

# Neue Wege der Bioethanolgewinnung. Kleine Anlagen – große Effizienz

T. Senn, Universität Hohenheim, Institut für Lebensmitteltechnologie,  
FG Gärungstechnologie mit Forschungs- und Lehrbrennerei

## Einleitung

Die Herstellung von Ethanol zu Beimischungszwecken in großtechnischen Erzeugungsanlagen wird nach wie vor eher kritisch gesehen, da bisherige Studien jeweils nur eine knapp 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 (CO<sub>2</sub>-Äquivalenten) eine Erhöhung der Emissionen von Gasen mit Versauerungspotential (SO<sub>2</sub>-Äquivalenten) entgegensteht (Stelzer). Dies soll anhand einer Energiebilanz der großtechnischen Alkoholproduktion aus Weizen, unter Berücksichtigung des Hohenheimer Dispergier-Maisch-Verfahrens (DMV), mit der erforderlichen Schlempetrocknung aufgezeigt werden:

**Tabelle 1: Energiebilanz der großtechnischen Alkoholproduktion**

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

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 lA 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:

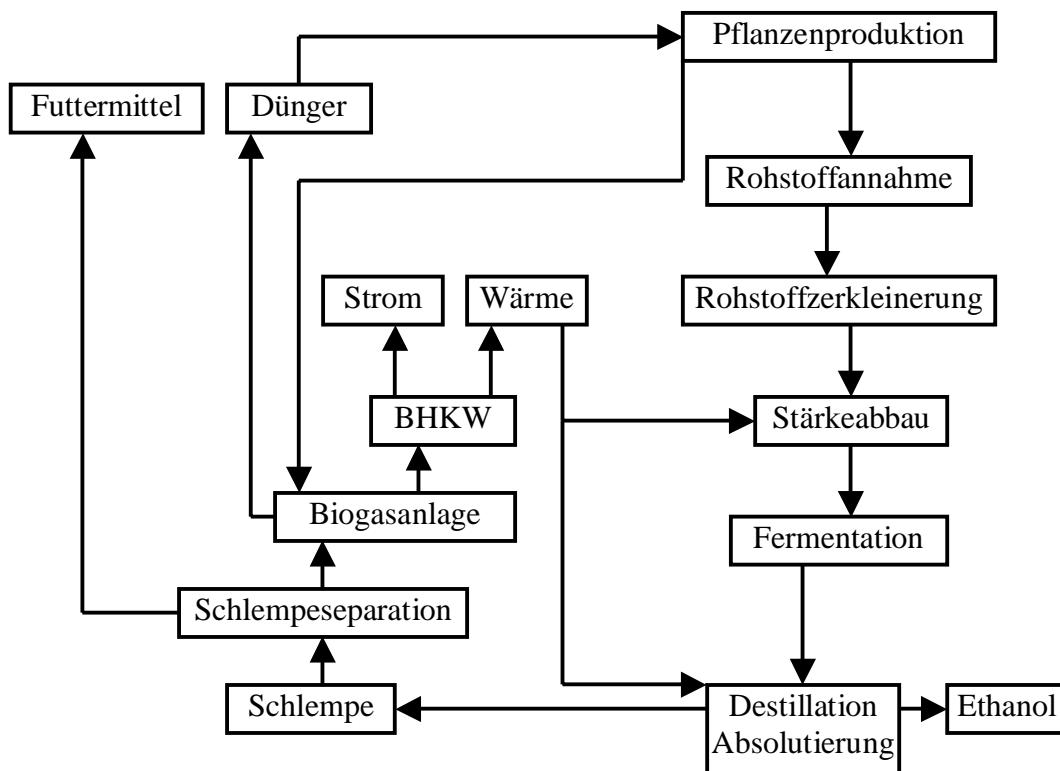


Abbildung 1: Vereinfachtes Schema der Produktion von Bioethanol in der Landwirtschaft

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. Daraus ergibt sich die im Folgenden dargestellte Massenbilanz für die landwirtschaftliche Bioethanolproduktion:

Massenbilanz Bioethanol; Fruchtfolge mit Raps; Biogasgewinnung: Gärmasse 7%TS,  $H_{RT} = 25$  d

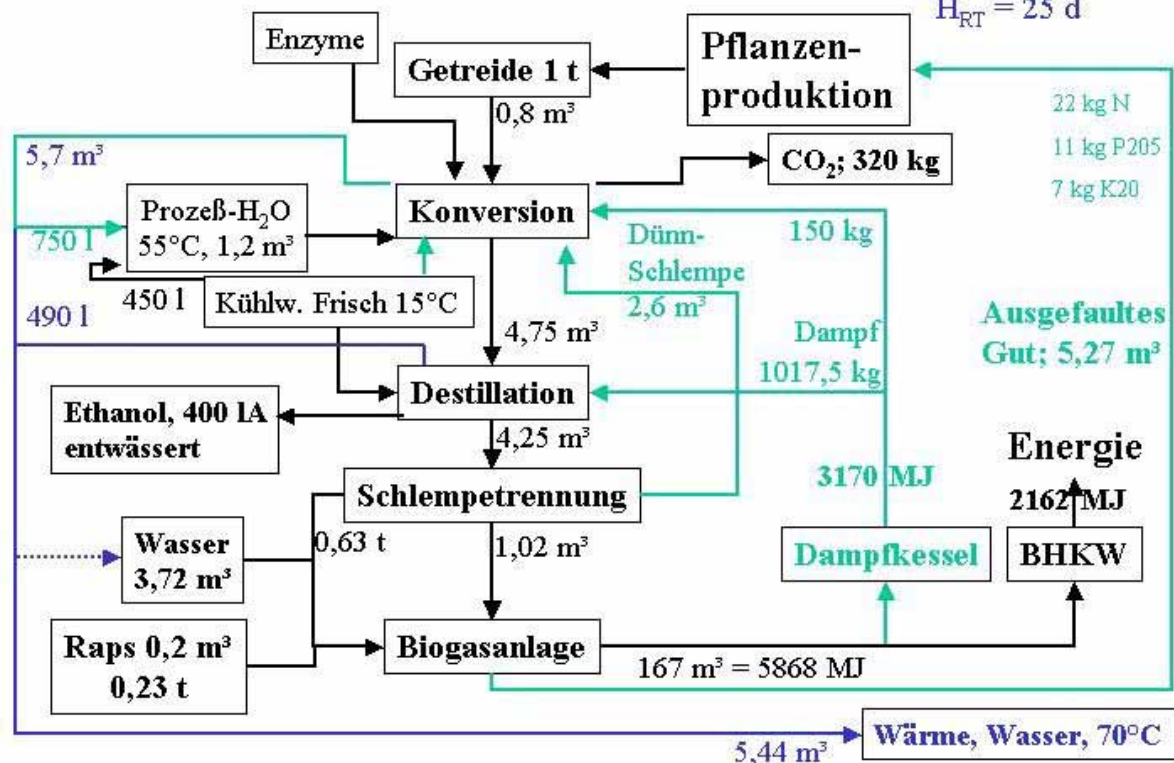


Abbildung 3: Massenbilanz der dezentralen nachhaltigen Ethanolproduktion

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:

**Tabelle 2: Energiebilanz der dezentralen nachhaltigen Ethanolproduktion**

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

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 von 10 Mio lA realisierbar.

Für die wirtschaftliche Betrachtung einer solchen Anlage 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 Ethanols kalkuliert. 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 auch sämtliche Lagerkosten, 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 Ethanolproduktion 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 %
<b>Werte beziehen sich auf 1.000 l A</b>		Verweildauer $H_{RT} = 25$ d		
<b>Summe Kapitalbedarf</b>		<b>1.806</b>	<b>2.072</b>	<b>2.634</b>
Kapitalkosten	€	248	281	342
laufende Kosten	€	389	397	411
Arbeitskosten	€	92	108	147
Betriebsleitung	€	24	36	72
<b>Summe Kosten</b>	€	<b>753</b>	<b>822</b>	<b>972</b>
Subventionen	€	201	201	201
Energieerträge	€	112	112	112
<b>Summe Leistungen</b>	€	<b>313</b>	<b>313</b>	<b>313</b>
<b>Produktionskosten für Alkohol</b>	€	<b>441</b>	<b>510</b>	<b>659</b>
<b>Nicht bewertete nutzbare Wärme</b>	kWh	<b>557</b>	<b>557</b>	<b>557</b>

Bei der größten der kalkulierten Anlagen liegen die Produktionskosten von Ethanol im nachhaltigen System demnach unter 45 Cent/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 Cent gedrückt werden können. Für die Produktion von Silomais im Rahmen einer Fruchtfolge ergeben sich folgende Produktionskosten für Ethanol:

**Tabelle 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 %
<b>Werte beziehen sich auf 1.000 l A</b>		<b>Verweildauer <math>H_{RT} = 25</math> d</b>	
<b>Summe Kapitalbedarf</b>		<b>2.771</b>	<b>2.451</b>
Kapitalkosten	€	390	354
laufende Kosten	€	469	434
Arbeitskosten	€	134	124
Betriebsleitung	€	24	24
<b>Summe Kosten</b>	€	<b>1017</b>	<b>937</b>
Subventionen	€	201	201
Energieerträge	€	299	299
<b>Summe Leistungen</b>	€	<b>500</b>	<b>500</b>
<b>Produktionskosten für Alkohol</b>	€	<b>517</b>	<b>437</b>
<b>Nicht bewertete nutzbare Wärme</b>	kWh	<b>2.881</b>	<b>2.881</b>

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 Cent je lA 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.

Bei all diesen Betrachtungen darf aber auch die ökologische Bilanz einer solchen Vorgehensweise nicht außer acht gelassen werden. So haben bereits STELZER und KALTSCHMITT in ihren Arbeiten gezeigt, dass die ökologisch nicht durchgehend positive 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 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:

**Tabelle 5: Einfluß des Ethanol-Blends E10 auf die Treibhaus-Gas-Emissionen (Wang 2002)**

	<b>Reduzierung der Treibhaus-Gas-Emissionen in % bezogen auf reines Benzin</b>
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 %

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 wäre aus volkswirtschaftlicher Sicht die nachhaltige Ethanolproduktion bereits heute sinnvoll und wirtschaftlich.

## **Ausblick**

Bei dieser Betrachtung darf jedoch nicht übersehen werden, dass die Hauptproblematik der Energienutzung der modernen Gesellschaften in der exzessiven und teilweise auch gedankenlos verschwenderischen Art der Nutzung zu sehen ist.

Man darf auch nicht übersehen, dass auch die energetische Nutzung von Biomasse nicht ohne die Emission von umweltschädlichen Gasen erfolgen kann, wie das oben ja dargestellt ist. Es kommt also bei der Nutzung erneuerbarer Energie auch darauf an, auf der verfügbaren Fläche, und diese stellt den eigentlich begrenzenden Faktor dar, diejenige Energieform zu erzeugen, die einerseits den höchsten Flächenertrag in MJ/ha bereitstellt, andererseits aber auch die größtmögliche Reduzierung umweltrelevanter Emissionen sicherstellt. So gesehen bietet das hier dargestellte nachhaltige und dezentrale Konzept bereits deutliche Vorteile gegenüber der Bioethanolproduktion in Großanlagen.

Die hier dargestellten Ergebnisse zeigen aber auch, dass bei einer ausschließlichen Nutzung erzeugter Biomasse über die Biogasproduktion verglichen mit der Ethanol-Option mehr als die doppelte Energiemenge je ha bereitgestellt werden. Die Ethanolproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen rechtfertigt sich von daher nur durch die Tatsache, dass eben ein



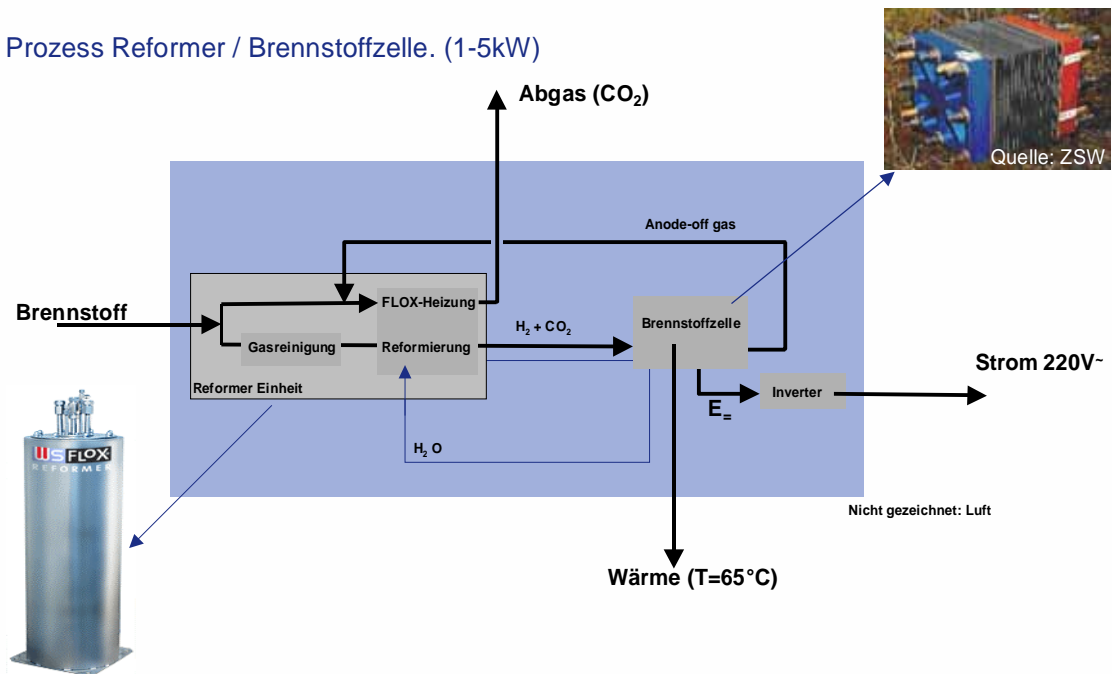
solcher flüssiger Energieträger mit relativ hoher Energiedichte dringend benötigt wird, um im Transportsektor eine Reduzierung der umweltrelevanten Emissionen zu erzielen.

Im Rahmen einer nachhaltigen und dezentralen Ethanolerzeugung ergeben sich in diesem Zusammenhang weitere, die Emissionsbilanzen, vor allem auf der Seite der Energienutzung, verbessernde Möglichkeiten. So kann das erzeugte Ethanol auch als Energieträger für Beheizung von Einfamilienhäusern oder kleineren Wohneinheiten genutzt werden. Hierzu können neue Systeme von Brennstoffzellen zur Wärme und Stromerzeugung aus Wasserstoff genutzt werden, die über einen Reformer, der Ethanol als Energieträger nutzt mit Wasserstoff versorgt wird. Auch auf diese Weise kann effizient fossile Energie, hier Heizöl; durch einen Energieträger aus nachwachsenden Rohstoffen ersetzt werden. Da die Nutzung des Ethanols auf diese Weise praktisch emissionsfrei genutzt werden und diese Zellen entsprechend dem erforderlichen Wärmebedarf geregelt werden können, lässt sich für ein solches System eine weitere Verbesserung der Bilanzen darstellen.

Die Technologie

## Kraft-Wärme-Koppelung im Haushalt.

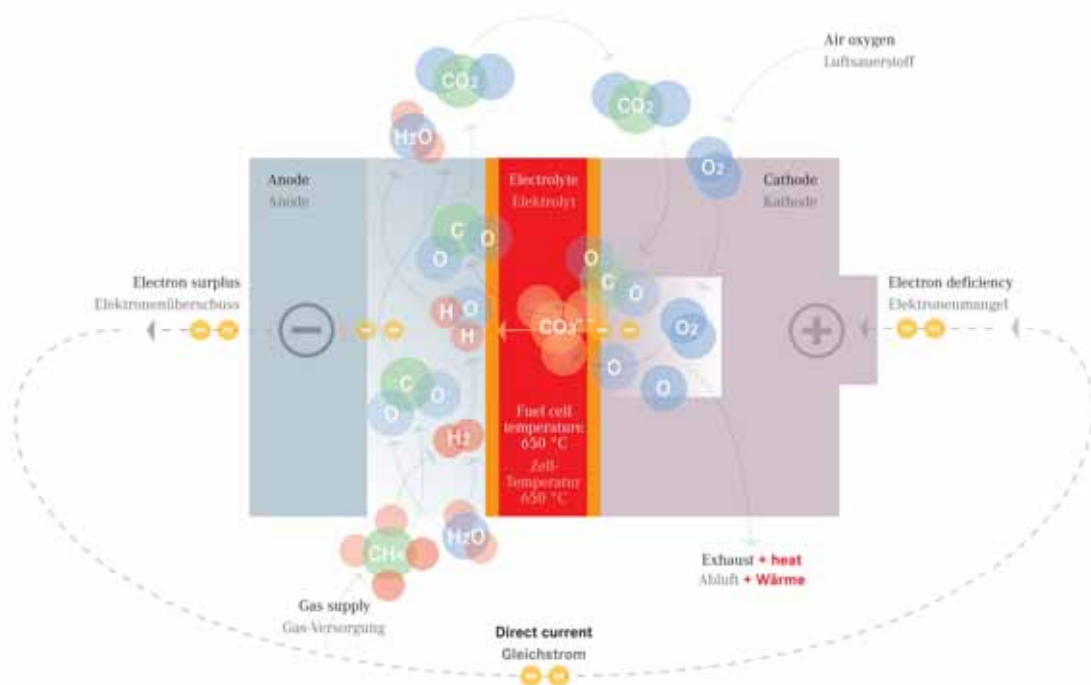
Prozess Reformer / Brennstoffzelle. (1-5kW)



**Abbildung 4: Funktions-Schema von Ethanolreformer und Brennstoffzelle; WS-Reformer, Renningen**

Obige Darstellung zeigt auch auf, dass die Nutzung von Biogas über die Verbrennung ebenfalls nicht ohne schädliche Emissionen abläuft. Auch hier bietet sich in Form des Hot Module ein

Ersatz des mittels Verbrennungsmotor betriebenen BHKW eine wasserstoffbasierte Alternative an. Auf diese Weise fällt auch hier praktisch die gesamte Emission an NO<sub>x</sub> weg, da dieses im Temperaturbereich dieser Brennstoffzellen nicht gebildet wird. Diese Hot Modules zeichnen sich zudem durch einen elektrischen Wirkungsgrad von etwa 50 % aus, wobei diese Aggregate Wärmeenergie auf einen Niveau von 300 °C liefern, wodurch wiederum sämtliche anfallende Wärme in nutzbare Form bereitgestellt wird. Damit wären die Probleme, die bei klassischen BHKW's bestehen elegant zu umgehen.



**Abbildung 5: Funktionsprinzip der Hot Module Brennstoffzelle; MTU München**

Damit ist gezeigt, dass der dezentrale und nachhaltige Ansatz zur Produktion von Bioethanol deutliche volkswirtschaftliche Vorteile aufweist und zudem auch ein deutliches Potenzial zur weiteren Verbesserung der Umweltbilanzen und damit auch zu Senkung der für die Volkswirtschaft entstehenden Kosten hat. Kleine Anlagen – Hohe Effizienz!

## Literatur

- 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.
- ROSENBERGER, A. (2001): Optimierung und Bewertung der Produktion von Getreidekorngut als Rohstoff für die Bioethanolerzeugung: Dissertation, Universität Hohenheim
- SENN, T., PIEPER, H.J. (2001): Ethanol – Classical Methods. In: Roehr, M., Editor; *The Biotechnology of Ethanol*, Wiley-VCH, Weinheim.
- STELZER, T. (1999): Biokraftstoffe im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen – Lebensweganalysen von Umweltwirkungen. Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Forschungsbericht, Band 57.
- 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.

## Kontakt

Thomas Senn, Universität Hohenheim, Institut für Lebensmitteltechnologie,  
FG Gärungstechnologie mit Forschungs- und Lehrbrennerei, Garbenstraße 25, 70593 Stuttgart

