

Energetische Verbesserungspotenziale in der Bioethanolherstellung



VON
CAND. WI.-ING. MARTIN WAGENER

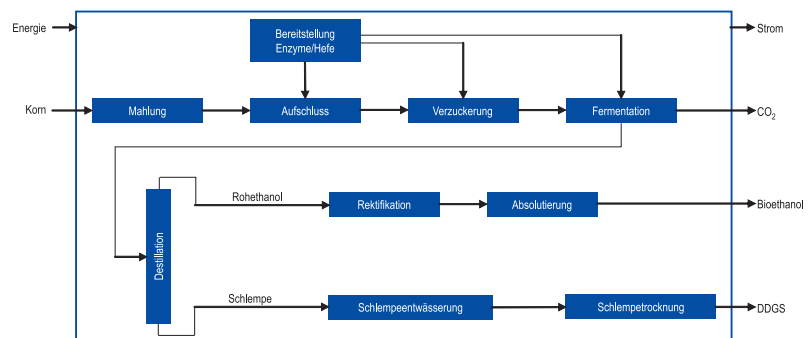
Der fossile Primärenergieträger Rohöl ist der Treibstoff des Verkehrs. Dieser sichert die weltweite Mobilität und ist Grundlage wirtschaftlichen Wachstums. Als Antwort auf die weltweit steigende Rohölnachfrage in einem durch Verfügbarkeit limitierten Markt und die bei Verbrennung entstehenden klimawirksamen Emissionen muss der Verbrauch fossiler Kraftstoffe gesenkt werden. Neben verbrauchsensenden innovativen Antriebstechniken rücken verstärkt heimisch hergestellte biogene Kraftstoffe ins Blickfeld der aktuellen Diskussion.

Für die Bundesrepublik Deutschland, welche 97 % ihres Mineralölverbrauchs importiert [1], gilt es die Abhängigkeit vom Rohöl zu senken und die zukünftige Versorgung mit Kraftstoffen zu sichern. Gleichzeitig müssen im Hinblick auf den Klimaschutz die Emissionen aus dem Verkehrsbereich gesenkt werden. Nur auf diese Weise ist Deutschland in der Lage seine auf europäischer Ebene eingegangenen Verpflichtungen zu erfüllen. Sowohl Versorgungssicherheit als auch Klimaschutz sind unter der Prämisse der Wirtschaftlichkeit zu prüfen.

Bioethanol in Deutschland

Dieser Artikel arbeitet die gewonnenen Erkenntnisse des Seminars "Globale Trends und Herausforderungen in der Verfahrenstechnik" bei Prof. Dr. Kraushaar (Institut für Chemische Verfahrenstechnik an der Universität Karlsruhe (TH)) auf. In diesem Rahmen wird Bioethanol als ein Eckpfeiler einer zukünftig zu diversifizierenden Kraftstoffwirtschaft untersucht. Insbesondere werden energetische Bilanzen der Herstellungsverfahren betrachtet und Verbesserungspotenziale aufgezeigt.

Biokraftstoffe sind Sekundärenergieträger und können als Treib- oder als Brennstoff genutzt werden. Es ist festzustellen, dass der Einsatz von Biokraftstoffen als Brennstoff in Heizungsanlagen und Stromerzeugern aus energetischen Gründen wenig sinnvoll ist. Da die Biokraftstoffherzeugung mit Energieverlusten verbunden ist, sollten in Heizungsanlagen und Stromerzeugern Primärenergieträger verfeuert werden. Bioethanol ist der weltweit bedeutendste biogene Kraftstoff. In Deutschland spielt Bioethanol gegenüber biogenen Kraftstoffen, welche aus Raps gewonnen werden,



▲ **Abbildung 1: Schematische Darstellung der Bioethanolproduktion in der Südzucker Bioethanolanlage in Zeitz, QUELLE: Eigene Darstellung nach o.V. (2007): CropEnergies - creative regeneration of power**

eine eher untergeordnete Rolle. Allerdings ist mit der Beimischungspflicht eines biogenen Anteils zum Ottokraftstoff eine steigende Bedeutung erwartet.

In Deutschland werden zurzeit in 7 Großanlagen sowie 1056 Brennereien insgesamt 896.000 m³/a Bioethanol erzeugt [2]. Im Vergleich zu Brasilien, als weltweit führender Bioethanolproduzent besitzt Deutschland nur eine jährliche Kapazität von ungefähr 6 %. Die drei größten Anlagen in Schwedt/Oder, Zeitz und Zörbig produzieren mit einer Gesamtkapazität von 590.000 m³/a ungefähr 66 % des deutschen Bioethanolausstoßes - Anlagen mit 138.400 m³/a befinden sich im Bau und eine Produktionskapazität von 849.000 m³/a in der Planungsphase.

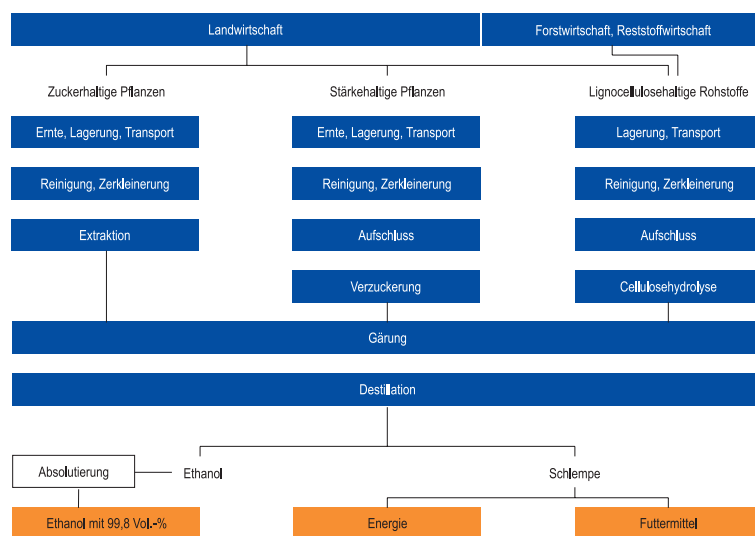
Fossile Kraftstoffe aus Erdöl dominieren mit einem Anteil von 94 % (bezogen auf den Energieinhalt) den deutschen Kraftstoffmarkt. Unter den biogenen Kraftstoffen besitzt Ethanol einen Anteil von 12 %, Biodiesel von 62 % und Pflanzenöl von 26 % [3]. Auf Grund politischer Vorgaben (EU-Richtlinie 2003/30/EC: Substitution von 5,75 % fossiler Kraftstoffe durch biogene bis 2010; eingeschränkte Besteuerung von biogenen Reinkraftstoffen und dem biogenen Anteil in Kraftstoffgemischen bis 2012) und der Verteuerung des Rohöls auf dem Weltmarkt ist eine Erhöhung des biogenen Kraftstoffanteils auf 10 % bis 15 % im Jahre 2015 zu erwarten. Aktuell blickt die Branche jedoch auf Grund der schrittweisen Anpassung des Besteuerungssatzes von biogenen Kraftstoffen an den Mineralölsteuersatz unter negativen Vorzeichen in die Zukunft.

Herstellung und Einsatzmöglichkeiten

Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung der Südzucker Bioethanolanlage in Zeitz. Diese erzeugt aus Weizen und nach einer baulichen Erweiterung ebenfalls aus Zuckerrüben mit Hilfe von Enzymen und Hefe Ethanol. Das dabei angewandte Prinzip der Gärung ist der Menschheit seit Jahrtausenden aus der Herstellung von Bier und Wein bekannt. Gärung beruht auf den organischen Stoffe zersetzenden Stoffwechselprozessen von Mikroorganismen unter anaeroben Bedingungen gemäß der folgenden Reaktionsgleichung:

$C_6H_{12}O_6$ (Glucose) $\rightarrow 2 CO_2$ (Kohlendioxid) + $2 C_2H_5OH$ (Ethanol). Der großindustrielle Prozess der Ethanolherstellung aus Getreide verläuft über die Zermahlung des Korn, den Aufschluss der Stärke, die Verzuckerung, die Fermentation des Zuckers, die Destillation der Maische und die abschließende Produktaufbereitung. Bioethanol wird traditionell aus zucker- und stärkehaltigen Pflanzen hergestellt. In

kann ein Zusatz von 5 Vol.-% Ethanol zum Ottokraftstoff (E5) nach DIN EN 228 schon heute realisiert werden. Aus Bioethanol und Isobuten kann ETBE (Ethyl-Tertiär-Butyl-Ether) hergestellt werden, welcher als Oktanzahlverbesserer dem Ottokraftstoff nach DIN EN 228 mit bis zu 15 Vol.-% zugesetzt werden kann. Ein Einsatz mit einem höheren Ethanolanteil (> 15 Vol.-%) und als Reinkraftstoff erfordert Eingriffe in das Motoren-



▲ **Abbildung 2: Darstellung der unterschiedlichen Prozesswege der Bioethanolproduktion** QUELLE: Eigene Darstellung

Deutschland werden auf Grund der klimatischen Bedingungen als Rohstoffe bevorzugt Zuckerrüben und Getreide angebaut. Die Produzenten in den Vereinigten Staaten von Amerika bevorzugen Körnermais. In Brasilien erzeugt man Ethanol hauptsächlich aus Zuckerrohr. Die oben genannten Rohstoffe werden limitiert durch die, für die Landwirtschaft als Lieferant zur Verfügung stehende Kulturfäche. In der Erprobung sind Verfahren, welche als neue Rohstoffbasis Lignocellulose aus Gräsern, Holz, Stroh, Chinaschilf und Landschaftspflegegut verwenden.

Bioethanol kann als Reinkraftstoff, Mischkraftstoff oder nach chemischer Umwandlung zum Einsatz kommen. Die beiden letzten Möglichkeiten implizieren eine enge Verzahnung des Biokraftstoffes mit herkömmlichem Ottokraftstoff. Mischkraftstoffe sind einfach einsetzbar; beispielsweise

konzept der herkömmlichen Motoren. So genannte heute bereits serienmäßig erhältliche Flexibel-Fuel-Vehicles können sowohl mit reinem Ethanol als auch mit Ottokraftstoffen mit hohem Bioethanolzusatz fahren.

Technologie der Herstellung

Auf Grund der differenzierten chemischen Struktur der drei grundsätzlich zur Verfügung stehenden Stoffklassen (zucker-, stärkehaltige Pflanzen und lignocellulosehaltige Rohstoffe) ergeben sich unterschiedlich Synthesewege (vgl. Abbildung 2). Ethanol kann nicht direkt aus Pflanzen gewonnen werden, sondern muss durch einen Fermentationsprozess aus den Rohstoffen umgewandelt werden. Bei stärkehaltigen Pflanzen (z.B. Getreide) wird das Korn in den Prozess eingeschleust. Während bei

zuckerhaltigen Pflanzen nur deren Pflanzkörper Verwendung findet. Um die Fermentation zu beginnen, müssen die drei Stoffklassen zuvor unterschiedliche Prozesswege durchlaufen, um als Eingangsstoff eine zuckhaltige Lösung (Maische) zu gewinnen. Die in der Fermentation gewonnene alkoholische Lösung wird in Destillations- und Rektifikationskolonnen aufkonzentriert. Als Produkte ergeben sich Ethanol sowie die Schlempe als anfallender Reststoff. Dieser kann zu Tierfutter weiter verarbeitet werden oder über weitere Prozessschritte schließlich in die Endprodukte Biogas und Wärme überführt werden.

Energetische Bilanzierung der Herstellung

Um eine Energiebilanz für Ethanol zu erstellen, müssen sämtliche in den Bilanzraum eingeführten und ausgeführten Stoff-

sowie Wärmeströme, welche auf fossilen Energieträgern basieren, betrachtet werden. Als Vergleichsgröße für die fließenden Energie- und Stoffströme wird in diesem Fall der produzierte Liter Bioethanol gewählt. Die relevanten Stoffströme sind in energetische Äquivalente umzurechnen. Dabei ist es zweckmäßig die Ethanolherstellung in drei Teilsysteme zu unterteilen: die agrarische Kultivierung, die Konversion der Rohstoffe in Ethanol und die Nachbereitung von Kuppelprodukten.

Bei der Produktion agrarischer Rohstoffe machen der Einsatz von Düngemitteln, Pestiziden und der Kraftstoffverbrauch bei Kultivierung sowie Transport einen Großteil des fossilen Energieeinsatzes aus. Die resultierenden Energieumsätze variieren je nach Rohstoff beträchtlich. Die Konversion beansprucht den größten Anteil an Energie. Dieser wird jedoch maßgeblich durch den technischen Standard der Anlagen und die Art

der Prozessführung beeinflusst. Beispielsweise ermöglichen Biogasanlagen und Kraft-Wärme-Kopplungen ein hohes Maß an energetischer Autarkie. Der Sumpf der Destillation kann entweder zu DDGS verarbeitet werden oder bei kleineren Mengen in einer Biogasanlage zur Energiegewinnung eingesetzt werden. DDGS als ein aus dem Bilanzraum auszuschleusendes Kuppelprodukt muss durch Energiegutschriften berücksichtigt werden. Der durch die Biogasanlage erzeugte Strom und die anfallende Prozesswärme sind je nach Wahl des Bilanzraumes ebenfalls zu verrechnen.

Energetische Äquivalente der Umsätze

Studien, in welchen Energiebilanzen für Ethanol erstellt wurden, kommen zu stark unterschiedlichen Ergebnissen. Als kritische Faktoren für die energetische Bewertung

Logistics is our profession and challenge

Wir gehören zu den anerkannten Spezialisten in der Logistik-Beratung. Strategische Planung und Optimierung logistischer Systeme sind unsere Geschäftsfelder. Ingenieurwissenschaftliche und mathematische Methoden sind unsere Kernkompetenzen. Unsere Kunden sind führende Unternehmen weltweit.

LOCOM - Lösungen

- ▶ Globale Netzwerkoptimierung
- ▶ Strategische Standortplanung
- ▶ Simulative Transportplanung
- ▶ Optimierung Lagerbestände

Notwendige Anpassungen

- ▶ Aus Logistikketten werden Netze
- ▶ Transparente Prozesse in Real-Time Supply Chains
- ▶ Strukturen werden flexibel und dynamisch
- ▶ Unternehmensübergreifende IT-Vernetzung

Erlebte Veränderungen

- ▶ Globalisierung von Einkaufs- und Absatzmärkten
- ▶ „Going east“ von Produktionskapazitäten
- ▶ Explodierende Nachfrage in Schwellenländern
- ▶ Verknappung von Logistikressourcen

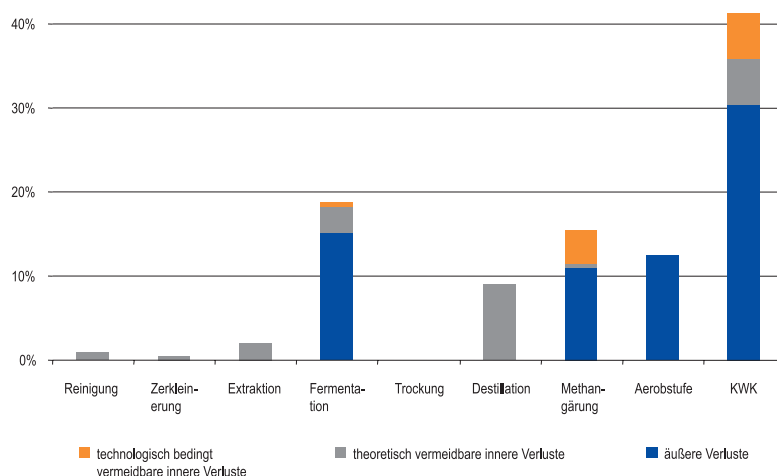
Freuen Sie sich auf einen interessanten Aufgabenbereich in unserem Unternehmen. Wir freuen uns auf Ihre Bewerbung!
nathalie.aubard@locom.de



und Vergleichbarkeit sind der Düngbedarf pro Hektar, der angenommene Hektarertrag des Rohstoffes, die Anlagengröße der Bioethanolanlage und die Verwendung der Kuppelprodukte zu nennen.

Für die Bewertung der energetischen Effizienz des Umwandlungsprozesses eignet sich besonders das Verhältnis zwischen Energieoutput und Energieeinsatz. Insgesamt schneidet die Energiebilanz für die

als Hauptverlustquellen der Konversion (Wirkungsgrad 86 %) identifiziert werden. Die Energieverluste bei der Destillation, welche durch den hohen Prozessenergiebedarf verursacht werden, sind theoretisch zu vermeiden. Im Gegensatz dazu sind die aus den ablaufenden Fermentationsreaktionen resultierenden inneren Verluste nur bedingt vermeidbar. Dennoch bietet auch die Fermentation Potenzial zu Verbesserungen.



▲ Abbildung 3: Verlustbeiträge der Prozessstufen der konventionellen Bioethanolherstellung QUELLE: Schulz M., Hebecker, D. (2005): *Thermodynamische Analyse und Bewertung der Bioethanolherstellung*, Chemie Ingenieur Technik 2005, 77, No. 6, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim, S. 796. Darstellung der unterschiedlichen Prozesswege der Bioethanolproduktion

Produktion von Ethanol aus Getreide (22-34 MJ/(L Ethanol) schlechter ab als die von Zuckerrüben (20-30 MJ/(L Ethanol)). In älteren Literaturquellen lassen sich Studien finden, in denen die Energiebilanz sogar negativ ist. D.h. bei der Herstellung von Bioethanol wird mehr Energie eingesetzt, als durch die Verbrennung des Ethanols freigesetzt wird. In den Berechnungen der Energiebilanzen sind die unterschiedlichen Heizwerte von Benzin und Ethanol zu berücksichtigen. Benzin besitzt einen Heizwert von 32,4 MJ/L gegenüber 21,06 MJ/L von Ethanol [4], d.h. ein Liter Ethanol substituiert 0,65 Liter Benzin.

Verbesserungspotenziale der Energiebilanz

Die Verlustbeiträge der einzelnen Prozessstufen in Abbildung 3 zeigen auf, dass die Teilsysteme Destillation und Fermentation

Eine vollkommenere Umwandlung des Zuckers zum Zielprodukt Ethanol würde im weiteren Prozessablauf Energie einsparen, welche ursächlich der Fermentation gutgeschrieben würde. Dabei ist zu beachten, dass Ethanol bereits ab einer Konzentration von 2 % sich aufwärts verstärkend als Zellgift für die Pilze wirkt. Der toxische Effekt wird in diesem Fall der zellmembranschädigenden Wirkung von Ethanol zugeschrieben. Bei einer Konzentration von 110 g/L werden das Zellwachstum und die Ethanolproduktion der meisten Hefestämme gestoppt [5]. Der Einsatz von Bakterien anstatt etablierter Hefen erhöht die Ethanolausbeute signifikant. Außerdem wird eine weitere Erhöhung durch Feststofffermentation, d.h. die direkte Vergärung der Rübenschnitzel erreicht. Diese Art der Fermentation vermeidet die Dünnsaferherstellung und anschließende Lösungsfermentation.

Sämtliche beschriebene Optimierungen

verfolgen das Ziel, die Menge der entstehenden Nebenprodukte zu minimieren. Dies ist insoweit wichtig, da die Umsetzung der Nebenprodukte über Methangärung, eine abschließende aerobe Stufe sowie Abwasserreinigung einen Wirkungsgrad von 71 % aufweist. Die sich anschließende Strom- und Prozesswärmeerzeugung mittels Kraft-Wärme-Koppelung besitzt jedoch nur einen Wirkungsgrad von 40 %. Da die angegebenen inneren Verluste technologisch nur bedingt zu vermeiden sind, kann die Minimierung der Menge der entstehenden Kuppelprodukte als umso wichtiger angesehen werden.

Fazit

Unter dem Vorzeichen steigender Rohölpreise und begrenzter Rohölvorkommen stellt Bioethanol kurz- und mittelfristig eine zukunftssträchtige Diversifizierungsmöglichkeit dar. Eine volumenstarke Substitution fossiler Kraftstoffe durch Bioethanol ist langfristig bei konsequenter technologischer Weiterentwicklung möglich, birgt allerdings Herausforderungen wie beispielsweise zunehmende düngereintensive Monokulturen in der Landwirtschaft. Weiterhin werden im Gegensatz zu Biokraftstoffen der neuen Generation (BTL) nicht sämtliche Pflanzenteile verwendet. Daher ist es notwendig die gesamte Herstellungs- und Bereitstellungs-kette zu analysieren.

Die Vorteile von Bioethanol liegen in der biogenen Basis und dem daraus resultierenden geschlossenen Kohlenstoffkreislauf. Die Sonneneinstrahlung auf die Erde ermöglicht es den Pflanzen durch Photosynthese Biomasse aufzubauen. Die in der Biomasse enthaltene Energie geht in den Bioethanol ein. Damit klinkt man sich durch die Bioethanolnutzung als Kraftstoff in natürliche Ströme ein.

Die Verbrennungseigenschaften von Ethanol bieten auf Grund eines günstigen Kohlenstoff-Wasserstoffverhältnisses und einer hohen Oktanzahl das Potenzial die Motoremissionen zu senken. Die Materialauswahl für moderne Motoren birgt wegen der korrosiven Eigenschaften von Ethanol Herausforderungen. Nachteilig wirkt sich die geringe Energiedichte von Ethanol gegenüber Benzin aus. Diese hat eine

geringere Reichweite und einen höheren volumenmäßigen Transportaufwand zum Verbraucher zur Folge.

Die gute Mischbarkeit von Benzin und Ethanol ermöglicht die sukzessive Einführung in den Kraftstoffmarkt. Als wesentlicher Vorteil von Bioethanol erweist sich die Tatsache, dass bereits optimierte Motorkonzepte und vorhandene Verteilungsinfrastruktur weiterhin genutzt werden können. Letztendlich wird jedoch die Summe aus Rohstoff- und Produktionspreis sowie die Beimischungskosten pro Liter Kraftstoff über Erfolg oder Misserfolg entscheiden. Diese liegt bei Bioethanol je nach Rohstoff mit 0,77 € pro Liter höher als bei Benzin aus Rohöl mit ca. 0,45 € pro Liter. Daher ist auf dem Gebiet der Bioethanolherstellung ein erheblicher weiterer Forschungsbedarf festzustellen.

Fußnoten

- [1] Vgl. Arbeitsgemeinschaft Energie e.V. (2006).
- [2] Vgl. Grunert, LFL, zitiert nach Kupfer, M. (2007).
- [3] o.V. (2007) Biokraftstoffe-info.de.
- [4] Vgl. Schmitz, N. (2003), S. 251.
- [5] Vgl. Kosaric, N., Duvjak, Z., Sahn, H., Bringer-Meyer, S., chapter 5.1.3.

Literatur

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanz e. V. (2006): Heimische Energiegewinnung auf Vorjahresniveau. in: Pressemitteilung vom 24.03.2006, URL: <http://www.emissionshandel-fichtner.de/news.html>, Stand: 04.10.2007.

Grunert, LFL, zitiert nach Kupfer, Marion (2007): Andere Kraftstoffe - Bioethanol. URL: <http://www.biokraftstoff-portal.de/ndshb/index.php?tpl=kr&bkr=1&kr=4>, Stand: 04.10.2007.

Biokraftstoffportal Niedersachsen (2007), URL: <http://www.biokraftstoff-portal.de/ndshb/index.php?lng=de&tpl=main&id=22>, Stand: 04.10.2007.

Kaltschmitt, Martin (2001): Energie aus Biomasse. Hrsg. Hartmann, Hans, Springer-Verlag Berlin München New York.

Kosaric, Naim, Duvjak, Zdravko, Sahn, Hermann, Bringer-Meyer, Stephanie (2001): Ethanol. in: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry (2001).

Schmitz, Norbert (2003): Bioethanol in Deutschland, Schriftenreihe: Nachwachsende Rohstoffe. Band 21, Hrsg: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Landwirtschaftsverlag GmbH Münster.

Südzuckerbioethanol GmbH (2007): CropEnergies - creative regeneration of

power. in Internet unter: <http://www.crop-energies.com/de/Bioethanol/>, Stand: 04.10.2007.

Schulz, Michael, Hebecker, Dietrich (2005): Thermodynamische Analyse und Bewertung der Bioethanolherstellung, Chemie Ingenieur Technik 2005, 77, No. 6, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim.

