

Die Produktion von Bioethanol als Treibstoff unter dem Aspekt der Energie-, Kosten- und Ökobilanz

Zusammenfassung

Die Produktion von Bioethanol zur Verwendung als Energieträger aus nachwachsenden Rohstoffen wird nach wie vor sehr kritisch gesehen. Es kann jedoch anhand einer amerikanischen Studie gezeigt werden, dass auch die großtechnische Alkoholproduktion nach dem derzeitigen Stand der Technik neben einer positiven Energiebilanz auch eine positive Ökobilanz aufweist. Betrachtet man das System einer nachhaltigen Ethanolproduktion in dezentralen Anlagen, kann gezeigt werden, dass dies, unter Einbeziehung der Produktion von Biogas in diesen Anlagen, zu einer deutlich verbesserten Energiebilanz, einer positiven Ökobilanz und wirtschaftlichen Preisen für das erzeugte Bioethanol führt.

T. Senn
Universität Hohenheim,
Institut für
Lebensmitteltechnologie,
sennthom@uni-hohen-
heim.de

Einleitung

Die Einhaltung der von der Bundesregierung übernommenen Verpflichtungen zur Reduktion des CO₂-Ausstoßes wird im gegebenen Zeitrahmen wohl kaum realisierbar sein ohne auch im Verkehrssektor wirksame Maßnahmen für eine deutliche Reduktion der Emissionen zu ergreifen. Dazu ist ein flüssiger Energieträger für den Einsatz in den vorhandenen Verbrennungsmotoren erforderlich. Neben Biodiesel kommt hierfür auch Ethanol als Beimischungskomponente zu Benzin in Frage.

Die Herstellung von Ethanol zu Beimischungszwecken in großtechnischen Erzeugungsanlagen wird jedoch nach wie vor eher kritisch gesehen, da bisherige Studien jeweils nur eine knappe positive Energiebilanz aufzeigen. In der politischen Diskussion wird also davon ausgegangen, dass für die Herstellung einer Energiemenge von 1 MJ in Form von Ethanol nahezu auch 1 MJ an fossiler Energie verbraucht wird. Hinzu kommt, dass der erzielbaren Reduktion der Emission von Treibhausgasen (CO₂-Äquivalenten) eine Erhöhung der Emissionen von Gasen mit Versauerungspotential (SO₂-Äquivalenten) entgegensteht [4]. Dies soll anhand einer Energiebilanz der großtechnischen Alkoholproduktion aus Weizen, unter Berücksichtigung des Hohenheimer Dispergier-Maisch-Verfahrens (DMV), mit der erforderlichen Schlemmetrocknung aufgezeigt werden:

*Tabelle 1:
Energiebilanz der
großtechnischen
Alkoholproduktion*

Verfahrensschritt	[MJ/t Getreide]
Getreideproduktion	-1.367
Getreidelagerung	-150
Ethanolproduktion großtechnisch	-2.500
Schlemmetrocknung	-2.400
Summe Ethanolproduktion	-6.417
Energiegehalt Ethanol (400 lA/t Getreide)	8.480
Energie-Ertrag /t Getreide	2.063
Verhältnis Energie-Gewinn / Energie-Eintrag	1,32

Diese Bilanz zeigt, dass bei der großtechnischen Alkoholproduktion unter Einsatz von 1 MJ in Form fossiler Energie 1,3 MJ in Form von Ethanol gewonnen werden können. In Verbindung mit den auch vorhandenen negativen Auswirkungen auf das Versauerungspotential scheint die Kritik an der großtechnischen Treibstoffalkoholproduktion aus diesem Blickwinkel berechtigt zu sein. Unter Einsatz

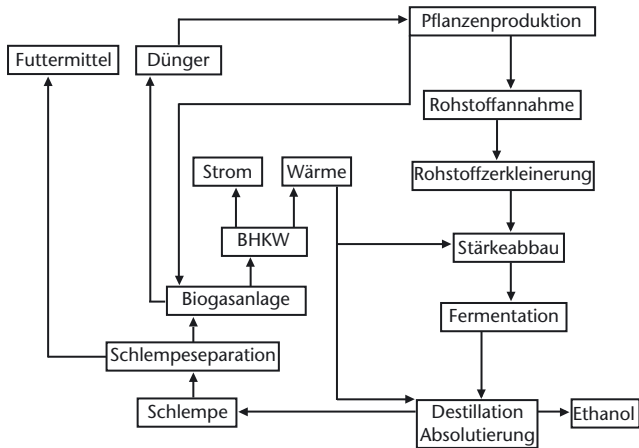
modernster Destillations- und Trocknungstechnik sollte es jedoch möglich sein, dieses Output: Input-Verhältnis auf bis zu 1,6:1 zu steigern. Dies entspräche bereits einem Energie-Gewinn von 60%, der nicht mehr vernachlässigbar ist. Diese Technologie ist jedoch nur in Anlagen umsetzbar, die täglich mindestens 100.000 IA erzeugen! Es stellt sich jedoch die Frage, ob Ethanol auf diese Art und Weise hergestellt werden muss oder ob es nicht Alternativen gibt?

Konzept der nachhaltigen Bioethanolproduktion

Aufgrund solcher Überlegungen wurde vom Bundesverband der landwirtschaftliche Rohstoffe verarbeitenden Brennereien unter Vorsitz von Herrn Spradau eine Studie zur Bilanzierung der Ethanolproduktion in mittelständischer Größenordnung und unter Einbeziehung einer Biogasproduktion beim Fachgebiet Gärungstechnologie des Instituts für Lebensmitteltechnologie an der Universität Hohenheim und der VLSF in Berlin (Bewertung des Einsatzes von ETBE) in Auftrag gegeben.

Ein solches System der Alkoholproduktion lässt sich vereinfacht wie folgt schematisch darstellen:

Abbildung 1:
Vereinfachtes Schema
der Produktion von
Bioethanol in der
Landwirtschaft



Im ethanolerzeugenden landwirtschaftlichen Betrieb wird die erforderliche Getreidemenge produziert. Zusätzlich erfolgt auf einem Drittel der Fläche die Produktion einer Blattfrucht (Fruchtfolge) als Co-Substrat für die Biogasproduktion. Das Getreide wird in der Brennerei zu Ethanol verarbeitet, wobei je Liter Ethanol etwa 10 Liter Schlempe anfallen. Diese Schlempe wird von den Feststoffanteilen befreit, welche als Futtermittel dienen. Die Dünnschlempe wird zusammen mit dem Co-Substrat in die Biogasanlage gegeben. Das entstehende Biogas wird genutzt, um mittels eines Dampferzeugers die Brennerei mit Energie zu versorgen. Überschüssiges Biogas wird in einem BHKW verstromt, wobei wiederum zumindest teilweise nutzbare Wärme entsteht. Das ausgefaulte Material dient als Dünger für die genutzten landwirtschaftlichen Flächen. So wird neben dem Kohlenstoff-Kreislauf auch der Stickstoff-Kreislauf zu mindestens 60 % geschlossen.

Der Prozessablauf in der Brennerei kann wie folgt beschrieben werden:

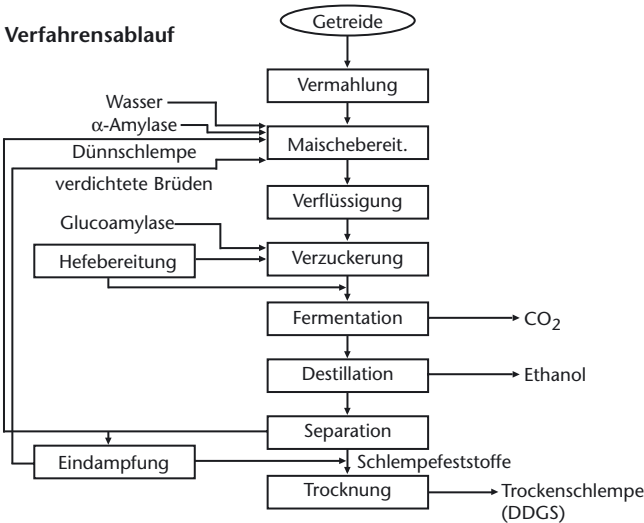


Abbildung 2:
 Prozess-Fließbild der
 Ethanolproduktion mit
 Schlempetrocknung

Dieses Schema zeigt den Verfahrensablauf einschließlich einer Schlempetrocknung, wie es obiger Energiebilanz bei großtechnischer Verarbeitung entspricht. Auch im Brennereibetrieb selbst erfolgt eine weitgehende Wärmerückgewinnung, um den Energiebedarf des Verfahrens so weit wie möglich zu senken.

Bilanzierung

Es wurde also ein nachhaltiges System zur Produktion von Bioethanol bilanziert, das die Produktion von Getreide, die Konversion zu Ethanol, die Produktion von Biogas aus der anfallenden Schlempe, die Rückführung dieser ausgefaulten Schlempe auf die landwirtschaftlichen Flächen und die Verwertung des Biogases zur Dampferzeugung und/oder

Stromerzeugung in einem Block-Heizkraftwerk (BHKW) vorsieht. Zur Sicherung der nachhaltigen Ethanolproduktion auf den gleichen Flächen ist auf einem Drittel der Fläche zur Sicherung der Fruchtfolge die Produktion von Silomais, Raps oder anderen Rohstoffen für die Biogasgewinnung vorgesehen. Daraus ergibt sich die im Folgenden dargestellte Massenbilanz für die landwirtschaftliche Bioethanolproduktion:

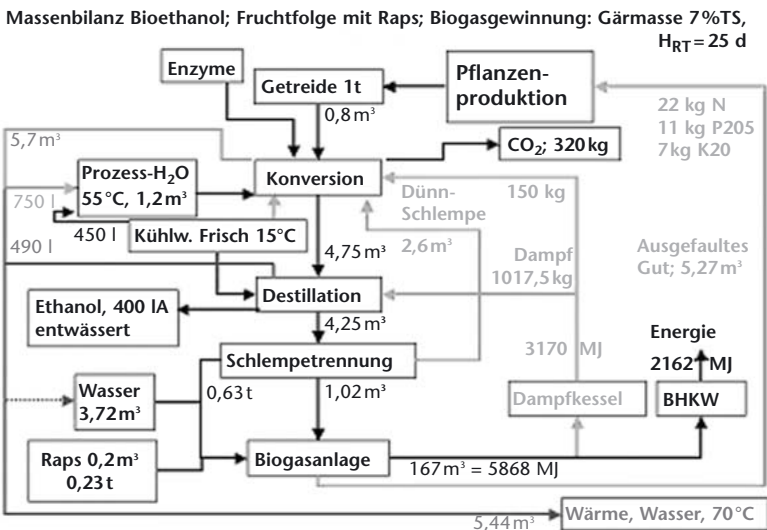


Abbildung 3: Massenbilanz der dezentralen nachhaltigen Ethanolproduktion

Wie bereits festgestellt, muss auf der für die Fruchtfolge genutzten Fläche nicht unbedingt Raps angebaut werden. Als Alternative hierzu wäre neben Silomais auch die Produktion etwa von Gras und Grassilage gegeben. Auf der Basis dieses nachhaltigen Konzeptes ergibt sich dann folgende Energiebilanz für die Alkoholproduktion:

Verfahrensschritt	[MJ/t Getreide]
Getreideproduktion	-1.367
Getreidelagerung	-150
Rapsproduktion	-587
Rapslagerung	-98
Ethanolkonversion	-2.564
Summe Ethanolproduktion	-4.766
Energiegehalt Ethanol (400 IA/t Getreide)	8.480
Energieproduktion über Biogas	-992
Energie aus Biogas	4.987
Energiegutschrift für Dünge-N der Schlempe	990
Summe Energiegehalt der Energie-Produkte	14.457
Energie-Ertrag je t Getreide	8.699
Verhältnis Energie-Gewinn / Energie-Eintrag	2,51

*Tabelle 2:
Energiebilanz der
dezentralen nachhaltigen
Ethanolproduktion*

Damit können bei nachhaltiger Ethanolproduktion mit 1 MJ fossiler Energie 2,5 MJ an Energie in Form von Ethanol, Strom und Wärme bereitgestellt werden. Darüber hinaus muss festgehalten werden, dass je t geernteten Getreides zusätzlich 1 t Stroh anfällt. Geht man realistischer Weise davon aus, dass zwei Drittel der anfallenden Strohmenge (17,3 MJ/kg Stroh) geborgen und energetisch genutzt werden können, so fallen je t Getreide zusätzlich 11.418 MJ an. Für die Strohbergung werden bezogen auf 1 t Getreide jedoch nur 250 MJ benötigt. Damit ließe sich der Energie-Ertrag je produzierte 1 t Getreide auf ca. 20.000 MJ steigern. Dieser entspräche dann einem Verhältnis von Energie-Gewinn/Energie-Eintrag von 1 : 3,47. Jedoch ist auch die Strohbergung nur in einer mittelständischen Struktur der Alkoholerzeugung logistisch zu bewältigen. Die nachhaltige und energetisch überaus sinnvolle Produktion von Treibstoffalkohol ist demnach vor allem in Anlagen mit einer maximalen Jahreskapazität vom 10 Mio. IA realisierbar.

Es stellt sich nun die Frage, ob eine solche Bioethanolproduktion wirtschaftlich sein kann. Hierzu wurden die Produktionskosten in derartigen Anlagen unter den gegebenen landwirtschaftspolitischen Voraussetzungen und unter der Annahme einer kompletten Neu-Errichtung dieser Anlagen einschließlich einer Absolutierung des Ethanol kalkultiert. Auch die Biogasanlage einschließlich BHKW wird als neu zu errichten betrachtet. Ebenso sind alle Kosten der Getreideproduktion wie auch die der Ausbringung der ausgefaulten Schlempe und sämtliche Lager-, Gebäude-, Fahrwege- und Arbeitskosten erfasst worden. Daraus ergeben sich folgende Produktionskosten in Abhängigkeit von der Anlagengröße (Die Kosten für die Bioethanolproduktion wurden von L. Gekle, Universität Hohenheim -410-, berechnet):

*Tabelle 3:
Kosten der dezentralen
nachhaltigen Ethanol-
produktion in
Abhängigkeit von
der Anlagengröße*

Größe der Brennereianlage	9.000.000 l A	5.000.000 l A	2.000.000 l A
Blattfrucht	Raps	Raps	Raps
Trockensubstanzgehalt im Fermenter	7%	7%	7%
Werte beziehen sich auf 1.000 l A		Verweildauer $H_{RT} = 25$ d	
Summe Kapitalbedarf	1.806	2.072	2.634
Kapitalkosten	€ 248	281	342
laufende Kosten	€ 389	397	411
Arbeitskosten	€ 92	108	147
Betriebsleitung	€ 24	36	72
Summe Kosten	€ 753	822	972
Subventionen	€ 201	201	201
Energieerträge	€ 112	112	112
Summe Leistungen	€ 313	313	313
Produktionskosten für Alkohol	€ 441	510	659
Nicht bewertete nutzbare Wärme kWh	557	557	557

Bei der größten der kalkulierten Anlagen liegen die Produktionskosten von Ethanol im nachhaltigen System demnach unter 45 € ct/l Ethanol. Werden jedoch für kleinere Anlagengrößen bereits vorhandene Anlagen der aus dem Monopol ausgeschiedenen gewerblichen Brennereien genutzt, so lassen sich auf diesem Wege die Investitionskosten deutlich senken, so dass auch für solche Anlagen die Herstellungskosten auf etwa 50 € ct gedrückt werden können. Für die Produktion von Silomais im Rahmen einer Fruchtfolge ergeben sich folgende Produktionskosten für Ethanol:

*Table 4:
Kosten der dezentralen nachhaltigen Ethanolproduktion in Abhängigkeit der TS in der Biogasanlage*

Größe der Brennereianlage	9.000.000 l A	9.000.000 l A
Blattfrucht	Silomais	Silomais
Trockensubstanzgehalt im Fermenter	7%	12%
Werte beziehen sich auf 1.000 l A	Verweildauer $H_{RT} = 25$ d	
Summe Kapitalbedarf	2.771	2.451
Kapitalkosten	€ 390	354
laufende Kosten	€ 469	434
Arbeitskosten	€ 134	124
Betriebsleitung	€ 24	24
Summe Kosten	€ 1.017	937
Subventionen	€ 201	201
Energieerträge	€ 299	299
Summe Leistungen	€ 500	500
Produktionskosten für Alkohol	€ 517	437
Nicht bewertete nutzbare Wärme kWh	2.881	2.881

Bei der Produktion und Cofermentation von Maissilage in der Biogasanlage ergeben sich etwas höhere Produktionskosten als bei der Alternative Raps. Jedoch wird hier deutlich, dass die Kosten ebenfalls unter 45 € ct je IA liegen, wenn ein heute durchaus realisierbarer Trockensubstanzgehalt von 12% in der Biogasanlage gefahren wird, wodurch diese deutlich kleiner ausfallen kann.

Wird in diesem System der Alkoholproduktion zusätzlich das anfallende Stroh genutzt, kann davon ausgegangen werden, dass die Produktionskosten durch diese Maßnahme weiter gesenkt werden können.

	Reduzierung der Treibhaus-Gas-Emissionen in % bezogen auf reines Benzin
Trockenvermahlung, heutige Technik	1,5%
Trockenvermahlung, nahe Zukunft	2,0%
Nassvermahlung, heutige Technik	1,0%
Nassvermahlung, nahe Zukunft	2,0%
Lignocellulosehaltige Biomasse, nahe Zukunft	10,0%

*Tabelle 5:
Einfluß des Ethanol-Blends E10 auf die Treibhaus-Gas-Emissionen [5]*

Bei all diesen Betrachtungen darf aber auch die ökologische Bilanz einer solchen Vorgehensweise nicht außer acht gelassen werden. So haben bereits Stelzer und Kaltschmitt [4] in ihren Arbeiten gezeigt, dass die ökologisch eher negative Bilanz einer großtechnischen Alkoholproduktion im Annex zu einer Zuckerfabrik durch die Einbindung einer Biogasproduktion positiv gestaltet werden kann. Im Jahre 2002 konnte dann aber im Rahmen eines Life-Cycle-Assessments von Wang [5] gezeigt werden, dass auch die Ethanolproduktion auf dem gegenwärtigen Stand der

Technik bei der ökologischen Bilanzierung durchaus positiv ausfällt. Diese Studie führte zu folgenden Ergebnissen: Es ist in diesem Zusammenhang darauf hinzuweisen, dass diese Bilanzen keine Biogasproduktion aus der Schlempe oder sonstigen Substraten vorsehen. Darüber hinaus macht ein Blick auf die obigen Energiebilanzen zudem deutlich, dass eine energieautarke Ethanolproduktion durchaus möglich ist. Durch den völligen Verzicht auf den Einsatz von fossilen Energieträgern in der Bioethanolproduktion aber werden die ökologischen Bilanzen noch weiter positiv beeinflusst.

Damit kann aus volkswirtschaftlicher Sicht folgender Schluss gezogen werden: Die Energiemenge von 1 MJ in Form fossiler Energie (Erdöl) kann entweder dazu genutzt werden, um Benzin herzustellen, wodurch 0,8MJ in Form von Benzin bereitgestellt werden können. Wird dieses eine MJ aber genutzt, um in der landwirtschaftlichen Produktion Ethanol herzustellen, können 2,5MJ, bei der Nutzung von Stroh etwa 3,5MJ, in Form von Ethanol, Strom und Wärme gewonnen werden. Damit wäre aus volkswirtschaftlicher Sicht die nachhaltige Ethanolproduktion bereits heute sinnvoll und wirtschaftlich.

Literatur

- [1] Rosenberger, A, Kaul, H.-P., Senn, T., Aufhammer, W. (2001): Improving the energy balance of bioethanol production from winter cereals: the effect of crop production intensity. *Applied Energy*, 68, 51-67
- [2] Rosenberger, A (2001): Optimierung und Bewertung der Produktion von Getreidekorngut als Rohstoff für die Bioethanolerzeugung: Dissertation, Universität Hohenheim
- [3] Senn, T., Pieper, H.J. (2001): Ethanol Classical Methods. In: Roehr, M., Editor; *The Biotechnology of Ethanol*, Wiley-VCH, Weinheim
- [4] Stelzer, T. (1999): Biokraftstoffe im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen – Lebensweganalysen von Umweltwirkungen. Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Forschungsbericht, Band 57
- [5] Wang, M.: A life-cycle-assessment of the impact of fuel ethanol on energy and greenhouse gas emissions; *World Biofuels* 2002, 23.-24. April 2002, Sevilla, Spain