

Ganzheitliche Systemanalyse
zur Erzeugung und Anwendung
von Bioethanol
im Verkehrssektor

- Kurzfassung -

Gefördert durch: Bayerisches Staatsministerium
für Landwirtschaft und Forsten

Lehrstuhl für Energiewirtschaft
und Anwendungstechnik
Prof. Dr.-Ing. U. Wagner

Bearbeiter:
Dipl.-Ing R. Igelspacher

München im Juni 2003

1 Zielsetzung, Vorgehensweise und Begriffe

Der Einsatz erneuerbarer Energien zur Reduzierung von Treibhausgasen findet im Bereich der Kraftstoffe bisher kaum statt. Lediglich Biodiesel erzielt einen nennenswerten Anteil am Kraftstoffmarkt. Im Rahmen einer EU-Richtlinie soll der Anteil nachwachsender Rohstoffe bis 2005 auf 2 % und bis 2010 auf 5,75 % des gesamten Kraftstoffbedarfs ausgeweitet werden und bis 2020 sollen alternative Kraftstoffe bereits einen Marktanteil von 20 % erreichen. Dieses Ziel ist geprägt von dem Bewusstsein begrenzter Erdölreserven, zunehmender Importabhängigkeit mit stark schwankenden Preisen und den Problemen im Zusammenhang mit einem möglichen Treibhauseffekt. Auch die regionale Entwicklung ist hierbei von besonderer Bedeutung.

Neben Biodiesel soll als weiterer regenerativer Kraftstoff Ethanol einbezogen werden. Vor einer Einführung im großen Stil sollen die zahlreichen verschiedenen Möglichkeiten und Methoden hierzu verglichen und auf ihre Qualität bezüglich des Energieverbrauchs und der Emissionen im Vergleich zu konventionellem Ottokraftstoff untersucht werden.

Eine umfassende Systemanalyse soll aktuelle Aussagen zu der Erzeugung und dem Einsatz von Ethanol und ETBE (Ethyl-Tertiär-Butyl-Ether) im Verkehrssektor liefern. Bewertungsgrößen sind hierbei der Primärenergiebedarf, die Emissionen und die Kosten. Neben dem Einsatz von reinem Ethanol (E100, wobei E für Ethanol steht und die Zahl 100 den Ethanolanteil angibt) sollen auch Mischungen mit 15 % Benzin (E85) und 95 % Benzin (E5) sowie 15 % ETBE mit 85 % Benzin (ETBE15) untersucht werden. Grundlage hierfür ist die vollständige Prozesskettenanalyse, die beginnend mit der Landwirtschaft und damit der Produktion der primären Einsatzstoffe über die Veredelung zu hochwertigen Kraftstoffen bis zu deren Einsatz in PKWs reicht. Um möglichst belastbare Daten und Erkenntnisse zu gewinnen, werden der aktuelle Stand der bayerischen Landwirtschaft für die Produktion der eingesetzten Rohstoffe Weizen, Roggen, Körnermais und Zuckerrüben herangezogen. Zur aktuellen Beurteilung von Ethanol können Daten von in Planung befindlichen Anlagen herangezogen werden. Für den Einsatz der Kraftstoffe stehen aufbereitete Messergebnisse aus der Praxis zur Verfügung. Dadurch ist es möglich eine ganzheitliche Bewertung anhand von Prozessketten und einen Vergleich mit konventionellen Treibstoffen mit hoher Genauigkeit durchzuführen. Die Prozessketten reichen vom Energieträgereinsatz bis zur mechanischen Fahrenergie.

Begriffe und Definitionen:

Kumulierter nichtregenerativer Energieaufwand (KNRA):

Energieaufwand, der sich als Summe aller nicht-regenerativer Energieaufwendungen ergibt.

Kumulierter regenerativer Energieaufwand (KRA):

Energieaufwand, der sich als Summe aller regenerativer Energieaufwendungen ergibt.

Die Summe aus KNRA und KRA ergibt den *Kumulierten Energieaufwand (KEA)*

Bereitstellungsnutzungsgrad (b):

Der Bereitstellungsnutzungsgrad eines Energieträgers ist das Verhältnis seines Energieinhalts am Einsatzort (frei Tankstelle) zum Kumulierten Energieaufwand für die Bereitstellung

Erntefaktor (EF):

Der Erntefaktor gibt das Verhältnis zwischen dem Energieinhalt des Energieträgers am Einsatzort (frei Tankstelle) und dem nicht-regenerativen Energieaufwand (KNRA) an.

2 Vergleich der Ethanol-Prozessketten

2.1 Energetischer Vergleich

Erntefaktor und Bereitstellungsnutzungsgrad der untersuchten Prozessketten zur Ethanolherzeugung im Vergleich zum fossilen Referenzkraftstoff sind ein Maß für die Energieeffizienz; im Fall des Erntefaktors werden jedoch nur die nicht-regenerativen Aufwendungen bewertet. Der Bereitstellungsnutzungsgrad dagegen setzt den Energieinhalt des Kraftstoffes beim Endverbraucher zum Kumulierten Energieaufwand ins Verhältnis.

Die biogenen Kraftstoffe weisen nach **Bild 2-1** im Vergleich zu denen auf fossiler Basis niedrigere Bereitstellungsnutzungsgrade auf. Die Erntefaktoren sind dagegen erwartungsgemäß für biogene Kraftstoffe deutlich höher als bei den fossilen Ketten. Bei konsequenter Nutzung der Koppelprodukte entlang der Ethanolprozessketten lassen sich, die Bereitstellungsnutzungsgrade und Erntefaktoren deutlich erhöhen.

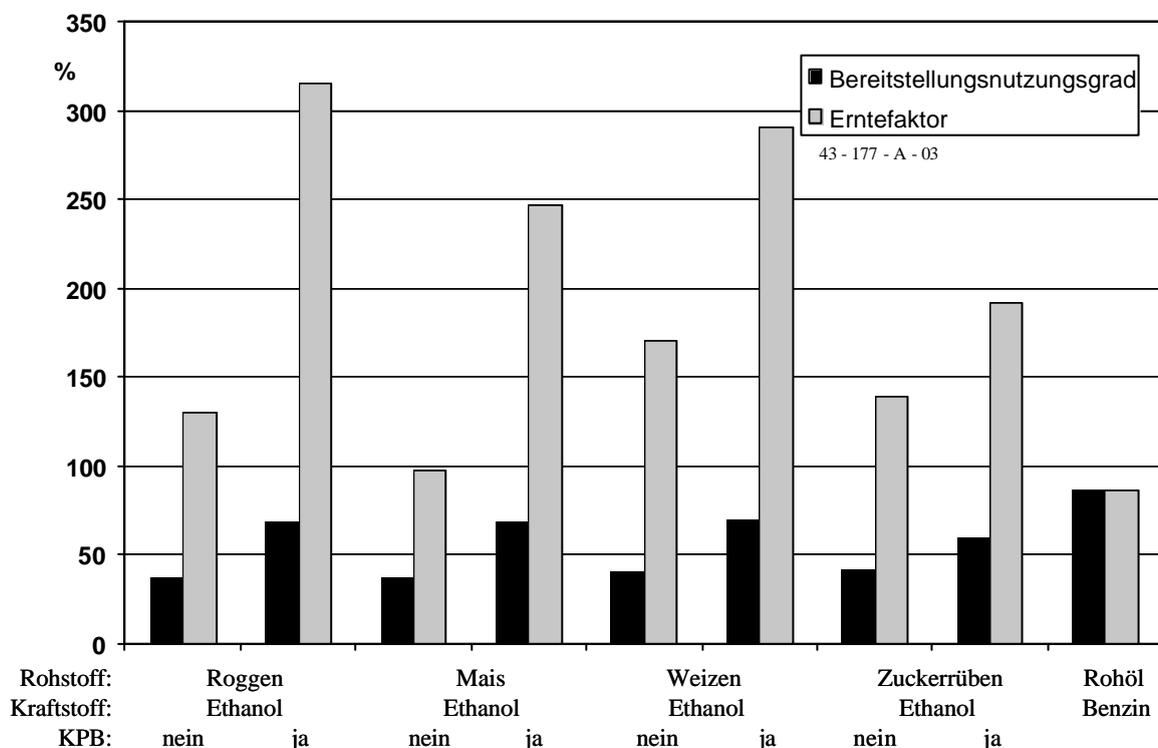


Bild 2-1: Erntefaktoren und Bereitstellungsnutzungsgrade verschiedener Energieumwandlungsketten zur Ethanol-Bereitstellung; KPB: Koppelproduktbewertung

Während bei den Bereitstellungsnutzungsgraden beim Einsatz von Roggen, Mais, Weizen und Zuckerrüben keine Präferenzen deutlich werden, zeigen die Erntefaktoren die Vorteile von Roggen, Mais und Weizen gegenüber der Zuckerrübe auf.

Für Quervergleiche von biogenen mit konventionellen Prozessketten ist neben der energetischen Bewertung von Produktion und Bereitstellung eines Kraftstoffs auch der Einbezug der Nutzungsphase von Bedeutung. Der Kumulierte Energieaufwand KEA der Biokraftstoffe kann für die unterschiedlichen Antriebskonzepte, bezogen auf eine Fahrstrecke von 100 km, untersucht werden. Hierzu werden der Benzinkette Ethanolprozessketten mit den Rohstoffen Roggen, Mais, Weizen und Zuckerrüben zum Einsatz im Ethanolfahrzeug gegenübergestellt.

Der Vergleich der Fahrzeuge erfolgt mit **Bild 2-2** auf Basis eines Mittelklasse-Pkw im NEFZ (Neuer europäischer Fahrzyklus). Man erkennt, dass auf Basis des KEA keine Vorteile der biogenen Energieumwandlungsketten gegenüber Ottokraftstoff gegeben sind. Zieht man jedoch den Kumulierten Nichtregenerativen Energieaufwand (KNRA) als Vergleichsgröße heran, sieht man, dass die biogenen Kraftstoffe besser als fossile Kraftstoffe abschneiden. Es lassen sich mit dem Einsatz von Ethanol, insbesondere bei Nutzung der Koppelprodukte (KPB) deutlich Ressourcen einsparen.

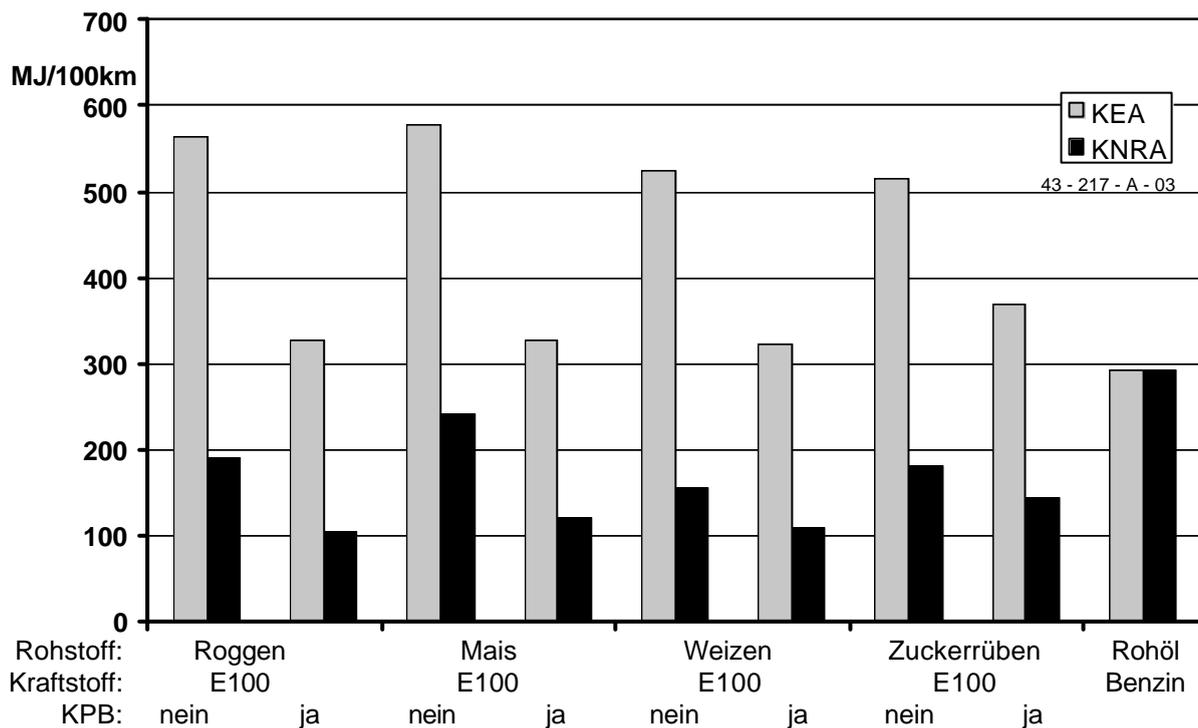


Bild 2-2: KEA und KNRA eines Mittelklasse-Pkw für Ethanol und Benzin im Vergleich

Neben dem energetischen Vergleich einzelner Prozessketten wird auch ein Vergleich der agrarisch benötigten Fläche durchgeführt. Hierzu wird zum einen die Ethanolherzeugung je ha landwirtschaftlicher Fläche untersucht und zum anderen der damit verbundene Energiegewinn je Hektar unter Berücksichtigung der Koppelprodukte. Da zunehmende Produktion

einen analogen Flächenzuwachs bedingt, wird so beurteilbar, inwieweit mit welcher Vorgehensweise überhaupt die geplanten Ausbauziele erreicht werden können.

Bei der Betrachtung von Energiegewinn und möglicher Ethanolherzeugung je Hektar ergibt sich ein deutlich anderes Bild als bei der Betrachtung des Erntefaktors (**Tabelle 2.1**). Beim Energiegewinn ist auch die Menge und Qualität der Nebenprodukte, sowie der Aufwand für diese Nebenprodukte von entscheidender Bedeutung. Klare Vorteile weisen nun die besonders ertragsstarken Feldfrüchte Mais und Zuckerrüben auf, im Gegensatz zu Weizen und Roggen. Bei dieser Aussage muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass nicht auf allen Böden alle Feldfrüchte gleich gut gedeihen.

Legt man nicht nur auf den Energieertrag insgesamt wert, sondern insbesondere auf den Ethanolertrag, so verschiebt sich das Bild nochmals deutlich. Hier liegt die Zuckerrübe mit gewaltigem Abstand vor Mais und den übrigen Getreidearten.

Aus den Aussagen zu Erntefaktor, Bereitstellungsgrad, Energiegewinn und Ethanolherzeugung in Liter/ha darf gefolgert werden, dass hier eine Reihe interessanter Bewertungsgrößen zur Verfügung stehen, die entsprechend dem Ziel gewichtet werden müssen.

Tabelle 2.1: Energiegewinn und mögliche Ethanolherzeugung bezogen auf einen Hektar Ackerfläche

Rohstoff	Koppelproduktbewertung	Energiegewinn in GJ/ha	Ethanolherzeugung in l/ha
Roggen	nein	9,2	1869
	ja	76,4	1869
Mais	nein	-1,9	3711
	ja	204,7	3711
Weizen	nein	21,5	2433
	ja	135,3	2433
Zuckerrüben	nein	41,0	6911
	ja	205,4	6911

2.2 Vergleich der Emissionen

Die Vergleichbarkeit von Energieträgern und -konzepten, insbesondere die daraus abgeleiteten Handlungsempfehlungen, werden auch maßgeblich von der Bewertung der auftretenden Emissionen beeinflusst. Daher ist es unerlässlich, dass bei der Ermittlung des kumulierten Energieaufwandes auch die Emissionen mit ausgewiesen werden. Im Rahmen dieser Studie werden auf Grundlage eigener Berechnungen und auf Basis verschiedener Quellen folgende Emissionen ausgewiesen: CO₂, N₂O, CO, CH₄, NMVOC, NO_x und SO₂.

Bei der Bestimmung der kumulierten Emissionen für die Bereitstellung der Biomasse stellt vor allem die landwirtschaftliche Produktion mit der Ausbringung von Düngemitteln einen Hauptposten dar. Die Bereitstellung der biogenen Kraftstoffe umfasst die Gewinnung, die

Verteilung und die Lagerung. Die Emissionen der untersuchten Fahrzeuge werden nach den zu erwartenden Emissionsstandards für Neufahrzeuge beziehungsweise nach den aus Feldversuchen bekannten Daten festgelegt.

Die für die einzelnen Prozessschritte ausgewiesenen Emissionen an CO₂, N₂O und Methan können zu den sogenannten CO₂-Äquivalenten bzw. dem sogenannten Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, kurz GWP) zusammengefasst werden. Als geeignete Bezugsgröße für den Verkehrssektor wird die zurückgelegte Wegstrecke in km gewählt. Erfasst sind nicht nur die Emissionen beim Fahrbetrieb selbst, sondern auch die Werte für die Fahrzeugherstellung und -entsorgung, Kraftstoffverteilung, -gewinnung und die Bereitstellung der Rohstoffe.

In **Bild 2-3** wird deutlich, dass sich mit den biogenen Kraftstoffen deutliche Einsparungen an klimarelevanten Emissionen erzielen lassen. Insbesondere bei konsequenter Nutzung der Nebenprodukte lassen sich trotz der hohen Lachgasemissionen Reduktionen von über 50 % im GWP erzielen, falls reines Ethanol getankt wird; bei niedrigeren Ethanolanteilen ist der Einspareffekt entsprechend geringer.

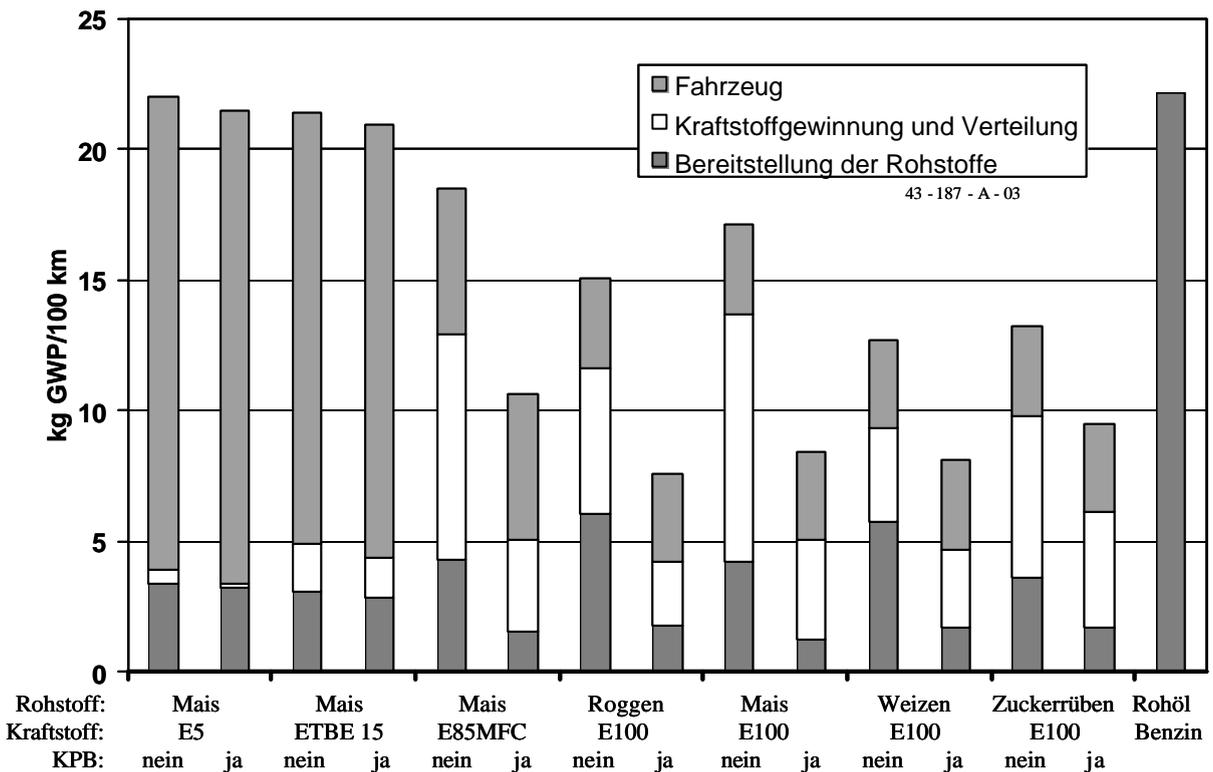


Bild 2-3: Kumulierte Treibhauspotentiale GWP (CO₂-Äquivalente) in kg/100km

2.3 Vergleich der Kosten

Entscheidenden Einfluss auf die Kosten der biogenen Kraftstoffe haben die Rohstoffkosten. Dabei kann in der Landwirtschaft zwischen Vollkosten und Marktpreisen unterschieden werden. In **Bild 2-4** sind die Kosten für biogene Kraftstoffe ohne MwSt., basierend auf Marktpreisen bei den Rohstoffen und Vollkosten bei der Kraftstoffgewinnung zusammengefasst. Die Mineralölsteuer wird auf die in Reinform vorliegenden biogenen Kraftstoffe noch nicht erhoben und daher auch nicht berücksichtigt. Derzeit wird auf Biokraftstoffe lediglich die Mehrwertsteuer von 16 % erhoben. Ferner erfolgt eine Differenzierung nach der Nutzung der Koppelprodukte. Die angewandte Methode zur Berücksichtigung der Nebenprodukte entlang der gesamten Prozesskette entspricht der energetischen Bilanzierung (direkte Zuteilung, Substitutionsmethode und quantitative Methode mittels Energieinhalt). Da jedoch einige Koppelprodukte nicht kostendeckend vermarktet werden können, werden hierfür dem Ethanol lediglich die Verkaufserlöse gutgeschrieben.

Als Referenzsystem ist den biogenen Kraftstoffen fossiler Ottokraftstoff gegenübergestellt, wobei hierbei ein mittlerer Tankstellenpreis angegeben ist und die Steuern sowie Abgaben getrennt ausgewiesen werden. Es handelt sich bei diesem Vergleich also um Kosten ohne Gewinnaufschlag und MwSt. für die Biokraftstoffe und um Endverbraucherpreise für Ottokraftstoff auf Basis von Liter Benzinäquivalent.

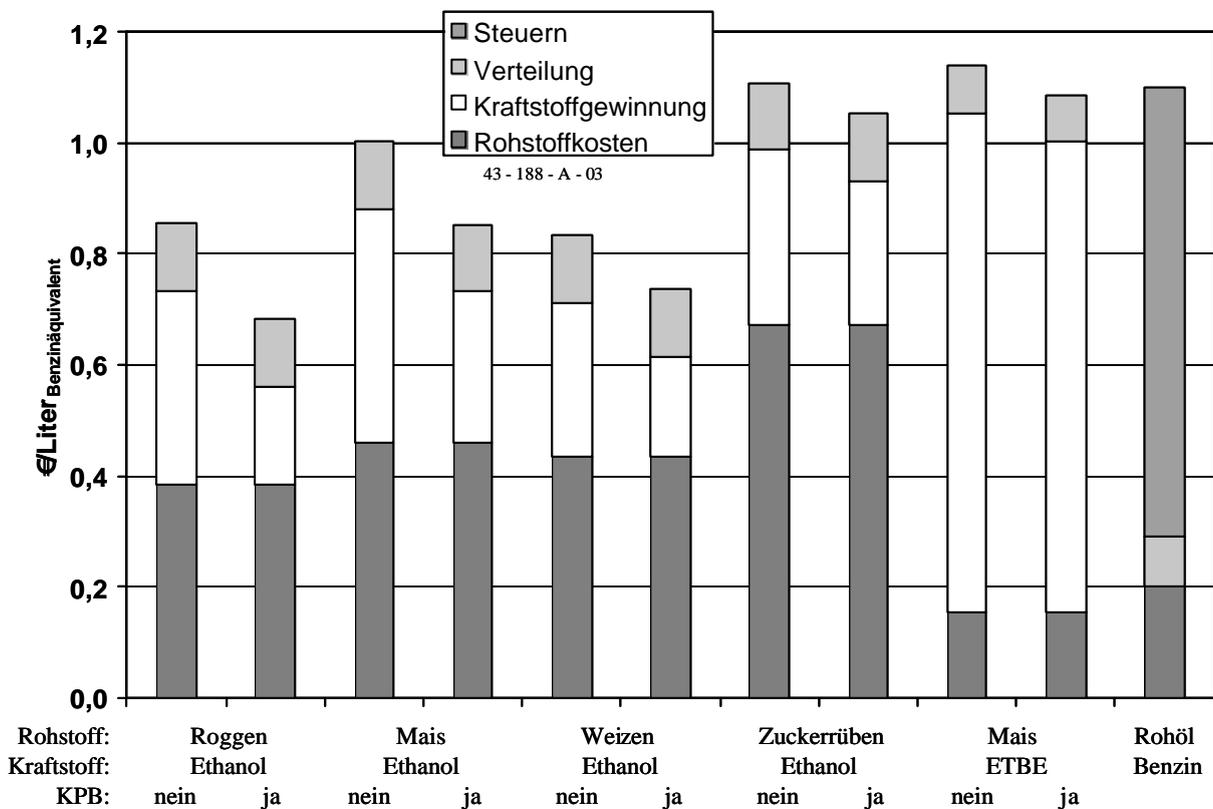


Bild 2-4: Spezifische Kraftstoffkosten und Preise in €/Liter_{Benzinäquivalent}

Alle Ethanolverfahren schneiden etwas günstiger ab als der konventionelle Kraftstoff Benzin. Dieser Vorteil wird unter Berücksichtigung der Koppelprodukte noch deutlicher. Dabei besteht noch Spielraum für eine geringe Gewinnmarge und Besteuerung bei diesen Kraftstoffen. Als besonders günstig erweisen sich Ethanol aus Roggen und Weizen mit jeweils 40 ct/Liter_{Benzinäquivalent} Kostenvorteil. Zu beachten ist dabei der erhebliche Größenunterschied der untersuchten Anlagen, so ist die Kapazität der Weizenverarbeitung um den Faktor 5 größer als bei Roggen. Bei Mais und insbesondere bei Zuckerrüben begrenzen die hohen Marktpreise für Rohstoffe die möglichen Renditen. Da hier jedoch die Marktpreise erheblich über den Vollkosten liegen, ist hier noch ein Reduktionspotenzial vorhanden.

In den Vergleich werden Ethanol aus Roggen, Mais, Weizen und Zuckerrüben, sowie ETBE aus Mais einbezogen. Die weiteren ETBE-Ketten werden nicht dargestellt, da sie sich analog zu Ethanol verhalten.

3 Schlussfolgerungen

Die detaillierte Untersuchung der einzelnen Prozessschritte biogener Kraftstoffketten erlaubt es, die Energieaufwendungen in allen Teilschritten zu bilanzieren. Für die Darstellung und Interpretation der Ergebnisse wurden einige, für biogene bzw. regenerative Energieträger charakteristische Größen definiert: Kumulierter nicht-regenerativer Energieaufwand, Kumulierter Energieaufwand, Erntefaktor, Energiegewinn und spezifischer Flächenertrag.

Als Ergebnis lassen sich im Vergleich mit den konventionellen Kraftstoffen nachfolgende Kernaussagen zu Energie, Emissionen und Kosten ableiten:

3.1 Energie

Ethanol aus regenerativen Rohstoffen weist im Vergleich zu Kraftstoffen auf fossiler Basis niedrigere Bereitstellungsnutzungsgrade auf. Die Erntefaktoren sind dagegen erwartungsgemäß für Ethanol deutlich höher als bei den fossilen Ketten. Dieser Vorteil verringert sich, falls man ETBE im Vergleich zu MTBE betrachtet; dies beruht auf dem fossilen Anteil im ETBE; je Flächeneinheit können jedoch größere Mengen produziert werden.

Die Erntefaktoren lassen sich durch die Nutzung der Koppelprodukte entlang der Ethanolketten erheblich erhöhen, unabhängig vom angesetzten Bewertungsverfahren. Die Bereitstellungsnutzungsgrade sinken entsprechend.

Der Flächenbedarf zur Bereitstellung von Ethanol ist bei Zuckerrüben am geringsten, gefolgt von Mais und Weizen, bei Roggen ist er am höchsten.

Betrachtet man die gesamte Ethanolerzeugung einschließlich der Nutzung von Nebenprodukten, so weist Ethanol aus Roggen je Energieeinheit den höchsten Erntefaktor auf, gefolgt von Weizen, Mais und Zuckerrüben.

3.2 Emissionen

Aufgrund der CO₂-Neutralität der biogenen Kraftstoffe treten während der Nutzungsphase bei diesen Prozessketten keine zu berücksichtigenden CO₂-Emissionen auf. Trotz der höheren kumulierten N₂O-Emissionen durch die vorgelagerten landwirtschaftlichen Prozesse schneiden die biogenen Prozessketten bei den klimarelevanten Emissionen besser ab als das konventionelle Referenzsystem. Dies trifft auch auf 15 %iges ETBE zu. Bei reinem Ethanol sinken die GWP-Emissionen um etwa 60 %.

Im Vergleich der biogenen Kraftstoffe untereinander schneidet Ethanol aus Roggen am besten ab, gefolgt von Weizen, Mais und Zuckerrüben. Im Einsatz weist die 5 %ige Beimischung Vorteile auf gegenüber reinen Ethanolfahrzeugen, ETBE15 und E85 MFC liegen dazwischen.

3.3 Kosten

Ethanol aus regenerativen Rohstoffen hat gegenüber besteuertem Benzin klare Kostenvorteile. Bei Nutzung der Koppelprodukte wird dieser Vorteil noch größer. Damit ist langfristig durchaus Spielraum für Gewinne und eine geringe Steuer vorhanden.

Die Rohstoffkosten dominieren bei der Ethanolbereitstellung mit 50- 70 % die Gesamtkosten. Bei Zuckerrüben erreichen die Kosten dadurch beinahe das Niveau von Benzin.

Im Vergleich der Rohstoffe führt Roggen zu den niedrigsten Ethanolkosten, gefolgt von Weizen, Mais und Zuckerrüben. Die Nutzung der Nebenprodukte führt zu einer erheblichen Kostendegression.

Ethanol kann nur konkurrenzfähig sein, falls es nicht der gleichen Steuer- und Abgabenlast ausgesetzt ist wie die fossilen Kraftstoffe.

3.4 Fazit

Die Marktchancen für Ethanol aus verschiedenen stärke- oder zuckerhaltigen Pflanzen sind recht gut. Die zugrundeliegenden Rahmenbedingungen wie Koppelprodukterlöse, Besteuerung und eine Veränderung der Rohstoffpreise haben allerdings entscheidenden Einfluss auf die Konkurrenzfähigkeit gegenüber Ottokraftstoff.

Auch bei leicht steigenden Preisen für die landwirtschaftlichen Rohstoffe und sinkenden Erlösen für Koppelprodukte wird unbesteuertes Ethanol gegenüber besteuertem Benzin Kostenvorteile aufweisen.

Um eine Markteinführung von Bioethanol zu erreichen sind jedoch sichere Rahmenbedingungen, wie die Fortschreibung der Steuerbefreiung hilfreich. Staatliche Hilfen könnten die Investitionskosten begrenzen und so das unternehmerische Risiko senken.