



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE  
Bundesamt für Umwelt BAFU  
Bundesamt für Landwirtschaft BLW

# ÖKOBILANZ VON ENERGIEPRODUKTEN:

## ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG VON BIOTREIBSTOFFEN

### Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

Rainer Zah  
Heinz Böni  
Marcel Gauch  
Roland Hischier  
Martin Lehmann  
Patrick Wäger

Empa  
Abteilung Technologie und Gesellschaft  
Lerchenfeldstrasse 5  
CH-9014 St. Gallen  
[www.empa.ch/tsl](http://www.empa.ch/tsl)  
[rainer.zah@empa.ch](mailto:rainer.zah@empa.ch)

## **Impressum**

Rainer Zah, Heinz Böni, Marcel Gauch, Roland Hischer, Martin Lehmann & Patrick Wäger (Empa):  
*Ökobilanz von Energieprodukten: Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen*

Bern, 22. Mai 2007

### **Im Auftrag des Bundesamtes für Energie, des Bundesamtes für Umwelt und des Bundesamtes für Landwirtschaft:**

Bruno Guggisberg (BFE)  
Daniel Binggeli (BFE)  
Lukas Gutzwiler (BFE)  
Norbert Egli (BAFU)  
Daniel Zürcher (BAFU)  
Amira Ellenberger (BAFU)  
Anton Candinas (BLW)  
Reto Burkard (BLW)

### **Projektleitung:**

Niels Jungbluth, ESU-services Ltd., Uster

### **Critical Reviewer:**

Fredy Dinkel, Carbotech, Basel

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

## Zusammenfassung

Ziel dieser Studie ist die Beurteilung der Umweltauswirkungen der gesamten Produktionskette von in der Schweiz genutzten Treibstoffen aus Biomasse. Die Studie liefert einerseits eine handlungsorientierte Analyse der möglichen Umweltauswirkungen von Biotreibstoffen. Andererseits wird eine „ökologische Gesamtbilanz“ der verschiedenen Biotreibstoffe erstellt, die als Grundlage für die Festlegung der Befreiung von der Mineralölsteuer verwendet werden kann. Zusätzlich werden die Auswirkungen der Treibstoffnutzung mit anderen Nutzungsformen für Bioenergie, wie Strom- und Wärmenutzung, verglichen. Die auf der Schweizerischen Umweltinventardatenbank *ecoinvent* beruhende Studie erlaubt einen gesamthaften Vergleich der Umweltauswirkungen von Biotreibstoffen; Kosten der Biotreibstoffe, oder soziale Folgen der Produktion werden jedoch nicht bewertet. Die Resultate beziehen sich auf durchschnittliche Verhältnisse im Jahr 2004 in den jeweiligen Produktionsländern und gelten bezüglich Nutzung für die Schweiz als Ganzes. Die Studie kann somit keine Antworten auf die Frage nach zukünftigen Auswirkungen – beispielsweise auf Nahrungsmittelpreise – geben.

Grundsätzlich lässt sich jeder der untersuchten Treibstoffe (Bioethanol, Biomethanol, Biodiesel und Biogas) auf umweltfreundliche Art produzieren – entscheidend ist, welche Rohstoffe und Produktionstechnologien dabei eingesetzt werden. Der grösste Anteil der Umweltbelastung geht dabei auf den landwirtschaftlichen Anbau der jeweiligen Rohstoffe zurück. Deutlich geringer ist in der Regel die Umweltbelastung durch die Treibstoff-Produktion. Nochmals geringer ist die Umweltbelastung durch den Transport vom Produktionsort an die Schweizer Tankstelle, selbst wenn die Biotreibstoffe in Übersee produziert werden. Die vorliegende Studie zeigt, dass bei den meisten Biotreibstoffen ein Zielkonflikt zwischen der Minimierung der Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) und einer positiven ökologischen Gesamtbilanz besteht. Zwar lassen sich mit einer ganzen Reihe von Biotreibstoffen die THG-Emissionen um mehr als 30% reduzieren. Die meisten dieser Bereitstellungspfade weisen jedoch bei mehreren anderen Umweltindikatoren höhere Belastungen als Benzin auf.

Die ökologische Gesamtbilanz wurde einerseits mit der Schweizer Methode der ökologischen Knappheit (UBP 06) bestimmt, welche die Differenz der Umweltbelastungen zu den gesetzlich festgelegten Grenzwerten bewertet, andererseits mit der europäischen Methode Eco-indicator 99, welche die Schädigung der menschlichen Gesundheit und der Ökosysteme quantifiziert. Beide Methoden zeigen das gleiche Bild: Im Falle der tropischen Landwirtschaft ist dies primär die Brandrodung von Urwäldern, welche grosse Mengen von CO<sub>2</sub> freisetzt, eine erhöhte Luftbelastung bewirkt und massive Auswirkungen auf die Biodiversität hat. In den gemässigten Breiten sind teils der niedrige Flächenertrag, teils die intensive Düngung und mechanische Bearbeitung für eine ungünstige Umweltbeurteilung ausschlaggebend. Im Gegensatz zu den fossilen Treibstoffen lassen sich die Umweltauswirkungen von Biotreibstoffen aber durch gezielte Massnahmen deutlich verringern. In Sensitivitätsanalysen zeigt die Studie auf, wie beispielsweise eine Reduktion des Methanschlupfs die Ökobilanz der Biogas-Produktion verbessern kann oder welchen Einfluss der Verzicht auf Brandrodung für die Ökobilanz von Biodiesel aus Palmöl hat.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse dieser Studie, dass eine Förderung von Biotreibstoffen beispielsweise durch steuerliche Begünstigung, differenziert erfolgen muss. Nicht alle Biotreibstoffe führen per se zu einer Reduktion der Umweltauswirkungen im Vergleich zu fossilen Treibstoffen. Von den untersuchten Produktionspfaden zeigt gegenwärtig vor allem die Verwertung von biogenen Abfallstoffen, von Gras und von Holz eine Reduktion der Umweltauswirkungen gegenüber Benzin. Da das Potential der einheimischen Bioenergie heute – aber auch in Zukunft – beschränkt ist, lassen sich mit Bioenergie allein unsere Energieprobleme nicht lösen. Wird die verfügbare Biomasse jedoch effizient und umweltfreundlich in Energie transformiert, gleichzeitig der Verbrauch gesenkt und die Energieeffizienz erhöht, so können diese alternativen Energieträger im Verbund mit anderen erneuerbaren Energieformen eine nicht zu vernachlässigende Rolle in unserer zukünftigen Energieversorgung leisten.

## Résumé

Cette étude est consacrée à l'évaluation des effets sur l'environnement de l'ensemble de la chaîne de production des carburants produits à partir de biomasse utilisés en Suisse. Elle fournit d'une part une analyse orientée vers l'action des effets possibles des biocarburants sur l'environnement et elle établit d'autre part un écobilan global des différents biocarburants qui peut être utilisé comme base pour la détermination de leur exemption de l'impôt sur les huiles minérales. Par ailleurs, elle compare aussi les effets de l'utilisation des carburants avec ceux d'autres formes de l'utilisation des bioénergies telles que l'électricité et la chaleur. Cette étude, qui repose la banque de donnée d'inventaires environnementaux ecoinvent permet une comparaison globale des effets sur l'environnement des biocarburants. Le coût de biocarburants ou les conséquences sociales de leur production n'ont toutefois pas été évalués. Les résultats se rapportent aux conditions moyennes de l'année 2004 dans les pays de production concernés et s'appliquent à la Suisse dans son ensemble pour ce qui est de leur consommation. Cette étude ne peut ainsi pas fournir de réponse sur les conséquences futures telles que par exemple sur les effets sur le prix des denrées alimentaires.

Par principe chacun des carburants étudié (bioéthanol, biométhanol, biodiesel et biogaz) peut être produit de manière écologique- ce qui est décisif, ce sont les matières premières et les technologies utilisées pour leur production. La majeure partie des pressions exercées sur l'environnement proviennent de la culture des matières premières utilisées. La pollution provoquée par la production des carburant eux-mêmes est en règle générale nettement plus faible et celle découlant des transports du site de production aux stations service, encore plus faible, cela même si le biocarburant est produit outremer. Cette étude montre que pour la majorité des biocarburants il existe un conflit d'objectifs entre la minimisation des émissions de gaz à effet de serre et un bilan écologique global positif. Certes de nombreux biocarburants permettent de réduire de plus de 30% les émissions de gaz à effet de serre, mais la majorité de leurs filières de production présentent pour plusieurs autres indicateurs environnementaux une pollution plus élevée que pour l'essence.

Le bilan global a été déterminé d'une part à l'aide de la méthode suisse de la saturation écologique (UBP 06) qui évalue la différence entre les impacts sur l'environnement et les valeurs limites légales et d'autre part avec la méthode européenne Eco-indicator 99 qui quantifie les atteintes à la santé humaine et aux écosystèmes. Les deux méthodes aboutissent à une image semblable: dans le cas de l'agriculture tropicale c'est en premier lieu le défrichage par brûlage des forêts qui libère de grandes quantités de CO<sub>2</sub>, provoque une augmentation de la pollution atmosphérique et exerce des effets massifs sur la biodiversité. Sous les latitudes modérées, ce sont en partie les bas rendements superficiels, la fertilisation intensive et la mécanisation qui sont déterminants pour une évaluation écologique défavorable. Toutefois au contraire de ce qui est le cas pour les carburants fossiles, il est possible de réduire notablement par des mesures ciblées les effets sur l'environnement des biocarburants. Dans des analyses de sensibilité cette étude montre comment par exemple une réduction des pertes de méthane permet d'améliorer l'écobilan de la production de biogaz ou quelle influence exerce le renoncement au défrichage par brûlage dans la production de biodiesel à partir d'huile de palme.

Au total les résultats de cette étude montrent que la promotion des biocarburants, par exemple par le biais de mesures fiscales, doit s'effectuer de manière différenciée. Tous les biocarburants ne conduisent pas intrinsèquement à une réduction des effets sur l'environnement par comparaison avec les carburants fossiles. Parmi les filières de production, c'est actuellement la valorisation des déchets biogènes, de l'herbe et du bois qui conduit à une réduction des effets sur l'environnement par rapport à l'essence. Mais le potentiel de la bioénergie indigène est actuellement limité et le restera aussi dans l'avenir, la bioénergie ne permettra pas à elle seule de résoudre nos problèmes d'énergie. Mais si l'on transforme de manière efficace et écologique en énergie la biomasse disponible et que l'on réduit simultanément la consommation en augmentant l'efficacité énergétique, ces supports énergétiques de remplacement peuvent, en association avec d'autres formes d'énergie renouvelables, jouer un rôle non négligeable dans notre approvisionnement futur en énergie.

## Riassunto

Scopo di questo studio è la valutazione dell'impatto ambientale di tutta la catena produttiva dei propellenti usati in Svizzera. Da una parte lo studio fornisce un'analisi sugli utilizzi pratici dei possibili impatti ambientali di carburanti biologici. Dall'altra è compilato un'„ecobilancio generale“ dei diversi propellenti, da utilizzarsi per fissare gli sgravi tributari relativi all'uso di carburanti. Viene inoltre comparato l'uso dell'energia biologica con quello di altre forme energetiche in altri settori di utilizzo, come quello per la produzione di corrente o di calore. Lo studio, basato sull'inventariato ambientale offerto dalla banca dati svizzeraecoinvent, consente un confronto generale sull'impatto ambientale di carburanti biologici, ma non sono valutati né i costi dei biocarburanti né le conseguenze sociali relative alla loro produzione. I risultati, riferiti alla situazione media 2004 nei paesi produttori, valgono per il consumo svizzero considerato nel suo insieme. Per questo motivo lo studio non può fornire risposte su effetti futuri, come ad esempio quelli sui costi di generi alimentari.

In linea di principio, ognuno dei carburanti presi in esame (bioetanolo, biometanolo, biodisel e biogas) può essere prodotto rispettando l'ambiente; a questo riguardo sono di primaria importanza le materie prime e le tecnologie produttive utilizzate. La maggior parte dell'impatto ambientale è da addebitarsi alla coltivazione delle relative materie prime. Notevolmente minore è in genere l'impatto ambientale dovuto alla produzione del carburante, ed ancora inferiore è quello addebitabile al trasporto dal luogo di produzione alle stazioni di rifornimento svizzere, anche nel caso che i carburanti vengano prodotti oltre oceano. Il presente studio indica che per la maggior parte di carburanti biologici esiste un conflitto tra il minimizzare le emissioni di gas ad effetto serra e un ecobilancio globale positivo. È pur vero che con tutta una serie di carburanti biologici le emissioni di gas ad effetto serra possono essere ridotte del 30% e più, ma in ogni caso molti altri indicatori evidenziano un carico ambientale del loro processo produttivo superiore a quello della benzina.

L'ecobilancio globale è stato fatto da una parte con il metodo svizzero della scarsità ecologica (UBP 06), che esamina la differenza tra carico ambientale e valori limiti stabiliti per legge, dall'altra con il metodo europeo Eco-indicator 99, che quantifica sia il danno sulla salute umana che sull'ecosistema. Entrambi forniscono lo stesso quadro: nel caso di economia agricola a livello tropicale, il disboscamento, nel bruciare grandi estensioni di foreste tropicali, libera grandi quantità di CO<sub>2</sub>, causa un maggiore inquinamento atmosferico ed ha un forte impatto sulla diversità biologica. A latitudini intermedie la valutazione sfavorevole è dovuta in parte ai bassi ricavi conseguiti dallo sfruttamento delle aree agricole, in parte alla eccessiva concimazione ed alla lavorazione meccanica. Ma al contrario dei carburanti fossili, gli impatti ambientali dei carburanti biologici possono essere notevolmente ridotti con provvedimenti mirati. Ad esempio, nell'analisi della sensibilità, lo studio indica come una riduzione di dispersione di metano può migliorare l'ecobilancio della produzione di biogas o mostra quale influsso abbia sull'ecobilancio relativo al biodisel derivato da olio di palma la rinuncia al disboscamento per combustione.

I risultati di questo studio indicano in generale che un sostegno di biocombustibili debba essere fatto in modo differenziato, ad esempio con politiche fiscali. Comparati ai combustibili fossili, non tutti i biocombustibili portano di per sé ad una riduzione di impatto ambientale. Tra tutti i processi produttivi esaminati, attualmente è l'utilizzo di rifiuti biogeni, di piante graminacee che, in confronto alla benzina, in primo luogo porta ad una riduzione dell'impatto ambientale. Poiché oggi, ma anche in futuro, il potenziale di bioenergia autoctona è limitata, i nostri problemi non si lasciano risolvere solo con la bioenergia. Ma se la biomassa disponibile è trasformata in energia in modo efficiente e rispettoso dell'ambiente e se allo stesso tempo si migliora l'efficienza energetica, allora queste forme di energia alternativa, in congiunzione con altre forme di energia rinnovabile, possono giocare un ruolo non trascurabile per il nostro futuro approvvigionamento di energia.

## Summary

The objective of this study is to evaluate the environmental impact of the entire production chain of fuels made from biomass used in Switzerland. Firstly the study supplies an analysis of the possible environmental impacts of biofuels suitable as a basis for political decisions. Secondly an “ecological life-cycle analysis” (LCA) of the various biofuels is done, which can be used as a basis for granting an exemption from the excise duty on hydrocarbon oil. In addition, the impacts of fuel use are compared with other uses for bioenergy such as the generation of electricity and heat. The study based on the Swiss database of environmental inventories ecoinvent gives a holistic comparison of the environmental impacts of biofuels; however neither the costs of biofuels nor the social consequences of their production are evaluated. The results refer to average values from the year 2004 in the respective production countries and are to be taken as a snapshot of factors relevant to the fuels’ use in Switzerland. Thus the study cannot provide any answers to questions concerning future impacts – for instance, on food prices.

In principle, each of the fuels examined (bioethanol, biomethanol, biodiesel and biogas) can be produced in an environmentally friendly way – it depends on what raw materials and production technologies are used. Most of the environmental impacts can be attributed to the agricultural cultivation of the respective raw materials (feedstocks). The environmental impact from fuel processing is usually much lower. The environmental impact from the transport from the production site to Swiss filling stations is even less, even when the biofuels are produced overseas. The present study shows that with most biofuels there is a trade-off between minimizing greenhouse gases (GHG emissions) and a positive ecological LCA. It is true that GHG emissions can be reduced by more than 30% with a number of biofuels. However most of these supply paths show greater impacts than petrol for various other environmental indicators.

The ecological LCA was done using two different methods: one was the Swiss method of ecological scarcity (Environmental Impact Points, UBP 06), which evaluates the difference between environmental impacts and legal limits. The other one is the European Eco-indicator 99 method, which quantifies the damage done to human health and ecosystems. Both methods show the same results: in the case of tropical agriculture it is primarily the slashing and burning of rainforests that releases the largest quantities of CO<sub>2</sub>, causes an increase in air pollution and has massive impacts on biodiversity. In the moderate latitudes it is partly the lower crop yields, partly the intensive fertilizer use and mechanical tilling of the soil that are the causes of a bad environmental evaluation. However unlike the case of fossil fuels, the environmental impacts of biofuels can be greatly reduced by specific measures. The study shows in sensitivity analysis how, for instance, a reduction in methane leakage can improve the LCA of biogas production or what effect a prohibition of slash and burn would have on the LCA of biodiesel made from palm oil.

Overall, the results of the study show that any promoting of biofuels by a tax break, for instance, must be done so as to target the best production paths. Not all biofuels per se can reduce environmental impacts as compared to fossil fuels. Currently, of all the production paths investigated, it is especially the use of biogenic wastes ranging from grass to wood that brings a reduction in environmental impact as compared with petrol. Since the potential of domestic bioenergy today is limited – and will be so in future – bioenergy will not solve our energy problems. However if the available biomass is transformed into energy in an efficient and environmentally friendly manner, while at the same time consumption is reduced and energy efficiency increased, these alternative energy carriers can together with other forms of renewable energy play a role in our future energy supply that should not be neglected.

# Executive Summary

Im Zusammenhang mit der Verknappung fossiler Energieträger und der Klimaproblematik stösst die Nutzung von erneuerbaren Energieträgern sowohl in der Schweizer Öffentlichkeit als auch in der Industrie auf steigendes Interesse. Im Strassenverkehr sind Treibstoffe aus Biomasse – sogenannte Biotreibstoffe – gegenwärtig die wichtigste erneuerbare Energieform und könnten zumindest kurz- und mittelfristig eine Rolle bei der Reduktion der Treibhausgase und der Abhängigkeit von fossilen Energieträgern übernehmen.

Vor dem Hintergrund, den Einsatz von erneuerbaren Treibstoffen gegenüber Diesel und Benzin steuerlich zu fördern, stehen in der Schweiz deshalb wichtige politische Entscheide an.

Obwohl Biotreibstoffe aus erneuerbaren Ressourcen bestehen, kann bei deren Anbau und Verarbeitung ein gegenüber fossilen Treibstoffen deutlich breiteres Spektrum von Umweltbelastungen entstehen. Dieses reicht von Überdüngung und Versauerung des landwirtschaftlichen Bodens bis hin zu Biodiversitätsverlust hervorgerufen durch die Brandrodung von Regenwaldflächen. Weiter darf nicht vergessen werden, dass eine Ausdehnung der landwirtschaftlichen Energieproduktion zu einer Flächenkonkurrenz mit anderen Landnutzungsformen wie der Nahrungsmittelproduktion oder dem Erhalt natürlicher Flächen führen kann. Energetische Effizienz und erzielte Treibhausgasreduktion können daher nicht die alleinigen Kriterien für eine ökologische Gesamtbewertung dieser alternativen Treibstoffe sein.

Ziel dieser Studie ist die Beurteilung der Umweltauswirkungen der gesamten Produktionskette von in der Schweiz genutzten Biotreibstoffen. Die Studie soll einerseits eine handlungsorientierte Analyse der Umweltauswirkungen von erneuerbaren Energieträgerträgern liefern. Andererseits soll eine „ökologische Gesamtbilanz“ der verschiedenen Biotreibstoffe erstellt werden, die als Grundlage für die Umsetzung der Befreiung erneuerbarer Treibstoffe von der Mineralölsteuer verwendet werden kann. Zusätzlich werden die Auswirkungen der Treibstoffnutzung mit anderen Nutzungsformen für Bioenergie, wie Strom- und Wärmenutzung, verglichen.

## Methodik

Um die Auswirkungen von Biotreibstoffen auf die Umwelt möglichst genau bestimmen zu können, wurde die Methodik der Ökobilanzierung verwendet. Dabei werden der für die Erfüllung einer definierten Funktion (z.B. dem Tanken von 1 MJ Energie an einer Schweizer Tankstelle) notwendige Energie- und Ressourcenverbrauch und sämtliche anfallenden Schadstoffemissionen über den gesamten Lebenszyklus gesamthaft beurteilt. Die dazu notwendigen Inventardaten für Biotreibstoffe wurden in einem ersten Teilprojekt erhoben und durch zusätzliche Daten aus der Schweizer Umweltinventardatenbank (ecoinvent 1.3) ergänzt. Die Auswirkungen auf die Umwelt wurden anschliessend einerseits mit Hilfe von **handlungsorientierten Indikatoren** bestimmt, welche die unmittelbaren Umweltauswirkungen beschreiben und gezielte Rückschlüsse auf mögliche Massnahmen erlauben. Andererseits wurde eine **ökologische Gesamtbilanz** erstellt, bei der die unterschiedlichen Schadstoff-Wirkungen gewichtet und aggregiert werden, sodass die gesamte Umweltauswirkung abgeschätzt werden konnte (siehe Abbildung 1). Zu beachten ist, dass die aggregierten Bewertungsmethoden (in dieser Studie UBP 06<sup>1</sup> und Eco-indicator 99<sup>2</sup>) die Gewichtung der verschiedenen Umweltauswirkungen (z.B. Treibhauseffekt vs. Überdüngung) vorwegnehmen. Für den politischen Diskurs ist es daher wichtig, sich nicht allein auf die Gesamtbewertung abzustützen, sondern von Fall zu Fall die zugrundeliegenden handlungsorientierten Einzelindikatoren miteinzubeziehen.

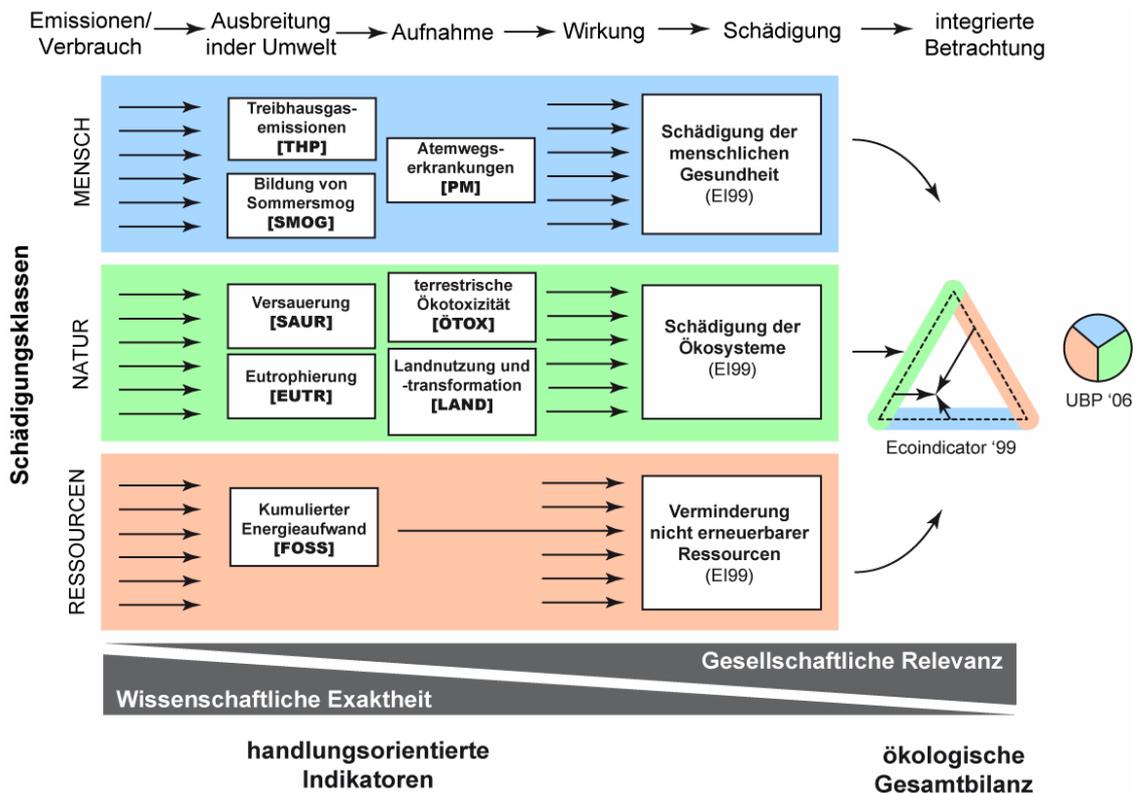
In der Studie wurden erneuerbare Energieträgerträger aus der Schweiz und aus ausländischer Produktion verglichen, als Nutzungsort wurde jedoch immer die Schweiz angenommen. Die Beurteilung erfolgte «cradle-to-grave<sup>3</sup>»; dabei werden alle relevanten Umweltauswirkungen vom Biomasse-Anbau bzw. der Entstehung eines biogenen Abfallstoffes bis hin zur energetischen Nutzung miteinbezogen. Als Betrachtungszeitraum wurde die Situation im Jahr 2004 gewählt, wobei teilweise auf ältere oder neuere Daten zurückgegriffen werden musste.

---

<sup>1</sup> Methode der ökologischen Knappheit (UBP 06). Die Masseinheit sind Umweltbelastungspunkte. Diese Schweizer Methode schätzt die totale Umweltbelastung aus der Differenz der Emissionswerte zu den gesetzlichen Vorschriften.

<sup>2</sup> Voll aggregierende Umweltbewertungsmethode, die auf der Ausbreitung und Schädigungswirkung von Emissionen beruht.

<sup>3</sup> „Von der Wiege bis zur Bahre“



**Abbildung 1** Schema der in dieser Studie verwendeten Umweltindikatoren entlang des Ausbreitungs- und Wirkungspfades.

Ein wichtiger Aspekt bei der Bilanzierung von nachwachsenden Rohstoffen ist die Berücksichtigung von Koppelprodukten: Bei der Herstellung der in dieser Studie untersuchten Produkte gibt es auf verschiedenen Produktionsstufen Nebenprodukte, für die eine Allokation der Umweltauswirkungen auf die verschiedenen Produkte notwendig ist. So müssen z.B. die Rohstoffinputs und Umweltbelastungen aus dem Pressen von Rapskörnern auf die beiden Produkte Rapsöl und Rapskuchen aufgeteilt werden. Erfolgt ist diese Allokation bei der vorausgegangenen Datenerfassung in der Regel nach ökonomischen Kriterien, was bedeutet, dass die Umweltauswirkungen gemäss den Anteilen des erzielten Erlöses auf die jeweiligen Produkte verteilt wurden.

### Grenzen der Arbeit

Die gewählte Methodik erlaubt einen gesamthaften Vergleich von Bioenergieträgern unter Berücksichtigung der gesamten Produktionskette. Dennoch besitzt der Ansatz bei der Interpretation der Ergebnisse folgende Grenzen:

- Die Methodik der Ökobilanzierung analysiert die Umweltauswirkungen von Stoff- und Energieflüssen. Es lassen sich damit keine Aussagen zu ökonomischen Faktoren wie z.B. Kosten oder zu sozialen Faktoren wie z.B. Kinderarbeit machen.
- Obwohl der hier gewählte Ökobilanzierungsansatz sehr umfassend ist, werden gewisse Umweltauswirkungen nicht oder nur unvollständig berücksichtigt. Beispielsweise werden die Auswirkungen der Wassernutzung nicht bewertet, da diese stark von lokalen Gegebenheiten (Niederschlagsmenge, Grundwasserspiegel, etc.) abhängig ist. Unvollständig ist die Bewertung von Biodiversitätsverlusten da insbesondere bei tropischen Ökosystemen die Datengrundlage fehlt.
- Im gewählten Bilanzierungsansatz werden nur die primären Umweltauswirkungen der Prozesskette berechnet, beispielsweise Energieverbrauch und Schadstoffemissionen beim Anbau von Energie-Raps. Sekundäre Folgen werden hingegen nicht berücksichtigt. (Auf der Energie-Raps-Anbaufläche wurden beispielsweise vorher Nahrungsmittel angebaut. Diese müssen nun aus dem Ausland importiert werden, es fallen also zusätzliche Transporte und damit verbundene Umweltbelastungen an.)

- Bei der Anbaubiomasse (z.B. Getreide oder Kartoffeln) wird nicht zwischen Ernteüberschüssen oder spezifisch zur Treibstoffherstellung produzierter Biomasse unterschieden. Auch differenziert die Methode nicht zwischen der Nutzung von bereits bewirtschafteten Flächen oder neu zu bewirtschaftenden Stilllegungsflächen oder Brachflächen, und damit verbundenen Umwelteinflüssen, wie z.B. eine Reduktion der Biodiversität.
- Auf Grund der vorliegenden Sachbilanzdaten beziehen sich die Resultate im Wesentlichen auf bestehende Prozessketten und decken somit das Bezugsjahr 2004 ab; zukünftige Entwicklungen werden nicht beurteilt. Ein ansatzweiser Ausblick auf zukünftige Entwicklungen wird durch die Sensitivitätsanalysen und die möglichen Optimierungspotentiale gegeben.
- Da viele Allokationen aufgrund von Verkaufserlösen berechnet werden und Erlöse von der Marktdynamik abhängen, sind die Ergebnisse dieser Studie nicht 'in Stein gemeisselt' und müssen allenfalls zu einem späteren Zeitpunkt überprüft werden.
- Die untersuchten Prozessketten stellen nur eine Teilmenge aller Herstellungsverfahren dar; eine Vielzahl weiterer Herstellungspfade wäre denkbar. Die ausgewählten Pfade werden für die heutige Situation in der Schweiz als besonders relevant betrachtet.
- Die zugrunde liegenden Sachbilanzdaten bilden durchschnittliche Verhältnisse in den jeweiligen Produktionsländern (Schweiz, Europa, Brasilien, USA, etc.) ab und gelten bezüglich Nutzung für die Schweiz als Ganzes. Die Ergebnisse lassen sich daher nicht ohne weiteres auf Entscheidungssituationen in Teilregionen oder bei einzelnen Betrieben anwenden, da die Umweltauswirkungen im Einzelfall erheblich von der Durchschnittssituation abweichen können.
- Die Studie gibt keine Antworten auf die Frage nach den zukünftigen Folgen einer Umstellung auf erneuerbare Treibstoffe, beispielsweise die Konsequenzen für die Umwelt, falls landwirtschaftliche Produkte in grossen Massstab für energetische Nutzung angebaut würden und damit die landwirtschaftliche Produktion insgesamt intensiviert werden müsste oder mögliche Rebound-Effekte<sup>4</sup>, falls sich durch die Einführung von Biotreibstoffen eine Erhöhung des Treibstoffverbrauchs ergeben sollte, da diese in der Wahrnehmung der Konsumenten als „umweltfreundlich“ und daher unproblematisch angesehen werden.

### Wie verteilen sich die Umweltbelastungen entlang der Wertschöpfungskette?

Abbildung 2 gibt eine Übersicht über die Verteilung der Treibhausgas-Emissionen (THG-Emissionen) entlang verschiedener Produktionsketten für Bioethanol, Biodiesel, Methanol und Methan<sup>5</sup>. Die Abbildung zeigt, dass je nach Biotreibstoff und Produktionsweg Einsparungen von bis zu 80% gegenüber fossilen Treibstoffen möglich sind. Entlang der Produktionskette zeigen sich jedoch grosse Unterschiede:

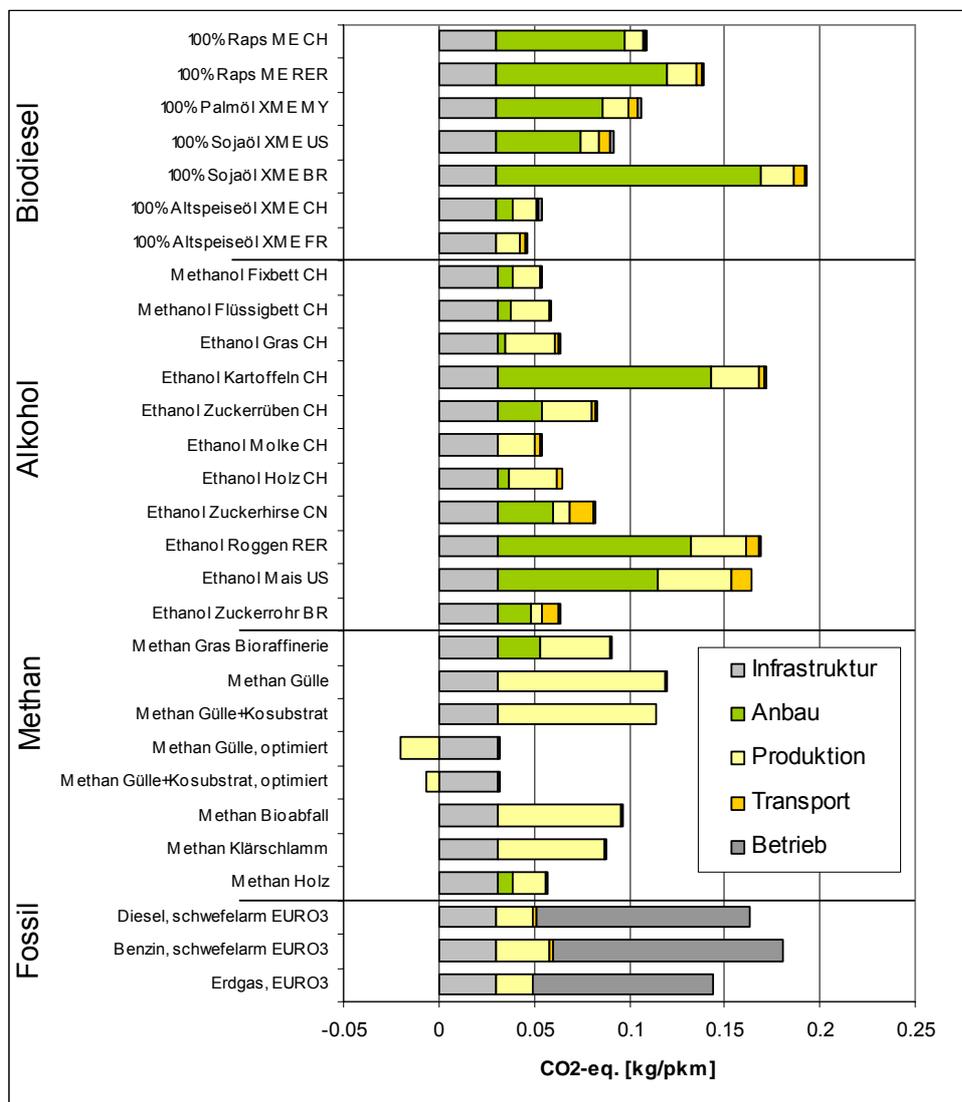
- Der grösste Anteil an den THG-Emissionen stammt aus dem **landwirtschaftlichen Anbau** (Abbildung 2, grün) durch den Einsatz von Maschinen, Düngemitteln und/oder Pestiziden, aber auch in Form von direkten Emissionen (z.B. Lachgas). Gleichzeitig ist dieser Anteil jedoch sehr variabel. Wichtigste Einflussfaktoren für die landwirtschaftlichen THG-Emissionen sind die Flächenerträge (hoch bei Zuckerrüben CH oder Zuckerrohr BR, jedoch niedrig bei Kartoffeln CH oder Roggen RER), die Lachgasemissionen (machen z.B. bei Mais US 30% aus) und die Brandrodung von Regenwaldflächen (relevant bei Palmöl MY und Sojaöl BR). Die regionalen Unterschiede in der Intensität der Regenwaldabholzung können einen relevanten Einfluss auf die Gesamtbilanz haben. Hauptfaktor ist generell die Art und Weise, wie Energiepflanzen angebaut werden. Dies gilt nicht nur für die THG-Emissionen, sondern auch für die meisten anderen Umweltauswirkungen von Biotreibstoffen. Im Gegensatz zu landwirtschaftlichen Produkten brauchen Abfall- und Reststoffe zur Bereitstellung keinen Energieaufwand; dies wirkt sich sehr positiv auf deren Gesamtbilanz aus. So lassen sich die insgesamt niedrigsten THG-Emissionen bei der Verwendung von Biodiesel aus Alt-speiseöl oder Methan aus Gülle erzielen.
- Die **Treibstoff-Produktion** (Abbildung 2, gelb) verursacht im Schnitt deutlich geringere THG-Emissionen als der landwirtschaftliche Anbau. Besonders gering sind die Emissionen bei der Ölgewinnung und Veresterung zu Biodiesel. Bei der Fermentierung von Bioethanol sind die Emissio-

<sup>4</sup> Ein Rebound-Effekt liegt dann vor, wenn Effizienzgewinne zu einem erhöhten Verbrauch führen, welcher wiederum die Vorteile dieses Effizienzgewinns vermindert resp. zunichte macht.

<sup>5</sup> Biogenes ETBE wurde in dieser Studie ebenfalls betrachtet. Da es sich in Bezug auf die Umweltauswirkungen aber analog zu Ethanol verhält, mit dem Unterschied, dass die CO<sub>2</sub>-Reduktionswirkung geringer ausfällt, da nur rund die Hälfte von ETBE auf Biomasse beruht, wurde es im Executive Summary jedoch nicht gesondert dargestellt.

nen sehr variabel, da entweder fossile Energieträger zum Einsatz kommen (Bioethanol aus Mais US) oder Abfälle aus der landwirtschaftlichen Produktion als Prozess-Energie verwendet werden (Bagasse beim Zuckerrohr BR). Die höchsten THG-Emissionen im Produktionsprozess werden bei der Gewinnung von biogenem Methan frei. Die Ursachen hierfür sind die Methan- und Lachgasemissionen bei der Nachgärung des Gärrückstands sowie der Methanschlupf bei der Aufbereitung von Biogas zu 96 Vol.-% Methan. Abbildung 2 zeigt aber auch, dass beispielsweise bei der Gülle durch gezielte Massnahmen wie die Abdeckung des Nachgärbehälters ein Grossteil dieser Emissionen reduziert werden kann<sup>6</sup>. Diese Abdeckung entspricht 2007 schon dem Stand der Technik.

- Der **Treibstoff-Transport** (Abbildung 2, orange) aus den Produktionsgegenden an die Schweizer Tankstelle macht in den meisten Fällen deutlich weniger als 10% der Gesamtemissionen aus und spielt aus Umweltsicht eine untergeordnete Rolle – sofern der interkontinentale Transport mit Tankschiffen oder in Pipelines erfolgt.
- Der eigentliche **Fahrzeug-Betrieb** (Abbildung 2, dunkelgrau) ist bei den hier verglichenen, reinen Biotreibstoffen CO<sub>2</sub>-neutral, da das freigesetzte CO<sub>2</sub> beim Pflanzenwachstum in einem kurzen Zeitraum gebunden wurde.

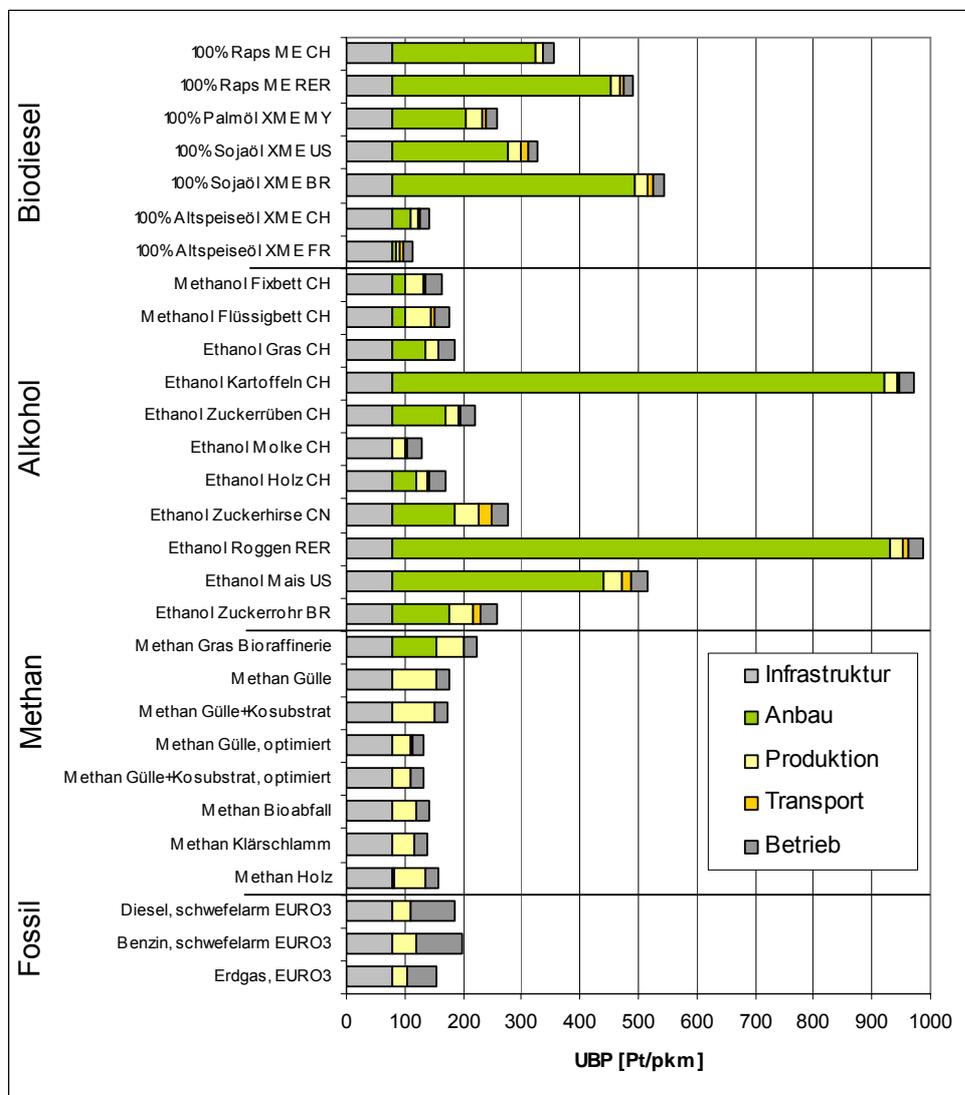


**Abbildung 2 Vergleich der Treibhausgas-Emissionen von Biotreibstoffen im Vergleich mit fossilen Treibstoffen (Benzin und Diesel, EURO3). Die Emissionen sind nach den einzelnen Prozessen der Wertschöpfungskette gegliedert.**

<sup>6</sup> Die THG-Emissionen bei *Methan aus Gülle, optimiert* sind negativ, da hier die Differenz zu den Emissionen bei landwirtschaftlichem Ausbringen der unvergorenen Gülle betrachtet werden.

- Die **Bereitstellung und der Unterhalt der Fahrzeuge und Strassen** (Abbildung 2, hellgrau) wurde in dieser Studie ebenfalls berücksichtigt. Allerdings wurden für alle betrachteten Fälle ein identisches Fahrzeug und eine gleiche jährliche Fahrleistung angenommen, weshalb dieser Anteil für alle Varianten gleich hoch ist. Dieser Aufwand kann bei sehr effizienten alternativen Treibstoffen wie Biodiesel aus Altöl, Bioethanol aus Zuckerrohr oder Methan aus Gülle deutlich mehr die Hälfte der gesamten THG-Emissionen ausmachen.

Ein anderes Bild zeigt Abbildung 3, in der die gesamte Umweltbelastung, berechnet nach der Methode der ökologischen Knappheit (UBP 06), dargestellt ist. Zwar sind die Umweltauswirkungen des Fahrzeugbetriebs (dunkelgrau) bei der Verwendung von fossilem Treibstoff im Vergleich zu den Biotreibstoffen noch deutlich höher, dies wird aber durch teilweise sehr hohe Umweltbelastungen in der landwirtschaftlichen Produktion überkompensiert. Ursachen hierfür sind Bodenversauerung und Überdüngung bei der europäischen und Schweizer Landwirtschaft. Bei der tropischen Landwirtschaft sind Biodiversitätsverlust, Luftbelastung durch Brandrodung sowie Toxizität von in der Schweiz teilweise verbotenen Pestiziden die wesentlichen Ursachen für die hohen Umweltbelastungen. Die sehr hohe Belastung bei der Nutzung von Schweizer Kartoffeln ist durch die hohe Gewichtung der Nährstoffauswaschung zu erklären. Die sehr hohen Werte für Roggen aus europäischer Produktion lassen sich dagegen durch den niedrigen Ernteertrag von Roggen im gesamteuropäischen Schnitt erklären.



**Abbildung 3** Vergleich der aggregierten Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit, UBP 06) von Biotreibstoffen im Vergleich mit fossilen Treibstoffen (Benzin und Diesel, EURO3). Die Umweltbelastung ist nach den einzelnen Prozessen der Wertschöpfungskette gegliedert.

## Sollen Biotreibstoffe aus dem Ausland importiert werden?

Sowohl bei den THG-Emissionen (Abbildung 2) als auch bei der gesamten Umweltbelastung (Abbildung 3) macht der Transport der Biotreibstoffe aus Übersee an die Schweizer Tankstelle einen geringen Anteil aus und einzelne importierte Biotreibstoffe wie Bioethanol aus brasilianischem Zuckerrohr erzielen eine ähnlich gute Umweltbewertung wie die besten einheimischen Biotreibstoffe. Der Grund hierfür ist, dass aus ökonomischen Gründen effiziente Transportmittel wie Hochseetanker oder Pipelines eingesetzt werden, die pro Transporteinheit relativ wenig Energie benötigen und geringe Schadstoffemissionen verursachen.

Es ist dennoch fraglich, ob der Import von Biotreibstoffen in grossem Massstab langfristig sinnvoll ist. Einerseits könnte der Biotreibstoff auch in den Produktionsländern eingesetzt werden, um dort die Abhängigkeit von Ölimporten zu mindern; andererseits führt die grosse Nachfrage nach Biotreibstoff zu einem rasanten Ausbau der Produktionsflächen und damit auch zu steigenden Nahrungsmittelpreisen und zu einem erhöhten Druck auf Regenwaldflächen. Sobald aber Brandrodung stattfindet, verschlechtert sich sowohl die Treibhausgasbilanz als auch die gesamte Ökobilanz massiv, was wiederum einen Import fragwürdig macht.

## Welche Biotreibstoffe sind am umweltfreundlichsten?

Für die integrierte Umweltbeurteilung gilt es, eine Vielzahl verschiedener Umweltindikatoren auf geeignete Art und Weise zusammenzufassen. Hierzu müssen Wertungen vorgenommen werden. Die primäre Motivation zur Steuerbefreiung von Biotreibstoffen liegt bei deren Potential zur Treibhausgasreduktion. Entsprechend ist die erste Umwelanforderung für eine Treibstoffsteuerreduktion die Menge an eingesparten Treibhausgasen. Für die Darstellung in dieser Studie sind die folgenden Schwellenwerte zugrunde gelegt worden:

- **Treibhausgasreduktion um mindestens 30% gegenüber der fossilen Referenz (Benzin, EURO3<sup>7</sup>)**

Diese Treibhausgas-Einsparungen dürfen jedoch nicht auf Kosten anderer Umweltbelastung erfolgen, welche bei Biotreibstoffen vielfältiger Art sein können. Eine wichtige weitere Anforderung für die integrierte Umweltbeurteilung ist daher das Kriterium:

- **Keine Zunahme der Belastungen bei anderen relevanten Umweltfaktoren gegenüber der fossilen Referenz (Benzin, EURO3)**

Diese beiden Kriterien wurden in Abbildung 4 (siehe übernächste Seite) auf die Ökobilanzergebnisse dieser Studie angewendet. Es zeigt sich, dass 13 verschiedene Biotreibstoffe Treibhausgasreduktionen von mehr als 50% ermöglichen, wobei 5 davon aus Abfallstoffen hergestellt werden. Die bedeutendsten Reduktionen lassen sich dabei mit Biotreibstoffen aus Gülle erzielen. Die weiteren Treibstoffe, welche Treibhausgasreduktionen von mehr als 50% ermöglichen, sind: Biodiesel aus Altspeiseöl, Methanol und Methan aus Holz sowie Bioethanol aus inländischer Biomasse (Gras, Holz, Zuckerrüben oder Molke), brasilianischem Zuckerrohr und chinesischer Zuckerhirse. 9 Treibstoffe (vier davon aus Abfallstoffen) ermöglichen eine Treibhausgasreduktion von immerhin noch mehr als 30%, darunter die Produktion von Biodiesel aus verschiedenen landwirtschaftlichen Produkten (Sojaöl US, Palmöl MY, Rapsöl CH) und die Vergärung zu biogenem Methan aus verschiedenen Abfallstoffen. 5 alternative Treibstoffe schliesslich weisen weniger als 30% Treibhausgasreduktionen auf, im Extremfall von brasilianischem Soja-Biodiesel sind die Emissionen sogar leicht höher als beim Benzin.

Während der kumulierte nicht-erneuerbare Energieaufwand (KEA)<sup>8</sup> mit den THG-Emissionen korreliert, ändert sich das Bild bei den übrigen Umweltindikatoren. Beim Sommersmog-Potential (SMOG) weisen besonders die tropischen Alternativen hohe Werte auf, da die Anbauflächen oft mittels Brandrodung bereitgestellt werden oder – im Falle von Bioethanol aus Zuckerrohr – die trockenen Blätter vor der Ernte abgebrannt werden. Die Überdüngung (EUTR) ist erwartungsgemäss bei landwirtschaftlichen Prozessen um Faktoren höher als bei fossilen Treibstoffen. Beim brasilianischen Zuckerrohr und beim malaysischen Palmöl zeigt sich jedoch, dass auch diese Faktoren bei geringem Düngereinsatz und gleichzeitig hohen Flächenerträgen niedrig ausfallen können. Die Ökotoxizität (ÖTOX) zeigt wie-

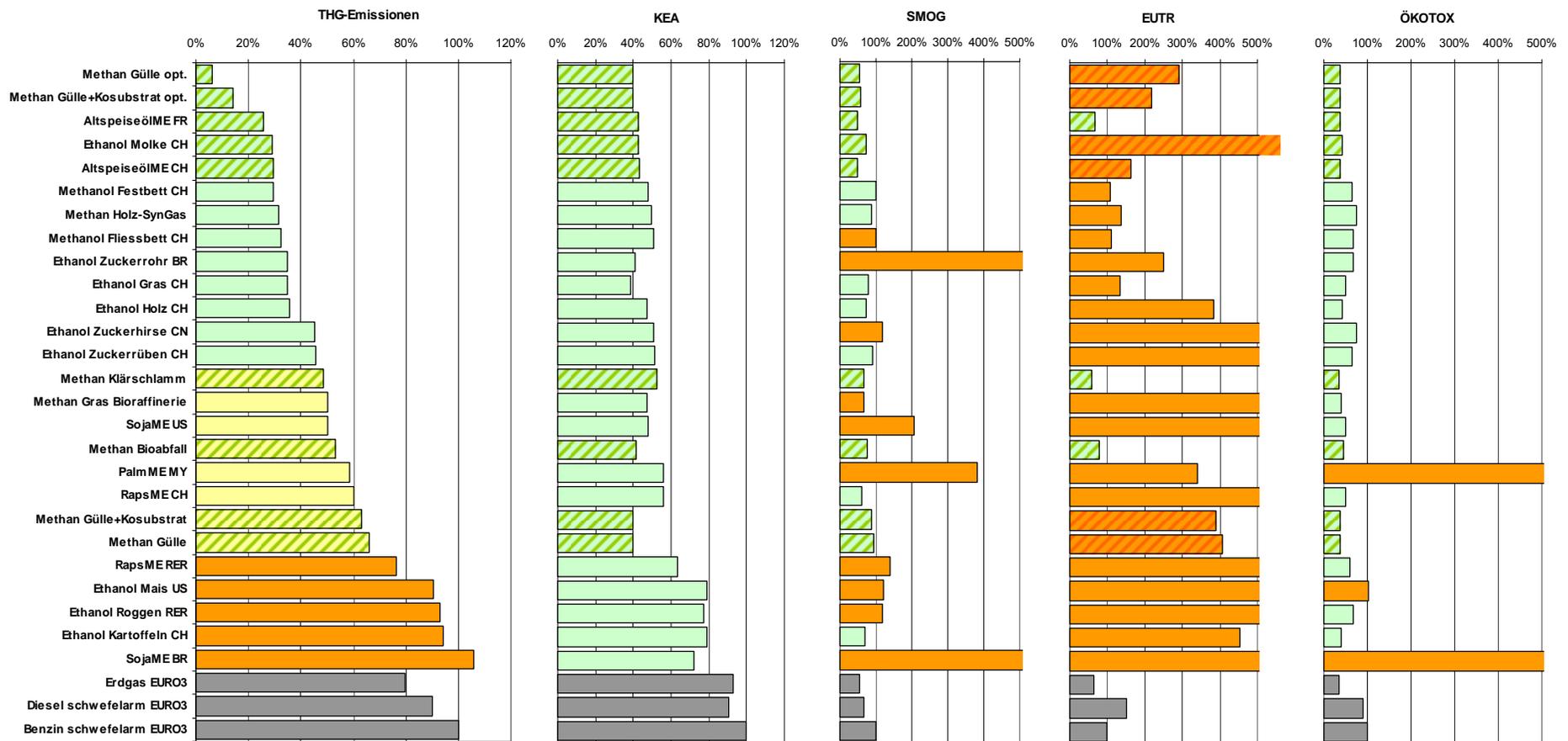
<sup>7</sup> EURO 3 ist die seit Jan. 2000 gültige Europäische Schadstoffnorm für Personenwagen. Da die Emissionen bis und mit der Fahrleistung verglichen werden, ist es notwendig eine Schadstoffnorm zu definieren.

<sup>8</sup> Gesamte Menge an nicht erneuerbarer Energie, die für die Produktion und Bereitstellung eines Produkts (in unserem Fall eines Biotreibstoffs) gebraucht wird.

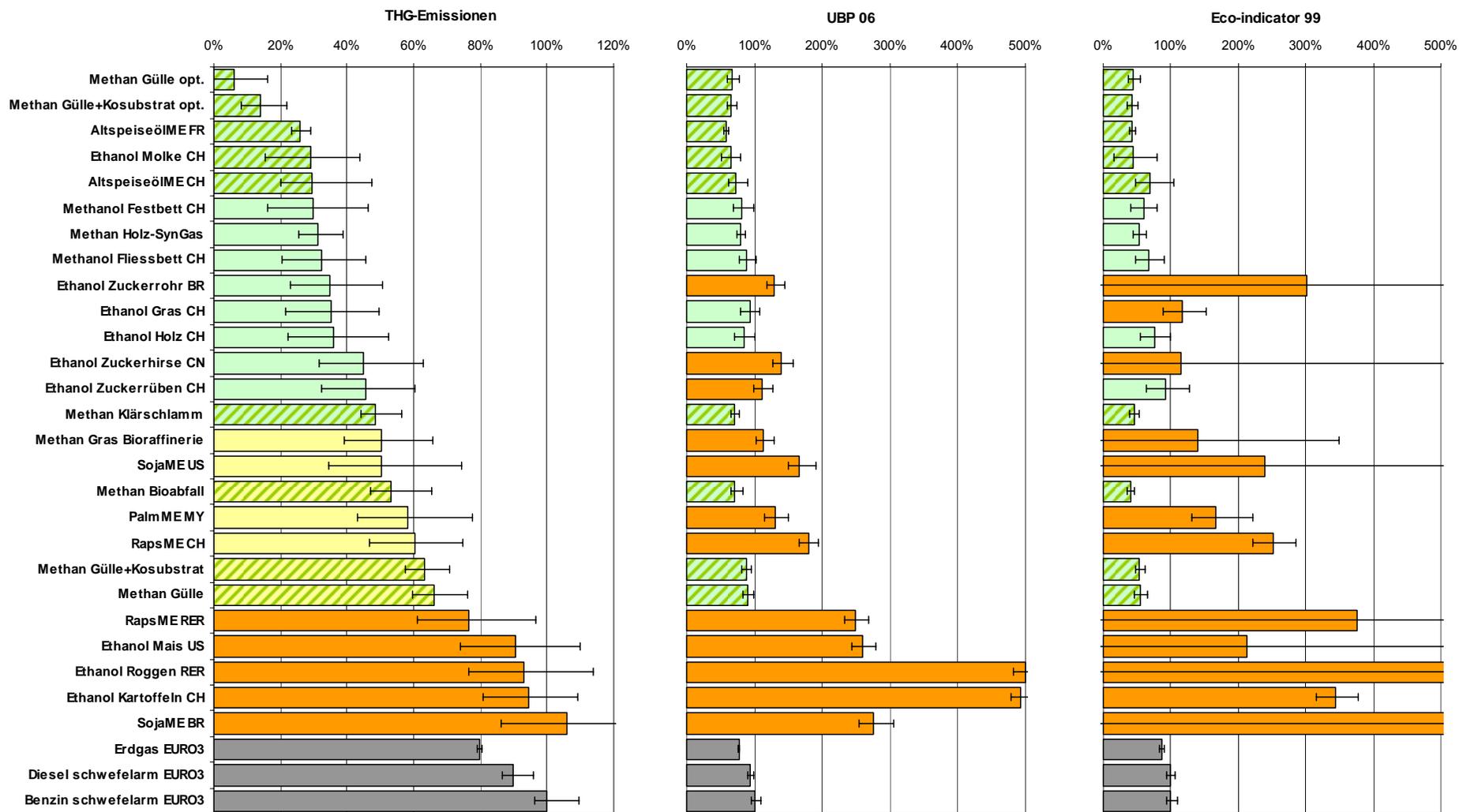
derum Spitzenwerte bei Kulturen, die auf Brandrodungsflächen wachsen; Ursache ist die hohe ökotoxische Bewertung von Azeton-Emissionen. Die einzigen untersuchten Biotreibstoffe, welche in allen hier untersuchten Umweltfaktoren unter dem Wert des Benzins bleiben, sind in Frankreich hergestellter Methylester aus Altspeiseöl sowie Methan aus Klärschlamm und Bioabfall.

Aufgrund der Umweltauswirkungen durch den landwirtschaftlichen Anbau ergibt die Gesamtbeurteilung (Abbildung 5) bei der Schweizerischen Bioethanol-Produktion aus Molke eine gegenüber Benzin um bis zu 30% (UBP 06) resp. 50% (Eco-indicator 99) reduzierte Gesamtbelastung. Die übrigen einheimischen Pfade für Bioethanol zeigen in der Gesamtbelastung gleiche oder gar bessere Werte als Benzin. Eine gegenüber Benzin um bis zu 30% (UBP 06) resp. 50% (Eco-indicator 99) reduzierte Gesamtbelastung lässt sich auch bei der Produktion und Nutzung von biogenem Methan erzielen, obwohl die THG-Emissionen aufgrund des Methanschlupfs teilweise erhöht sind. Abbildung 5 zeigt auch das Vertrauensintervall an, in dem 95% aller Werte liegen. Dieses Vertrauensintervall berücksichtigt nur die Unsicherheiten bei der Erhebung der Inventardaten (z.B. beim Abschätzen des Energieverbrauchs) und nicht die Unsicherheit der Bewertungsmethodik (z.B. die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Krebs bei der Emission einer gewissen Menge karzinogener Substanzen). Die Unsicherheiten sind vor allem bei der UBP-Methodik, aber auch bei der Abschätzung der THG-Emissionen relativ klein und führen nur in Einzelfällen zu einer Änderung der Bewertung (von grün nach rot oder umgekehrt). Sehr hoch ist die Unsicherheit aber bei allen landwirtschaftlichen Prozessen bei der Eco-indicator 99-Bewertung. Ursache ist hierfür die Bewertung der Landnutzung, die – primär aus methodischen Gründen – eine hohe Unsicherheit bewirkt.

Abbildung 6 und Abbildung 7 fassen THG-Emissionen und gesamte Umweltbeurteilung für alle betrachteten Treibstoffe zusammen. Der grüne Bereich bedeutet eine bessere Bewertung sowohl bei den THG-Emissionen als auch bei der gesamten Umweltbeurteilung als die fossile Benzin-Referenz. Die Abbildungen zeigen einerseits, dass es für alle Treibstofftypen Produktionspfade im grünen Bereich gibt; andererseits basieren die meisten dieser „grünen“ Produktionspfade auf Abfall- und Reststoffen. Bioethanol aus brasilianischem Zuckerrohr weist sehr unterschiedliche Bewertungen mit UBP 06 und Eco-indicator 99 auf. Ursache hierfür ist das stark Arsen-haltige Pestizid Daconate, welches in dieser Studie nur im Inventar des Zuckerrohr-Anbaus auftaucht und das bei der Beurteilung mit Eco-indicator 99 zu hohen Werten bei der Ökotoxizität führt. Die grossen Unterschiede bei Bioethanol aus Kartoffeln erklären sich dagegen durch die hohe Gewichtung der Nährstoffauswaschung bei der UBP 06-Methode.



**Abbildung 4** Ökologische Gesamtbilanz aller betrachteten, ungemischten Biotreibstoffe im Vergleich zur fossilen Referenz. KEA = Kumulierter nicht erneuerbarer Energieaufwand, SMOG = Sommersmog-Potential, EUTR = Überdüngung, ÖTOX = Ökotoxizität. Referenz (= 100%) ist jeweils Benzin EURO3. Die Biotreibstoffe sind im Diagramm links nach den THG-Emissionen geordnet. Treibstoffe, die eine gesamte THG-Emissionsreduktion von mehr als 50% gegenüber Benzin erzielen, sind grün dargestellt, THG-Emissionsreduktionen von mehr als 30% sind gelb dargestellt, THG-Emissionsreduktionen kleiner als 30% sind rot dargestellt. In den anderen Diagrammen bedeutet grün = besser als die Referenz; rot = schlechter als die Referenz. Schraffierte Felder = Produktionspfade aus Rest- oder Abfallstoffen.



**Abbildung 5** Ökologische Gesamtbilanz aller betrachteten, ungemischten Biotreibstoffe im Vergleich zur fossilen Referenz. THG-Emissionsreduktionen von mehr als 30% sind gelb dargestellt, THG-Emissionsreduktionen kleiner als 30% sind rot dargestellt. In den anderen Diagrammen bedeutet grün = besser als die Referenz; rot = schlechter als die Referenz. Schraffierte Felder = Produktionspfade aus Rest- oder Abfallstoffen. Fehlerbalken = 2.5% / 97.5% Perzentilen berechnet mit Monte Carlo-Simulation.

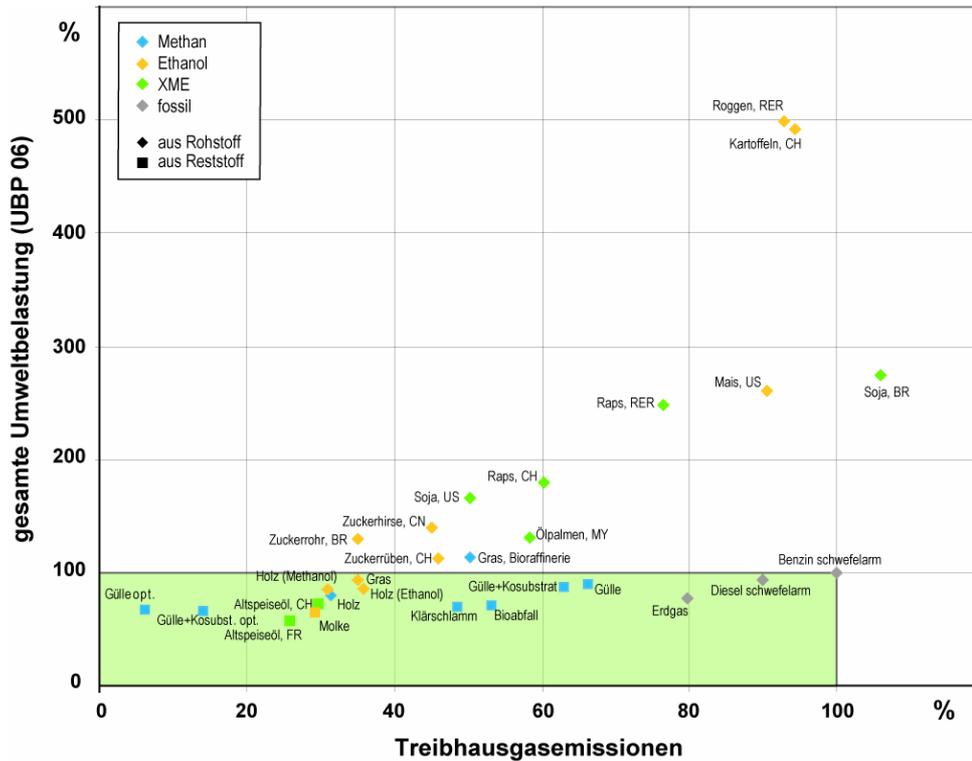


Abbildung 6 Zweidimensionale Darstellung von Treibhausgasemissionen und gesamter Umweltbelastung als UBP 06. Die Werte sind relativ zur fossilen Referenz Benzin dargestellt. Der grüne Bereich bedeutet sowohl geringere Treibhausgasemissionen als auch eine geringere gesamte Umweltbelastung als Benzin.

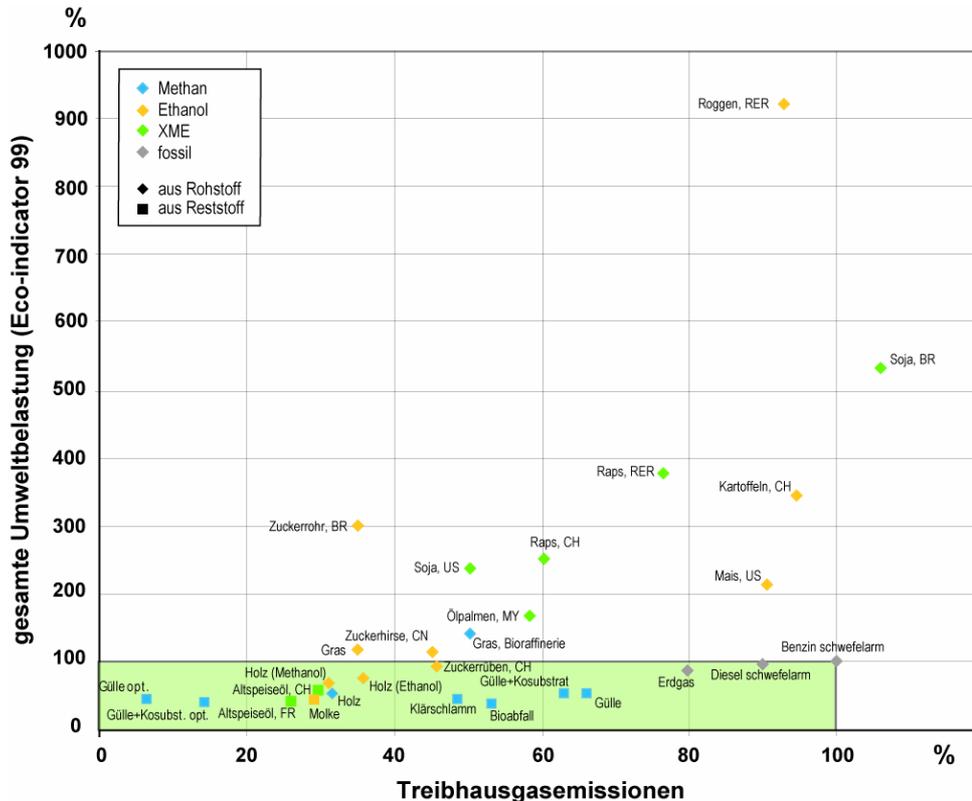


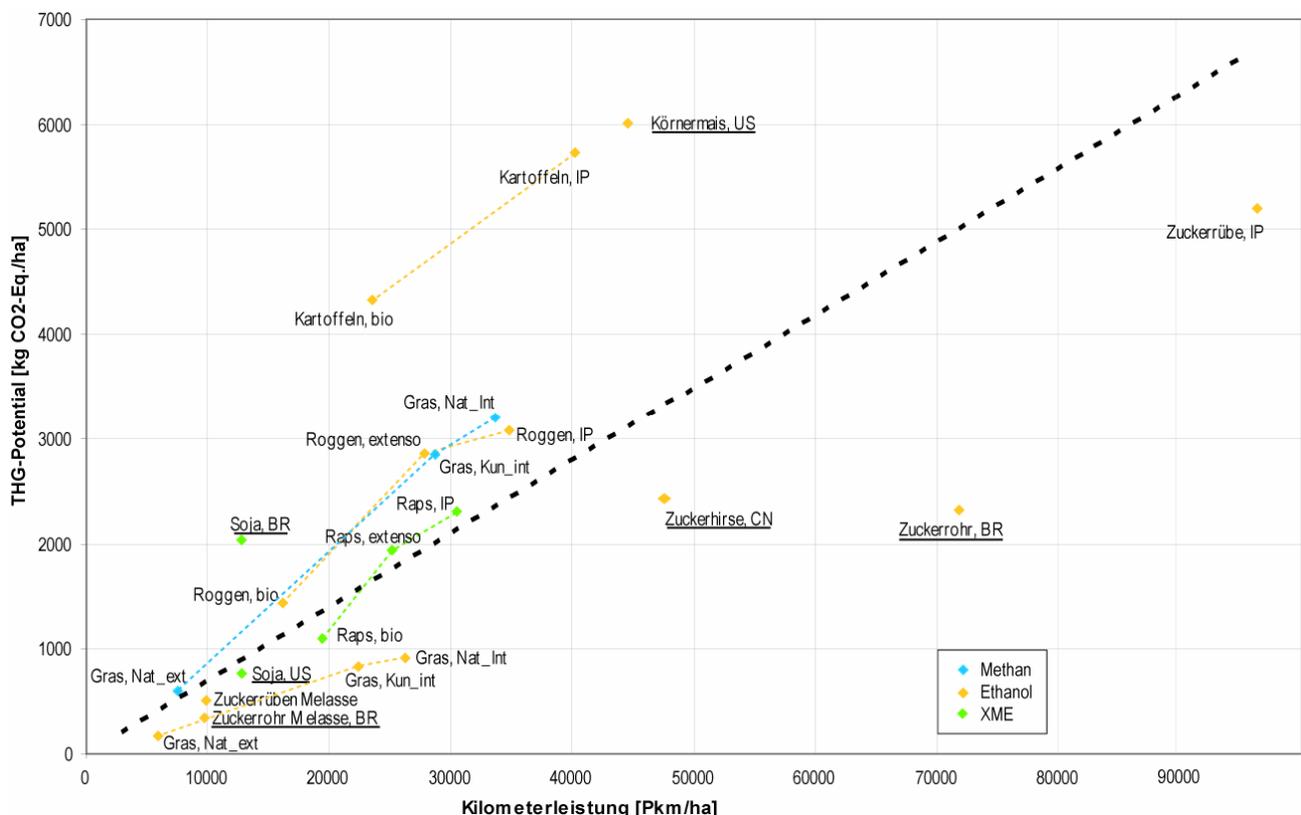
Abbildung 7 Zweidimensionale Darstellung von Treibhausgasemissionen und gesamter Umweltbelastung als Eco-indicator 99. Die Werte sind relativ zur fossilen Referenz Benzin dargestellt. Der grüne Bereich bedeutet sowohl geringere Treibhausgasemissionen als auch eine geringere gesamte Umweltbelastung als Benzin.

## Wie hoch sind die Umweltauswirkungen der Treibstoffproduktion pro Fläche?

Abbildung 8 zeigt die THG-Emissionen pro Hektar und Jahr im Vergleich zur Kilometerleistung, die sich mit der auf dieser Hektare gewachsenen Biomasse erzielen lässt. Die Abbildung zeigt massive Unterschiede im landwirtschaftlichen Anbau auf, sowohl was die Energieerträge als auch was die THG-Emissionen anbelangt.

Die grösste Kilometerleistung lässt sich mit Bioethanol aus inländischen Zuckerrüben erzielen. Die Zuckerrüben ergeben ungefähr den gleichen Hektarenertrag wie brasilianisches Zuckerrohr (ca. 70 t/a), weisen aber aufgrund des deutlich niedrigeren Fasergehalts einen leicht höheren Saccharose-Gehalt als Zuckerrohr auf. Vergleicht man die Kilometerleistung/ha mit dem Treibhausgas-Potential/ha, weist das brasilianische Bioethanol dennoch den grössten Abstand zur Korrelationsgeraden und damit das beste Verhältnis auf.

Betrachtet man bei den einheimischen Landwirtschaftsprodukten die Anbauformen „IP“, „extenso“ und „bio“, ergeben sich bei Kartoffeln, Roggen, Gras und Raps bei extensivem Anbau weniger THG-Emissionen, die Kilometerleistung nimmt aber in ähnlichem Mass ab, sodass keine klaren Präferenzen zu erkennen sind.



**Abbildung 8** Zweidimensionale Darstellung von Kilometerleistung und Treibhausgasbelastung pro Hektar für verschiedene Energiepflanzen. Die schwarze gestrichelte Linie stellt den Mittelwert (lineare Regression) dar. Die farbige gestrichelte Linien verbinden die verschiedenen Anbauformen der jeweiligen Produkte. Unterstrichen = ausländisches Produkt.

## Welche energetische Nutzung ist am umweltfreundlichsten?

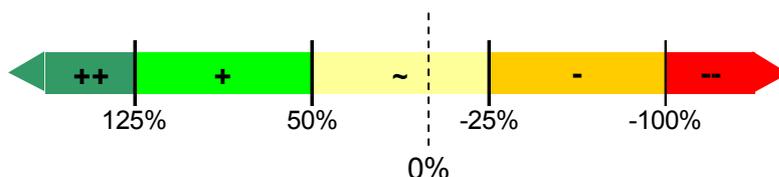
Biogene Energieträger wie Holz, Biogas oder Ethanol können nicht nur als Treibstoff eingesetzt werden, sondern es lässt sich daraus beispielsweise auch Wärme und/oder Strom produzieren. Nicht alle dieser Nutzungsmöglichkeiten sind ökologisch gesehen gleich vorteilhaft, denn es werden unterschiedliche Anteile von konventionellen, häufig fossilen, Energieträgern ersetzt. In dieser Studie wurde deshalb in einem zweiten Schritt der Frage nachgegangen, welche Nutzungsart die geringsten Umweltbelastungen erzeugt. Dafür wurde für verschiedene biogene Energieträger der resultierende Nettonutzen anhand der folgenden Formel berechnet:

$$\text{Nettonutzen} = \text{Vermiedene Umweltbelastung durch Ersatz fossiler Energieträger} - (\text{erzeugte}) \text{ Umweltbelastung der Nutzung des biogenen Energieträgers XY}$$

Die funktionale Einheit bei diesen Untersuchungen ist eine bestimmte Menge eines biogenen Energieträgers (z.B. 1 kg Molke). Aus dieser Menge kann dann eine bestimmte Energiemenge für eine Wärme-, Strom- oder Transportnutzung erzeugt werden. Für diese Energiemenge sowie für die dadurch substituierte fossile Energiemenge wurden die jeweiligen Umweltbelastungen und gemäss der obigen Formel dann der Nettonutzen berechnet.

Im Rahmen der vorliegenden Studie konnten nicht alle Möglichkeiten einer Nutzung biogener Energieträger untersucht werden – vielmehr beschränkt sich diese Studie auf jene Fälle, für welche im ersten Teil des Projektes spezifische Daten erhoben wurden, inklusive der Nutzungsmöglichkeiten, die bereits in der Datenbank ecoinvent enthalten sind. Die Studie beschränkt sich dabei auf einen Vergleich mit heute gängigen Energieträgern, also vornehmlich auf den Vergleich mit fossilen Energieträgern.

Nachfolgend sind die Resultate des Nutzenvergleiches für die Stufen Treibhauspotential (THP) sowie die Gesamtbeurteilung (mit Eco-indicator'99 und der Methode der ökologischen Knappheit, Version 2006) aller untersuchten Energieträger zusammengefasst. Für diesen Überblick wird folgendes Farbschema benutzt:



Die Skala zeigt dabei an, wie hoch der Nutzen im Vergleich zur Umweltbelastung aus der Nutzung des biogenen Sekundärenergieträgers ist. Da ein positiver Nettonutzen im Vordergrund steht, wurde eine um 25% asymmetrische Skala hier benutzt. (Berechnungsbeispiel: Die Nutzung von 1 kg Bioabfall als Treibstoff ergibt einen Nettonutzen beim THP von 0.13 kg CO<sub>2</sub>-Eq. Der Aufwand für die Vergärung von Bioabfall zu Methan ist 0.39 kg CO<sub>2</sub>-Eq. Somit folgt als Rechnung: 0.13 kg/0.39 kg was 33% entspricht und womit als Resultat gemäss der obigen Skala ein ~ für den Bereich „-25% bis +50%“ ergibt).

Energieträger \ Nutzungspfad	Holz		Gras		Gülle		Altholz		Molke		Bioabfall		Frisklar-schlamm	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Heizung	++	++												
BHKW	++	++	+	++	++	++			++	++	~	+	++	++
PKW (Methan)	++	++	+	+	++	++	++	++	+	+	~	~	+	+
PKW (Ethanol)	++	++	++	++					+	+				
direkte Entsorgung in "KVA, aktuell"							++	++			~	~	--	--
direkte Entsorgung in "moderne KVA"											++	++		
Zement Werk							++	++					~	~

**Abbildung 9** Nettonutzen bezüglich dem Treibhauspotential. Die Tabelle zeigt alle im Kapitel 4 untersuchten Varianten, wobei der Nutzen relativ zur Umweltbelastung des biogenen Sekundärenergieträgers aufgetragen ist (Erläuterungen siehe Text oben). Für die konventionelle Strom- und Wärmeproduktion wurden jeweils zwei verschiedene Szenarien im Kapitel 4 untersucht – wodurch der Nettonutzen zwischen einem minimalen (Spalte „Min“) sowie einem maximalen Wert (Spalte „Max“) liegen kann. Weisse Felder bedeuten, dass diese Varianten hier nicht untersucht wurden.

Energieträger \ Nutzungspfad	Holz		Gras		Gülle		Altholz		Milch		Bioabfall		Frisklär-schlamm	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Heizung	~	++												
BHKW	~	++	~	~	+	++			+	++	-	-	+	++
PKW (Methan)	+	+	~	~	++	++	+	+	+	+	~	~	++	++
PKW (Ethanol)	~	~	+	+					++	++				
direkte Entsorgung in "KVA, aktuell"							~	+			-	-	--	--
direkte Entsorgung in "moderne KVA"											+	++		
Zement Werk							+	+					-	-

Energieträger \ Nutzungspfad	Holz		Gras		Gülle		Altholz		Milch		Bioabfall		Frisklär-schlamm	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Heizung	~	+												
BHKW	~	+	+	++	+	++			-	-	-	-	~	++
PKW (Methan)	~	~	+	+	+	+	~	~	-	-	-	-	~	~
PKW (Ethanol)	~	~	++	++					++	++				
direkte Entsorgung in "KVA, aktuell"							-	-			-	-	--	--
direkte Entsorgung in "moderne KVA"											-	-		
Zement Werk							+	+					-	-

Abbildung 10 Nettonutzen bezüglich der Gesamtbeurteilung nach Eco-Indikator'99 (oben) sowie UBP'06 (unten). Die Tabellen zeigen alle im Kapitel 4 untersuchten Varianten, wobei der Nutzen relativ zur Umweltbelastung des biogenen Sekundärenergieträgers aufgetragen ist (Erläuterungen siehe Text oben). Für die konventionelle Strom- und Wärmeproduktion wurden jeweils zwei verschiedene Szenarien im Kapitel 4 untersucht – wodurch der Nettonutzen zwischen einem minimalen (Spalte „Min“) sowie einem maximalen Wert (Spalte „Max“) liegen kann. Weisse Felder bedeuten, dass diese Varianten hier nicht untersucht wurden.

Das Resultat für die **THG-Emissionen** in Abbildung 9 korreliert dabei wiederum mit jenem für den kumulierten nicht-erneuerbare Energieaufwand (KEA). In den allermeisten Fällen ist der Nutzen 50 und mehr % grösser als die Belastung, welche die Nutzung des biogenen Energieträgers ausmacht. Nicht so positiv sieht das Bild nur für die beiden stark wasserhaltigen Sekundärenergieträger Bioabfall und Klärschlamm aus, da deren Nutzung oftmals eine ganze Reihe von vorangehenden, mit fossilem Energieverbrauch verbundenen, Trocknungsschritten beinhaltet.

Macht man eine **Gesamtbeurteilung** mittels der Methoden **Eco-Indicator 99** und **UBP 06**, so zeigt sich ein etwas weniger optimistisches Bild, wie in Abbildung 10 zu sehen ist. Es zeigt sich auch hier wieder, dass es nicht so einfach ist, einen biogenen Energieträger zu finden, welcher sowohl bezüglich THG-Emissionen als auch in der ökologischen Gesamtbetrachtung positiv abschneidet. Am besten schneidet noch die Nutzung von Gülle (Hofdünger) ab – wird diese doch in beiden angewandten Methoden als gut bis sehr gut dargestellt. Die Nutzung des Bioabfalls zeigt dem gegenüber ein viel weniger positives Bild. Hauptgrund dafür sind die Schwermetallemissionen, welche mit der Nutzung des Gärgutes in landwirtschaftliche Kulturen ausgeglichen werden.

Eine horizontale Betrachtungsweise, bei welcher die unterschiedlichen Nutzungsmöglichkeiten (Nutzung in einem BHKW, als Treibstoff, etc.) angeschaut werden, zeigt in allen Fällen positive und weniger positive, zum Teil sogar negative Fälle. Tendenziell scheinen die aktuellen KVA nicht sehr effizient zu sein für die Nutzung von biogenen Sekundärenergieträgern.

Alles in allem kann aus den erfolgten Vergleichen gefolgert werden, dass ein Ersatz der traditionellen, fossilen Energieträger durch die hier untersuchten biogenen Varianten bei den THG-Emissionen zu positiven Resultaten – sprich geringeren Umweltbelastungen – führen wird. Viele der untersuchten Varianten weisen aber in anderen ökologisch relevanten Aspekten klare Nachteile gegenüber den heute eingesetzten fossilen Varianten auf, so dass eine ökologische Gesamtbetrachtung längst nicht in allen Fällen zu einem positiven Befund für den Einsatz des biogenen Energieträgers kommt.

## Fazit

Die vorliegende Studie zeigt, dass bei den meisten Biotreibstoffen ein Zielkonflikt zwischen der Minimierung der Treibhausgasemissionen und einer positiven ökologischen Gesamtbilanz besteht. Zwar lassen sich Treibhausgas-Reduktionen von mehr als 30% mit einer ganzen Reihe von Biotreibstoffen erzielen, die meisten dieser Bereitstellungspfade weisen jedoch bei mehreren anderen Umweltindikatoren höhere Belastungen als Benzin auf. Der Transport auch von ausländischen Biotreibstoffen in die Schweiz ist dabei von untergeordneter Bedeutung. Wesentlich bedeutender ist, wie der jeweilige Biotreibstoff hergestellt wird.

Zentrale Erkenntnis dieser Studie ist, dass bei Biotreibstoffen der Grossteil der Umweltbelastungen durch den landwirtschaftlichen Anbau verursacht wird. Im Falle der tropischen Landwirtschaft ist dies primär die Brandrodung von Urwäldern, welche grosse Mengen von CO<sub>2</sub> freisetzt, eine erhöhte Luftbelastung bewirkt und massive Auswirkungen auf die Biodiversität hat. Konkrete Zertifizierungsrichtlinien für Biotreibstoffe, welche dieser Problematik Rechnung tragen, beispielsweise analog den Richtlinien des *Forest Stewardship Council* (FSC), wären dringend wünschbar. In den gemässigten Breiten sind teils der niedrige Flächenertrag, teils die intensive Düngung und mechanische Bearbeitung für eine ungünstige Umweltbeurteilung ausschlaggebend. Hier gilt es, durch geeignete Sortenwahl und Fruchtfolge ein optimales Verhältnis aus energetischem Ertrag und geringen Umweltbelastungen zu finden. Eine günstigere Umweltbilanz lässt sich auch bei der energetischen Nutzung von landwirtschaftlichen Co-Produkten erreichen, beispielsweise mit Melasse oder Zuckerhirse-Stroh.

Am besten schneidet in dieser Studie die energetische Nutzung von Abfall- und Reststoffen ab, da hier einerseits die hohen Belastungen aus der Rohstoff-Bereitstellung wegfallen und andererseits Umweltemissionen aus der Abfallbehandlung, wie Abwasserbelastung durch Molke oder Methan-Emissionen durch Düngung mit unvergorener Gülle, reduziert werden können. Ein kritischer Faktor sind die teilweise hohen Methanemissionen bei der Produktion und Aufbereitung von Biogas. Auch in diesem Bereich liesse sich die Gesamtbilanz durch gezielte Massnahmen markant verbessern. Diese werden bei neuen Anlagen zum einen bereits verwirklicht, zum anderen besteht aber gerade bei der effizienten CO<sub>2</sub>-Abtrennung noch konkreter Forschungsbedarf.

Ebenfalls gute Ergebnisse zeigt die energetische Nutzung von Holz, da hier die Umweltauswirkungen bei der Rohstoff-Bereitstellung sehr gering sind. Eine mögliche Technologie für die Zukunft ist die Vergasung von Holz, falls treibhauswirksame Methan-Emissionen durch eine geschlossene Prozessführung minimiert werden können. Auch wenn solche Verfahren grundsätzlich als zukunftsträchtig beurteilt werden, ist die zukünftige Bedeutung aufgrund der limitierten Rohstoffverfügbarkeit und der heutigen konkurrenzierenden Verwertungen noch offen.

Die Erkenntnisse dieser Studie zeigen insgesamt, dass eine Förderung von Biotreibstoffen z.B. durch steuerliche Begünstigung differenziert erfolgen muss. Nicht alle Biotreibstoffe sind per se mit einer Reduktion der Umweltauswirkungen im Vergleich zu fossilen Treibstoffen verbunden. Von den untersuchten Produktionspfaden zeigen gegenwärtig vor allem Verwertungen von biogenen Abfallstoffen und von Holz, sowie die Nutzung von Gras zur Ethanolproduktion eine Reduktion der Umweltauswirkungen gegenüber der fossilen Referenz. Im Gegensatz zu den fossilen Treibstoffen lassen sich die Umweltauswirkungen von Biotreibstoffen aber durch gezielte Massnahmen deutlich verringern. Auf Grund des möglichen Optimierungspotentials ist deshalb zu erwarten, dass sich in Zukunft für verschiedene Produktionspfade bessere Beurteilungen ergeben. Zusätzlich werden auch neuartige Verfahren wie Biomass-to-Liquid (BTL) an Bedeutung gewinnen, die im Rahmen dieser Studie nicht untersucht werden konnten.

Das Potential der einheimischen Bioenergie ist heute – aber auch in Zukunft – beschränkt. Würden in der Schweiz in grossem Massstab Energiepflanzen angebaut, würde dies einen negativen Einfluss auf den Selbstversorgungsgrad der Schweiz mit Nahrung nach sich ziehen resp. durch eine allfällige Intensivierung des Nahrungsanbaus zusätzliche Umweltbelastungen hervorrufen. Mit biogenen Energieträgern allein lassen sich somit unsere Energieprobleme nicht lösen. Wird die dafür verfügbare Biomasse aber effizient und umweltfreundlich in Energie transformiert, gleichzeitig der Verbrauch gesenkt und die Energieeffizienz erhöht, so können diese alternativen Energieträger im Verbund mit anderen erneuerbaren Energieformen eine nicht zu vernachlässigende Rolle in unserer zukünftigen Energieversorgung spielen.