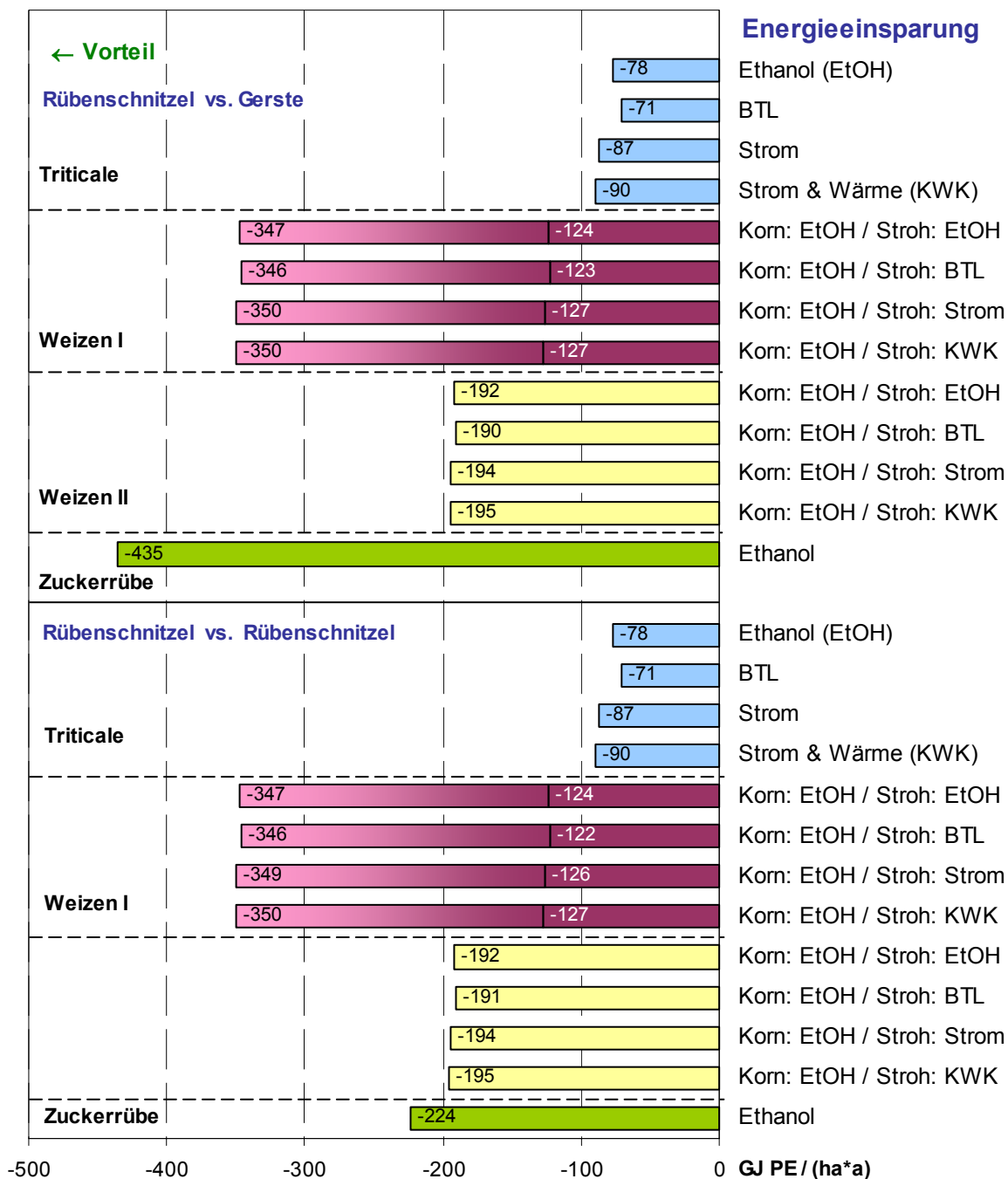


Abb. 7-15 Ergebnisse aller Lebenswegvergleiche für die erweiterten Szenarien „Gerste“ und „Rübenschnitzel“ für Energieeinsparung. Linker Teilbalken bei Weizen I: Gutschrift für Gluten; PE = Primärenergie

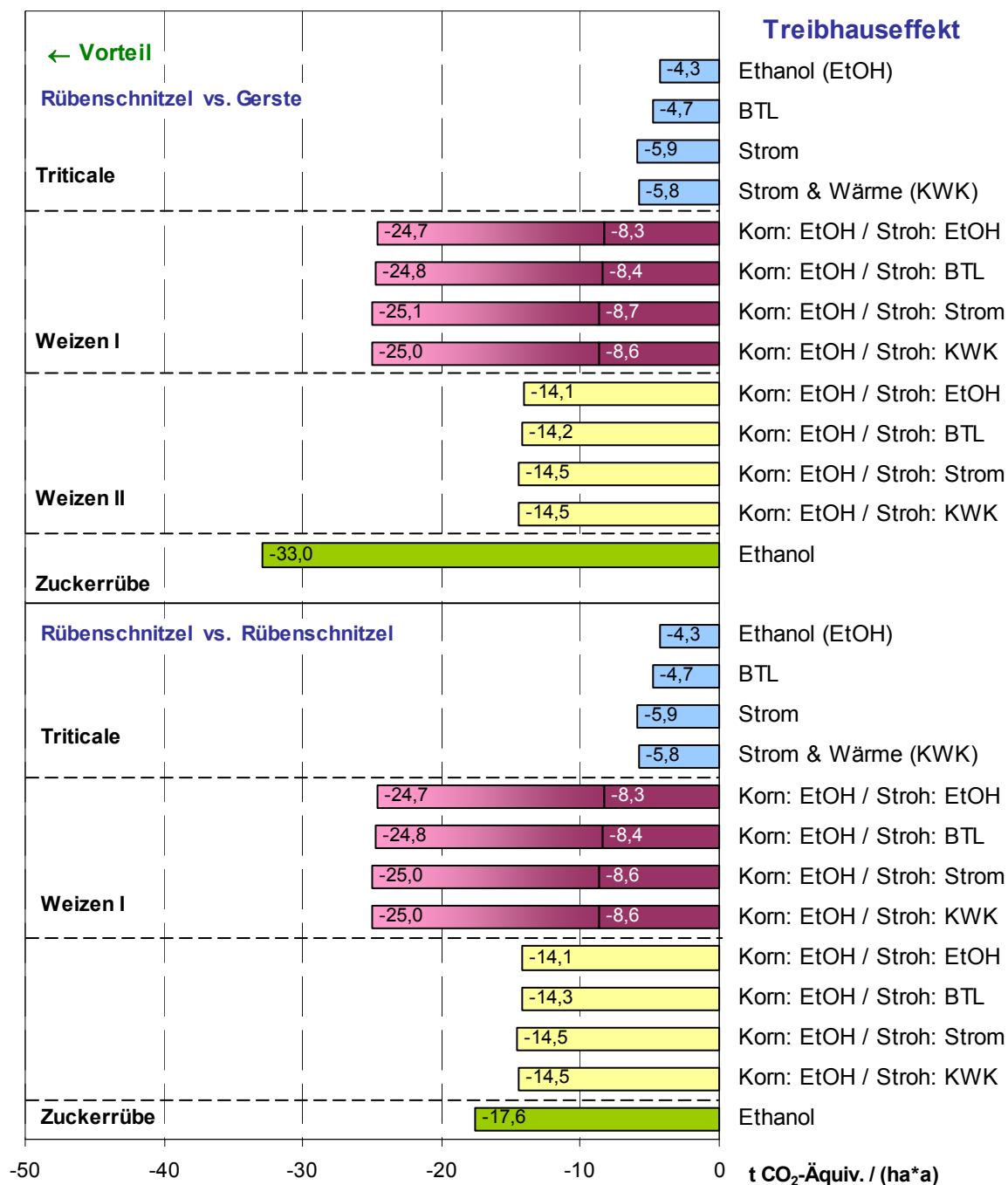


Abb. 7-16 Ergebnisse aller Lebenswegvergleiche für die erweiterten Szenarien „Gerste“ und „Rübenschnitzel“ für Treibhauseffekt. Linker Teilbalken bei Weizen I: Gutschrift für Gluten