

## Biotreibstoffe

Grundlagen für die Beurteilung aus Schweizer Sicht



Andreas Kampa und Ulrich Wolfensberger



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Volkswirtschafts-  
departement EVD  
**Forschungsanstalt**  
**Agroscope Reckenholz-Tänikon ART**

### **Impressum**

ISSN	1661-7584 ART-Schriftenreihe
ISBN	978-3-905733-06-8
Herausgeberin	Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART Tänikon, CH-8356 Ettenhausen Telefon +41 (0)52 368 31 31, Fax +41 (0)52 365 11 90 info@art.admin.ch, www.art.admin.ch
Grafik	Regina Häusler/Ursus Kaufmann, ART
Titelbild	Raps, Rohstoff für einen Biotreibstoff   Biotreibstoff für den Traktor ART   Robert Meier, ART
Preis	CHF 30.00   € 20.00; inkl. MWSt
Copyright	2007 ART

# Inhalt

Vorwort	III
<b>Zusammenfassung</b>	<b>V</b>
<b>Résumé</b>	<b>VII</b>
<b>Summary</b>	<b>IX</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Übersicht Biotreibstoffe</b>	<b>2</b>
2.1 Flüssige Biotreibstoffe	4
2.2 Gasförmige Biotreibstoffe	5
<b>3. Gegenwärtige Biotreibstoffversorgung</b>	<b>6</b>
3.1 Gegenwärtige Biotreibstoffversorgung in den EU-Mitgliedsstaaten	7
3.2 Gegenwärtige Biotreibstoffversorgung der Schweiz	7
<b>4. Rapsöl und Rapsölmethylester (RME) als Treibstoff</b>	<b>11</b>
4.1 Rohstoffe	11
4.2 Herstellung von Rapsöl und Rapsölmethylester (RME)	12
4.2.1 Verfahrensschritte in dezentralen Ölgewinnungsanlagen	12
4.2.2 Verfahrensschritte in zentralen Ölgewinnungsanlagen	14
4.2.3 Umesterung zu Rapsölmethylester	16
4.3 Eigenschaften	19
4.3.1 Rapsöl	19
4.3.2 Rapsölmethylester (RME)	23
4.4 Nutzung als Treibstoff	25
4.4.1 Rapsöl	25
4.4.2 Rapsölmethylester (RME)	27
4.5 Entstehende Nebenprodukte und deren Verwendung	28
<b>5. Bioethanol als Treibstoff</b>	<b>30</b>
5.1 Rohstoffe	30
5.1.1 Zuckerhaltige Rohstoffe	30
5.1.2 Stärkehaltige Rohstoffe	31
5.1.3 Lignocellulosehaltige Rohstoffe	32
5.2 Herstellung von Bioethanol	34
5.2.1 Rohstoffaufbereitung	35
5.2.2 Fermentation	37
5.2.3 Destillation und Rektifikation	38
5.2.4 Entwässerung	38
5.3 Eigenschaften und Nutzung als Treibstoff	39
5.3.1 Nutzung als Treibstoff in Ottomotoren	40
5.3.2 Nutzung als Treibstoff in Dieselmotoren	41
5.4 Entstehende Nebenprodukte und deren Verwendung	42

<b>6. Biogas als Treibstoff</b>	<b>43</b>
6.1 Substrate	43
6.2 Herstellung von Biogas	44
6.2.1 Vergärung	45
6.2.2 Vergärungsverfahren	45
6.2.3 Biogasaufbereitung	47
6.3 Eigenschaften	50
6.4 Nutzung als Treibstoff	50
6.5 Nutzung der Nebenprodukte	52
<b>7. BtL-Treibstoffe (Biomass-to-Liquid)</b>	<b>53</b>
7.1 Rohstoffe	53
7.2 Herstellung von BtL-Treibstoffen	53
7.2.1 Herstellung von Synthesegas aus Biomasse	54
7.2.2 Herstellung von BtL-Treibstoffen aus Synthesegas mittels Fischer-Tropsch-Synthese	54
7.3 Nutzung als Treibstoff	55
<b>8. Versuche mit einem Diesel-Bioethanol-Gemisch</b>	<b>56</b>
8.1 Treibstoff	56
8.2 Versuchsdurchführung	57
8.3 Ergebnisse	57
8.4 Interpretation	59
<b>9. Schlussfolgerungen</b>	<b>61</b>
9.1 Rohstoffe	61
9.2 Herstellung	61
9.3 Weiterer Studienbedarf	63
Literatur	64

## Vorwort

Das gegenwärtig wieder stark zunehmende Interesse an erneuerbaren Energien, und besonders an Biotreibstoffen, dürfte heute, im Gegensatz zur relativ kurzzeitigen Euphorie vor fünfzehn Jahren ernsthafter und ausdauernder sein. Was spricht für diese These?

- Zunehmend auftretende Naturkatastrophen sind offensichtlich auf globale Temperaturverschiebungen und atmosphärische Veränderungen zurückzuführen. Die Ursache dafür soll nicht zuletzt bei den steigenden CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Nutzung fossiler Energien liegen. Die Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstosses ist eine wichtige Herausforderung für Politik, Wirtschaft und Gesellschaft
- Das weltweite Fördermaximum von Erdöl (Peak Oil) soll in wenigen Jahrzehnten überschritten sein. Durch aufstrebende Wirtschaftsnationen wie China und Indien nimmt der weltweite Energieverbrauch rasch zu. Die Vorräte sind endlich.
- Die gegenwärtige Preissteigerung fossiler Energieträger scheint keine kurzfristige Marktbewegung zu sein, sondern eine mittel- bis langfristige Reaktion auf die zunehmende Verknappung.

Das CO<sub>2</sub>-Gesetz der Schweiz verlangt von 1990 bis 2010 eine Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstosses von 10 %. 40,66 Mio. Tonnen freigesetztes CO<sub>2</sub> basiert in der Schweiz auf der energetischen Nutzung fossiler Energieträger. Davon verursacht die individuelle Mobilität 16,88 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>. Der Treibstoffanteil am gesamten Endenergieverbrauch beträgt 32,3 %.

Lösungsansätze liegen in der Verbesserung der Energieeffizienz und in der Energiesubstitution. Bei der Substitution hat die Biomasseenergie eine besondere Rolle. Neben der Holznutzung im Wärmebereich wird im Verkehrsbereich ein grosses Potenzial für die Energiesubstitution geortet. Dieses Ziel verfolgt unter anderem die am 17.05.2003 in Kraft getretene EU-Richtlinie «zur Förderung der Verwendung von Biotreibstoffen oder anderen erneuerbaren Treibstoffen im Verkehrssektor». Danach soll der Marktanteil von Biotreibstoffen in allen EU-Mitgliedsländern im Jahr 2005 auf 2 % und im Jahr 2010 auf 5,75 % ansteigen. Fachleute rechnen damit, dass mit neuen Biotreibstoffen der sogenannten «zweiten Generation» um die 30 % der fossilen Treibstoffe substituiert werden könnten.

Die Kenntnisse der Eigenschaften der Biotreibstoffe, sowie deren Vor- und Nachteile, waren bisher eher partiell. In der ganzen Kette vom Rohstoff bis zur Anwendung gibt es vor allem bei den chemisch-technischen Verfahren zur Treibstoffherstellung offene Fragen. Von ihrer Beantwortung hängt unter anderem ab, ob eine kleingewerblich dezentrale Produktion möglich oder eher eine industrielle Grossproduktion sinnvoll ist. Dies ist wiederum für die Landwirtschaft als Biomasselieferant von Bedeutung, ergeben sich daraus doch Hinweise zur realistischen Abschätzung von Biomasseenergie als Einkommensalternative.

Die vorliegende Studienarbeit von Andreas Kampa schliesst hier wichtige Lücken. Im Rahmen seines Verfahrenstechnik-Studiums an der Fachhochschule Wismar (D) hat er an der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART in Tänikon Informationen von aktuellen und zukünftig möglichen Biotreibstoffen übersichtlich und verständlich zusammengestellt. Der Schwerpunkt liegt bei der Verfahrenstechnik zur Herstellung von unterschiedlichen Biotreibstoffen. Die Arbeit liefert wichtige Grundlagen für die umfassende ökonomische und ökologische Beurteilung der verschiedenen Biotreibstoffe mit Einbezug der chemisch-technischen Herstellungsschritte. Sie muss als ein bedeutendes Element einer vergleichenden Beurteilung der verschiedenen Biotreibstoffe verstanden werden.

April 2007

Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART



Robert Kaufmann, Leiter Agrartechnik



## Zusammenfassung

### Biotreibstoffe Grundlagen für die Beurteilung aus Schweizer Sicht

Der weltweit steigende Verbrauch fossiler Energieträger und die damit einhergehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen haben in letzter Zeit eine zunehmend negative Wirkung auf Umwelt- und Klima. Wesentlich zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen trägt der Transportsektor bei, denn rund ein Drittel des Energiebedarfs entfällt auf den Verkehr. Neben der Holznutzung im Wärmebereich wird deshalb im Verkehrsbereich ein grosses Potenzial für die Energiesubstitution durch Biotreibstoffe geortet.

In dieser Schriftenreihe werden verschiedene Informationen und Daten der aktuellen und zukünftigen Herstellung von Biotreibstoffen zusammengeführt. Der Fokus liegt bei den chemisch-technischen Verfahren zu ihrer Herstellung. Rohstoff, Herstellung, Eigenschaften und die Nutzung folgender Biotreibstoffe werden dargestellt:

- Rapsöl
- Rapsölmethylester (RME)
- Bioethanol aus zucker-, stärke- und lignocellulosehaltigen Rohstoffen
- Biogas
- Biomass-to-Liquid (BtL)

In der ganzen Kette vom Rohstoff bis zur Anwendung sind die chemisch-technischen Verfahren zur Biotreibstoff-Herstellung im Agrarsektor und bei den politischen Entscheidungsträgern relativ wenig bekannt. Gerade diese Verfahren entscheiden jedoch die wichtige Frage, ob eine kleingewerbliche, dezentrale Produktion möglich oder eher eine industrielle Grossproduktion sinnvoll ist.

Die vorliegende Arbeit schält die grossen Unterschiede beim technischen Aufwand in der Herstellung der verschiedenen Biotreibstoffe heraus und analysiert den heutigen Stand der technischen Möglichkeiten:

- Die Produktion von Rapsöltreibstoff besteht zwar aus wenigen relativ einfachen Verarbeitungsschritten, die Anforderungen an den Rapsöltreibstoff sind jedoch hoch und müssen von konstanter und ständig überprüfter Qualität sein. Die Produktionskapazität der marktreifen Anlagen beträgt zwischen 0,5 und 25 Tonnen Ölsaaten pro Tag. Solche Produktionsanlagen eignen sich für dezentrale, betriebliche oder gewerbliche Produktion.
- Die Herstellung von Rapsölmethylester (RME) aus gepresstem Rapsöl geschieht in einer relativ unkomplizierten Umesterungsanlage, die aber einige anspruchsvolle verfahrenstechnische Komponenten beinhaltet. Umesterungsanlagen eignen sich in der Regel nicht für betriebliche oder gewerbliche Produktion. Es sind heute Grossanlagen mit einer Jahreskapazität von mehr als 100 000 t RME in Planung.
- Bei der Bioethanolherstellung ist die Glucoseherstellung aus zuckerhaltigen und stärkehaltigen Rohstoffen bekannt, dagegen kann der Aufschluss der Celluloseketten bei lignocellulosehaltigen Rohstoffen bisher erst labor- bzw. pilotmässig durchgeführt werden. Die Vergärung der Glucose, die anschliessende mehrstufige Destillation und die Rektifikation zu 97 %igem Alkohol ist bekannt. In einem Entwässerungsschritt muss er noch zu 99,9 %igem Alkohol aufkonzentriert werden. Bioethanol eignet sich nicht für die Produktion in dezentralen gewerblichen Anlagen.
- Die Biogasproduktion findet häufig auf landwirtschaftlichen Betrieben oder (klein-) gewerblich statt. Allerdings nimmt auch hier tendenziell die Kapazität neuer Anlagen zu. Die Nutzung von Biogas als Fahrzeugtreibstoff oder zur Einspeisung ins Gasnetz



bedingt eine weitergehende Aufbereitung. Es ist eine Methan-Aufkonzentrierung (> 96 %) durch Kohlendioxidabtrennung erforderlich. Derartige Gasaufbereitung wird vornehmlich in zentralen, grösseren Anlagen durchgeführt.

- Die Herstellung von BtL-Treibstoffen erfolgt in drei Verfahrensschritten: Biomassevergasung zu Synthesegasen, Erzeugung von Kohlenwasserstoffen aus den Synthesegasen mittels Fischer-Tropsch-Verfahren sowie Produktaufbereitung aus den Kohlenwasserstoffen zum gewünschten Treibstoff (Diesel oder Benzin). Der erste Schritt kann erst labor- bzw. pilotmässig durchgeführt werden. Eine Produktion wird dereinst nur in industriellen Grossanlagen in Frage kommen.

Aus der Schriftenreihe geht auch hervor, dass das Angebot an geeigneten Rohstoffen in der Schweiz aus klimatischen und topografischen Gründen beschränkt ist und es wird das Anbaupotenzial geschätzt:

- Für Pflanzenöltreibstoff und Pflanzenölmethylester eignet sich hauptsächlich Raps. 2003 wurden rund 1,3 Mio. Liter erzeugt. Das Flächenpotenzial für Treibstoffraps wird auf 25 000 Hektaren geschätzt, was etwa 30 Mio. Liter Rapsöltreibstoff ergeben würde.
- Für Bioethanol könnte die Anbaufläche von Zuckerrüben verdoppelt werden, das heisst man könnte zusätzlich zur aktuellen Zuckerproduktion noch rund 135 Mio. Liter Bioethanol gewinnen. Von den stärkehaltigen Rohstoffen eignen sich Mais, Kartoffeln und Getreide. Aus Kartoffeln können zirka 3300 l/ha und aus Mais knapp 3600 l/ha erzeugt werden. Das Rohstoffpotenzial von Lignozellulose für Ethanol ist sowohl flächen- als auch ertragsmässig um ein Mehrfaches grösser, allerdings ist die Herstellungsmethode heute noch nicht ausgereift.
- Für die Biogasproduktion stehen im Wesentlichen alle biogenen Reststoffe aus der Landwirtschaft, der Nahrungsmittelverarbeitung, aus Haushalten und Gewerbe sowie auch Nachwachsende Rohstoffe als Substrate zur Verfügung. Es kann mit einem sehr grossen, noch weitgehend unerschlossenen Potenzial gerechnet werden.
- Die Herstellung von BtL-Treibstoffen konzentriert sich auf die Verwendung von Holz und Stroh als Rohstoff. Wenn dereinst der Einsatz jeglicher Art von Biomasse möglich ist, wird hier das grösste Potenzial für Biotreibstoffe vorhanden sein.

## Résumé

### Biocarburants

#### Données de base pour l'évaluation en Suisse

Ces derniers temps, les effets négatifs sur l'environnement et le climat se multiplient suite à la croissance de la consommation mondiale d'agents énergétiques fossiles et aux émissions de CO<sub>2</sub> qui en résultent. Une partie considérable des émissions de CO<sub>2</sub> sont causées par le secteur des transports, le trafic routier absorbant environ un tiers de l'énergie totale. Par conséquent, beaucoup peut être fait pour remplacer les énergies fossiles non seulement dans la production thermique avec l'utilisation du bois, mais également dans le trafic routier avec l'utilisation de biocarburants.

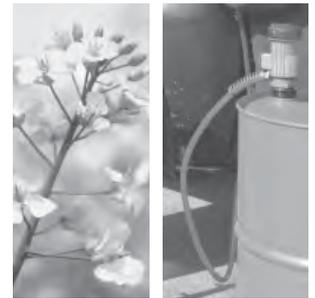
La présente publication réunit diverses informations et données relatives aux biocarburants actuels et futurs tout en mettant l'accent sur les procédés techniques chimiques utilisés pour la production de carburants. Les matières premières, les caractéristiques, les aspects liés à la production et à l'utilisation sont présentés pour les carburants suivants:

- Huile de colza
- Ester méthylique de colza (EMC)
- Bioéthanol produit à partir de matières premières contenant du sucre, de l'amidon et de la lignocellulose
- Biogaz
- Biomass-to-Liquid (BtL)

Les procédés techniques chimiques utilisés dans la chaîne de production (des matières premières jusqu'à l'utilisation finale) sont relativement peu connus des responsables politiques et des milieux agricoles bien que les procédés de production appliqués soient déterminants pour choisir entre une production décentralisée caractérisée par de petites structures et une production industrielle de grande taille.

La présente étude montre les importantes différences techniques des procédés utilisés pour la production des biocarburants et analyse les possibilités techniques actuelles:

- Les procédés techniques nécessaires à la production de carburants à base d'huile de colza sont peu nombreux et relativement simples, mais les critères de qualité à respecter par les carburants à base d'huile de colza sont élevés. La qualité du carburant doit être constante et est soumise à des contrôles réguliers. Les installations de production actuellement utilisées ont une capacité de 0,5 à 25 tonnes par jour et conviennent à la production décentralisée, agricole ou artisanale.
- L'ester méthylique de colza (EMC) à partir d'huile de colza pressée est produit dans des installations de transestérification relativement peu complexes, qui contiennent par contre un nombre de composants sophistiqués. Les installations de transestérification ne conviennent en général pas à la production agricole ou artisanale. A l'heure actuelle, des installations de grande taille avec une capacité supérieure à 100 000 t d'EMC par an sont à l'étude.
- Pour la fabrication de bioéthanol, on produit du glucose à partir de matières premières contenant du sucre ou de l'amidon. Jusqu'à présent, la séparation des chaînes de cellulose dans les matières premières contenant de la lignocellulose n'a par contre été effectuée qu'en laboratoire ou dans des installations-pilotes. Les procédés de fermentation du glucose, la distillation ultérieure en différentes étapes, ainsi que la rectification pour obtenir de l'alcool à 97% sont connus. L'alcool est ensuite déshydraté et concentré pour obtenir de l'alcool à 99,9 %. Le bioéthanol ne convient pas pour la production artisanale décentralisée.



- La production de biogaz s'effectue souvent dans des exploitations agricoles ou dans de (petites) entreprises artisanales. Là aussi, la capacité des nouvelles installations a tendance à augmenter. L'utilisation du biogaz comme carburant pour les véhicules ou pour l'alimentation du réseau de gaz demande une transformation spéciale; la teneur en méthane doit être augmentée par concentration (> 96 %) à l'aide de la séparation du dioxyde de carbone. La transformation du gaz est en général effectuée dans des installations centralisées de grande taille.
- La production de carburants BtL s'effectue en trois procédés techniques: gazéification de la biomasse pour obtenir des gaz de synthèse, production d'hydrocarbures à partir des gaz de synthèse au moyen du procédé Fischer-Tropsch et fabrication du carburant souhaité (diesel ou essence) à partir des hydrocarbures. Le premier procédé ne peut actuellement être effectué qu'en laboratoire ou dans des installations-pilotes. La production sera désormais uniquement possible dans des installations industrielles de grande taille.

La présente publication montre qu'en Suisse, l'offre de matières premières appropriées est limitée pour des raisons climatiques et topographiques. On estime le potentiel de culture de la façon suivante:

- Le colza est la culture la mieux adaptée pour produire du carburant à base d'huile végétale ou de l'ester méthylique de colza. En 2003, environ 1,3 millions de litres ont été produits. La surface de culture potentielle est estimée à 25 000 hectares ce qui permettrait de produire env. 30 millions de litres de carburant à base d'huile de colza.
- Pour la production de bioéthanol, on pourrait doubler la surface de culture des betteraves sucrières, c'est-à-dire produire env. 135 millions de litres de bioéthanol en plus de la production de sucre actuelle. Le maïs, les pommes de terre et les céréales sont les cultures les mieux adaptées parmi celles qui contiennent de l'amidon. Les pommes de terre permettent de produire env. 3300 l/ha et le maïs presque 3600 l/ha. Le potentiel de la lignocellulose pour produire de l'éthanol est beaucoup plus élevé en termes de surface ainsi qu'en termes de rendement. La méthode de production n'est par contre pas encore optimale.
- La production de biogaz se base notamment sur des résidus biogènes provenant de l'agriculture, de la transformation de denrées alimentaires, des ménages et des entreprises artisanales. En outre, on utilise des matières premières renouvelables sous forme de substrats. Il existe un très grand potentiel qui est encore peu exploité aujourd'hui.
- Les carburants BtL sont essentiellement produits à partir de bois et de paille. Si l'utilisation de tout type de biomasse était désormais possible, les carburants BtL seraient ceux dont le potentiel serait le plus élevé parmi les biocarburants.

## Summary

### Biofuels Foundations for Assessment from a Swiss Viewpoint



The increasing use worldwide of fossil fuels and the associated CO<sub>2</sub> emissions have lately led to a rise in negative environmental and climate impacts. The transport sector contributes substantially to CO<sub>2</sub> emissions, with traffic being responsible for about one-third of all energy consumption. For this reason, a major potential for energy substitution has been pinpointed not only in the heating sector, where wood is used as a fuel, but also in the traffic sector with the use of biofuels.

This publication series brings together various facts and data on current and future biofuel production, focusing on the chemical-engineering processes of fuel production. The raw materials, production processes, properties and uses of the following fuels are described:

- Rapeseed oil
- Rapeseed-oil methyl ester (RME)
- Bioethanol from raw materials containing sugar, starch and lignocellulose
- Biogas
- Biomass-to-liquid (BtL)

Over the entire chain from raw material to finished product, the chemical-engineering processes for biofuel manufacture are relatively little known in the agricultural sector and by the policy decision-makers, although they are critical in deciding the important question of whether small-scale, decentralised production is possible, or whether large-scale industrial production makes more sense.

This paper draws out the major technical differences between the processes used to produce the various biofuels and analyses the current status of technical options:

- Although the production of rapeseed-oil fuel involves just a few relatively simple processing steps, the demands made of this fuel are high – it must be of consistent, constantly monitored quality. The production capacity of the market-ready facilities stands at between 0.5 and 25 tonnes per day. Such production facilities are suitable for decentralised manufacture on farms or in non-industrial facilities.
- The manufacture of rapeseed-oil methyl ester (RME) from pressed rapeseed oil takes place in a relatively straightforward transesterification plant, which nevertheless contains several sophisticated process-engineering components. In general, transesterification plants are not suitable for production on farms or in non-industrial facilities. At present, large facilities with an annual capacity of over 100,000 tonnes RME are in planning.
- With bioethanol manufacture, glucose production from raw materials containing sugar and starch is known; by contrast, to date it has only been possible to break down the cellulose chains of raw materials containing lignocellulose in the laboratory or in pilot plants. The fermentation of glucose, the subsequent multi-step distillation and rectification to 97% alcohol is known. In a dehydration step, it must also be concentrated to 99.9% alcohol. Bioethanol is not suitable for production in decentralised non-industrial facilities.
- Biogas production often takes place on farms or in (small) non-industrial plants. Here too, however, the capacity of new facilities is on an upward trend. The use of biogas as a vehicle fuel or for input in the gas-distribution system requires further processing.

Methane concentration (> 96%) via carbon dioxide separation is necessary. This sort of gas processing is primarily carried out in fairly large, central facilities.

- BtL fuels are manufactured in three process steps: biomass gasification into synthesis gases (syngases), generation of hydrocarbons from the syngases by means of the Fischer-Tropsch process, and product preparation from the hydrocarbons into the desired fuel (diesel or petrol). At present, the first step can only be carried out in a laboratory or pilot plant. Production will be possible at some stage in large industrial facilities only.

From the publication series, it also emerges that, for climatic and topographical reasons, the supply of suitable raw materials in Switzerland is limited. The potential for growing them is assessed as follows:

- It is chiefly rapeseed which is suitable for vegetable-oil fuel and vegetable-oil methyl ester. Around 1.3 million litres were produced in 2003. The potential land area for growing fuel rapeseed is estimated at 25,000 hectares, which would yield about 30 million litres rapeseed-oil fuel.
- For bioethanol, the sugar-beet crop-growing area could be doubled, i.e. 135 million litres or so of bioethanol could be extracted in addition to the current sugar production. Maize, potatoes and cereal crops are suitable starchy raw materials. Approx. 3300 litres/ha can be produced from potatoes, and just under 3600 litres/ha from maize. The raw-material potential of lignocellulose for ethanol is several times greater both in terms of area and yield, although the production method is still in its early stages.
- For biogas production, all biogenic waste materials from agriculture, food processing, households and non-industrial companies, as well as renewable raw materials, are essentially available as substrates. A very big, as yet largely undeveloped potential may be reckoned with.
- The manufacture of BtL fuels focuses on the use of wood and straw as raw materials. If one day the use of any sort of biomass is possible, it is here that we will find the greatest potential for biofuels.

# 1. Einleitung

Aufgrund des weltweit steigenden Verbrauchs fossiler Energieträger und der damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen sind in letzter Zeit zunehmend negative Umwelt und Klimawirkungen hervorgerufen worden. Wesentlich zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen trägt der Transportsektor bei. Der relative Anteil von Treibstoffen am gesamten Erdölverbrauch hat in den letzten dreissig Jahren weltweit von 42 % auf 58 % zugenommen (IEA 2006), ist also der grösste und wichtigste ölabhängige Sektor, und wird auch weiterhin wachsen.

Derzeit werden in der Schweiz jährlich zirka 5,5 t CO<sub>2</sub> pro Kopf freigesetzt. Dabei entfallen etwa 2,3 t CO<sub>2</sub> auf die individuelle Mobilität. Im Jahr 2005 machten die Treibstoffe 32,3 % des gesamten Endenergieverbrauchs der Schweiz aus. Der Verbrauch von Benzin lag bei 3 595 000 Tonnen, der von Diesel bei 1 712 000 Tonnen und von Flugtreibstoffen bei 1 186 000 Tonnen.

Im Verkehrsbereich bietet die vermehrte Umstellung auf Biotreibstoffe eine Massnahme zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen und eröffnet eine zukunftsweisende Alternative zur Sicherung einer nachhaltigen Mobilität. Mittlerweile sind Länder aus allen Regionen der Welt an der zunehmenden Nutzung von Biotreibstoffen als Ersatz für fossile Treibstoffe interessiert. Unterstützt wird dieses Interesse massgebend durch steigende Erdölpreise. Die Hauptargumente für einen vermehrten Einsatz von Biotreibstoffen sind:

- Reduktion von Treibhausgasemissionen;
- Schonung von nichterneuerbaren Ressourcen;
- Erhöhung der Energieversorgungssicherheit
- Minderung der Rohölabhängigkeit;
- Diversifizierung der Energiematrix;
- Unterstützung des Agrarsektors und Förderung des ländlichen Raums;
- Sinnvolle Verwertung landwirtschaftlicher Überproduktion.

Die Landwirtschaft ist sowohl als potenzieller Biomasselieferant als auch als Treibstoffkonsument an der Entwicklung von Biotreibstoffen stark interessiert, denn die Biotreibstoffe stellen kurz- bis mittelfristig eine Alternative zu fossilen Treibstoffen dar und die Landwirtschaft sieht hier eine Einkommensalternative. Biotreibstoffe werden jedoch fossile Treibstoffe nicht ersetzen können, weil die dem Anbau von nachwachsenden Rohstoffen dienenden Flächen begrenzt sind.

Es gibt viele verschiedene Arten von Biotreibstoffen mit sehr unterschiedlichem Entwicklungsstand. Gelegentlich sind Aussagen über Qualität, Anwendbarkeit und Wirkung des Treibstoffs weder belegt noch nachvollziehbar, teilweise sind diskutierte Treibstoffe erst in Entwicklung. Entsprechend gross ist die Unsicherheit bei Interessenten in der Landwirtschaft, welche «Schiene» erfolgversprechend ist, in welcher Richtung nach Einkommensalternativen gesucht werden soll. Für umfassende Beurteilungen sind viele agronomische und wirtschaftliche Kenntnisse vorhanden, häufig sind aber die Anforderungen und Besonderheiten der Verfahrenstechnik zur Produktion der Biotreibstoffe ungenügend bekannt.

## 2. Übersicht Biotreibstoffe

«Biotreibstoffe» sind flüssige oder gasförmige Treibstoffe, die aus Biomasse hergestellt werden, wobei «Biomasse» als der biologisch abbaubare Anteil von Erzeugnissen, Abfällen und Rückständen der Landwirtschaft (einschliesslich pflanzlicher und tierischer Stoffe), der Forstwirtschaft und damit verbundener Wirtschaftszweige sowie Abfälle aus Gewerbe und Haushalten definiert ist (Definition lt. Biotreibstoffrichtlinie 2003/30/EG).

Mittlerweile gibt es eine grosse Anzahl von unterschiedlichen Biotreibstoffen, die aus einer Vielzahl von pflanzlichen Rohstoffen gewonnen werden können (Tab. 1). Zu den heute sich im Einsatz befindlichen Biotreibstoffen zählt man Pflanzenöl, Pflanzenölmethylester, Bioethanol, ETBE (Ethyl-Tertiär-Butylether) und Biogas. Daneben gibt es die Gruppe der heute noch nicht grosstechnisch hergestellten Biotreibstoffe. Hierzu zählen Biomethanol, MTBE (Methyl-Tertiär-Butylether), Dimethylether (DME), BtL-Treibstoffe (Biomass-to-Liquid), Pyrolyseöl-Diesel sowie HTU-Diesel (Hydro Thermal Upgrading). Die prinzipiellen Herstellungsprozesse dieser Biotreibstoffe sind in Abbildung 1 dargestellt. Abgesehen von Biogas sind alle Biotreibstoffe flüssig und somit leicht zu speichern. Einige Biotreibstoffe werden bereits über das bestehende Tankstellennetz verteilt. Dabei können Biotreibstoffe in folgenden Formen bereitgestellt werden:

- Als reine Biotreibstoffe oder in hoher Konzentration in Mineralölderivaten;
- Mineralölderivate mit beigemischten Biotreibstoffen (gem. EN228 und EN590);
- Als Flüssigkeiten, die Derivate von Biotreibstoffen sind (zum Beispiel ETBE);

Welche Biotreibstoffe Verwendung finden und in welchem Ausmass sie eingesetzt werden, ist länderspezifisch. Im Verkehrsbereich stellen einige Biotreibstoffe aus heutiger Sicht die einzige technisch ausgereifte und kurz bis mittelfristig umsetzbare Option zur Ablösung fossiler Energieträger dar.

**Tab. 1. Rohstoffe für Biotreibstoffe in Mitteleuropa.**

Rohstoffe	Rapsöl	Rapsöl-methyl-ester	Bio-ethanol	Biogas	Biomass-to-Liquid	DME
Raps	x	x		x	x	x
Getreide			x	x	x	x
Stroh			x		x	x
Mais			x	x	x	x
Kartoffeln			x	x	x	x
Zuckerrüben			x	x	x	x
Waldholz			x		x	x
Sonst. Biomasse				x	x	x

Quelle: Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR)

In Tabelle 2 werden die wichtigsten Kenngrössen von Biotreibstoffen mit den entsprechenden fossilen Treibstoffen verglichen.

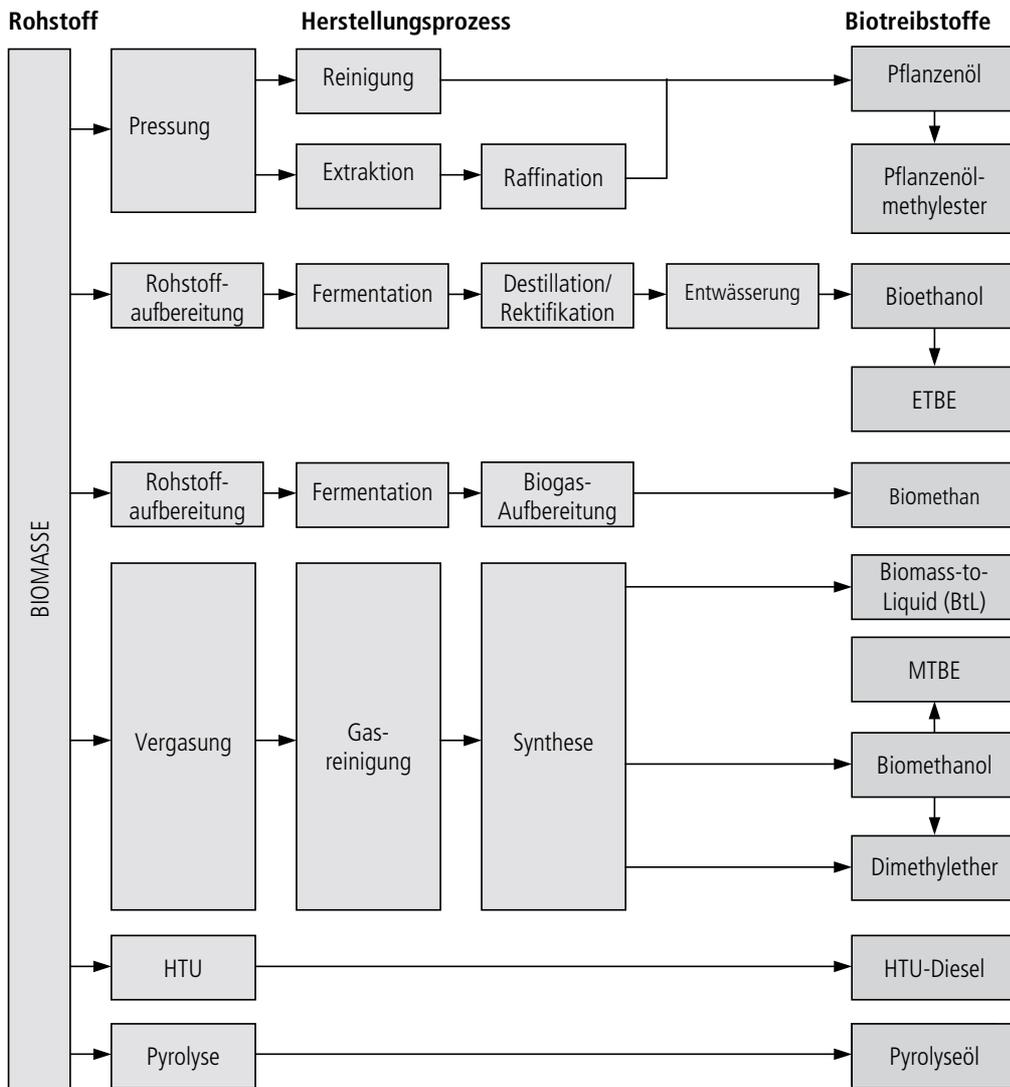


Abb. 1: Biotreibstoffpfade.

Tab. 2. Kraftstoffvergleich verschiedener Biotreibstoffe.

	Dichte bei 15°C [kg/l]	Heizwert [MJ/kg]	Heizwert [MJ/l]	Viskosität bei 20°C [mm <sup>2</sup> /s]	Cetanzahl	Oktanzahl (ROZ)	Flammpunkt [°C]	Kraftstoff-äquivalent [l]
Diesekraftstoff	0,84	42,7	35,87	5,0	50	–	80	1
Rapsöl	0,92	37,6	34,59	74,0	40	–	317	0,96
Rapsölmethylester	0,88	37,1	32,65	7,5	56	–	120	0,91
BtL <sup>1</sup>	0,76	43,9	33,45	4,0	>70	–	88	0,93
Benzin	0,76	42,7	32,45	0,6	–	92	< 21	1
Bioethanol	0,79	26,8	21,17	1,5	–	> 100	< 21	0,65
ETBE	0,74	36,4	26,93	1,5	–	102	< 22	0,83
Biomethanol	0,79	19,7	15,56	–	–	> 110	–	0,48
MTBE	0,74	35,0	25,90	0,7	–	102	–28	0,80
DME	0,67 <sup>2</sup>	28,4	19,03	–	60	–	–	0,59
Biomethan	0,72 <sup>3</sup>	50,0	36,00 <sup>4</sup>	–	–	130	–	1,4 <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Werte auf Grundlage von FT-Kraftstoffen – <sup>2</sup> Bei 20°C – <sup>3</sup> [kg/m<sup>3</sup>] – <sup>4</sup> [MJ/m<sup>3</sup>] – <sup>5</sup> Biomethan in [kg]

Quelle: Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR)

## 2.1 Flüssige Biotreibstoffe

### Pflanzenöl

Als pflanzliche Rohstoffe dienen ölhaltige Pflanzen. Aus Kostengründen werden einheimische Pflanzen bevorzugt. In Mitteleuropa wird Pflanzenöl überwiegend aus den Samen von Raps hergestellt. Die Herstellung von Rapsöltreibstoff erfolgt entweder nur durch mechanische Extraktion (Kaltpressung) oder durch mechanische Extraktion (Warmpressung) mit anschliessender Lösemittelextraktion. Hierbei erhält man gegenüber dem ersten Prozess eine höhere Ausbeute an Öl. Um eine definierte Qualität zu erhalten, müssen durch geeignete Massnahmen, wie Filtration und allenfalls Raffination, Feststoffe und unerwünschte Begleitstoffe entfernt werden. Rapsöltreibstoff darf für den vorgesehenen Einsatz im pflanzenöлтаuglichen Motor keine andere Nutzung (zum Beispiel als Frittieröl, Schmierstoff oder Hydrauliköl) erfahren haben. Pflanzenöl kann nur in speziell angepassten Motoren eingesetzt werden.

### Pflanzenölmethylester

Pflanzenölmethylester, oder im Volksmund auch Biodiesel genannt, wird aus Pflanzenöl hergestellt. Die Herstellung von Pflanzenölmethylester erfolgt durch Umesterung von Pflanzenöl. Hierbei wird das Pflanzenölmolekül, das aus dem dreiwertigen Alkohol Glycerin und drei Fettsäureketten besteht, aufgespalten. Das Glycerin wird durch den einwertigen Alkohol Methanol ersetzt, an dem sich jeweils nur eine Fettsäure anlagern kann. Wird Pflanzenölmethylester aus Rapsöl hergestellt, so wird es als Rapsölmethylester (RME) bezeichnet. Fahrzeuge, sofern sie für Rapsölmethylester freigegeben wurden, können ausschliesslich damit fahren. Seit 2004 ist es in der Schweiz erlaubt, dem konventionellen Diesel 5 % Pflanzenölmethylester beizumischen. Diese Beimischung führt zu keinerlei Schäden am Fahrzeug.

### Bioethanol

Ethanol entsteht durch die Vergärung von zucker- und stärkehaltigen Pflanzen. In Mitteleuropa werden hierfür vor allem Weizen, Roggen und Zuckerrüben in Betracht gezogen. Als Ausgangsstoff dient der in Pflanzen enthaltene Zucker. Bei stärkehaltigen Pflanzen muss die Stärke zunächst durch geeignete Enzyme in Zucker umgewandelt werden. Der freigeordnete Zucker wird mit Hilfe von Hefepilzen und Enzymen zu Ethanol vergoren. Nach anschliessender Aufbereitung (Destillation/Rektifikation und Entwässerung) kann Bioethanol Benzin zugemischt und dem Ottomotor zugeführt werden. In einigen Ländern, auch in der Schweiz, darf Bioethanol dem Ottotreibstoff bis zu 5 % beigemischt werden. Ethanolbeimischungen von mehr als 5 % erfordern angepasste Motoren. Flexible Fuel Vehicles (FFV) sind Fahrzeuge, die mit bis zu 85 % Ethanol (E85) betrieben werden.

### Ethyl-Tertiär-Butylether (ETBE)

Ethyl-Tertiär-Butylether ist eine chemische Verbindung aus (regenerativen) Bioethanol und aus (fossilen) Isobutylene. Der Volumenprozentanteil des Bioethanols beträgt 47%. ETBE wird nicht als Reintreibstoff, sondern als Beimischung von bis zu 15 % dem Ottotreibstoff zugesetzt. Es ersetzt das aus fossilen Energieträgern stammende Antiklopfmittel Methyl-Tertiär-Butylether (MTBE). Durch die Zugabe von ETBE wird die Oktanzahl erhöht und so die Klopfneigung des Ottotreibstoffs herabgesetzt. Als Klopfen werden unkontrollierte Verpuffungen bezeichnet, die den Motor mechanisch und thermisch stark belasten.

### BtL-Treibstoffe

BtL steht für Biomass-to-Liquid und gehört zur Gruppe der synthetischen Treibstoffe, deren Bestandteile genau auf die Anforderungen moderner Motorenkonzepte zugeschnitten

ten sind. Zur Herstellung von BtL-Treibstoffen, die auch als «Sunfuel» bezeichnet werden, kann grundsätzlich jede Art von Biomasse genutzt werden. Durch Vergasung der Biomasse wird ein Synthesegas hergestellt, aus dem mittels Fischer-Tropsch-Synthese der BtL-Treibstoff gewonnen wird. Ein Unterschied zu anderen Biotreibstoffen ist die vollständige Verwertung der Biomasse. Somit können höhere Erträge erwirtschaftet werden. BtL-Treibstoffe können in heutigen Motoren, seien es Otto- oder Dieselmotoren, problemlos eingesetzt werden. BtL-Treibstoffe werden derzeit noch nicht kommerziell hergestellt. Die erste großtechnische Anlage für BtL-Treibstoffe wird vom Unternehmen Choren Industrie GmbH in Lubmin (Deutschland) errichtet. Ab 2008 sollen dort zirka 200 000 t BtL-Treibstoff pro Jahr produziert werden.

### **Methanol und Dimethylether (DME)**

Diese Treibstoffe können wie BtL-Treibstoffe über Synthesegas hergestellt werden, das aus der Vergasung einer breiten Biomassepalette resultiert. Sie bedürfen aber zum Teil eigener Verbrennungsmotoren und stellen in absehbarer Zeit voraussichtlich keine relevanten Biotreibstoffe dar.

### **MTBE (Methyl-Tertiär-Butylether)**

Treibstoff, der auf der Grundlage von Biomethanol hergestellt wird. Der Prozentanteil des Biotreibstoffes beträgt 36 Vol.-%. MTBE ist derzeit kein relevanter Biotreibstoff.

### **HTU-Diesel (Hydro Thermal Upgrading)**

HTU-Diesel wird aus in Wasser verrotteter Biomasse gewonnen. Hierbei wird ein Rohöl (bio-crude) gewonnen, aus dem ein Dieseleratz produziert wird. Als Rohstoff eignet sich Biomasse mit einem hohen Wassergehalt.

### **Pyrolyseöl-Diesel**

Pyrolyseöl wird durch Pyrolyse gewonnen; eine thermische Umwandlung von Biomasse unter Ausschluss von Sauerstoff. Das gewonnene Pyrolyseöl dient als Ausgangsmaterial für die Produktion eines Dieseleratzes. Als Rohstoff für das Pyrolyseöl dient lignocellulosehaltige Biomasse.

## **2.2 Gasförmige Biotreibstoffe**

### **Biogas**

Biogas ist ein Stoffwechselprodukt von Methanbakterien, das beim biochemischen Abbau organischer Stoffe (Biomasse bzw. Abfälle und sonstige organische Reststoffe) im feuchten Milieu und unter Luftabschluss entsteht. Biogas besteht neben Methan hauptsächlich aus Kohlendioxid und Schwefelwasserstoff. Als Treibstoff ist nur das Methan nutzbar, das chemisch betrachtet mit Erdgas identisch ist. Durch eine Reinigung, bei der das Methan von den übrigen Biogas-Bestandteilen abgetrennt wird, erhält es die Qualität von Erdgas. Das aufbereitete Biogas kann ohne weitere technische Anpassungen in Erdgasfahrzeugen eingesetzt werden. In Schweden und der Schweiz kann Biogas an einigen öffentlichen Tankstellen bezogen werden.

### 3. Gegenwärtige Biotreibstoffversorgung

Gegenwärtig sind für die Mobilität unsere Gesellschaft fast ausschliesslich fossile Energieträger verantwortlich. Das Vorkommen an Erdöl und Erdgas ist jedoch begrenzt. Heute kann niemand mit Sicherheit vorhersagen, wann fossile Energieträger aufgebraucht sein werden. Fakt ist jedoch, dass die weltweit steigende Nachfrage nach fossilen Energieträgern dazu führt, dass Erdöl auf dem Weltmarkt knapp ist und die Preise für ein Barrel Rohöl in den letzten Jahren stetig gestiegen sind. Ein Rohölpreis von zirka 60 Dollar pro Barrel (Frühjahr 2006) stellt für viele Wirtschaftsbereiche ein ernsthaftes Problem dar. Deswegen muss es eine der wichtigsten Herausforderungen in den nächsten Jahren sein, mit den vorhandenen Ressourcen sparsamer umzugehen und neue Alternativen im Verkehrssektor anzustreben. Aus heutiger Sicht stellen einige Biotreibstoffe die einzige technisch erprobte umsetzbare Option dar, fossile Energieträger abzulösen. Ob Pflanzenöl, Pflanzenölmethylester, Bioethanol, ETBE, aufbereitetes Biogas oder synthetische Biotreibstoffe, jeder Treibstoff hat seine Vor- und Nachteile. Neben Rohstoffpotential und Energiebilanzen sind insbesondere die Herstellungskosten von Bedeutung. Darüber hinaus spielen unter anderem die Integrationsmöglichkeit in die bestehende Tankstelleninfrastruktur und die Kompatibilität zu zukünftigen Motorgenerationen eine wichtige Rolle. Aus der Vielzahl der unterschiedlichen Biotreibstoffe sind Biodiesel und Bioethanol die einzigen heute in grösseren Mengen produzierten Treibstoffe aus Biomasse. Ihre Produktion steigt seit Jahren kontinuierlich an (Abb. 2 und 3).

Abb. 2: Weltweite Bioethanolproduktion für den Kraftstoffsektor (Quelle: IEA 2004, F.O. Licht 2003, 2004).

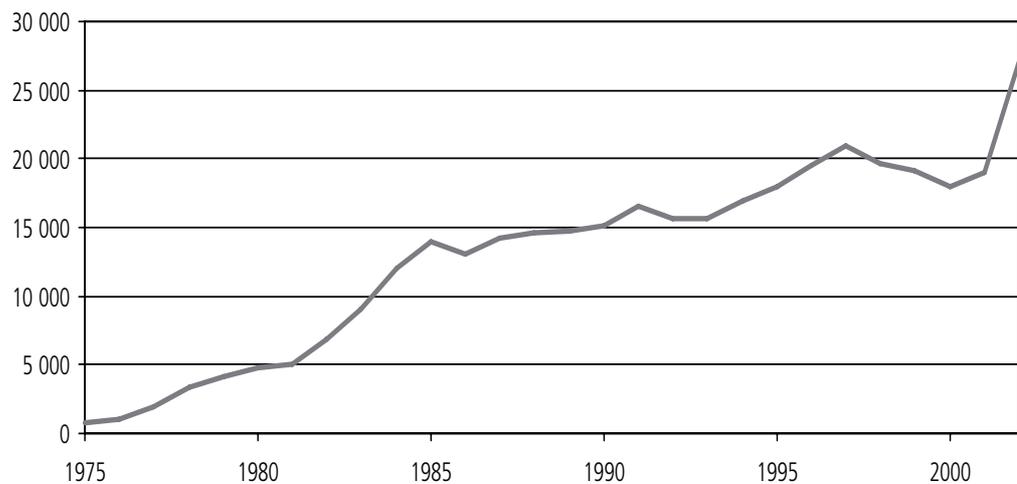
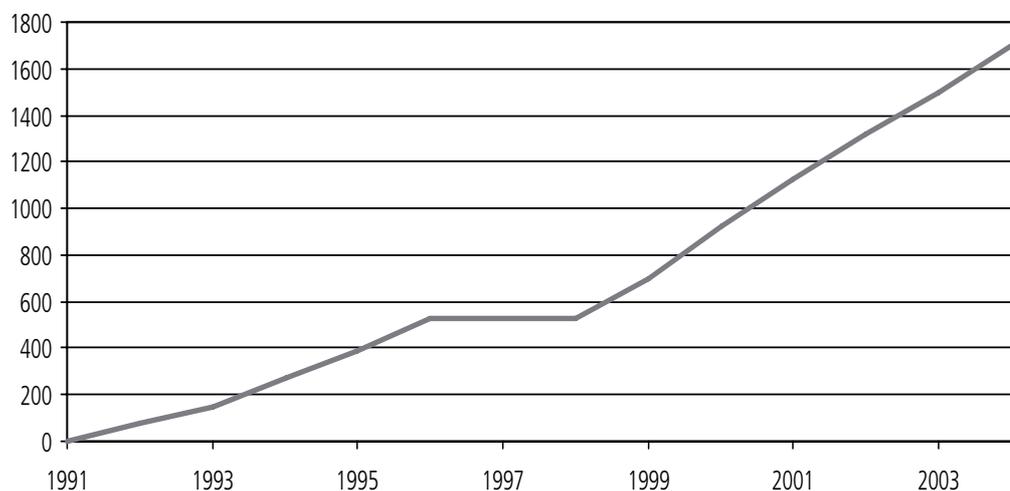


Abb. 3: Weltweite Produktionskapazitäten für Pflanzenölmethylester (Quelle: IEA 2004, F.O. Licht 2003, 2004).



In Anbetracht der zunehmenden Förderung von Biotreibstoffen gehen Prognosen für das Wachstum der Produktion von Bioethanol und Pflanzenölmethylester von mehr als einer Vervielfachung innerhalb der nächsten 20 Jahre aus (IEA 2004). Dabei wird sich das Wachstum nicht mehr auf die bereits etablierten Produzentenregionen Amerika und die EU beschränken, sondern weltweit und zunehmend in Entwicklungs- und Schwellenländern stattfinden. So werden auch in Märkten mit weiter stark wachsendem Treibstoffverbrauch und hoher Abhängigkeit von Ölimporten Biotreibstoffe über Beimischungsquoten gefördert. Zusätzlich begünstigen hohe Ölpreise die zunehmende Verwendung von Biotreibstoffen.

### 3.1 Gegenwärtige Biotreibstoffversorgung in den EU-Mitgliedsstaaten

In den EU-Mitgliedsstaaten hat das Interesse an Biotreibstoffen in den letzten Jahren stark zugenommen, so dass in immer mehr Mitgliedsstaaten eine umfassende Förderung von Biotreibstoffen erfolgt. Im Vergleich zu traditionellen Treibstoffen, deren Verwendung global gesehen weiter stark zunimmt, ist der Einsatz von Biotreibstoffen aber noch relativ gering. So liegt deren Anteil am gesamten Treibstoffverbrauch in kaum einem europäischen Land über 2 % (Abb. 4). Insgesamt ist jedoch ein Trend zu einer verstärkten Verwendung von Biotreibstoffen klar zu erkennen. Ein Grund hierfür ist die derzeitige Biotreibstoffpolitik der EU, welche massgeblich durch die beiden aktuellen EU-Direktiven zur Förderung von Biotreibstoffen (Direktiven 2003/30/EC und 2003/96/EC) und zur Besteuerung von Energieerzeugnissen (European Council, 2003a und 2003b) bestimmt wird.

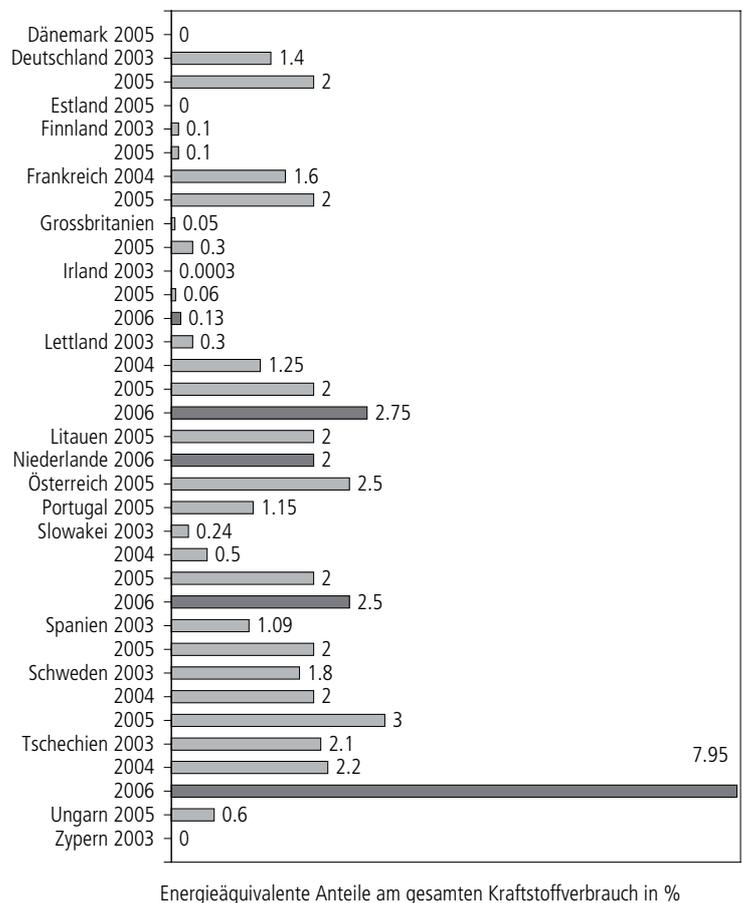
Folgende Rahmenbedingungen trugen dazu bei, dass zahlreiche Mitgliedsstaaten, die bisher keine nationalen Förderprogramme für Biotreibstoffe hatten, solche mittlerweile umgesetzt haben (Tab. 3):

- Die Ziele zum Anteil von Biotreibstoffen am Gesamttriebstoffverbrauch in den EU-Direktiven;
- Bis zu 100 % Steuerbefreiung für Biotreibstoffe;
- Die Aufforderung an die Mitgliedsstaaten, eine nationale Strategie zu entwickeln und über diese bis Ende des Jahres 2004 zu berichten.

### 3.2 Gegenwärtige Biotreibstoffversorgung der Schweiz

Im Jahr 2004 wurden in der Schweiz 31,3 % der Energieträger als Treibstoffe verbraucht (Tab. 4). Der Verbrauch von Benzin lag bei 3 708 000 Tonnen, der von Diesel bei 1 568 000 Tonnen und von Flugtreibstoffen bei 1 171 000 Tonnen. Insgesamt wurden 6 447 000 t Treibstoff verbraucht. Die Gruppe der Treibstoffe hält damit im Jahr 2004 den grössten Anteil an Energieverbrauch der Schweiz.

Abb. 4: Anteile von Biotreibstoffen und Ziele von EU-Mitgliedsstaaten (Quelle: Europäische Kommission 2004a).



Energieäquivalente Anteile am gesamten Kraftstoffverbrauch in %

**Tab. 3. Steuerbefreiungen für Biotreibstoffe in den EU-Mitgliedsstaaten, Stand 1.2.2005.**

Land	Mineralölsteuer für unverbleites Benzin (EUR/1.000 Liter)	Mineralölsteuerbefreiung für Biotreibstoffe
Belgien	507,56 oder 522,43 (abhängig vom Schwefelgehalt)	100 % für reine Biotreibstoffe und für die bis zu 5%ige Beimischung von Biotreibstoffen
Dänemark	539,38	keine Steuerbefreiung
Deutschland	669,8 oder 654,5 (abhängig vom Schwefelgehalt)	100 % für reine Biotreibstoffe und für den Biotreibstoffanteil bei Mischungen
Estland	337,45	100 %
Finnland	596,5 oder 587,6	51 % bis Ende 2004
Frankreich	639,60	Jährliche Anpassungen, 2004: <ul style="list-style-type: none"> <li>• 38 €/hl für den Bioethanolanteil in ETBE</li> <li>• 37 €/hl für die direkte Beimischung von Bioethanol (erstmal seit 2004)</li> <li>• 33 €/hl für Pflanzenöl</li> </ul>
Griechenland	296,0 oder 316,0 (abhängig von der Oktanzahl)	Steuerbefreiungen werden derzeit diskutiert und eine Umsetzung erfolgt vermutlich bald
Großbritannien	688,52 bis 733,65	Ab 2005: 20 pence pro Liter für mindestens 3 Jahre
Irland	442,68 oder 547,79 (abhängig von der Oktanzahl)	Steuerbefreiungen für Pilotprojekte möglich, Gesamtmenge (reines Pflanzenöl + Biodiesel + Bioethanol) auf 8 Mio. Liter begrenzt, EU-Genehmigung steht noch aus
Italien	541,84	0,29 € pro Liter reinem Biotreibstoff und auch 0,29 € pro Liter ETBE
Lettland	287,65	Seit Mai 2004 reduzierte Sätze
Litauen	287,04	Seit Mai 2004 Befreiung in Höhe des biogenen Anteils
Luxemburg	442,09	Keine Steuerbefreiung
Malta	310,10	Keine Steuerbefreiung
Niederlande	658,88	Fördermassnahmen werden derzeit diskutiert, eine Umsetzung erfolgt vermutlich 2005
Österreich	417,00 oder 432,00 (abhängig vom Schwefelgehalt)	100 % für reine Biotreibstoffe und für bis zu 5 % Beimischung von Bioethanol bzw. 2 % Beimischung von Biodiesel
Polen	320,28	Abhängig von der Höhe der Beimischung
Portugal	522,60	Massnahmen werden zur Zeit diskutiert und vermutlich ab 2005 umgesetzt
Slowenien	361,89	Keine Steuerbefreiung
Slowakei	375,53	Keine Steuerbefreiung, Fördermassnahmen werden zur Zeit diskutiert
Spanien	395,69 oder 426,92 (abhängig von der Oktanzahl)	100 % für reine Biotreibstoffe und für den Biotreibstoffanteil bei Mischungen
Schweden	327,24 oder 527,24 (abhängig von der Benzinspezifikation)	100 % Steuerbefreiung für Biotreibstoffe, ETBE ist nicht befreit
Tschechien	339,90	Seit Juni 2004: 100 % für Biodiesel bei 31 %iger Beimischung Seit August 1999: 100% für Bioethanol bei maximal 5 % Beimischung und für ETBE bei maximal 15 % Beimischung Weitere direkte Fördermaßnahmen bestehen
Ungarn	407,56 bis 459,57 (abhängig von der Benzinspezifikation)	100% für ETBE und für Biodiesel
Zypern	299,08	Keine Steuerbefreiung, Investitionsförderung möglich

Quelle: European Commission (2004a), European Commission (2004b)

**Tab. 4. Gesamter Energieverbrauch nach Energieträgern.**

Energieträger	Endverbrauch in Originaleinheiten	Gesamter Endverbrauch an Energieträgern in %
Erdölprodukte:	11 736 000 t	57,0
- davon Erdölbrennstoffe:	5 289 000 t	25,7
Heizöl extra-leicht	5 001 000 t	24,3
Heizöl mittel und schwer	151 000 t	0,7
Petrolkoks	24000 t	0,1
Übrige	113 000 t	0,6
- davon Treibstoffe:	6 447 000 t	31,3
Benzin	3 708 000 t	18,0
Flugtreibstoffe	1 171 000 t	5,7
Dieselöl	1 568 000 t	7,6
Elektrizität	56 171 GWh	23,1
Gas	29 433 GWh	12,1
Kohle	203 000 t	0,6
Holz und Holzkohle	2 621 000 m <sup>3</sup>	2,6
Fernwärme	4 256 GWh	1,7
Müll und Industrieabfälle	–	2,0
Übrige erneuerbare Energien	2 128 GWh	0,9
Total Endverbrauch	–	100

Quelle: Bundesamt für Energie: Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2004

Trotz des hohen Treibstoffverbrauchs im Jahr 2004 war der Anteil an Treibstoffen aus erneuerbaren Rohstoffen sehr gering (Tab. 5). Im direkten Vergleich zu anderen EU-Ländern war der Anteil an Biotreibstoffen damit ebenfalls gering. In Zukunft kann damit gerechnet werden, dass Biotreibstoffe vermehrt Absatz finden. Sowohl in der Politik wie auch in der Wirtschaft wird das Thema verstärkt behandelt. Ein eindeutiger Trend in Richtung Biotreibstoffe zeigen die drei Schweizer Tankstellenbetreiber Flamol, Migrol und Agrola durch ihre Vermarktungsstrategie (Tab. 6). Ob sich in der Schweiz Biotreibstoffe am Markt etablieren werden, hängt im Wesentlichen von den politischen Rahmenbedingungen ab. Aufgrund der derzeit noch höheren Herstellungskosten von Biotreibstoffen, müssen diese durch geeignete Massnahmen des Bundes gefördert werden.

**Tab. 5. Versteuerte Mengen von Treibstoffen aus erneuerbaren Rohstoffen im Jahr 2004.**

Produkt	Einheit	Im Inland hergestellt	Import	Total
Biogas	in 1000 Kilogramm Eigenmasse	3 377	–	3 377
Biodiesel	in 1000 Liter bei 15°C	2 310	104	2 414
Bioethanol		–	–	–
Pflanzliche und tierische Öle bzw. pflanzliche und tierische Altöle	in 1000 Liter bei 15°C	1 160	–	1 160
Andere Treibstoffe aus erneuerbaren Rohstoffen		–	–	–

Quelle: Eidgenössische Zollverwaltung EZV

**Tab. 6. In der Schweiz erhältliche Biotreibstoffe bzw. mit Biotreibstoff versehene Kraftstoffe.**

Tankstellenbetreiber	Produkt	Zusammensetzung	Einführung
Flamol	Biodiesel100	100 % Rapsölmethylester	1996
	DieselBIO5	95 % konventioneller Diesel, 5 % Biodiesel (RME) aus Schweizer Produktion	Mai 2005
	BenzinBIO5	95 % Benzin «Bleifrei 95», 5 % Bioethanol aus Schweizer Produktion	Mai 2005
Migrol	Migrol Diesel Greenlife Plus®	95 % konventioneller Diesel, 5 % Biodiesel (RME)	2004
Agrola	Bioéthà+	95 % Benzin «Bleifrei 95», 5 % Bioethanol aus Schweizer Produktion	2005
	Diesel AdGreen	95 % konventioneller Diesel, 5 % Biodiesel (RME)	2006

### Flamol

Die Schweizer Mineralölfirma Flamol ist derzeit mit seinen Produkten Biodiesel<sup>100</sup>, Diesel<sup>BIO5</sup>, Benzin<sup>BIO5</sup> führend bei der Vermarktung von Biotreibstoffen bzw. mit Biotreibstoff versehenen Treibstoffen. Die Produkte Diesel<sup>BIO5</sup> und Benzin<sup>BIO5</sup> sind im gesamten Flamol Tankstellennetz erhältlich. Biodiesel<sup>100</sup> wird hingegen nur an neun Flamoltankstellen angeboten.

### Migrol

Im Jahr 2004 wurde vom Tankstellenbetreiber Migrol das Produkt Migrol Diesel Greenlife Plus® auf den Markt gebracht. Obwohl es noch nicht an jeder Migrol Tankstelle erhältlich ist, wird es bereits flächendeckend in der Schweiz angeboten. Ab 2006 wird der Ausbau von Diesel Greenlife Plus® weiter vorangetrieben.

### Agrola

Vom Tankstellenbetreiber Agrola wird das Produkt Bioéthà+ vertrieben. Zurzeit ist Bioéthà+ an den Tankstellen in Delémont und Alle erhältlich. Ein Ausbau des Netzes ist geplant und wird laufend kommuniziert. 2006 brachte Agrola ein neues Produkt «Diesel AdGreen» auf den Markt.

## 4. Rapsöl und Rapsölmethylester (RME) als Treibstoff

In diesem Kapitel werden Rapsöl und Rapsölmethylester (RME) gemeinsam behandelt, weil bei der Rapsölmethylesterproduktion lediglich eine Weiterverarbeitung des Rapsöls stattfindet. Beide Biotreibstoffe stammen aus dem gleichen Rohstoff. Damit gelten die Aussagen am Ende dieser Studie für Rapsöl und Rapsölmethylester gleichermassen.

### 4.1 Rohstoffe

Die bedeutendsten Kulturpflanzen für die Treibstoffgewinnung auf Pflanzenölbasis sind in Mitteleuropa gegenwärtig Raps und Sonnenblumen. Die möglichen Erträge zeigt Tabelle 7. Aus ihnen lassen sich Biotreibstoffe wie Pflanzenöl bzw. nach Umesterung Pflanzenölmethylester (PME) gewinnen. Andere Ölpflanzen haben in Mitteleuropa praktisch keine Bedeutung. Nachfolgend wird Raps als wichtigster Rohstoff für die Pflanzenölgewinnung betrachtet.

**Tab. 7. Möglichen Erträge von Winterraps, Sommerraps und Sonnenblumen.**

	Einheit	Winterraps	Sommerraps	Sonnenblumen
Ölgehalt im Samen	%	39–43	38–40	35–52 (mit Samenschale) 55–60 (ohne Schale)
Kornertragspotential	t/ha*a	2,8–4,8	2,0–2,8	2,4–4,0
Ölertrag	kg/ha*a	1100–2000	750–1100	850–2000

Quelle: Kaltschmitt, 2001

#### Raps

Als Rohstoff für die Ölgewinnung werden in der Regel 00-Rapssorten mit geringem Glucosinolat- und Erucasäure-Gehalt eingesetzt. Durch Fortschritte in der Züchtung und in der Produktionstechnik ist bei den Rapsenerträgen eine Steigerung der Erträge zu erwarten. Neben einem hohen Ölgehalt und einer guten Ölqualität sollte bei der Sortenwahl auf die Krankheitsresistenz und eine gute Lagerfähigkeit Wert gelegt werden. Die Anbaupause sollte zwei bis drei Jahre betragen, da Raps aufgrund von vielfältigen Krankheiten nicht selbstverträglich ist. Raps wird in Winterraps und Sommerraps unterteilt. Nach derzeitigem Kenntnisstand nimmt die Rapsorte keinen Einfluss auf die Rapsöltreibstoffqualität. Als Grundstoff für die Ölgewinnung dient ausschliesslich das Rapskorn.

In der Schweiz wurde im Jahr 2003 auf einer Gesamtfläche von etwa 16 000 ha Raps angebaut. Davon dienten rund 14 875 ha der Speiseölgewinnung. Die restlichen 1123 ha dienten dem Anbau von nachwachsenden Rohstoffen. Insgesamt wurde ein Ertrag (Ertrag ermittelt als Quotient aus abgelieferter Ware und Anbaufläche) von 2,83 t/ha erwirtschaftet (SBV 2004).

Während der Lagerung der Ölsaaten laufen Abbau- und Umsetzungsprozesse ab, die eine Minderung der Ölausbeute bzw. eine Verschlechterung der Ölqualität hervorrufen können. Um eine möglichst hohe und qualitativ hochwertige Ölausbeute zu erlangen, sollte das Rapskorn im lagerfähigen Zustand etwa 43 % Öl, 40 % Rohprotein und Extraktstoffe, 7 % Wasser, 5 % Rohfaser und 5 % Asche enthalten. Damit diese Zusammensetzung gesichert ist, muss das Rapskorn durch geeignete Massnahmen (Reinigen, Trocknen, Belüften, Kühlen, Umlagern) entsprechend aufbereitet werden.

## 4.2 Herstellung von Rapsöl und Rapsölmethylester (RME)

Die Rapsölgewinnung kann sowohl in zentralen wie in dezentralen Anlagen erfolgen. Nachfolgend werden beide Anlagentypen erläutert.

### 4.2.1 Verfahrensschritte in dezentralen Ölgewinnungsanlagen

In dezentralen Ölgewinnungsanlagen werden etwa 0,5 bis 25 t Ölsaats pro Tag verarbeitet. Damit die Herstellung von Pflanzenöl bei diesen geringen Mengen wirtschaftlich ist, müssen die technische Ausstattung und der Verfahrensablauf sehr einfach gehalten werden. Die in grosstechnischen Anlagen üblichen Verfahrensschritte «Konditionierung», «Extraktion» und «Raffination» werden dafür als zu aufwändig eingestuft (Widmann 1994). Der Verfahrensablauf dezentraler Anlagen setzt sich aus Vorbehandlung, Kaltpressung und

anschliessender Reinigung zusammen. In Abbildung 5 sind die einzelnen Verfahrensschritte der Rapsölgewinnung in dezentralen Ölgewinnungsanlagen schematisch dargestellt und werden anschliessend erläutert.

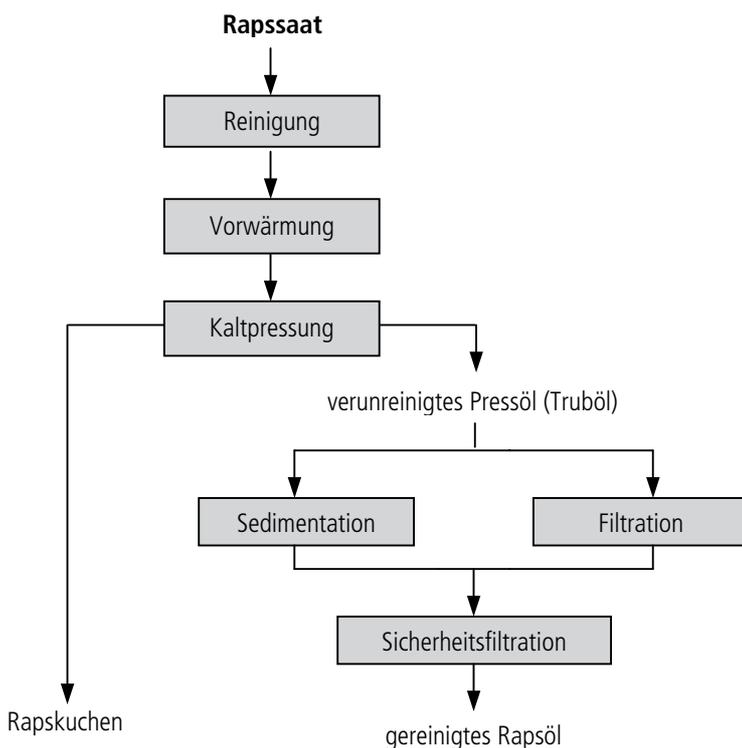


Abb. 5: Verfahrensschritte der Rapsölgewinnung in dezentralen Ölgewinnungsanlagen.

Wird nach der Pressung in einem zweiten Durchgang der Presskuchen weiter entölt, fallen Ölqualitäten an, die sich in der Regel nicht mehr für den Treibstoffeinsatz eignen.

**Reinigung**

Bei dem gewonnenen Pflanzenöl (Trüböl) handelt es sich um ein zweiphasiges Stoffgemisch, das aus einer flüssigen Phase (Öl) und einer festen Phase (Partikel) besteht. Der Feststoffgehalt (ölfrei) beträgt etwa 0,5 bis 6 Gewichtsprozent. Diese Feststoffe müssen aus dem Öl entfernt werden. In dezentralen Ölgewinnungsanlagen erfolgt die Reinigung zu

### Vorbehandlung

Um die gewünschte Ölqualität sicherzustellen und um die Schneckenpresse zu schonen, muss zu Beginn der Rapsölgewinnung eine zusätzliche Reinigung der Rapssaats erfolgen. Anschliessend wird diese bis etwa 40 °C vorgewärmt. Somit wird die Viskosität des in der Rapssaats enthaltenen Öls gesenkt, damit das Öl beim Pressvorgang besser ablaufen kann. Durch eine geringe Temperatur ist sichergestellt, dass sich während der Saatvorwärmung keine unerwünschten Begleitstoffe aus der Rapssaats lösen und in das Pressöl gelangen.

### Kaltpressung

Bei der Pressung der Ölsaats werden in dezentralen Ölgewinnungsanlagen hauptsächlich Schneckenpressen verwendet. Diese weisen Verarbeitungskapazitäten von 5 bis zirka 1000 kg/h auf. Hierbei entzieht man der Rapssaats etwa 75 bis 88 % des vorhandenen Ölgehaltes (Widmann 1994). Durch die Betriebsweise der Presse lässt sich der Gehalt an Phosphor, Calcium und Magnesium beeinflussen. Um den Übergang dieser unerwünschten Begleitstoffe in das Pressöl zu unterbinden, muss die Saatverarbeitung schonend erfolgen. Auf diese Weise können Ölqualitäten erzielt werden, die in Pflanzenölmotoren keine von vollraffiniertem Öl abweichenden Betriebsergebnisse liefern. Damit ist eine zusätzliche Raffination des Öls nicht mehr erforderlich (Widmann 1994).

Wird nach der Pressung in einem zweiten Durchgang der Presskuchen weiter entölt, fallen Ölqualitäten an, die sich in der Regel nicht mehr für den Treibstoffeinsatz eignen.

meist in zwei Stufen, zuerst als Hauptreinigung (Grobklärung) und anschliessend als Sicherheitsfiltration (Endfiltration). Bei der Hauptreinigung sollen die Feststoffe bereits möglichst vollständig aus der flüssigen Phase entfernt werden. Die hier angewendeten Reinigungsverfahren zur Fest/Flüssig-Trennung sind das Sedimentations- und Filtrationsverfahren.

Die Sicherheitsfiltration hat die Aufgabe, Störungen bei der Hauptreinigung anzuzeigen und die angestrebte Reinheit der Charge sicherzustellen. Da bei der dezentralen Ölgewinnung die Reinigung am Ende der Verfahrenskette steht und auf Verfahrensschritte der Raffination verzichtet wird, nimmt die Reinigung des Pflanzenöls entscheidenden Einfluss auf die Pflanzenölqualität.

Beim Sedimentationsverfahren ist die Sinkgeschwindigkeit abhängig von Grösse, Form und Dichte der Partikel, der Viskosität des Öls sowie von den Wechselwirkungen zwischen den Partikeln. Bei dezentralen Anlagen mit geringer Verarbeitungskapazität von etwa 50 kg Ölsaft/h wird das Öl häufig durch eine Sedimentation im Erdschwerefeld gereinigt (Abb. 6). Dabei kann eine kontinuierliche oder eine diskontinuierliche Sedimentation angewendet werden. Eine Mindestsedimentationszeit für die Reinigung des Öls lässt sich nur schwer angeben, da die Sedimentationszeit im wesentlichen vom Volumen und der Form des Behälters bestimmt wird. In der Regel dauert die Sedimentation mehrere Tage bis Wochen.

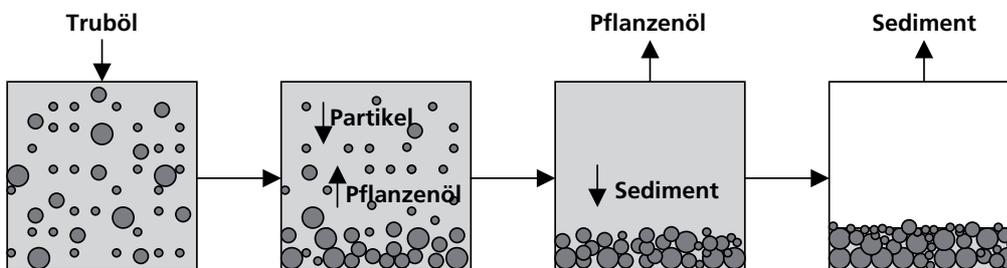


Abb. 6: Verfahrensschritte der diskontinuierlichen Sedimentation im Erdschwerefeld.

Um Partikel mit geringerer Dichte als die des Pflanzenöls nicht mit zu entfernen, wird das geklärte Pflanzenöl häufig durch Schwimmabsaugung wenige Zentimeter unter dem Ölspiegel entnommen. Die Entnahme des Sediments erfolgt dabei manuell. Vor allem die Entfernung des Sediments bei der diskontinuierlichen Sedimentation und die Reinigung der Sedimentationsbehälter ist arbeitsintensiv.

Neben der Sedimentation im Erdschwerefeld gibt es die Sedimentation im Zentrifugalfeld. Da hierbei die Kosten der Pflanzenölgewinnung stark steigen, ist sie in dezentralen Ölgewinnungsanlagen wenig verbreitet.

Das Filtrationsverfahren erfolgt nach dem Prinzip der kuchenbildenden Filtration. Dabei wird, um ein schnelles Verstopfen des Filtermaterials zu vermeiden, der Porendurchmesser des Filtermittels (Filtertuch) grösser gewählt als der Durchmesser der Partikel, die zurück gehalten werden sollen. Zu Beginn des Filtrationsprozesses gelangen deshalb so lange Partikel in das Filtrat, bis sich über dem Filtermittel stabile Brücken aus den Feststoffpartikeln gebildet haben. Der dabei entstehende Filterkuchen übernimmt die Funktion des Filtermittels. Erst wenn der Filterkuchen eine ausreichende Rückhaltung der Partikel gewährleistet, wird das gefilterte Pflanzenöl zur Endfiltration abgeführt. Zur Verbesserung der Brückenbildung können Filterhilfsmittel (Cellulose) eingesetzt werden. Diese dürfen jedoch keine unerwünschten Stoffe an das Öl abgeben und müssen als Beimengung im Futtermittel unbedenklich sein.

Am Ende des Hauptreinigungsprozesses sollte ein Sicherheitsfilter nachgeschaltet werden. Er hat die Aufgabe, Störungen bei der Hauptreinigung anzuzeigen und die angestrebte Reinheit der Charge sicherzustellen.

### 4.2.2 Verfahrensschritte in zentralen Ölgewinnungsanlagen

In heutigen industriellen Grossanlagen werden etwa 1000 bis 4000 t Ölsaaten pro Tag verarbeitet. Die Ölgewinnung erfolgt – vereinfacht dargestellt – mit den Verfahrensschritten Vorbehandlung, Warmpressung, Extraktion und Raffination (Abb. 7). Im Gegensatz zu dezentralen Anlagen wird hier eine Kombination von Pressung mit anschliessender Extraktion angewendet.

Mit diesem Verfahren lassen sich bei einem Energieeinsatz von zirka 1,7 GJ/t Saat bis zu 99 % des in der Saat enthaltenen Öls gewinnen. Eine ausschliessliche Pressung (Fertigpressen) oder eine ausschliessliche Extraktion (Direktextraktion) finden bei der grosstechnischen Pflanzenölgewinnung nicht statt, da bei der ausschliesslichen Pressung nur geringe Ölausbeuten erzielt werden, bei der Direktextraktion aber die wirtschaftlichen Vorteile der Pressung nicht ausgenutzt werden. Die Anwendung der Direktextraktion findet im Wesentlichen bei Ölsaaten mit einem niedrigen Ölgehalt statt.

Aus wirtschaftlichen Gründen verwendet man bei der Gewinnung von Pflanzenölen, die als Treibstoffe dienen, Ölsaaten mit einem hohen Ölgehalt. Somit ist bei der grosstechnischen Ölgewinnung eine Kombination aus Pressung mit anschliessender Extraktion am sinnvollsten, da so die Vorteile beider Verfahren optimal ausgeschöpft werden. Nachfolgend werden die einzelnen Verfahrensschritte der Rapsölgewinnung in zentralen Ölgewinnungsanlagen erläutert.

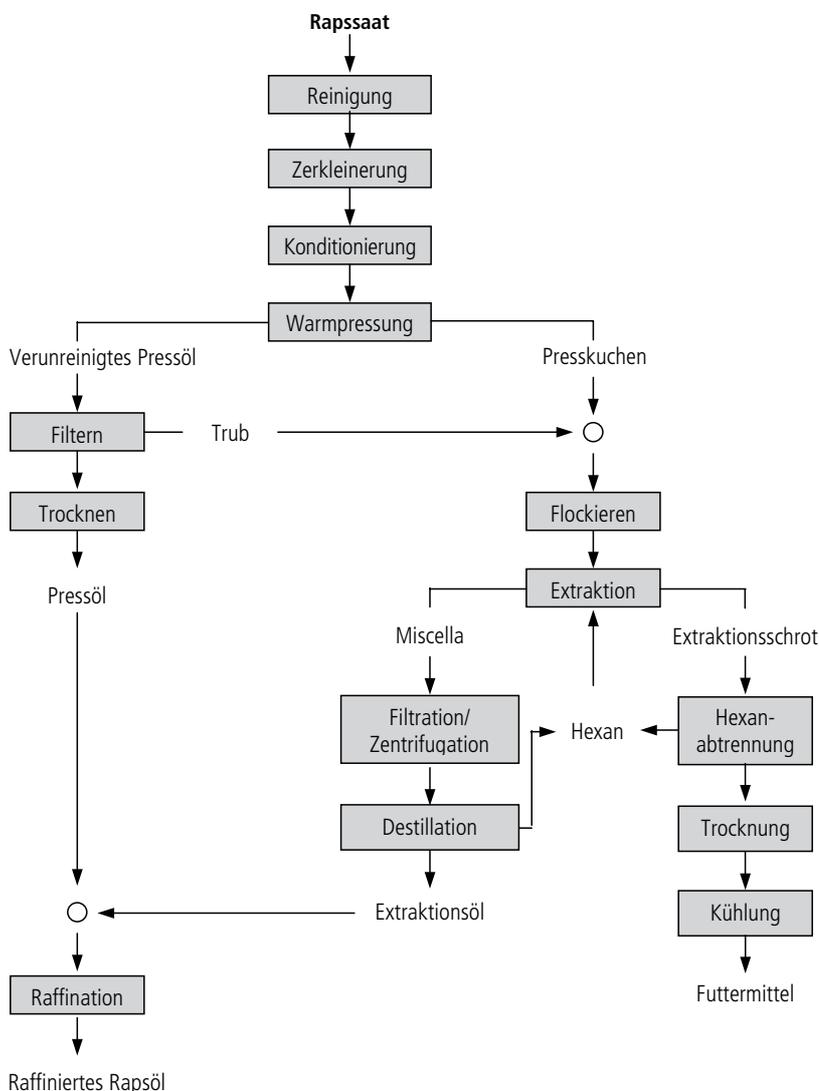


Abb. 7: Verfahrensschritte der Rapsölgewinnung in zentralen Ölgewinnungsanlagen.

Lagerung in unterschiedlicher Qualität vorliegt. Anschliessend wird die Rapssaat zerkleinert. Ziel ist es hierbei, Speichergewebe sowie Samenschale zu zerstören, um eine Vergrösserung der Oberfläche zu schaffen und somit den Ölaustritt zu erleichtern. Im weiteren Verfahrensschritt erfolgt die Konditionierung, das heisst Wassergehalt und Temperatur des Mahlgutes werden eingestellt.

Die Saat wird hierbei auf eine Temperatur von 80 bis 90 °C erhitzt. Dies führt dazu, dass das Öl dünnflüssiger wird und beim Pressen leichter abläuft. Zudem werden die in der Saat befindlichen Enzyme und Mikroorganismen abgetötet, die die Haltbarkeit des Presskuchens verringern können. Ein weiterer Vorteil ist, dass in der Saat vorhandene Eiweisse koaguliert werden. Hierdurch wird die weitere Prozessführung erleichtert, da bei der späteren Extraktion das Lösungsmittel den Presskuchen leichter durchdringt und die störenden Eigenschaften von Eiweissen, wie Schaumbildung bei der Extraktion und ein Verschmieren der Pressen, verhindert werden.

Bei dem Wassergehalt der Saat muss darauf geachtet werden, dass dieser nicht zu hoch ist, da bei der Extraktion die Durchdringung mit dem hydrophoben Extraktionsmittel er-

#### Vorbehandlung

Zu Beginn der Rapsölgewinnung kann eine zusätzliche Reinigung erforderlich sein, da die Rapssaat nach Ernte, Transport und

schwert werden würde. Ein zu niedriger Wassergehalt führt hingegen zum Zerpulvern der Saat, erhöht die Packungsdichte und verhindert somit das Durchdringen des Extraktionsmittels.

### **Warmpressung**

Die vorbehandelte Rapssaat wird mittels kontinuierlich arbeitenden Schneckenpressen ausgepresst. Diese unterscheiden sich im Aufbau und in der Funktionsweise kaum von den Schneckenpressen, welche in dezentralen Ölgewinnungsanlagen verwendet werden. Lediglich die Grösse bzw. der Durchsatz ist bei diesen entsprechend grösser.

Bei der Pressung der Rapssaat entstehen zwei Produkte, das Pressöl und der Presskuchen (Ölschilfer). Das Pressöl enthält verfahrenstechnisch bedingt noch kleine Saateilchen, welche als Trub bezeichnet werden. Der Trub wird in nachgeschalteten Filtern aus dem Pressöl entfernt und dem Presskuchen zugeführt. Das gereinigte Pressöl wird später dem aus der Extraktion gewonnenen Öl zugeführt.

Der Presskuchen enthält nach der Pressung einen Restölgehalt von 15 bis 20 %. Bevor der Presskuchen zusammen mit dem Trub in die Extraktionsanlage gelangt, muss seine Oberfläche vergrössert werden. Hierbei wird er durch Flockierwalzen zu kleinen, festen Plättchen von zirka 0,3 mm Dicke ausgewalzt. Diese Oberflächenvergrösserung beeinflusst entscheidend die nachfolgende Extraktion, da hierdurch für das Lösungsmittel kurze Diffusionswege entstehen, die eine nahezu vollständige Entölung ermöglichen.

### **Extraktion**

Bei der Extraktion wird das restliche Öl dem flockierten Presskuchen mit Hilfe eines Lösungsmittels nahezu vollständig entzogen. Als Lösungsmittel wird Hexan verwendet. Das Hexan durchläuft den flockierten Presskuchen und löst dabei das restliche Öl heraus. Dieser Vorgang wird in einem kontinuierlichen Verfahren mehrmals wiederholt. Bei der Extraktion entstehen zwei Produkte, nämlich das mit Öl angereicherte Lösemittel, die so genannte Miscella (20–30 % Ölgehalt, 70–80 % Lösemittel), und das mit Lösemittel durchsetzte, weitgehend ölfreie Extraktionsschrot (25–35 % Lösemittel). Diese müssen anschliessend aufgearbeitet werden, damit beide Produkte in Reinform vorliegen.

Die Miscella wird zunächst durch Filtration oder Zentrifugation gereinigt. Anschliessend wird der gereinigten Miscella das Lösemittel entzogen. Da das Hexan einen niedrigeren Siedepunkt (55–70 °C) hat als das Öl, geschieht dies mit einer mehrstufigen Destillation. Der dabei entstehende Brüden wird mit Hilfe eines Kondensators verflüssigt und in den Extrakteur zurückgeführt.

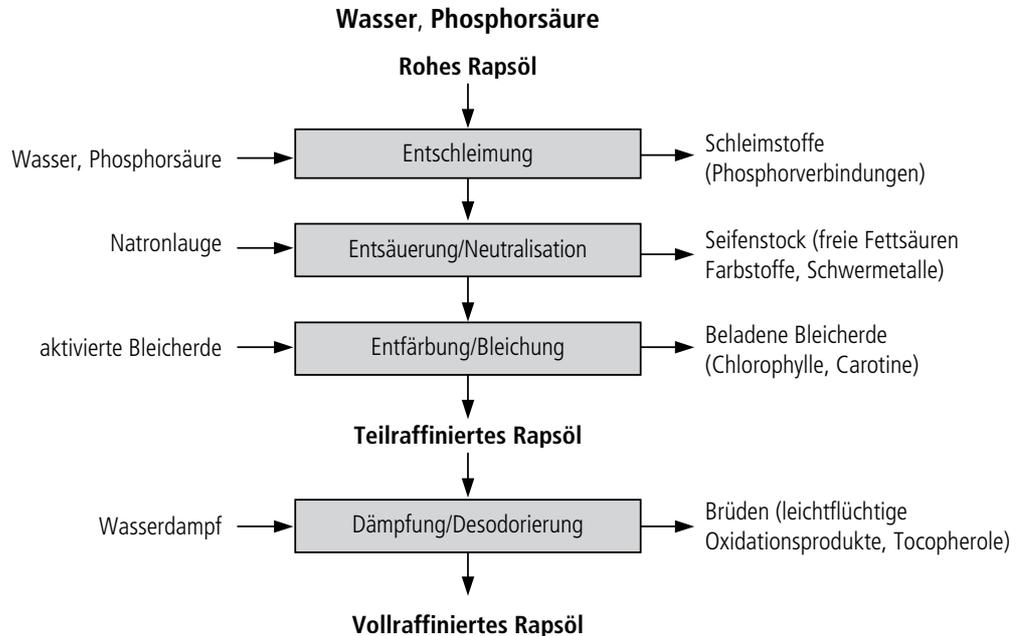
Um das Extraktionsschrot in seiner Reinform zu erhalten, muss zunächst das Lösungsmittel entfernt werden. Dazu wird das Extraktionsschrot erhitzt, was eine Trennung zwischen Lösemittel und Extraktionsschrot bewirkt. Anschliessend wird das Schrot gekocht, wodurch verdauungshemmende oder schädliche Stoffe zerstört werden. Nachdem das Extraktionsschrot auf einen bestimmten Wassergehalt getrocknet und anschliessend gekühlt wurde, kann es als hochwertiges Futtermittel verwendet werden.

### **Raffination**

Das Rohöl, das sich aus dem Extraktionsöl und dem Pressöl zusammensetzt, ist in diesem Zustand weder motorentauglich noch für die Umesterung geeignet, deswegen muss es weiter verarbeitet werden. Dieser Verfahrensprozess wird als Raffination bezeichnet. Ziel der Raffination ist es, alle unerwünschten Begleitstoffe, die bei der Konditionierung und Warmpressung entstanden sind, zu entfernen. Hierzu zählen unter anderem freie Fettsäuren, Phosphatide, Kohlenhydrate, Farbstoffe, Aldehyde, Ketone, Wachse, Schleimstoffe, Saateilchen, Schmutzpartikel, Schwermetalle und Pestizide. Um die gewünschte Reinheit des Rapsöls zu erlangen, unterteilt sich die Raffination in verschiedene Verfahrensschritte.

Dabei wird zwischen chemischer und physikalischer Raffination unterschieden. Wie und in welchem Umfang die Raffination abläuft, hängt im Wesentlichen von den enthaltenen Begleitstoffen ab und soll hier nicht näher definiert werden. Nachfolgend wird kurz die klassische (chemische) Raffination dargestellt (Abb. 8), die sich aus den Aufbereitungsstufen Entschleimung, Entsäuerung (Neutralisation), Entfärbung (Bleichung) und Dämpfung (Desodorierung) zusammensetzt.

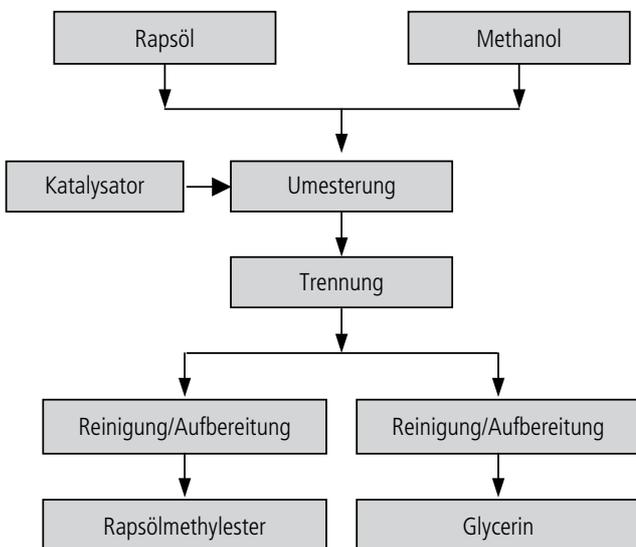
Abb. 8: Verfahrensschritte der chemischen Raffination nach Höffelmann (1993).



### 4.2.3 Umesterung zu Rapsölmethylester

Die Herstellung von Rapsölmethylester erfolgt durch die Umesterung von Rapsöl (Abb. 9). Ziel der Umesterung ist es, die physikalischen Eigenschaften des Rapsöls an die Anforderungen der auf konventionellen Dieseltreibstoff abgestimmten Motoren anzupassen. Dazu wird das relativ hochmolekulare Rapsöl, welches überwiegend aus Triglyceriden besteht, in niedrigmolekulare Verbindungen gespalten.

Abb. 9: Vereinfachtes Schema der Rapsölmethylesterherstellung.



Glyceride sind Ester aus einem dreiwertigen Alkohol (Glycerin), an denen je drei Fettsäuren angelagert sind. Bei der Umesterung wird der dreiwertige Alkohol durch drei einwertige Alkohole (Methanol) aus der Esterbindung verdrängt (Abb. 10). Das Methanol wird mit dem Rapsöl im Massenverhältnis 1:9 gemischt. Da die ursprüngliche Bindungsform erhalten bleibt, bezeichnet man diesen Vorgang als Umesterung. Das entstehende Produkt wird chemisch als Rapsölfettsäuremethylester oder kurz als Rapsölmethylester (RME) bezeichnet. Die entstehende Reaktion würde bei Umgebungstemperaturen nur sehr langsam ablaufen, deswegen gibt man bei der Umesterung einen Katalysator hinzu. Die erforderliche Katalysatormenge hängt dabei von den Konzentrationen an Wasser und freien Fettsäuren im Öl ab, da diese den Katalysator inaktivieren. Bei vollraffinierten Ölen beträgt die Katalysatormenge 0,01 % bis 0,1 % der umzuerstenden Menge. Bei nicht vollraffinierten Ölen kann sich die Katalysatormenge auf 0,5 % bis 1 % erhöhen. Als Katalysatoren

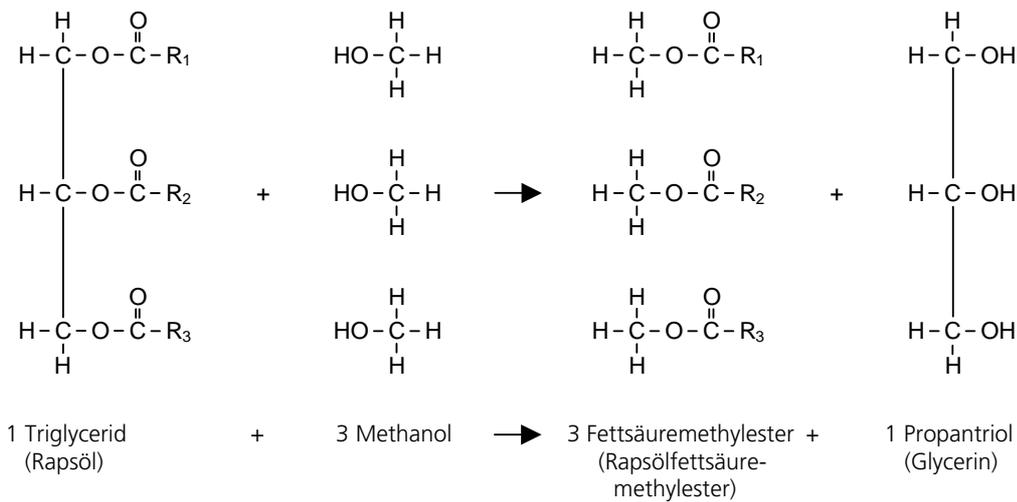


Abb. 10: Strukturformel der Umesterung von Rapsöl zu Rapsölmethylester.

sind Alkali-Metalle (zum Beispiel Natrium, Kalium), Alkali-Hydroxide (zum Beispiel Natronlauge NaOH, Kalilauge KOH) und Alkali-Alkoholate (zum Beispiel Natrium-Methylat) geeignet.



Wie anhand der Summengleichung ersichtlich, wurde mehr Methanol verwendet, als das zuvor angegebene Massenverhältnis besagt. Der Grund hierfür liegt darin, dass es sich bei der Umesterung um eine Gleichgewichtsreaktion handelt. Diese würde zum Stillstand kommen, wenn etwa zwei Drittel der Ausgangsstoffe miteinander reagiert hätten. Um eine höhere Ausbeute von Rapsölmethylester zu erzielen, kann entweder ein Reaktionspartner abgezogen oder ein Reaktionspartner im Überschuss verwendet werden. Meistens wird Methanol im Überschuss verwendet, womit sich das Gleichgewicht der Reaktion in die gewünschte Richtung lenken lässt. Die Ausbeute an Rapsölmethylester beträgt 90 bis 92 %, sie wird jedoch auf 98 % erhöht, indem das entstandene Glycerin abgezogen und die Reaktion unter erneuter Zufuhr von Methanol ein zweites Mal in einem zweiten Reaktor durchgeführt wird. Um Rückreaktionen zu verhindern, muss nach Beendigung der Reaktion das Glycerin schnell und vollständig aus dem Reaktor entfernt werden. Aufgrund der unterschiedlichen Dichte von Roh-RME und Rohglycerin und des daraus resultierenden Zwei-Phasen-Gemisches können beide Stoffe leicht voneinander getrennt werden. Anschliessend wird das restliche Methanol vom Rapsölmethylester abgetrennt, der nicht mehr benötigte Katalysator neutralisiert (zum Beispiel mit Zitronensäure) und aus dem Rapsölmethylester entfernt. Dabei kann das Methanol durch Destillation oder mit Hilfe von Zentrifugen abgetrennt werden. Der verbleibende Rapsölmethylester wird in einem Reinigungsschritt durch Zufuhr von Wasser von den darin noch befindlichen, unerwünschten Stoffen (Glycerin, inaktivierter Katalysator) getrennt und abschliessend getrocknet. Das anfallende Glycerin wird in einer weiteren Verfahrensstufe auf eine Reinheit von zirka 99,5 % aufbereitet und findet seinen weiteren Einsatz in der chemischen Industrie wieder. Es soll erwähnt werden, dass es, wie in Tabelle 8 aufgeführt, unterschiedliche Verfahrensvarianten zur Umesterung gibt, die wiederum unterschiedliche Anforderungen an die Qualität des verwendeten Rapsöls stellen.

Einen detaillierten Überblick über die erforderlichen Prozessschritte und Betriebsstoffaufwendungen der Umesterung zeigt das Verfahrensschema des Konzepts von «Feld & Hahn Ölmühle Leer» (Abb. 11).

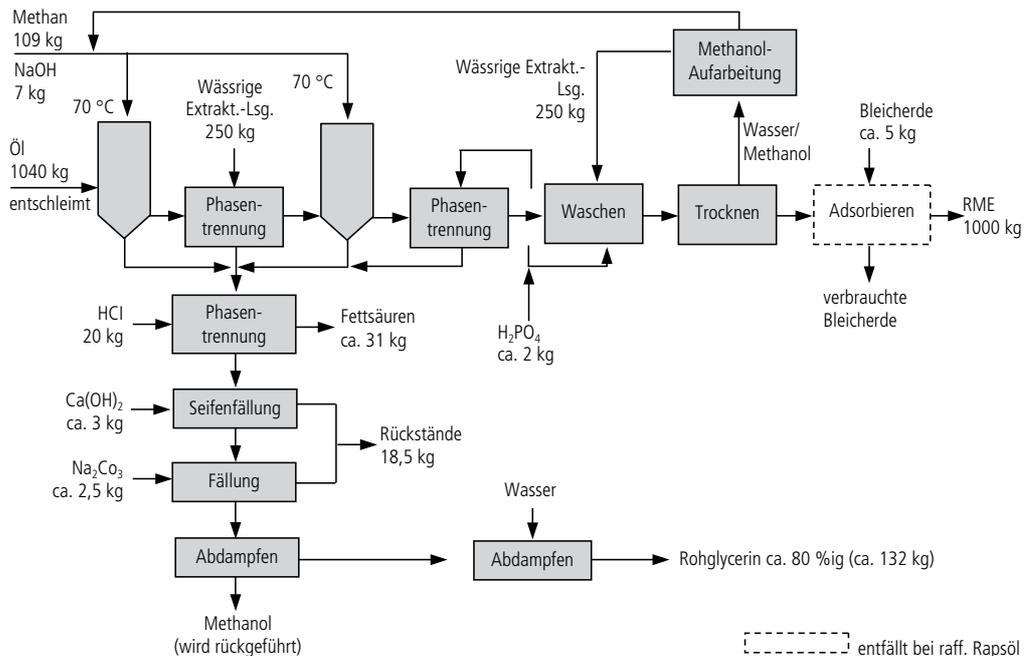
Das Ergebnis der Umesterung ist ein Treibstoff, dessen Fliesseigenschaften (Viskosität) etwa denen vom konventionellen Dieseltreibstoff entsprechen. Es wurde ein Treibstoff geschaffen, der für den Einsatz in modernen Einspritzpumpensystemen und Dieselmotoren angepasst ist.

**Tab. 8. Übersicht über Hilfsstoffe und Energieaufwand von verschiedenen Verfahrensvarianten zur Herstellung von 1 t Rapsölmethylester.**

Merkmal	Hochdruckverfahren	Feld&Hahn Aschbach	Feld&Hahn Ölmühle leer	Lurgi-Verfahren	Vogel&Noot-Verfahren
Verfahrens-klassifikation	kontinuierlicher Betrieb 50 bar 200 °C	Chargenbetrieb drucklos 70 °C	kontinuierlicher Betrieb drucklos 70 °C	Kontinuierlicher Betrieb drucklos 60-75 °C	Chargenbetrieb drucklos Raumtemperatur
Eduktan-forderungen	entschleimt 1110 kg	voll raffiniert 1021 kg	entschleimt 1040 kg	entschleimt entsäuert 1010 kg	roh (wasserent-schleimt) 1044 kg
Endenergie: thermisch Strom	968 kWh 30 kWh	483 kWh 64 kWh	178 kWh 17 kWh	211 kWh 16 kWh	90 kWh 58 kWh
Rohglyzerin-output	130 kg 81 %ig	106 kg 88 %ig	132 kg 80 %ig	116 kg 80 %ig	101 kg 88 %ig
Hilfsstoff-bedarf	Methanol: 135 kg Katalysator: 1,5 kg	Methanol: 132 kg NaOH (96 %ig): 4 kg Zitornensäure: 1 kg Salzsäure: 13 kg Ca(OH) <sub>2</sub> : 6 kg	Methanol: 109 kg NaOH (96 %ig): 7 kg Bleicherde: 5 kg HCl: 20 kg Ca(OH) <sub>2</sub> : 3 kg Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> : 2,5 kg Phosphorsäure (85 %ig): 2 kg	Methanol: 109 kg Na-Methylaat: 6 kg HCl: 13,5 kg Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> : 1,3 kg Filterhilfsmittel: 2 kg	Methanol; 112 kg KOH (88 %ig): 14 kg Wasser: 40 kg Essigsäure: 0,3 kg KOH (50 %ig): 4 kg Phosphorsäure (85 %ig): 20kg
Abfall	Abwasser: 18,5 kg	Abwasser: 35 kg Filterkuchen: 36 kg	verbrauchte Bleich-erde: 7 kg Fettsäuren: 31 kg Rückstände: 18,5 kg	Fettphase: 3 kg Filterkuchen: 10 kg Abwasser: 15 kg	Abwasser: 45,3 kg Kaliumhydrogen-phosphat: 21 kg Fettphase: 67 kg

Quelle: Reis (1996), Wäsche (1994)

Abb. 11: Schema zur Umesterung nach dem Verfahren «Feld & Hahn Ölmühle Leer» nach Reis (1996) und Wäsche (1994).



### 4.3 Eigenschaften

Die treibstofftechnischen Eigenschaften von Pflanzenölen weisen zum Teil erhebliche Unterschiede auf. Die wichtigsten Treibstoff-Kenngrößen verschiedener Pflanzenöle sind in Tabelle 9 aufgeführt.

**Tab. 9. Kenngrößen verschiedener Pflanzenöle.**

Pflanzenöl	Dichte bei 15°C [kg/dm <sup>3</sup> ]	Heizwert [MJ/kg]	Viskosität bei 20°C [mm <sup>2</sup> /s]	Cetanzahl	Stockpunkt [°C]	Flamm- punkt [°C]	Jodzahl [g/100g]
Rapsöl	0,92	37,6	72,3	40	0 bis -3	317	94 bis 133
Sonnenblumenöl	0,93	37,1	68,9	36	-16 bis -18	316	118 bis 144
Sojaöl	0,93	37,1	63,5	39	-8 bis -18	350	114 bis 138
Leinöl	0,93	37,0	51,0	52	-18 bis -27	–	169 bis 192
Olivenöl	0,92	37,8	83,8	37	-5 bis -9	–	76 bis 90
Baumwollsaatöl	0,93	36,8	89,4	41	-6 bis -14	320	90 bis 117
Purgiernussöl	0,91	37,0	71,0	51	–	340	103
Kokosöl (-fett)	0,87	35,3	21,7*	–	14 bis 25	–	7 bis 10
Palmöl (-butter)	0,92	37,0	29,4*	42	27 bis 43	267	34 bis 61
Palmkernöl (-fett)	–	35,5	21,5*	–	20 bis 24	–	14 bis 22

\* kinematische Viskosität bei 50°C

Quelle: Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR)

#### 4.3.1 Rapsöl

Die Eigenschaften von Rapsöl können in weitgehend konstante sowie in variable Eigenschaften unterteilt werden. Dabei werden die variablen Eigenschaften im Wesentlichen durch die Sortenwahl sowie durch Produktions- und Lagerungsverfahren beeinflusst. Nachfolgend werden sowohl konstante als auch variable Eigenschaften des Rapsöls erläutert. Die Qualitätsanforderungen an Rapsöltreibstoff gemäss Weihenstephaner Standard sind in Tabelle 10 dargestellt.

##### Konstante Eigenschaften

###### *Dichte*

Die Dichte des Rapsöls ist weitgehend genetisch fixiert und dient zur Unterscheidung von verschiedenen Pflanzenölen. Rapsöl weist bei einer Temperatur von 15 °C eine nahezu konstante Dichte von 920 kg/m<sup>3</sup> auf.

###### *Flammpunkt*

Der Flammpunkt beschreibt die Temperatur bei Normaldruck, bei der entflammable Dämpfe gebildet werden. Der Flammpunkt von Rapsöl liegt bei zirka 230 °C (Verfahren: geschlossener Tiegel nach Pensky-Martens), somit besitzt Rapsöl gegenüber fossilem Dieseltreibstoff eine höhere Lagerungs- und Transportsicherheit.

###### *Energiegehalt, Heizwert*

Der Heizwert eines Treibstoffs beschreibt dessen Energiegehalt. Rapsöl hat einen unteren Heizwert (Hu) von 36 000 bis 39 000 kJ/kg. Eine vergleichende Zusammenstellung von gemessenen Werten von Diesel, RME und Rapsöl der ART (Wolfensberger, 1993) ist in Tabelle 11 gegeben.

**Tab. 10. Qualitätsanforderungen an Rapsöltreibstoff, Weihenstephaner Standard.**

Eigenschaften	Einheiten	Unterer Grenzwert	Oberer Grenzwert	Prüfverfahren
konstante Eigenschaften				
Dichte (15 °C)	kg/m <sup>3</sup>	900	930	DIN EN ISO 3675 DIN EN ISO 12185
Flammpunkt nach P.-M.	°C	220		DIN EN 22719
Heizwert	kJ/kg	35000		DIN 51900-3
Kinematische Viskosität (40 °C)	mm <sup>2</sup> /s		38	DIN EN ISO 3104
Kälteverhalten				Rotationsviskosimetrie (Prüfbedingungen)
Zündwilligkeit (Cetanzahl)				Prüfverfahren wird evaluiert
Koksrückstand	Masse-%		0,40	DIN EN ISO 10370
Jodzahl	g/100g	100	120	DIN 53241-1
Schwefelgehalt	mg/kg		20	ASTM D5453-93
variable Eigenschaften				
Gesamtverschmutzung	mg/kg		25	DIN EN 12662
Neutralisationszahl	mg KOH/g		2,0	DIN EN ISO 660
Oxidationsstabilität (110°C)	h	5,0		ISO 6886
Phosphorgehalt	mg/kg		15	ASTM D3231-99
Aschegehalt	Masse-%		0,01	DIN EN ISO 6245
Wassergehalt	Masse-%		0,075	pr EN ISO 12937

Quelle : Remmele 2003

**Tab. 11. Dichte und Heizwert von Rapsöl und RME.**

		Diesel	Rapsöl	RME
Dichte bei 15 °C	kg/l	0,827	0,921	0,884
Heizwert (gravimetrisch)	MJ/kg	42,8	36,9	37,3
Heizwert (volumetrisch)	MJ/l	35,4	34,0	33,0

Quelle: Wolfensberger, 1993

*Kinematische Viskosität*

Die kinematische Viskosität (Zähflüssigkeit) ist eine motorentechnische Kenngröße, die das Fließ- und Pumpverhalten von Treibstoffen beschreibt. Die Viskosität beträgt für Rapsöl bei einer Temperatur von 40 °C zirka 35 mm<sup>2</sup>/s und ist etwa 10-mal höher als bei Dieseltreibstoff. Eine Erhöhung der Viskosität verschlechtert bei nicht umgerüsteten Motoren die Fließ- und Pumpfähigkeit sowie das Zerstäubungsverhalten des Treibstoffs, was gerade während der Startphase des Motors häufig zu Problemen führt. Bei Überschreiten des Grenzwerts (Tab. 10) von maximal 38 mm<sup>2</sup>/s (bei 40 °C) können verstärkt Probleme beim Kaltstart und Ablagerungen an Düsen und Ventilen auftreten. Abbildung 12 zeigt, dass die Viskosität von Rapsöl mit steigender Temperatur abnimmt und erst bei konventionellem Dieseltreibstoff Temperaturen von 60 bis 70 °C mit vergleichbaren Viskositätswerten erreicht. Auch Fettsäuremuster und Ölalterungsgrad beeinflussen die Viskosität.

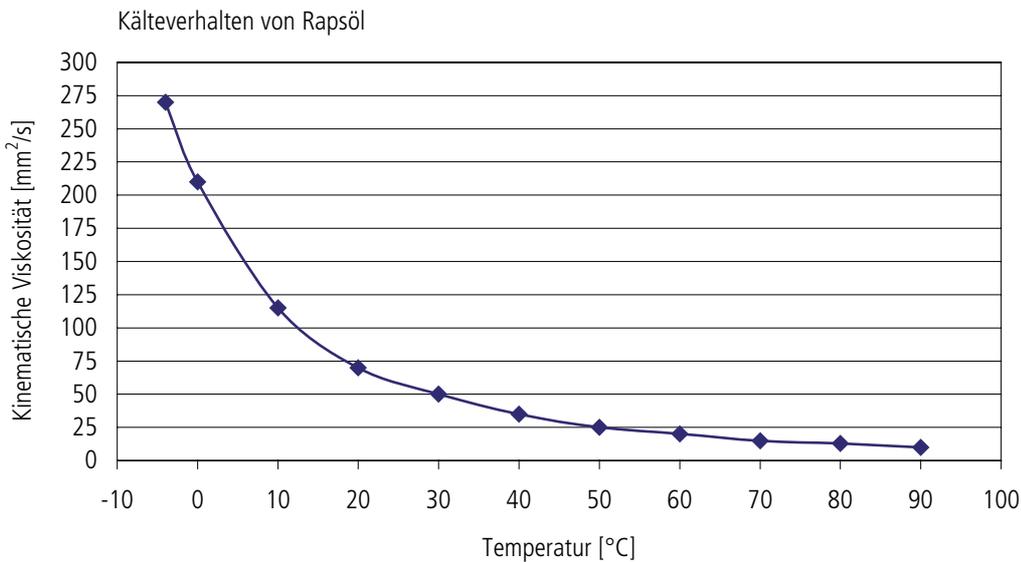


Abb. 12: Viskositäts-Temperatur-Verhalten von kalt gepresstem Rapsöl (Quelle: Eder, 2004).

#### Kälteverhalten

Der Cloud Point (auch Stockpunkt genannt) beschreibt das Kälteverhalten eines Treibstoffs und gibt Auskunft darüber, bis zu welcher Temperatur der Treibstoff pumpfähig ist. Rapsöl wird bei Temperaturen unter  $-10\text{ °C}$  spätestens nach drei Tagen fest. Bei Temperaturen von  $-25\text{ °C}$  bleibt es hingegen nur 6 Stunden flüssig. Diese für die motorische Nutzung und für die Treibstofflagerung ungünstige Eigenschaft muss durch technische Massnahmen ausgeglichen werden.

#### Zündwilligkeit (Cetanzahl)

Eine Beschreibung der Zündwilligkeit von Rapsöl ist nicht möglich, bzw. aussagekräftig. Das hierfür angewendete Prüfverfahren erfolgt in einem Prüfmotor für Dieseltreibstoff.

#### Koksrückstand

Der Koksrückstand beschreibt die Tendenz eines Treibstoffs, bei der Verbrennung kohlenstoffhaltige Rückstände zu bilden. Rapsöl weist einen Koksrückstand von etwa 0,3 Masse-% auf. Erfahrungen zeigen, dass bei Koksrückständen unter 0,4 Masse-% keine treibstoffbedingten Betriebsstörungen in pflanzenöltauglichen Motoren auftreten.

#### Jodzahl

Die Jodzahl ist ein Mass für die mittlere Anzahl an Doppelbindungen der Fettsäuremoleküle. Durch sie wird ausgesagt, wie viel Gramm Jod von 100 g Öl gebunden werden kann. Je niedriger die Jodzahl ist, desto höher liegt der Sättigungsgrad des Pflanzenöls. Die Jodzahl gibt Aufschluss über die Neigung des Pflanzenöls zu Ablagerung im Brennraum und an Einspritzdüsen bei der motorischen Verbrennung. Bei einer Jodzahl von über 120 g/100 g kann bereits eine verstärkte Verkokung im Motorbrennraum hervorgerufen werden. Zusätzlich sind Pflanzenöle mit einer grossen Jodzahl meist weniger alterungsbeständig und neigen somit eher zum Verharzen. Rapsöl ist bei einer mittleren Jodzahl von zirka 115 g/100 g in kühler, dunkler Umgebung und Vermeidung von oxidationsfördernden Bedingungen weitgehend lagerungsstabil.

#### Schwefelgehalt

Rapsöl besitzt einen sehr niedrigen Schwefelgehalt von weniger als 0,001 Masse-%, somit werden bei der Verbrennung nur geringe Mengen an SO<sub>x</sub> und partikelgebundene Sulfate freigesetzt. Daneben sichert schwefelarmer Treibstoff langfristig hohe Umsetzungs-

raten von Kohlenmonoxid-, Kohlenwasserstoff- und Aldehydemissionen in Oxidationskatalysatoren. Der Grenzwert für Rapsöltreibstoff beträgt maximal 0,002 Masse-%.

### **Variable Eigenschaften**

#### *Gesamtverschmutzung*

Die Gesamtverschmutzung beschreibt den Massenanteil ungelöster Fremdstoffe (Partikel) in Rapsöl. Diesem Kennwert ist eine hohe Bedeutung beizumessen, da hohe Fremdstoffgehalte zu Verstopfungen von Filtern und Einspritzdüsen führen. Zudem erhöht sich die Gefahr von Schäden an der Einspritzpumpe und von Ablagerungen im Brennraum. Der Grenzwert der Gesamtverschmutzung (Tab. 10) wurde auf maximal 25 mg/kg festgelegt. Jedoch wird dieser Wert in der Praxis häufig überschritten. Somit kommt es häufig zu motorischen Betriebsstörungen, die auf verunreinigtes Rapsöl zurück zu führen sind.

#### *Neutralisationszahl*

Die Neutralisationszahl bzw. Säurezahl ist ein Mass für den Anteil freier Fettsäuren im Rapsöl. Sie beschreibt die Menge an Kalilauge, die für die Neutralisation der freien Fettsäuren im Pflanzenöl erforderlich ist. Die Neutralisationszahl wird stark durch den Raffinationsgrad und dem Alterungsgrad beeinflusst. Der Grund hierfür ist, dass im Öl enthaltenes Wasser und Mikroorganismen eine hydrolytische Spaltung der Triglyceride hervorrufen. Die dabei abgespalteten Fettsäuren führen zu einem Anstieg der Neutralisationszahl und verursachen Korrosion, Verschleiss und Rückstandsbildung im Motor. Der Grenzwert der Neutralisationszahl bei Rapsöltreibstoff liegt bei 2,0 mg KOH/g (Tab. 10).

#### *Oxidationsstabilität*

Die Oxidationsstabilität beschreibt den Alterungszustand und damit die Lagerfähigkeit eines Treibstoffs. Hohe Temperaturen und Sauerstoffeintrag bewirken eine beschleunigte Ölalterung. Dabei entstehen unlösliche Verbindungen, welche sowohl Filter als auch Treibstoffleitungen verstopfen können. Zusätzlich besteht die Gefahr, dass das vorgealterte Rapsöl ins Motoröl gelangt und dort die Schmierfähigkeit des Motoröls beeinträchtigt.

#### *Phosphorgehalt*

Phosphor liegt beim Rapsöl in Form von Phospholipiden vor. Diese bewirken eine Minderung der Oxidationsstabilität sowie eine Senkung der Verbrennungstemperatur und sind in Ablagerungen im Motor nachweisbar. Ausserdem ist Phosphor wie Schwefel ein Katalysatorgift. Der Gehalt an Phosphor im Treibstoff kann beim Herstellungsprozess (Raffinationsgrad in zentralen Anlagen, Pressung in dezentralen Anlagen) von Rapsöl bestimmt werden. Der Phosphorgehalt bei Rapsöl sollte nicht mehr als 15 mg/kg (Tab. 10) betragen.

#### *Aschegehalt*

Der Aschegehalt definiert den Anteil anorganischer Stoffe im Treibstoff. Der Aschegehalt sollte den Wert von 0,01 Masse-% nicht überschreiten (Tab. 10), da es sonst zu Abreibungen in Einspritzsystemen führen kann.

#### *Wassergehalt*

Der Wassergehalt von Rapsölen wird hauptsächlich durch die Feuchte der Ölsaart beeinflusst. Zusätzlich kann sich der Wassergehalt durch unsachgemässe Lagerung des Rapsöls erhöhen. Das im Rapsöl befindliche Wasser kann bei niedrigen Temperaturen gefrieren und zu Filterverstopfungen führen. Zudem besteht die Gefahr, dass das freie Wasser in Hochdruckeinspritzsystemen Schäden an Pumpen und Düsen hervorrufft. Ein zu hoher Wassergehalt im Rapsöl begünstigt zudem das Wachstum von Mikroorganismen während der

Lagerung, was wiederum die Ölalterung beschleunigt. Bei einem Wassergehalt von 0,075 Masse-% (Tab. 10) sind keine negativen Begleiterscheinungen zu erwarten.

### 4.3.2 Rapsölmethylester (RME)

Die Eigenschaften, die RME erfüllen muss, sind in der europäischen Norm EN 14214 vorgeschrieben (Tab. 12). Einige wichtige Kenngrößen werden im folgenden beschrieben und erklärt.

#### *Cetanzahl*

Die Cetanzahl ist ein Mass für die Zündwilligkeit von Dieseltreibstoff. Cetan ist ein langkettiger Kohlenwasserstoff, welcher unter dem Einfluss von hohen Temperaturen und hohem Druck besonders gut zündet, ohne dabei eine Zündflamme oder einen Funken zu benötigen. Als Referenztreibstoff wurde Cetan eine Cetanzahl von 100 zugeordnet. Je höher

**Tab. 12. Europäische Norm EN 14214.**

Eigenschaft	Einheit	Unterer Grenzwert	Oberer Grenzwert	Prüfverfahren
Ester	% (m/m)	96,5	–	pr EN 14103
Dichte bei 15°C	kg/m <sup>3</sup>	860	900	EN ISO 3675 EN ISO 12185
kinematische Viskosität bei 40°C	mm <sup>2</sup> /s	3,5	5,0	EN ISO 3104
Flammpunkt	°C	> 120	–	ISO / CD 3679
Schwefelgehalt	mg/kg	–	10	–
Russrückstand (bei 10% Destillationsrückstand)	% (m/m)	–	0,3	EN ISO 10370
Cetanzahl	–	51,0	–	EN ISO 5165
Asche (Sulfat-Asche)	% (m/m)	–	0,02	ISO 3987
Wassergehalt	mg/kg	–	500	EN ISO 12937
Gesamtverschmutzung	mg/kg	–	24	EN 12662
Korrosionswirkung auf Kupfer (3h bei 50°C)	Korrosionsgrad	1		DIN ISO 2160
Thermische Stabilität				
Oxidationsstabilität, 110°C	Stunden	6	–	pr EN 14112
Säurewert	mg KOH/g	–	0,5	pr EN 14104
Jodwert		–	120	pr EN 14111
Gehalt an Linolensäure-Mehylester	% (m/m)	–	12	pr EN 14103
Gehalt an Fettsäure-Methylestern mit mehr als 3 Doppelverbindungen	% (m/m)	–	1	-
Methanolgehalt	% (m/m)	–	0,2	pr EN 14110
Monoglyceridgehalt	% (m/m)	–	0,8	pr EN 14105
Diglyceridgehalt	% (m/m)	–	0,2	pr EN 14105
Triglyceridgehalt	% (m/m)	–	0,2	pr EN 14105
Freies Glycerin	% (m/m)	–	0,02	pr EN 14105 pr EN 14106
Gesamt Glycerin	% (m/m)	–	0,25	pr EN 14105
Alkaligehalt (Na + K)	mg/kg	–	5	pr EN 14108 pr EN 14109
Phosphorgehalt	mg/kg	–	10	pr EN 14107

Quelle: europäische Kommission, 2005

die Cetanzahl eines Dieseltreibstoffs ist, umso besser laufen Zündung und Verbrennung ab und umso weicher und runder läuft der Motor. RME besitzt ohne Zusatz von Additiven eine Cetanzahl von 56 bis 58. Somit erfüllt RME die Forderung der Motorenhersteller nach einem qualitativ hochwertigen Treibstoff mit guter Zündwilligkeit. Konventionelle Dieseltreibstoffe weisen hingegen eine Cetanzahl von 50 bis 52 auf und müssen durch Zusatz von Zündbeschleunigern auf Werte von 53 bis 54 erhöht werden.

#### *Schwefelgehalt*

Der Schwefelgehalt von RME liegt bei maximal 0,001 %. Hingegen weist konventioneller Dieseltreibstoff einen um ein Vielfaches höheren Schwefelgehalt auf. Aufgrund der strengen Abgasverordnung muss dieser unter hohem Energieaufwand und zusätzlicher CO<sub>2</sub>-Emission und einem daraus resultierenden Verlust der Eigenschmierfähigkeit gesenkt werden. Der geringe Schwefelgehalt von RME erlaubt den Einsatz eines Oxidationskatalysators (ufop 2004).

#### *Schmierfähigkeit*

RME besitzt eine sehr gute Eigenschmierfähigkeit. Ein Maß für die Schmierfähigkeit ist der so genannte HFRR-Wert. Je geringer der HFRR-Wert, desto besser der Treibstoff. Hochentschwefelter konventioneller Dieseltreibstoff hat ohne die Zugabe von Additiven einen HFRR-Wert von 500 oder höher. Der Grenzwert der Norm bei Dieseltreibstoff liegt aber bei 450. Konventioneller Dieseltreibstoff muss daher additiviert werden. RME weist hingegen einen HFRR-Wert von zirka 200 auf. Somit eignet sich RME durch die Zugabe von nur 1 % zum konventionellen Dieseltreibstoff als gutes Schmierfähigkeitsadditiv. Beim Betrieb eines für RME freigegebenen Dieselmotors nimmt der Verschleiss des Motors deutlich ab (ufop 2004).

#### *Verbrennung*

RME enthält etwa 11 % Sauerstoff. Dieser Sauerstoffanteil führt zu einem besseren Verbrennungsablauf und damit zu geringerer Russbildung. Die treibstoffbedingten Rückstände im Motorinneren werden deutlich reduziert (ufop 2004).

#### *Oxidationsstabilität*

Die Treibstoffstabilität ist ein wichtiges Maß, wenn es um die Haltbarkeit von Treibstoffen geht. Wird RME hohen Temperaturen und häufigem Kontakt mit Sauerstoff sowie dem Einfluss von UV-Strahlung oder dem Kontakt mit Buntmetallen ausgesetzt, altert er schneller als konventioneller Dieseltreibstoff. Beim Oxidationsprozess öffnen sich Doppelbindungen in den Fettsäuren des RME und reagieren mit Sauerstoff. Das ist der Ausgangspunkt für eine Polymerisation des Treibstoffes. Hierbei entstehen langkettige Moleküle, die den Treibstoff verdicken lassen und zu Verklebungen in Einspritzpumpen oder Filterverstopfungen führen können. Um diesen Effekt gänzlich zu vermeiden, werden bei der Produktion von RME Additive (sogenannte Oxidationsstabilisatoren) verwendet.

#### *Wassergehalt*

Ein weiterer wichtiger Faktor, welcher sich auf RME destabilisierend auswirken kann, ist die Anwesenheit von Wasser. RME hat im Gegensatz zu konventionellem Dieseltreibstoff die Eigenschaft, Wasser anziehend (hygroskopisch) zu sein. Hierbei wird Wasser molekular vom RME gebunden, welches die Entstehung von freiem Wasser erheblich mindert. Aufgrund dieser Eigenschaft entzieht RME Mikroorganismen die Basis für deren Entwicklung. Die oft diskutierten negativen Auswirkungen mikrobiologischer Vorgänge in den Treibstoffschläuchen sind bisher zwar postuliert worden, jedoch ist kein einziger derartiger Schadensfall bekannt (ufop 2004).

*Wintertauglichkeit*

Damit RME ebenso wintertauglich wie konventioneller Dieseltreibstoff ist, muss er eine Kältefestigkeit von  $-20\text{ °C}$  (gemessen als CFPP-Wert) erfüllen. Dieser Wert wird von der europäischen Norm EN 14214 (Tab. 12) gefordert. Bei der Herstellung von RME wird dieser Wert durch Zugabe von Additiven erreicht. Andernfalls kommt es wie beim konventionellen Dieseltreibstoff zur Flockenbildung (Paraffinbildung), die zu Verstopfung der Treibstoffleitungen, Einspritzpumpe usw. führt. Bei RME dagegen kommt es zu einer Verdickung, die im Gegensatz zur Paraffinausscheidung des konventionellen Dieseltreibstoffes umkehrbar ist. Bei einer Erhöhung der Temperatur wird RME wieder dünnflüssiger. RME auf der Basis von Rapsöl besitzt rohstoffbedingt auch ohne Additivierung bereits einen CFPP-Wert von zirka  $-10$  bis  $-12\text{ °C}$  (ufop 2004). Durch spezielle Umesterungsvorgänge ist es möglich, dass RME einen CFPP-Wert von zirka  $-30\text{ °C}$  erreicht.

*Flammpunkt*

Nach EN 14214 hat RME einen Flammpunkt von über  $120\text{ °C}$  und weist damit ein geringes Gefährdungspotenzial auf. Aus diesem Grunde ist RME kein Gefahrgut. Für die Lagerung und den Umgang ist das ein Vorteil gegenüber konventionellem Dieseltreibstoff (Flammpunkt  $80\text{ °C}$ ).

*Energiegehalt*

Aufgrund des niedrigeren spezifischen Energiegehalts von RME (Heizwert  $33,0\text{ MJ/l}$ ) gegenüber konventionellem Dieseltreibstoff (Heizwert  $35,4\text{ MJ/l}$ ) ist ein Mehrverbrauch zu erwarten. Rechnerisch würde somit  $1\text{ l RME}$  zirka  $0,93\text{ l}$  konventionellen Dieseltreibstoff ersetzen, was einem Mehrverbrauch mit RME von  $7\%$  entspricht. Prüfstandsmessungen bestätigen diese Werte (Wolfensberger, 1993). Versuche zeigten aber, dass der Mehrverbrauch im praktischen Betrieb niedriger ausfällt, als die formale Rechnung ergibt. In Flottenversuchen wurde ein Mehrverbrauch bis  $5\%$  gegenüber dem Einsatz von Dieseltreibstoff ermittelt (ufop 2004).

*Biologische Abbaubarkeit*

In Deutschland hat die Kommission zur Bewertung Wasser gefährdender Stoffe (KBWS), für die das Umweltbundesamt zuständig ist, RME auf seine Umweltauswirkungen testen lassen und im Ergebnis als schwach Wasser gefährdend beurteilt und es damit in die Wassergefährdungsklasse (WGK) 1 eingestuft. Konventioneller Dieseltreibstoff ist dagegen als Wasser gefährdend (WGK 2) eingestuft worden.

RME ist schnell biologisch abbaubar. Es wurde nachgewiesen, dass RME in 21 Tagen zu über  $98\%$  biologisch abgebaut wird (ufop 2004). Die Bestimmung der Bioabbaubarkeit nach CEC L-33-T-82 der EMPA (Nr. 126829/10) im Auftrag der ART ergab 1991 die Abbaubarkeit von  $88\%$ .

## 4.4 Nutzung als Treibstoff

### 4.4.1 Rapsöl

Für den Betrieb von konventionellen Dieselmotoren mit Rapsöl sind Umrüstungsmaßnahmen am Treibstoff- und Einspritzsystem notwendig. Wird ein konventionelles Dieselfahrzeug ohne Umrüstung mit Rapsöl betrieben, so ist mit motorischen Schadensfällen zu rechnen. Grund für die Anpassung des Motors an Rapsöl sind vor allem dessen hohe Zähflüssigkeit sowie das Zünd- und Verbrennungsverhalten. Während der Warmlaufphase ist die Zerstäubung des Rapsöls aufgrund der hohen Viskosität sowie der niedrigen Betriebstemperatur des Motors zu gering, was zu einer unvollständigen Verbrennung führt. Es kommt zu Verkokung und Ablagerungen von Verbrennungsrückständen an Ventilen und

Kolbenringen. Zudem besteht die Gefahr, dass sich unverbranntes Rapsöl mit dem Motoröl vermischt, wodurch die Schmierfähigkeit des Motoröls stark eingeschränkt wird.

Um konventionelle Dieselmotoren mit Rapsöl betreiben zu können, sind Änderungen bzw. Umbauten an den Motoren speziell an der Treibstoffanlage erforderlich. Die gebräuchlichsten Umrüstkonzeppte sind dabei das Ein-Tank- sowie das Zwei-Tank-System. Nachfolgend werden beide Umrüstkonzeppte erläutert.

### **Ein-Tank-System**

Beim Ein-Tank-System wird der Dieselmotor ausschliesslich mit Rapsöl betrieben. Um eine saubere und rückstandsfreie Verbrennung des Rapsöls zu gewährleisten, sind neben einer beheizten Treibstoffanlage noch weitere Modifizierungen am Treibstoffsystem und am Motor erforderlich. Aufgrund der hohen Zündtemperatur von Rapsöl, müssen beim Kaltstart für die Rapsölverdampfung und -verbrennung ausreichend hohe Temperaturen im Brennraum geschaffen werden. Hierbei werden unter anderem leistungsstarke und nachglühfähige Glühkerzen benötigt. Diese Glühkerzen sorgen für ausreichende Hitze im Brennraum, bis das Vorwärmssystem und die steigende Motorentemperatur die Zusatzheizung unnötig machen. Die Vorglühzeit ist im Vergleich zum Dieselmotor verlängert.

### **Zwei-Tank-System**

Beim Zwei-Tank-System wird der Dieselmotor sowohl mit konventionellem Dieseltreibstoff wie auch mit Rapsöl betrieben. Beim Start und während der Warmlaufphase wird dabei Dieseltreibstoff verwendet, bevor für den Dauerbetrieb auf Rapsöl umgeschaltet wird. Die Umschaltung geschieht erst, wenn das Rapsöl eine Temperatur über 70 °C erreicht. Ab dieser Temperatur ist eine optimale Zerstäubung des Rapsöls im Brennraum bzw. in den Vorkammern gewährleistet. Beim Abstellen des Motors muss wieder auf Dieselmotorbetrieb umgestellt werden. Dabei werden Treibstoffleitungen, Pumpe und Einspritzdüsen mit Dieseltreibstoff gespült. Diese Massnahme ermöglicht wieder einen problemlosen Kaltstart.

In welchem Umfang die erforderlichen Umrüstungen stattfinden, ist vom Umrüster abhängig. Allen Umrüstkonzeppten gemeinsam ist vor allem der Einbau von Komponenten zur Treibstoffvorwärmung, leistungsfähigen Treibstoffförderpumpen, Treibstoffleitungen mit grösseren Querschnitten und Treibstofffiltern sowie die Veränderung von Einspritzzeitpunkt und Einspritzdruck. In der Praxis zeigt sich immer wieder, dass sich die Umrüstmassnahmen im technischen Aufwand und in ihrer Tiefe deutlich voneinander unterscheiden und nicht alle Umrüstkonzeppte den technischen Erwartungen gerecht werden. Bei allen Umrüstkonzeppten sind die vom Fahrzeughersteller empfohlenen Wartungsintervalle, zum Beispiel für Motorölwechsel, unbedingt einzuhalten. Zu beachten ist ebenfalls, dass durch die Umrüstmassnahmen die Gewährleistungspflicht des Fahrzeugherstellers erlischt.

Bei in Deutschland durchgeführten dreijährigen Demonstrationsvorhaben «100-Traktoren-Demonstrationsprojekt» wurden über 100 Traktoren auf den Rapsölbetrieb umgebaut. Dabei wurden sowohl das Ein-Tank- als auch das Zwei-Tank-System eingesetzt. Trotz sorgsamster Umbauten kam es bei 40 % der teilnehmenden Traktoren zu schweren Störungen. Bei den restlichen Traktoren sind keine bzw. geringe Schäden aufgetreten. Die Betriebsstörungen reichten von Leistungsverlusten, Kaltstartproblemen, schwergängigen Auslassventilen, defekten Einspritzpumpen bis hin zu Brennraumschäden.

Angesichts des technischen Entwicklungsstandes stellt der Einsatz von Rapsöl als Treibstoff zurzeit erst in Einzel- bzw. Nischenfällen eine Alternative zu Dieseltreibstoff dar. Die Treibstoff- und Motoren- bzw. Umrüstkonzepptentwicklung ist in einigen Fällen erfolgreich angewendet, jedoch in grösserem Umfang noch nicht auf dem Stand einer kontinuierlichen Qualitätsproduktion bzw. der Serienreife. Der Bau eines serienmässig für Rapsöl geeigneten Motors wird sowohl von der Automobilindustrie wie auch Traktorindustrie derzeit nicht vorangetrieben.

#### 4.4.2 Rapsölmethylester (RME)

In einigen europäischen Ländern hat sich Rapsölmethylester in den vergangenen Jahren zu einem etablierten Treibstoff entwickelt. Nicht zuletzt, da durch die im November 2003 in Kraft getretene europäische Norm EN 14214 eine einheitliche Qualität gewährleistet wird.

Durch die Umesterung von Rapsöl zu Rapsölmethylester erreicht man eine weitgehende Angleichung an die Eigenschaften von konventionellem Dieseltreibstoff. Beide Treibstoffe ähneln sich hinsichtlich Dichte, Viskosität und Zündwilligkeit. Damit ist Rapsölmethylester grundsätzlich als Treibstoff für moderne Einspritzpumpensysteme und Dieselmotoren geeignet. Rapsölmethylester kann sowohl als Reintreibstoff als auch als Mischtreibstoff eingesetzt werden. Nachfolgend werden beide Varianten erläutert.

##### Reintreibstoff

Rapsölmethylester kann prinzipiell als Reintreibstoff in konventionellen Dieselmotoren eingesetzt werden. Aufgrund lösungsähnlicher Eigenschaften müssen Modifikationen am Fahrzeug (Austausch von Treibstoffschläuchen, Dichtungen) vorgenommen werden. Einige Fahrzeughersteller, wie der Volkswagen-Konzern, haben einige ihrer Modelle für RME tauglich erklärt. Bei den freigegebenen Modellreihen sind empfindliche Kunststoff- und Gummibauteile bereits vom Werk aus durch RME resistente Materialien ersetzt worden.

Aufgrund der neuen EU-Abgas-Norm Euro IV, die 2005 in Kraft getreten ist, werden derzeit Freigaben nur noch in Verbindung mit speziellen Biodiesel-Paketen erteilt. Hauptgrund sind die relativ hohen Stickoxid-Emissionen von Rapsölmethylester. Durch den Einsatz als Reintreibstoff können die strengeren Werte dieser Norm nicht mehr eingehalten werden. Mit Hilfe eines neu entwickelten Sensors, der verschiedene Treibstoffe oder Treibstoffmischungen erkennt, kann das Motormanagement auf das jeweilige Treibstoffmischungsverhältnis eingestellt und die Verbrennung entsprechend optimiert werden. Dadurch ist es möglich, dass die Abgasgrenzwerte von Euro IV unterschritten werden. Dieser Sensor ist mittlerweile als Zusatzausrüstung für einige neue VW- und Audi-Modelle erhältlich.

Bevor Rapsölmethylester in Fahrzeugen mit konventionellen Dieselmotoren eingesetzt wird, muss abgeklärt werden, ob eine Freigabe seitens des Fahrzeugherstellers besteht. Andernfalls könnten negative Begleiterscheinungen hervorgerufen werden.

##### Mischtreibstoff

Rapsölmethylester kann aufgrund seiner Eigenschaften in beliebigem Mischungsverhältnis mit konventionellem Dieseltreibstoff in Dieselmotoren verbrannt werden. Wird Rapsölmethylester zu 5 % dem konventionellen Dieseltreibstoff zugemischt, müssen keine Veränderungen an konventionellen Dieselmotoren vorgenommen werden. Bei der Zugabe von 5 Vol.-% werden laut Mineralöl- und Automobilindustrie keine Probleme mit der Einhaltung der Euro IV-Abgas-Norm erwartet. Nachfolgend werden mögliche Probleme, die beim Einsatz von Rapsölmethylester entstehen können, erläutert.

Einige im Fahrzeugbau eingesetzte Elastomere (zum Beispiel Treibstoffschläuche, Dichtungen) sind gegenüber Rapsölmethylester bei längerem Gebrauch nicht beständig. Die Folge ist beispielsweise ein Aufquellen der Kunststoffe. Dies liegt daran, dass Rapsölmethylester lösungsähnliche Eigenschaften hat, die Kunststoff- und Gummibauteile wie Dichtungen und Benzinleitungen im Motor angreifen. Daher ist ein Ersatz durch Fluorkautschuk-Elastomeren erforderlich. Einige Hersteller bieten schon seit längerem Fahrzeuge an, die serienmässig mit RME-beständigen Materialien ausgestattet sind. Inzwischen gibt es jedoch von vielen Fahrzeugherstellern geeignete Nachrüstsätze.

In seltenen Fällen kann es durch Rapsölmethylester zu einer Verdünnung des Motoröls bei direktspritzenden Dieselmotoren kommen. Dieses Problem besteht meist dann, wenn

der Motor während seiner Betriebsdauer mit langen Leerlauf- und Teillastphasen betrieben wird. Mit sinkender Spritzmenge sinkt auch die Zerstäubungsqualität der Einspritzdüse. Dadurch gelangen tendenziell mehr unverbrannte Treibstofftröpfchen an die Zylinderwand und damit in den Schmierkreislauf. Da Rapsölmethylester einen hohen Flammpunkt hat, dunstet er im heissen Motoröl weniger aus als konventioneller Dieseltreibstoff, was zu einer Erhöhung der Treibstoffkonzentration im Motoröl führt. Durch hohe Temperaturen im Schmierkreislauf kann sich Rapsölmethylester allmählich zersetzen, was zu festen oder schleimartigen Rückständen führt. Dies und die allgemeinen Verschlechterungen der Schmiereigenschaften des Motoröls bei hoher Treibstoffkonzentration können zu erhöhtem Motorverschleiss führen. Aus Sicherheitsgründen schreiben viele Nutzfahrzeughersteller beim Einsatz von Rapsölmethylester kürzere Ölwechselintervalle vor.

Werden Fahrzeuge nach längerem Mineralölbetrieb auf Rapsölmethylester umgestellt, besteht die Möglichkeit, dass sich Altablagerung des konventionellen Dieseltreibstoffes ablösen und in den Treibstofffilter gelangen. Fachleute empfehlen daher nach der Umstellung auf Rapsölmethylester nach zwei bis drei Tankfüllungen den Treibstofffilter ausserhalb der üblichen Revisionsfristen zu wechseln, um den Filterversatz durch Altablagerungen zu verhindern. Normgerechtes Rapsölmethylester selbst führt nicht zum vorzeitigen Filterverschluss.

Lackflächen können durch Rapsölmethylester angegriffen werden. Mit Rapsölmethylester in Berührung gekommene Lackflächen sollten daher gereinigt werden.

## 4.5 Entstehende Nebenprodukte und deren Verwendung

### Presskuchen und Extraktionsschrot

Bei der Rapsölgewinnung in zentralen und dezentralen Ölgewinnungsanlagen fallen neben Rapsöl grosse Mengen an festen Rückständen an. Hierbei handelt es sich um Presskuchen und Extraktionsschrot (Tab. 13). Presskuchen, der beim Pressverfahren in klein- und grosstechnischen Anlagen entsteht, enthält zwischen 10 bis 20 % Restöl. In grosstechnischen Ölgewinnungsanlagen wird der Presskuchen mit Hilfe der Lösemittlextraktion

**Tab. 13. Zusammensetzung von Rapspresskuchen und Rapsextraktionsschrot in Trockenmasse.**

Bestandteile		Rapspresskuchen	Rapsextraktionsschrot
Rohprotein	%	30–36	35–41
Rohfett	%	14,0–21,7	2,0–2,7
Rohfaser	%	7,8–13,7	12,0–12,9
Rohasche	%	6,0–6,7	7,0–7,9
Kalzium	g/kg	5,6–7,3	7,1
Phosphor	g/kg	10,0–12,0	12,3
Natrium	g/kg	0,1–0,3	0,13
Kalium	g/kg	11,8	14,5
Magnesium	g/kg	4,5	6,2
Schwefel	g/kg		5,4–17,0
Eisen	mg/kg		230
Kupfer	mg/kg		11
Mangan	mg/kg		62
Zink	mg/kg		75

Quelle: Kaltschmitt, 2001

weiter entölt. Das dabei entstehende Extraktionsschrot weist ein Restölgehalt von 0,5 bis 3 % auf. Beide Nebenprodukte werden aufgrund ihres Proteinreichtums als wertvolles Eiweissfuttermittel verwendet.

In der Vergangenheit führten hohe Glucosinulatgehalte zu einer verminderten Futteraufnahme und gelegentlich zu gesundheitlichen Störungen. Seit Einführung der 00-Rapsorten, welche geringere Glucosinulatgehalte aufweisen, können beide Produkte in größerer Masse in der Tiernahrung eingesetzt werden.

Neben der Verwendung als hochwertiges Futtermittel könnten Rapskuchen und Rapsextraktionsschrot als organischer Dünger, als Brennstoff oder als Rohstoff für die Biogasproduktion verwendet werden. Aus wirtschaftlichen Gründen wurden bisher beide Produkte als Futtermittel verwertet.

### **Glycerin**

Glycerin ist ein weiteres Koppelprodukt, dass bei der Umesterung von Rapsöl zu Rapsölmethylester entsteht. Durch entsprechende Aufbereitung kann Glycerin auf eine Reinheit von 99,5 % aufbereitet werden. Seine weitere Verwendung findet Glycerin in der Nahrungsmittel-, Chemie-, Pharma- und Kosmetikindustrie.

## 5. Bioethanol als Treibstoff

### 5.1 Rohstoffe

Als Rohstoffe für die Ethanolerzeugung können zucker-, stärke- und cellulosehaltige Pflanzenkomponenten genutzt werden. Nachfolgend werden hauptsächlich diejenigen Rohstoffe behandelt, die in Mitteleuropa, speziell in der Schweiz, produziert werden.

#### 5.1.1 Zuckerhaltige Rohstoffe

Zuckerhaltige Rohstoffe sind weltweit die wichtigsten Ausgangsstoffe für die Ethanolerzeugung. Zu ihnen zählen im Wesentlichen die Zuckerrübe, die Zuckerhirse und das Zuckerrohr. Etwa drei Fünftel der globalen Ethanolproduktion erfolgt hierbei allein auf der Basis von Zuckerrohr und Zuckerrüben (Schmitz 2003). Die Analysewerte dieser beiden Rohstoffe sind in Tabelle 14 aufgeführt.

Tab. 14. Durchschnittliche Zusammensetzung von Zuckerrüben und Zuckerrohr.			
Bestandteile		Zuckerrüben	Zuckerrohr
Wasser	% FM	74,0–2,0	72,0–73,0
Zucker	% TM	68,0–82,0	50,0–53,0
Zucker	% FM	17,0–17,5	
Rohprotein	% TM	6,5–6,9	6,9–7,2
Fett	% TM	0,5–0,7	1,9–2,1
Rohfaser	% TM	5,8–6,0	30,0–33,0
Asche	% TM	5,3–5,6	5,8–6,2

Quelle: Kaltschmitt, 2001

**Zuckerrübe:** In Mitteleuropa ist die Zuckerrübe als zuckerhaltiger Rohstoff für die Ethanolproduktion von Interesse. Sie weist einen durchschnittlichen Zuckergehalt von 17,0 bis 17,5 % der Frischmasse auf. Hinsichtlich der Trockensubstanz (18 bis 26 %) macht dies einen Zuckeranteil von etwa 70 bis 80 % aus. Die durchschnittliche Ausbeute an Zucker liegt bei etwa 15,0 bis 15,5 % der Frischmasse. Im Jahr 2003 wurden in der Schweiz auf knapp 17 540 ha Zuckerrüben angebaut. Der Ertrag (Ertrag ermittelt als Quotient aus abgelieferter Ware und Anbaufläche) lag bei 72,1 t/ha. Dies entspricht einem Zuckerertrag von etwa 11 t/ha. Der Rohstoffbedarf an Zuckerrüben liegt bei 9,3 t/m<sup>3</sup> Ethanol (Schmitz 2003). Bei einem Zuckerrübenenertrag von 72,1 t/ha ergibt sich somit eine Ethanolausbeute von etwa 7750 l/ha.

Gegenwärtig wird Ethanol auf Zuckerrübenbasis überwiegend aus Melasse oder direkt aus Zuckerrüben (Dicksaft) gewonnen. Beide Produkte entstehen bei der Zuckerherstellung. Dabei handelt es sich bei Melasse (50 % Zuckeranteil) um ein Nebenprodukt und beim Dicksaft (63 % Zuckeranteil) um ein Zwischenprodukt. Dicksaft ist lagerfähig und steht der Ethanolproduktion ganzjährig zur Verfügung. Bereits heute liegen ausreichende Erfahrungen mit der grosstechnischen Erzeugung von Ethanol aus Melasse und Dicksaft vor. Somit stellen Zuckerrüben eine reelle Option für die Produktion von Bioethanol dar.

**Zuckerhirse:** Als weitere Zuckerpflanze könnte die Zuckerhirse in Betracht gezogen werden. Ihr Zuckergehalt beträgt etwa 8,8 % in der Frischmasse. Aufgrund von anbau- und verfahrenstechnischer Probleme stellt der industrielle Einsatz der Zuckerhirse zur Ethanolherstellung in Europa bisher keine relevante Option dar. Deshalb wird auf die Zuckerhirse als zuckerhaltiger Rohstoff für die Ethanolproduktion, nicht weiter eingegangen.

### 5.1.2 Stärkehaltige Rohstoffe

Als stärkehaltige Rohstoffe für die Alkoholerzeugung werden vor allem Kartoffeln, Mais sowie die gängigen Getreidearten verwendet. Gegenwärtig stellen stärkehaltige Rohstoffe den zweitgrössten Rohstofflieferanten für die alkoholische Gärung dar. Nachfolgend werden sie kurz dargestellt.

Kartoffel: Die Kartoffel ist in Mitteleuropa der am häufigsten verwendete stärkehaltige Rohstoff für die alkoholische Gärung. Der Stärkegehalt von Kartoffeln beträgt etwa 15 bis 21 % in der Frischmasse (Tab. 15). Die Anbaufläche für Kartoffeln betrug in der Schweiz im Jahr 2003 rund 13 578 ha, der erwirtschaftete Ertrag belief sich auf 33,6 t/ha (SBV 2004). Bei einem Rohstoffeinsatz von zirka 10 t/m<sup>3</sup> Ethanol ergibt sich somit eine Ethanolausbeute von etwa 3360 l/ha.

**Tab. 15. Durchschnittliche Zusammensetzung von Kartoffeln in % Frischmasse.**

Bestandteile	Kartoffel
Wasser	75,0–80,0
Stärke	15,0–21,0
Zucker	0,07–1,5
Dextrin und Pektin	0,2–1,6
Pentosane	0,75–1,0
Rohprotein	1,2–3,2
Fett	0,1–0,3
Rohfaser	0,5–1,5
Asche	0,5–1,5

Quelle: Kaltschmitt, 2001

Kartoffeln stellen für die grosstechnische Ethanolherzeugung einen problematischen Rohstoff dar. Nachteilig sind vor allem die hohen Rohstoff-, Lager- und Verarbeitungskosten, die Reinigung sowie eine eingeschränkte Verwendbarkeit der Schlempe und ein hoher Abwasseranfall.

Getreide: Zu den wichtigsten Getreidearten in Mitteleuropa gehören Weizen, Gerste, Roggen und Triticale. Allerdings sind für die grosstechnische Ethanolherstellung nicht alle Getreidearten gleichermassen geeignet.

Der Getreideanbau für die Ethanolherstellung zielt auf einen hohen Stärkegehalt ab (Tab. 16). Der Stärkegehalt kann durch einen hohen Kornertrag sowie durch einen hohen

**Tab. 16. Durchschnittliche Zusammensetzung der Winterformen unterschiedlicher Getreidearten.**

Bestandteile		Weizen	Roggen	Triticale	Gerste
Stärke	% FM	67,5	64,6	66,7	66,1
Rohprotein	% FM	13,8	11,3	14,6	12,6
Rohfett	% FM	2,0	1,8	1,8	2,3
Rohfaser	% FM	2,9	2,8	3,0	1,8
Asche	% FM	2,0	2,0	2,0	1,8
Zucker	% FM	3,2	6,3	4,0	7,9

Quelle: Kaltschmitt, 2001

Stärkegehalt im Korn selbst erreicht werden. Tabelle 17 zeigt die Rohstofferrträge verschiedener Getreidearten in der Schweiz.

Mais: Körnermais ist für die Ethanolherstellung grundsätzlich sehr gut geeignet und stellt weltweit die wichtigste Ressource für die Ethanolproduktion dar. 2003 wurde in der Schweiz eine Fläche von 21 099 ha mit Mais angebaut, dabei wurde ein Ertrag von 8,6 t/ha erwirtschaftet (SBV 2004). Der Rohstoffeinsatz von Mais beträgt 2,4 t/m<sup>3</sup> Ethanol. Somit ergibt sich ein Ethanolertrag von 3583 l/ha.

**Tab. 17. Rohstofferrträge der Schweiz zur Ethanolherstellung im Jahr 2003.**

	Bewirtschaftete Fläche, 2003 [ha]	Ertrag (Frischmasse) [t/ha]	Erforderlicher Rohstoffeinsatz pro Liter Ethanol [t/m <sup>3</sup> ]	Ethanolertrag [l/ha]
Weizen	84 428	5,21	2,7	zirka 1900
Roggen	1 990	5,28	2,85	zirka 1850
Triticale	12 913	5,26	2,75	zirka 1900
Gerste	39 368	5,53		

Quelle: Schweiz. Bauernverband, 2005; Schmitz, 2003

Als Rohstoff für die Ethanolherstellung kann entweder Körnermais oder Corn-Cob-Mix verwendet werden. Körnermais, der für die Ethanolproduktion eingesetzt wird, muss einen Wassergehalt von maximal 15 % in der Frischmasse, einen Stärkegehalt von mindestens 62 bis 65 % sowie möglichst geringe Rohproteingehalte von 9 bis 10,5 % in der Trockenmasse aufweisen (Tab. 18). Da unter mitteleuropäischen Klimabedingungen die Maisernte erst im Oktober oder November erfolgen kann, ist für die Trocknung der Maiskörner ein hoher Energieaufwand erforderlich. Dieser Nachteil entfällt bei der Verwendung von Corn-Cob-Mix, da die geschroteten und silierten Maiskolben unmittelbar und ohne aufwändige Trocknung der Maische zugegeben werden können.

**Tab. 18. Durchschnittliche Zusammensetzung von Körnermais und Körnermais-Silage in % Frischmasse.**

	Körnermais	Körnermais-Silage
Wasser	15,0	41,6
Stärke	62,6	42,6
Anderer stickstofffreier Extrakt	6,7	5,0
Rohprotein	8,4	5,8
Fett	3,7	2,5
Rohasche	2,0	1,6
Asche	1,5	1,1

Quelle: Kaltschmitt, 2001

Zusammenfassend ist in Tabelle 19 ein Stärken-/Schwächenprofil von zucker- und stärkehaltigen Rohstoffen für die Bioethanolproduktion dargestellt.

### 5.1.3 Lignocellulosehaltige Rohstoffe

Unter lignocellulosehaltigen Rohstoffen versteht man Biomasse mit einem wesentlichen Anteil aus Cellulose, Hemicellulose, Lignin und Pektin. Dabei stellt Cellulose den wichtigsten

**Tab. 19. Stärken-/Schwächenprofil der zucker- und stärkehaltigen Rohstoffe für die Methanolherstellung nach Schmitz, 2003.**

	<b>Stärken</b>	<b>Schwächen</b>
Zuckerrübe	Gute Photosyntheseleistung resultiert in positiver CO <sub>2</sub> -Bilanz	Relativ hohe Anforderungen an Böden, dadurch regionale Begrenzung des Anbaus
	Hohe Flächenproduktivität und hohe Ertragssicherheit	Lagerfähigkeit als Rübe eingeschränkt, aber als Dicksaft ganzjährig verfügbar
	Gute Wirtschaftlichkeit (Konversionskosten)	Hohe Transport- und Logistikkosten
	Erfahrung und gute Verarbeitungseigenschaften bei Ethanolerzeugung	Begrenzter Markt für Koppelprodukte (insb. Vinasse)
	Potenzial zur Kostensenkung bei landwirtschaftlicher Produktion	Hohe Kosten für Abwasserbeseitigung in Zuckerfabrik und Melassebrennerei
	Positive Wirkung in der Fruchtfolge	
Kartoffel	Relativ geringe Ansprüche an Boden	Hohe Rohstoffkosten
	Hohe Flächenproduktivität	Relativ hohe Lagerkosten bei hohem Lagervolumen
		Hohe Verarbeitungskosten
		Eingeschränkte Verwendbarkeit der Schlempe
		Hoher Abwasseranfall
Weizen	Hoher Stärkegehalt, gute Kornausbildung	Relativ hohe Ansprüche an den Boden
	Gute Lagerfähigkeit	Relativ teurer Rohstoff
	Gute Verfügbarkeit; weltweit auf Märkten gehandelt	Im Vergleich zu zuckerhaltigen Rohstoffen und Kartoffeln geringe Flächenproduktivität
	Flächenproduktivität im Vergleich mit anderen Getreidearten hoch	
	Gute Verarbeitungseigenschaften bei der Ethanolerzeugung und hochwertige Kuppelprodukte	
	Relativ geringe Abwassermengen	
Roggen	Vorzüglichkeit auf schwachen Böden	Angebot abhängig v. Marktordnung
	Geringe Ansprüche an Düngung und Pflege	Geringere Ethanolausbeute als bei Weizen und Triticale
	Kostengünstiger Rohstoff	Hoher Proteingehalt (führt andererseits aber auch zu höherwertigen DDGS*)
		Höhere Kosten wegen viskositätssenkender Enzyme und höheren Dampfbedarfs für die DDGS-Trocknung
		Schlempe-Rückführung nur begrenzt möglich
Triticale	Hoher Stärkegehalt, gute Kornausbildung	Relativ geringe Flächenproduktivität
	Nicht so anspruchsvoll wie Weizen im Hinblick auf Bodengüte, Düngung u. Pflege	Wird nicht wie Weizen auf internationalen Märkten gehandelt
	Gute Verarbeitung bei Ethanolerzeugung	Verfügbarkeit am Markt eingeschränkt
	Relativ hohe Ausbeute	
	Vorzüglichkeit auf schwachen Böden	
	Kostengünstiger Rohstoff	
Körnermais	Geringe Ansprüche an Boden	Hoher Düngeraufwand erforderlich
	Kann in Monokultur angebaut werden (keine Fruchtfolge erforderlich) aber dann kein Flächenbeitrag	Trocknung von Mais erfordert hohen Energieaufwand
	Hohe Flächenproduktivität	
	Gute Verfügbarkeit	
	Gut verwertbare Kuppelprodukte	

\*DDGS: Dried Distillers Grains with Solubles = Futtermittel aus pelletierter, getrockneter Schlempe (Wikipedia)

Gerüststoff in Pflanzen dar und ist weltweit das am häufigsten vorkommende Stoffwechselprodukt von Pflanzen. Zu den wichtigsten lignocellulosehaltigen Rohstoffen gehören:

1. Holz

- Primärholz aus vorhandenen Forstkulturen bzw. Waldbeständen;
- Plantagenholz (Pappel, Weide usw.);
- Primärabfälle aus der Forstindustrie (zum Beispiel Schwachholz, Astholz);
- Sekundärholzabfälle aus der Holzverarbeitenden Industrie (zum Beispiel Holz schnitzel);
- Cellulosehaltige Plantagenpflanzen (Chinaschilf, Rutenhirse, Rohrglanzgras oder Futtergräser).

2. Cellulosehaltige Rückstände aus der Landwirtschaft

- Stroh (zum Beispiel Weizen, Roggen, Gerste);
- Bagasse (Zuckerrohr);
- Silagen (Mais, Milo, Rübenblatt, Gras).

3. Häusliche Abfälle

4. Papierabfall

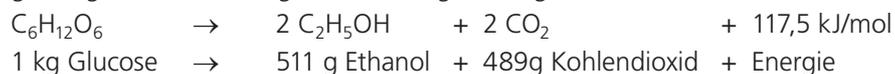
- zum Beispiel Altpapier, Kartonagen

Obwohl die Ethanolherstellung aus lignocellulosehaltigen Rohstoffen weltweit von steigendem Interesse ist, werden zucker- und stärkehaltige Rohstoffe vorerst die wichtigsten Lieferanten für die Ethanolherzeugung bleiben. Bisher existieren zum Teil erhebliche technische Schwierigkeiten, aus cellulosehaltigen Rohstoffen, auf dem Wege der Fermentation Ethanol herzustellen. Zudem verhindern die derzeit hohen Konversionskosten eine wirtschaftliche Ethanolproduktion auf der Basis lignocellulosehaltiger Rohstoffe.

Trotz derzeitiger Probleme stellen cellulosehaltige Rohstoffe mittel- bis langfristig eine viel versprechende Option dar. Dies wird damit begründet, dass das Rohstoffpotenzial lignocellulosehaltiger Rohstoffe flächenmässig um ein Vielfaches grösser ist, als das von zucker- und stärkehaltigen Rohstoffen. Zudem können pro Hektar bewirtschaftete Fläche deutlich höhere Ethanolerträge erwirtschaftet werden. Ausserdem ist damit zu rechnen, dass lignocellulosehaltige Rohstoffe zu wesentlich niedrigeren Einstandspreisen zur Verfügung stehen könnten, als zucker- und stärkehaltige Rohstoffe (Schmitz 2003) und diese Nahrungsmittel nicht konkurrenzieren.

## 5.2 Herstellung von Bioethanol

Alkohole können im Unterschied zu Pflanzenölen nicht direkt aus Pflanzen gewonnen werden, sondern müssen durch eine alkoholische Gärung aus in Pflanzen enthaltenen Rohstoffen erzeugt werden. Dabei werden Kohlenhydrate mit Hilfe von Mikroorganismen gespalten und über mehrere Zwischenstufen zu Ethanol umgewandelt. Die alkoholische Gärung erfolgt dabei nach folgender Bruttogleichung:



Für die Ethanolherzeugung können somit alle Substrate dienen, die vergärbare Zucker oder in vergärbare Zucker überführbare Bestandteile enthalten. Dazu zählen zuckerhaltige, stärkehaltige und lignocellulosehaltige Pflanzenkomponenten (Kapitel 5.1). Stärke und Cellulose sind Polysaccharide und nicht direkt vergärbare, deswegen müssen sie, bevor sie alkoholisch vergärt werden können, zunächst in niedermolekulare Zucker aufgespalten werden.

Für die Ethanolherstellung bedeutet dies, dass sich der Verfahrensprozess, je nach eingesetztem Rohstoff, in der Rohstoffaufbereitung unterscheidet. Hingegen ist die anschließende Fermentation, Destillation und Rektifikation und Entwässerung des Ethanols in ihren Grundzügen unabhängig vom eingesetzten Rohstoff (Abb. 13).

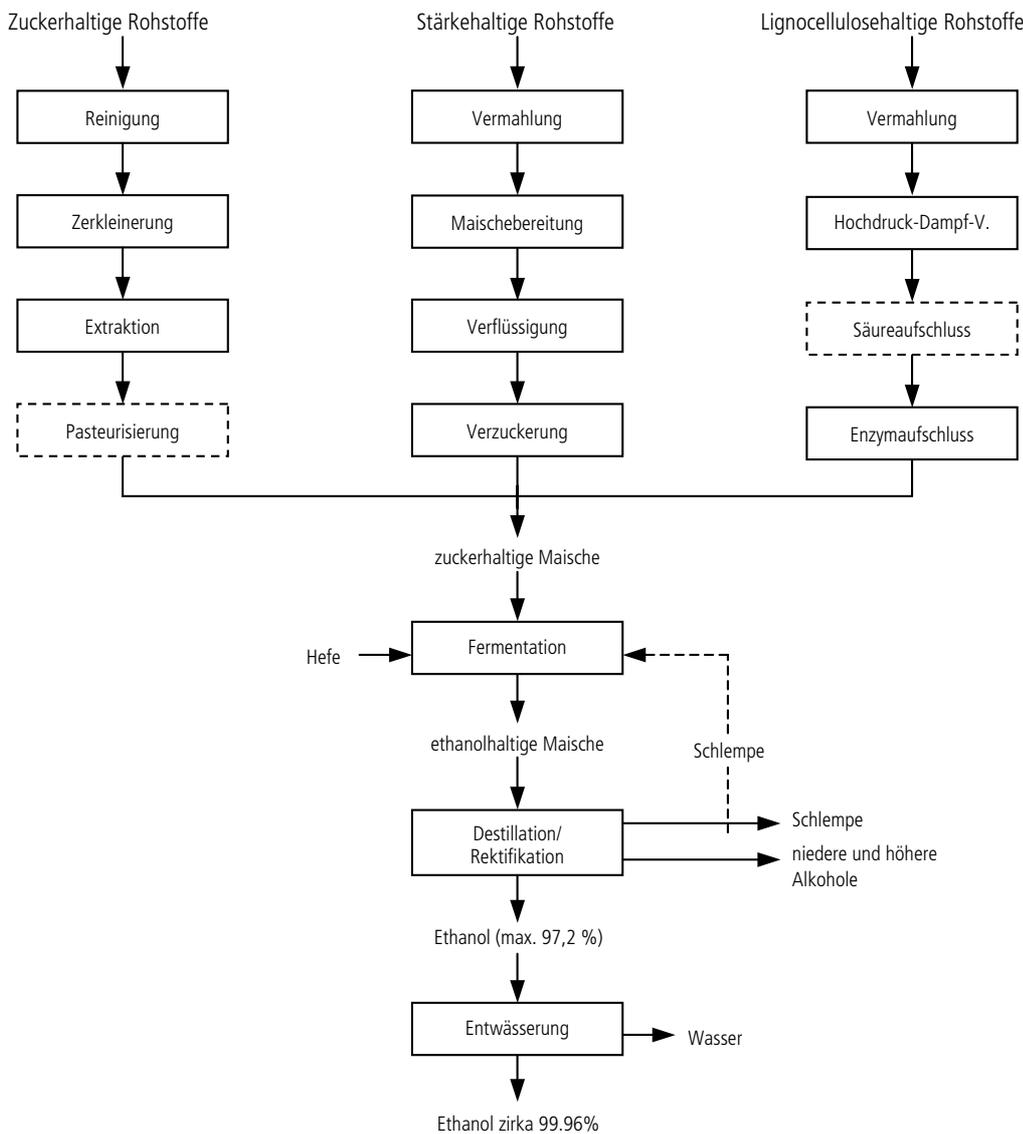


Abb. 13: Grobschema der Ethanolherstellung.

### 5.2.1 Rohstoffaufbereitung

Der Aufschluss der zucker-, stärke- und lignocellulosehaltigen Rohstoffe ist der erste Verfahrensschritt bei der Herstellung von Ethanol. Bei diesem verfahrenstechnischen Prozess werden die im Rohstoff enthaltenen Substrate aus dem Rohstoff gewonnen und wenn nötig in vergärbare Zucker überführt. Nachfolgend wird der Herstellungsprozess der Rohstoffaufbereitung hinsichtlich der unterschiedlichen Rohstoffgruppen erläutert.

#### Zuckerhaltige Rohstoffe

Die Alkoholgewinnung aus zuckerhaltiger Biomasse stellt die verfahrenstechnisch einfachsten Anforderungen an die Rohstoffaufbereitung. Bei zuckerhaltigen Rohstoffen muss der Zucker lediglich aus dem Zellmaterial freigesetzt werden. Die hierfür benötigten Verfahrensschritte können sich aus Reinigung, Zerkleinerung und anschließender Extraktion (Zuckerrübe, Zuckerrohr) oder aus mechanischem Abpressen (Zuckerhirse, Zuckerrohr) zusammensetzen. Nachfolgend wird die Rohstoffaufbereitung zuckerhaltiger Biomasse am Beispiel der Zuckerrübe dargestellt.

Zuckerrüben (Abb. 14): Zu Beginn des Herstellungsprozesses müssen die Zuckerrüben entsprechend gereinigt werden, um Ernterückstände wie Erde sowie Kraut- und Blattreste zu entfernen. Anschliessend werden die Zuckerrüben zu so genannten Schnitzeln zerklei-

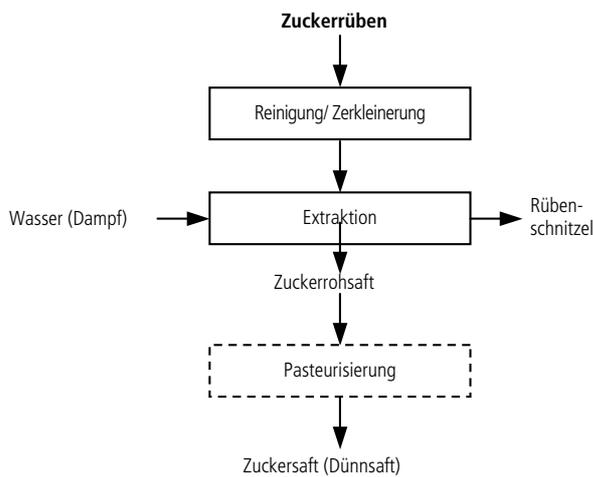


Abb. 14: Verfahrensschritte der Rohstoffaufbereitung aus Zuckerrüben.

tung haben. Die als Rückstand verbleibenden Rübenschnitzel werden mittels Verdampfung getrocknet und als Tierfutter verwertet. Bei diesem Verfahren können pro Tonne Zuckerrüben etwa 1100 kg Rohsaft und 58 kg Rübenschnitzel gewonnen werden (Hartmann 2002). Zuckerrüben müssen innerhalb von drei Monaten nach ihrer Ernte verarbeitet werden. Um einen kontinuierlichen Betrieb der Ethanolherstellung gewährleisten zu können, muss ein Grossteil des gewonnenen Rohsaftes gelagert werden. Zur Reduzierung des Tankvolumens wird deshalb der Dünnsaft zu Dicksaft aufkonzentriert.

### Stärkehaltige Rohstoffe

Da Stärke nicht direkt vergoren werden kann, muss diese zunächst durch Hydrolyse in niedermolekulare Zucker umgewandelt werden. Die Rohstoffaufbereitung aus stärkehaltigen Rohstoffen setzt sich deshalb aus Reinigung, Vermahlung, Maischebereitung, Verflüssigung und Verzuckerung zusammen. Nachfolgend wird die Rohstoffaufbereitung stärkehaltiger Rohstoffe am Beispiel von Getreide dargestellt.

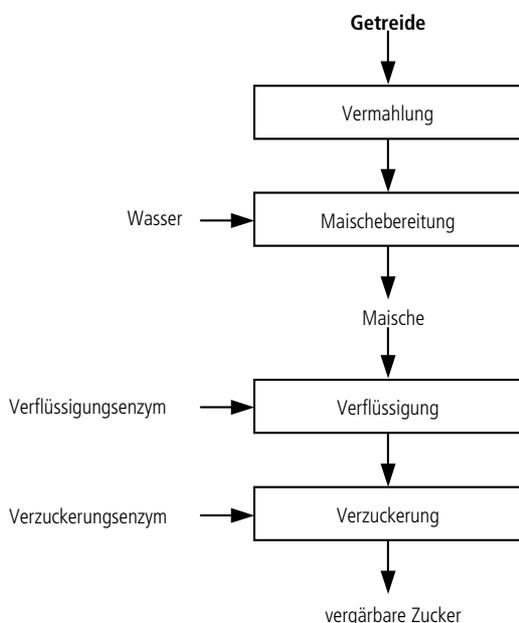


Abb. 15: Verfahrensschritte der Rohstoffaufbereitung aus Getreide.

Verflüssigungstank gelangt. Im Verflüssigungstank wird der Maische das Verflüssigungsenzym  $\alpha$ -Amylase zugegeben, dass die hochmolekulare Stärke in Dextrine (etwa fünf bis sechs Glucoseeinheiten) abbaut und die hohe Viskosität der Maische stark herabsetzt. Die Verflüssigung der Stärke im Verflüssigungstank erfolgt bei Temperaturen von über 65 °C und einer Verweilzeit von etwa einer Stunde. Anschliessend gelangt die Maische in den

ner. Die Zerkleinerung dient der Oberflächenvergrößerung und ermöglicht in der nachfolgenden Extraktion kurze Prozessstrecken. Um den Austritt des Zuckerrübensaftes aus den Zellen zu ermöglichen, werden die Zellen durch Wärmeeinwirkung zerstört. Bei der Extraktion wird deshalb die in der Zuckerrübe gespeicherte Saccharose mit Hilfe von heissem Wasser im Gegenstromverfahren extrahiert. Die dabei gewonnene Zuckerlösung ist direkt vergärbar, erfordert aber je nach Extraktionsverfahren eine zusätzliche Pasteurisierung. Zusätzlich wird durch die Extraktion ein zweites Zwischenprodukt gewonnen. Hierbei handelt es sich um die ausgelaugten Rübenschnitzel, die jedoch für die weitere Ethanolproduktion keine Bedeu-

Getreide (Abb. 15): Um an die im Getreidekorn enthaltene Stärke zu gelangen, muss dieses zunächst aufgespalten werden. Hierbei wird das Getreidekorn im ersten Verfahrensschritt vermahlen.

Die Vermahlung kann als Trockenvermahlung oder als Nassvermahlung erfolgen. Eine weitere Möglichkeit zur Aufspaltung des Getreidekorns wäre das Druckaufschlussverfahren, das jedoch aufgrund seines hohen Dampfverbrauchs und dem damit verbundenen hohen Energieaufwand heute nicht mehr angewendet wird. Nach der Aufspaltung des Getreidekorns wird die freigesetzte Stärke in einem Maischprozess zu vergärbaren Zuckern abgebaut. Dazu wird die Stärke zunächst mit Wasser vermischt und auf 90 bis 95 °C erhitzt. Durch das Erhitzen der Maische wird sichergestellt, dass sich die Stärke im Wasser löst. Gleichzeitig steigt jedoch die Viskosität der Maische drastisch an, so dass die Maische in den

Verzuckerungstank. Der Maische werden hierbei Verzuckerungsenzyme wie Glucoamylase oder  $\beta$ -Amylase zugegeben. Diese Enzyme können die unterschiedlichen Bindungen ( $\alpha$ -1,3-,  $\alpha$ -1,4- und  $\alpha$ -1,6-Bindungen) zwischen den Stärke- und Dextrine-Molekülen angreifen und Stärke und Dextrine in vergärbare Zucker überführen. Die Verzuckerung erfolgt bei Temperaturen zwischen 52 und 55 °C und einer Verweilzeit von etwa einer Stunde.

### **Lignocellulosehaltige Rohstoffe**

Lignocellulosehaltige Rohstoffe setzen sich überwiegend aus Cellulose, Hemicellulose und Lignin zusammen. Dabei sind für die Ethanolgewinnung im Wesentlichen nur Cellulose und Hemicellulose von Bedeutung. Cellulose und Hemicellulose sind wie Stärke aus Glucosemolekülen aufgebaut. Im Unterschied zum Stärkemolekül sind beide Stoffe  $\beta$ -glycosidisch verknüpft. Für die Ethanolherstellung aus Cellulose und Hemicellulose, muss eine Aufspaltung der Celluloseketten sowie die Zerlegung in vergärbare Zucker erfolgen. Hierzu müssen die  $\beta$ -glycosidischen Bindungen aufgespalten werden. Verfahrenstechnisch stellt dieser Schritt die grösste Schwierigkeit bei der Ethanolherstellung aus cellulosehaltigen Rohstoffen dar. Der Grund hierfür ist, dass aufgrund der  $\beta$ -Bindungen die Cellulosemoleküle sowie die einzelnen Celluloseketten eine kristalline Struktur ausbilden, die einem enzymatischen Angriff weitestgehend widerstehen und sich nur sehr schwer hydrolysieren lassen.

Die Ethanolherstellung aus cellulosehaltigen Rohstoffen beginnt mit der Freisetzung der Cellulose aus dem Rohstoff, um sie anschliessend hydrolysieren zu können. Die Freisetzung kann entweder durch sehr feines Vermahlen des Rohstoffs oder durch die Anwendung eines Hochdruck-Dampf-Verfahrens erfolgen. Beide Verfahren setzen die Cellulose frei und zerstören teilweise die kristalline Struktur der Cellulose. Anschliessend erfolgt die Hydrolyse. Grundsätzlich gibt es hierzu drei Möglichkeiten: Durch konzentrierten Säureaufschluss, durch verdünnten Säureaufschluss oder über den enzymatischen Aufschluss. Beim Säureaufschluss kann unter anderem 72 prozentige Schwefelsäure bzw. 42 prozentige Salzsäure verwendet werden. Beide Säuren können Cellulose bereits bei Temperaturen bis zu 45 °C vollständig lösen. Die Cellulose wird hierbei in Oligosaccharide gespalten. Damit die Cellulose jedoch zu Glucose hydrolysiert wird, bedarf es Temperaturen von 100 °C bis 200 °C sowie einer Verweilzeit von 1 bis 3 Stunden. Auf diese Weise kann mit Hilfe von konzentrierten Säuren etwa 90 % der potenziell in der Cellulose enthaltenen Glucose freigesetzt werden (Hartmann 2001). Problematisch hierbei ist die anschliessende Trennung der Zucker von der sauren Mutterlauge sowie die Säurerückgewinnung und das Aufkonzentrieren der recycelten Säure (Schmitz 2003). Zusätzlich werden aufgrund der hohen Korrosivität der Säure hohe Anforderungen an das Material gestellt. Diese Tatsachen sowie eine kostenintensive Abwasserbehandlung führen zu hohen Investitionskosten, weshalb sich dieses Verfahren des Säureaufschlusses bisher nicht durchsetzen konnte.

Heutzutage wird vorwiegend zum enzymatischen Celluloseaufschluss geforscht, allerdings nur mit mässigem Erfolg. Um befriedigende wirtschaftliche Ergebnisse zu erzielen, muss hier noch eine vorgeschaltete Säurebehandlung erfolgen.

Die Ethanolerzeugung aus lignocellulosehaltigen Rohstoffen birgt langfristig gesehen ein grosses Potenzial. Durch günstige Rohstoffkosten wäre diese Art der Ethanolherstellung weitaus wirtschaftlicher, wenn ein hoher Konversionswirkungsgrad erreicht werden kann.

### **5.2.2 Fermentation**

Bei der Fermentation wird die zuvor gewonnene zuckerhaltige Lösung mit Hilfe von Mikroben (Hefe) unter anaeroben Bedingungen in Ethanol und Kohlendioxid umgewandelt. Hierbei produziert die Hefe ein Enzym (Zymase), welche die Umsetzung von Glucose bewirkt.

Zu Beginn des Gärprozesses verläuft die Fermentation sehr schnell, nimmt aber aufgrund des steigenden Alkoholgehaltes gegen Ende des Prozesses ab. Die Ursache hierfür ist, dass ein Alkoholgehalt von mehr als 10 Vol.-% zu Wachstumsstörungen oder zum Absterben der Hefezellen führt, und somit die Gärgeschwindigkeit verringert.

Für die grösstmögliche Ethanolausbeute ist es von besonderer Wichtigkeit, dass für die jeweiligen Mikroorganismen optimale Kulturbedingungen (Temperatur, pH-Wert, Alkoholkonzentration) herrschen. Die günstigen Kulturbedingungen für Hefen ermöglichen allerdings auch das Wachstum anderer Mikroorganismen. Dabei kann es sich um «wilde» Hefen, Pilze oder um Bakterien handeln. Insbesondere die säurebildenden Bakterien wie Milch-, Butter- oder Essigsäure werden als schädlich angesehen. Sie benötigen für ihr Wachstum Zucker und Alkohol und senken den pH-Wert und somit die Gärleistung im Fermenter.

Die Fermentation kann durch unterschiedliche Verfahren realisiert werden. Hierbei kann zwischen dem Batch-, dem Kaskaden- und dem kontinuierlichen Verfahren unterschieden werden.

### 5.2.3 Destillation und Rektifikation

Bei der Destillation und Rektifikation handelt es sich um einen mehrstufigen Konzentrationsprozess, bei dem der fermentierten Maische der enthaltene Alkohol entzogen, aufkonzentriert und gereinigt wird.

Zu Beginn des mehrstufigen Konzentrationsprozess wird die fermentierte Maische in die Rektifizieranlage gepumpt. In einer ersten Stufe wird durch einfache Destillation eine Anreicherung des Alkohols von zirka 35 % erreicht. Dies erfolgt in einer Maischekolonne mit übereinander angeordneten Kochböden. Die fermentierte Maische wird in Kondensatoren vorgewärmt und der Kolonne im oberen Teil zugeführt. Dabei rieselt sie über die einzelnen Kochböden nach unten hin ab. Gleichzeitig befindet sich im unteren Teil der Kolonne ein Wärmeaustauscher, der die Maische aufkocht. Das dadurch entstehende Alkohol-Wasserdampf-Gemisch steigt nach oben hin auf und durchquert die einzelnen Kochböden. Dabei entzieht der aufsteigende Dampf der hinabrieselnden Maische bereits einen Teil ihres Alkoholgehalts. Der Alkohol nimmt somit auf seinem Weg zum Kolonnenkopf eine immer höhere Konzentration an. Am oberen Teil der Maischekolonne entweicht das Ethanol-Wasserdampf-Gemisch. Anschliessend wird es zu einem Kühler geführt und dort kondensiert. Am Boden der Kolonne verbleibt die von Ethanol befreite Maische. Diese wird als Schlempe bezeichnet. In weiteren Kolonnen wird der gewonnene Alkohol auf eine Reinheit von 96 % aufkonzentriert, durch den Entzug niederer Alkohole wie Methanol und Aldehyde sowie höherer Alkohole wie Propanol und Fuselöle kann ein Ethanolgehalt von maximal 97,2 % erreicht werden (Schmitz 2003). Eine weitere Konzentrationserhöhung ist durch Destillation nicht möglich, da Ethanol und Wasser bei dieser Konzentration ein Azeotrop<sup>1</sup> bilden.

### 5.2.4 Entwässerung

Für die Nutzung als Beimischung zum Ottotreibstoff muss das Bioethanol entwässert werden. Für die weitere Aufkonzentrierung können das Schleppmittel-, das Membran- sowie das Molekularsiebverfahren verwendet werden.

Beim Schleppmittelverfahren entsteht durch Zusatz eines weiteren Stoffes ein Drei-Stoff-Gemisch, welches das azeotrope Ethanol-Wasser-Gemisch zerstört. Durch die Ausnutzung der verschiedenen Löslichkeiten der Stoffe ineinander wird ein anderes, tiefer siedendes Gemisch gebildet, welches destillativ zu trennen ist. Das Ethanol-Schleppmittel-Wassergemisch kann so in Kolonnensystemen getrennt werden. Hierbei wird im unteren Teil der Kolonne das Ethanol abgezogen, während das Schleppmittel-Wassergemisch dampfförmig aus der Kolonne entweicht und anschliessend kondensiert wird. Als Schleppmittel wird häufig Cyclohexan verwendet, da es sich relativ leicht vom Wasser abtrennen lässt. An-

<sup>1</sup> Stoffgehalt, das man nicht durch gewöhnliche Destillation trennen kann, weil die Zusammensetzung der Flüssigkeit und der Gasphase gleich ist. Beim Sieden verhalten sich azeotrope Gemische wie Reinstoffe (Wikipedia).

schliessend wird es gereinigt und dem Prozess wieder zugeführt. Der primäre Nachteil dieses Verfahrens ist der relativ hohe Energieaufwand in Form von Dampf.

Das Membran-Trennverfahren ist ein physikalisches Verfahren, das heisst es findet keine Veränderung der beteiligten Stoffe statt. Bei diesem Verfahren wird mit Hilfe der Membran Ethanol vom Wasser abgetrennt. Aufgrund der hohen Kosten für die Membran und deren geringe Lebensdauer ist das Verfahren sehr kostenintensiv (Schmitz 2003).

Das gebräuchlichste Verfahren zur Entwässerung des Ethanols ist das Molekularsiebverfahren. Es beruht auf dem Prinzip der Adsorption. Hierbei wird das Ethanol im dampfförmigen Zustand komprimiert und durch ein aus Zeolithen bestehendes Molekularsiebbett gedrückt. Dabei lagern sich die im hydrierten Ethanol enthaltenen Wassermoleküle in den Poren der Zeolithe durch Adsorption ab. Für den durchgängigen Betrieb werden die Anlagen mit zwei Kolonnen betrieben, da die Molekularsiebe regelmässig gereinigt werden müssen. Als nachteilig sind die relativ hohen Investitionskosten anzusehen. Allerdings ist die Lebensdauer hoch, so dass sich dieser Nachteil relativiert. Der bedeutendste Vorteil des Molekularsiebverfahrens sind die geringen Betriebskosten.

### 5.3 Eigenschaften und Nutzung als Treibstoff

Ethanol eignet sich aufgrund seiner physikalisch-chemischen Eigenschaften gut als Treibstoff für den Verkehrsbereich. In Tabelle 20 sind seine treibstofftechnischen Eigenschaften zusammengestellt.

<b>Tab. 20. Treibstofftechnische Eigenschaften von Ethanol, Benzin und Dieseltreibstoff.</b>			
<b>Eigenschaften</b>	<b>Ethanol</b>	<b>Benzin (Normal)</b>	<b>Diesel</b>
Zusammensetzung in Gew.-%:			
Kohlenstoff	52	86	86
Wasserstoff	13	14	13
Sauerstoff	35	0	–
Heizwert:			
massebezogen in MJ/kg	26,8	42,7	42,5
volumetrisch in MJ/l	21,3	zirka 32,0	zirka 36,0
Dichte bei 15°C in kg/l	0,794	0,72–0,78	0,815–0,855
Kinematische Viskosität bei 20°C in mm <sup>2</sup> /s	1,5	0,6	4
Siedepunkt in °C	78	25–215	180–360
Flammpunkt in °C	12,8	–42,8	68
Zündtemperatur in °C	420	zirka 300	zirka 250
Spez. Verdampfungswärme in kJ/kg	904	380–500	zirka 250
Theoretische Mindestluftmenge in kg/kg	9	14,8	14,5
ROZ (Oktanzahl)	107	93	–

Quelle: Schmitz, 2003

Der Einsatz von Ethanol als Treibstoff kann als Reintreibstoff, als Mischtreibstoff oder nach chemischer Umwandlung zu Ethyl-Tertiär-Butyl-Ether (ETBE) erfolgen. Prinzipiell bestehen zwei Möglichkeiten, Ethanol als Treibstoff einzusetzen. Entweder wird der Treibstoff an bestehende Motoren angepasst oder es werden Veränderungen am Motor vorgenommen. Nachfolgend wird die Nutzung von Ethanol im Ottomotor sowie im Dieselmotor erläutert.

### **5.3.1 Nutzung als Treibstoff in Ottomotoren**

#### **Reintreibstoff**

Unter normalen Bedingungen ist der Betrieb von Ottomotoren mit Ethanol als Reintreibstoff kurzzeitig möglich. Für einen störungsfreien Dauerbetrieb, den Betrieb unter erschwerenden Bedingungen, zum Beispiel bei hohen und tiefen Temperaturen und zur Optimierung des Treibstoffverbrauchs sowie der Fahreigenschaften (zum Beispiel bei der Beschleunigung) sind jedoch Anpassungen des Motors erforderlich. An Reinethanol angepasste Motoren bezeichnet man als Reinethanolmotoren. Reinethanolmotoren sind in ihrer Grundkonzeption unverändert. Im Vergleich zum Ottomotor besitzen sie ein höheres Verdichtungsverhältnis. Weitere Veränderungen sind unter anderem eine Kaltstarthilfe, Zündspulen, die für höhere Leistungen ausgelegt sind, Zündkerzen mit höheren Wärmewerten sowie höhere Einspritzmengen für den Warmlauf. Reinethanolmotoren verbrauchen zirka 53,6 kWh auf 100 km und haben einen Nutzungsgrad von 17,7 % (Wagner 2003). Der Einsatz von Benzin in Reinethanolmotoren ist nicht mehr möglich.

Somit ist festzustellen, dass sich Ethanol als Reintreibstoff nicht in herkömmlichen Ottomotoren, sondern nur in speziell entwickelten Reinethanolmotoren verwenden lässt. Eine breite Anwendung von Ethanol als Reintreibstoff setzt eine entsprechende Verbreitung des Reinethanolmotors sowie ein eigenes Distributionssystem für diesen Treibstoff voraus. Aufgrund der damit verbunden hohen Investitionen, ist ein derzeitiger Einsatz von Reinethanol in der Schweiz unwahrscheinlich.

#### **Mischtreibstoff**

Weiterhin kann Ethanol als Mischtreibstoff in verschiedenen Mischungsverhältnissen eingesetzt werden. In den EU-Richtlinien 85/537 und 87/441 EWG wird EU-weit die Beimischung von bis zu 5 Vol-% Ethanol (E 5) zu Ottotreibstoffen freigestellt. Auch in der Schweiz darf nach SN 181162 Ethanol bis zu 5 Vol-% dem Ottotreibstoff beigemischt werden. So ist seit Mitte Mai 2005 an sämtlichen Flamol-Tankstellen das Produkt Benzin Bio5 erhältlich. Ebenfalls bietet der Tankstellenbetreiber Agrola seit 1. Juni 2005 an seinen Tankstellen in der Nähe des Alcosuisse-Betriebes Delémont Benzin 95 mit 5 % Ethanol an. Auch bei einer Zugabe von 10 Vol-% sind keine Modifikationen an Ottomotoren erforderlich.

In der Praxis wurde ein problemloser Betrieb von Ottomotoren mit einer Ethanolzumischung von 20–25 Vol-% nachgewiesen. Dieser Treibstoff, der als «Gasohol» bezeichnet wird, wird in Brasilien bereits seit Jahren verwendet. Aufgrund des relativ hohen Ethanolgehaltes im konventionellen Ottotreibstoff sind geringe Modifikationen erforderlich. Diese beinhalten Veränderungen der Zündzeitpunkte und den Schutz von Kunststoffen und Metallen.

Einen noch höheren Ethanoleinsatz lassen sogenannte «Flexible Fuel Vehicles» zu. Diese FFV-Fahrzeuge können mit einem Ethanolanteil bis zu 85 Vol.-% betrieben werden. Zusätzlich können sie mit herkömmlichen Ottotreibstoff sowie mit jeder weiteren Benzin-Ethanol-Mischung betrieben werden. Die Motoren der FFV-Fahrzeuge besitzen Sensoren, welche die jeweilige Zusammensetzung des Treibstoffs erkennen und dementsprechend den Motor auf diese Bedingungen einstellen. FFV-Fahrzeuge werden gegenwärtig in den USA, Brasilien und Schweden eingesetzt.

Die Zugabe von Ethanol zu Ottotreibstoffen kann verschiedene Auswirkungen auf einige Treibstoffkenndaten haben. Nachfolgend werden diese erläutert.

#### *Klopffestigkeit*

Die Beimischung von Ethanol zu Ottotreibstoff verbessert die Klopffestigkeit des Treibstoffs. Der Grund hierfür liegt bei der vergleichsweise hohen Oktanzahl von Ethanol (ROZ 107) gegenüber Benzin 95 (ROZ 93). Treibstoffe mit einer geringen Oktanzahl neigen zum sogenannten Klopfen. Dabei entstehen Spontanverbrennungen, die von einem deutlichen

Leistungsverlust bis hin zu Motorschäden führen. Die Beimischung von Ethanol zu Ottotreibstoff erhöht demnach die Oktanzahl und verbessert somit die Klopfestigkeit des Treibstoffgemisches. Dies ermöglicht eine höhere Kompression in den Zylindern des Motors und führt zu einem besseren Wirkungsgrad.

#### *Verbrennung*

Aufgrund des hohen Sauerstoffanteils von 35 Gew.-% im Ethanol wird die thermische Leistungsfähigkeit der Motoren verbessert. Der damit verbesserte Verbrennungsprozess führt zu verringerten Emissionen. Die Emissionen von Motoren mit Ethanolbeimischungen bzw. mit reinem Ethanol unterscheiden sich zum Teil beträchtlich von denen der reinen Benzinmotoren. Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffemissionen nehmen bei Reinethanolmotoren um zirka 50 % ab (Schmitz 2003).

#### *Materialverträglichkeit*

Ethanol weist sowohl als Reintreibstoff als auch als Mischtreibstoff Lösungsmittleigenschaften auf. Dabei können einige Elastomere und Farbanstriche angegriffen werden. Dies erfordert den Einsatz geeigneter Elastomere (Schläuche, Dichtungen). Ethanolhaltige Treibstoffe wirken zudem korrodierend auf Leichtmetalle und Stahl. Die Ursache hierfür ist der höhere Wassergehalt ethanolhaltiger Treibstoffe. Durch Zusatz von Korrosionsschutzmitteln kann dieses Problem gelöst werden. Bei einem Ethanolgehalt von 5 Vol-% im Treibstoff treten diese Probleme nicht auf.

#### *Energiegehalt*

Der Energiegehalt von Ethanol (Heizwert 21,3 MJ/l) fällt gegenüber Ottotreibstoffen (Heizwert zirka 32,0 MJ/l) deutlich geringer aus. Somit enthält Ethanol etwa 65 Vol-% des Energiegehaltes von Ottotreibstoffen. Aufgrund des geringeren Energiegehalts von Ethanol ist mit einem Mehrverbrauch zu rechnen. Diesbezüglich findet man in der Literatur zum Teil unterschiedliche Angaben. Es werden Werte von 1,33 l (Figueiredo 2003) bzw. 1,5 l Ethanol (Schmitz 2003) genannt, um die gleichen Leistungen wie mit 1 l Benzin zu erbringen.

#### **Einsatz nach chemischer Umwandlung**

Ethanol kann nach chemischer Umwandlung als ETBE Ottotreibstoff beigemischt werden. ETBE wird aus Isobuten und Ethanol hergestellt und besteht zu 47 Vol-% aus Ethanol und 53 Vol-% aus Isobuten (Schmitz 2003). Die Beimischung von ETBE würde die derzeit verwendete Treibstoffkomponente Methyl-Tertiär-Butyl-Ether (MTBE) ersetzen. MTBE wird in Ottotreibstoffen wegen seiner hohen Oktanzahl als Antiklopfmittel zur Steigerung der Gebrauchstauglichkeit eingesetzt. Nach SN 181162 darf die Beimischung von ETBE zum Ottotreibstoff bis zu 15 Vol-% betragen.

#### **5.3.2 Nutzung als Treibstoff in Dieselmotoren**

Bioethanol ist grundsätzlich ein Ottotreibstoff mit hoher Oktanzahl und eignet sich deshalb nicht als Treibstoff in Dieselmotoren. Es gibt jedoch Hinweise, dass eine Beimischung von Bioethanol zu Dieseltreibstoff die Partikelemissionen wesentlich senken soll. Dabei ist kein bestimmtes Mischungsverhältnis definiert, es wird von etwa 7 bis 10 % Bioethanol gesprochen.

Da sogar die Idee aufkam, dass der derzeit heftig diskutierte Partikelfilter für Dieselmotoren durch die Verwendung von Diesel-Bioethanol-Gemischen hinfällig werden könnte, wurden an der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART) in Tänikon im Januar 2006 Prüfstandsversuche an Traktormotoren mit einem solchen Mischtreibstoff gefahren (siehe Kapitel 8).

## 5.4 Entstehende Nebenprodukte und deren Verwendung

Bei der Alkoholgewinnung fällt als Nebenprodukt Schlempe an. Schlempe entsteht bei der Destillation. Dabei fallen je erzeugtem Liter Ethanol etwa 10 bis 15 Liter Schlempe an. Die Menge der anfallenden Schlempe richtet sich nach eingesetztem Rohstoff und nach Art der Destillationsanlage. Wenn möglich wird die anfallende Schlempe wiederverwertet, indem sie zum Maischprozess zurückgeführt wird. Damit lässt sich die Schlempe menge bis etwa auf die Hälfte reduzieren.

### Futtermittel

Die anfallende Schlempe kann prinzipiell als hochwertiges Futtermittel angesehen werden, das unter anderem in der Schweinemast eingesetzt werden kann. Dabei kann sie in fester oder flüssiger Form vorliegen. In Europa wird Schlempe meist direkt in flüssiger Form verfüttert. Der Grund hierfür liegt an den kleineren Anlagekapazitäten, bei denen sich eine Trocknung der Schlempe nicht lohnt. Der Nachteil, der sich hierbei ergibt, ist die geringe Lagerfähigkeit der Schlempe sowie hohe Transportkosten. Flüssige Schlempe muss innerhalb von zwei Tagen verbraucht werden. Getrocknete Schlempe besitzt hingegen den Vorteil einer besseren Lagerfähigkeit sowie geringeren Transportkosten. Der für die Trocknung benötigte Energieeinsatz entspricht etwa dem gleichen Energieeinsatz, der für die gesamte Ethanolherstellung benötigt wird. Die Schlempe kann auf einen Trockenmassegehalt von 90 bis 95 % getrocknet werden.

### Weitere Verwendungen

Weitere Verwendungen für die anfallende Schlempe sind der Einsatz als Düngemittel sowie als Rohstoff für die Biogasproduktion. Der Einsatz als Düngemittel ist aufgrund der in der Schlempe enthaltenen Mineralien möglich. Dabei unterscheidet sich die Zusammensetzung des Nährstoffgehalts vom eingesetzten Rohstoff. Die Verwendung der Schlempe für die Biogasproduktion dient der Energiegewinnung. Dieser Verwendungszweck ist von besonderem Interesse, da hier die bei der Ethanolproduktion benötigte Energie wieder zurück gewonnen werden kann. Theoretisch kann aus der anfallenden Schlempe etwa 120 % der für die Ethanolerzeugung benötigten Energie gewonnen werden (Hartmann 2001).

## 6. Biogas als Treibstoff

Bei Biogas handelt es sich um ein Gasgemisch, das in der Regel aus 50 bis 70 Prozent Methan (CH<sub>4</sub>), 30 bis 40 Prozent Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) sowie in geringem Umfang aus Gasen wie Wasserdampf, Stickstoff, Sauerstoff, Kohlenmonoxid, Schwefelwasserstoff, Ammoniak und Wasserstoff besteht. Damit Biogas als Biotreibstoff im Treibstoffsektor seine Verwendung finden kann, muss es vorher auf Erdgasqualität gereinigt werden.

### 6.1 Substrate

Als Ausgangssubstrate für die fermentative Biogaserzeugung kommen grundsätzlich alle Formen von Biomassen in Frage, insofern sie als Hauptbestandteile Kohlenhydrate, Eiweiße, Fette sowie Cellulose oder Hemicellulose enthalten und Hemm- bzw. Schadstoffe nur in so geringer Konzentration vorkommen, dass weder der Gärprozess noch die nachfolgende landwirtschaftliche Verwertung des Gärrückstandes nachteilig beeinflusst wird. Somit können sämtlich biogenen Reststoffe wie zum Beispiel Gülle, Ernterückstände oder Bioabfälle aus der Nahrungsmittelverarbeitung, aus Haushalten und Gewerbe sowie ein breites Spektrum nachwachsender Rohstoffe für die Produktion von Biogas eingesetzt werden, wobei diese Stoffe sowohl einzeln als auch gemeinsam (Kofermentation) verwertet werden können. Lignin oder ligninkrustierte Cellulose sind ohne eine kosten- und energieaufwändige Vorbehandlung nicht für die Biogaserzeugung geeignet. Holzartige Biomasse wird deshalb als Rohstoff für die Biogaserzeugung ausgeschlossen. Man unterscheidet zwischen Rohstoffen aus der Landwirtschaft und aus gewerblichen Quellen.

Zu den landwirtschaftlichen Rohstoffen zählen:

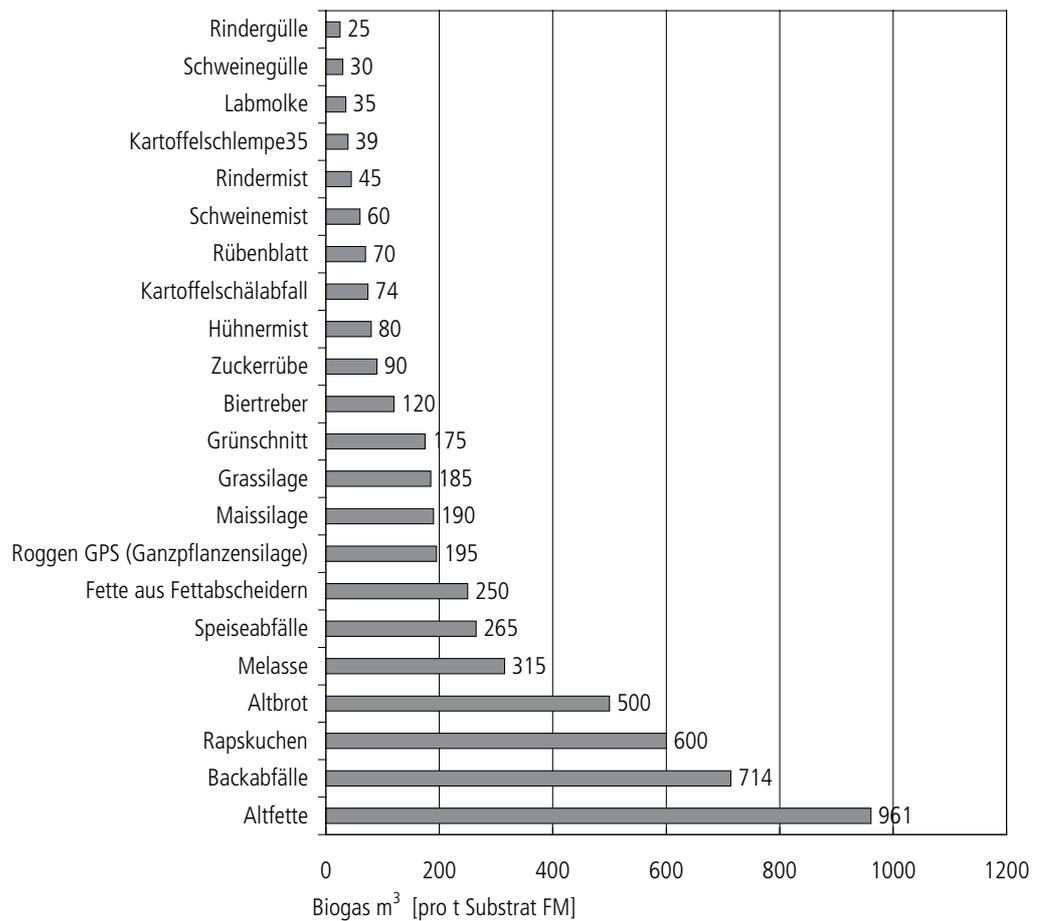
- Gülle
- Mist
- Mais/Maissilage
- Gras/Grassilage
- Sonstige (Energie-)Pflanzen

Zu den Rohstoffen aus gewerblichen Quellen zählen:

- Bioabfälle
- Speisereste
- Schlachthofabfälle
- Fette
- Obst- und Gemüseabfälle
- Klärschlämme
- Kompost
- Proteinreiche Industrieabwässer
- Kohlenhydratreiche Industrieabwässer
- Fettabscheiderrückstände

Insbesondere in der Landwirtschaft konnte sich die Biogastechnologie zur energetischen Verwertung von Gülle etablieren. Durch die Kofermentation, bei der biogene Reststoffe wie Altöl und Speiseabfälle von Unternehmen ausserhalb der Landwirtschaft mit verwertet wurden, konnte die Rentabilität der Biogasanlage meist signifikant gesteigert werden. Ein zunehmendes Thema ist der Einsatz von speziell für die Biogasgewinnung angebauten, nachwachsenden Pflanzen. Somit können die Substitutionspotenziale der Biogastechnologie weiter ausgeschöpft werden. Da weder der Wassergehalt und die spezifische stoffliche Zusammensetzung noch die Struktur die Anwendbarkeit einschränken, liegt mengenmässig ein sehr grosses und bisher weitgehend unerschlossenes Substratpotenzial vor. Je nach Art des eingesetzten Substrats unterscheidet sich der Gasertrag (Abb. 16).

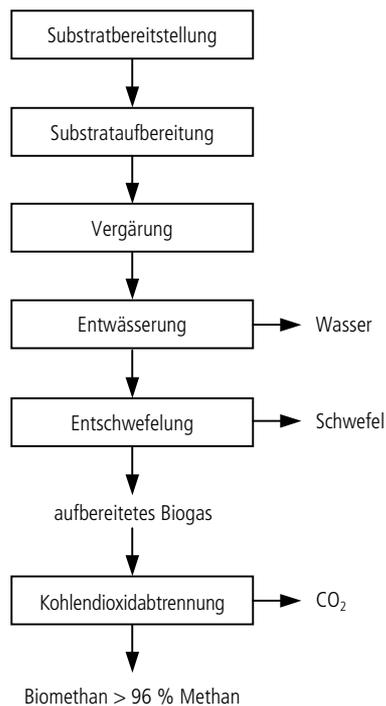
Abb. 16: Unterschiedliche Gasausbeuten verschiedener Substrate.



## 6.2 Herstellung von Biogas

Biogas entsteht in einem mehrstufigen Prozess, der Vergärung oder Faulung, durch die Aktivität von anaeroben Mikroorganismen, das heißt unter Ausschluss von Luft bzw. Sauerstoff. An dem Prozess sind vielfältige Organismenstämme beteiligt, deren Zusammensetzung sich jeweils aus den spezifischen Prozessbedingungen ergibt (zum Beispiel Ausgangsstoff der Vergärung, Temperatur, pH-Wert usw.). Da sich die Mikroorganismen an verschiedene Substrate anpassen können, ist fast jede organische Substanz durch Vergärung abbaubar. Die in der Regel hochmolekulare organische Substanz wird in mehreren Stufen zu wenigen niedermolekularen Stoffen bis hin zum Methan abgebaut. Neben Biogas entsteht bei der Prozesskette als Gärrückstand ein Gemisch aus Wasser, nicht abgebauter organischer Substanz (meist zellulosereiche oder holzige Substanz) sowie nicht organischer Substanz (meist Sand und andere Bodenteilchen, Salz und andere Minerale). Die Vergärung findet im feuchten Milieu statt, die Mikroorganismen benötigen mindestens etwa 50 % Wasser im Ausgangssubstrat. Die wichtigsten Verfahrensschritte bei der Herstellung von Biogas (Abb. 17) sind Substratbereitstellung, Substrataufbereitung, Vergärung und Gasaufbereitung. Die Gasaufbereitung setzt sich vor-

Abb. 17: Grobe Verfahrensschritte der Biomethanherstellung.



Die Gasaufbereitung setzt sich vor-

nehmlich aus den Prozessschritten Entwässerung und Entschwefelung zusammen. Damit Biogas allerdings als Biotreibstoff im Treibstoffsektor eingesetzt werden kann, muss es auf Erdgasqualität gereinigt werden. Deshalb kommt als weiterer Verfahrensschritt die Methan-anreicherung auf Erdgasqualität hinzu. Nachfolgend werden die einzelnen Verfahrensschritte erläutert, auf die Substratbereitstellung sowie auf die Substrataufbereitung soll nicht näher eingegangen werden.

### 6.2.1 Vergärung

Der Prozess der Biogasbildung lässt sich in vier Stufen der bakteriellen Umsetzung einteilen.

- Die 1. Stufe der Vergärung ist die Hydrolyse. In dieser Phase wird hochmolekulare organische Substanz (Proteine, Fette, Kohlenhydrate) durch bakterielle Enzyme in niedermolekulare Einheiten (Monomere wie zum Beispiel Aminosäuren, Glukose, Fettsäuren) aufgespalten. In der Regel geschieht dies durch die Anlagerung bzw. Zwischenlagerung von Wassermolekülen an die Spaltstellen (Hydrolyse).
- Die 2. Stufe der Vergärung ist die Säurebildung. In der säurebildenden Phase werden die kleineren Moleküleinheiten von Bakterien zu niedermolekularen organischen Säuren wie Essigsäure, Propionsäure, Buttersäure, Milchsäure abgebaut. Zusätzlich entstehen niedere Alkohole sowie in geringem Umfang Kohlendioxid, Wasserstoff und andere Gase wie Ammoniak und Schwefelwasserstoff. Das Temperaturoptimum für die Säurebildung liegt bei etwa 30 °C, das pH-Optimum bei etwa pH 6. Im gesamten Prozess gebildeter und nicht abgeführter Wasserstoff hat eine hemmende Wirkung auf die Säurebildungsphase.
- Die 3. Stufe der Vergärung ist die Essigsäurebildung. In der acetogenen Phase werden die niedermolekularen organischen Säuren und Alkohole von Bakterien zu Essigsäure, Kohlendioxid und Wasserstoff abgebaut. Auch auf diesen Prozess wirkt eine erhöhte Wasserstoffkonzentration hemmend.
- Die 4. Stufe der Vergärung ist die Methanbildung. In dieser Phase werden mit Hilfe von Bakterien Kohlendioxid und Wasserstoff zu Methan und Wasser reduziert ( $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ ). Des Weiteren wird die Essigsäure zu Methan, Kohlendioxid und Wasser umgesetzt (Essigsäure  $\rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ). Kohlendioxid ist hierbei im Überschuss und verbleibt als Rest im Gasgemisch. Aufgrund verschiedener Mikroorganismengruppen ergeben sich für diesen Prozess zwei Temperaturoptima, der mesophile Bereich (zirka 35 °C) und der thermophile Bereich (zirka 55 °C). Das pH-Optimum liegt bei etwa pH 7, so dass eine kontinuierliche Verarbeitung der Zwischenprodukte erforderlich ist, um einer Versäuerung des Prozesses entgegenzuwirken.

Die Voraussetzungen für eine optimale und zügige Fermentation der Biomasse sind eine gleichbleibende Prozesstemperatur, Sauerstoff- und Lichtabschluss, Gasdichtigkeit, ausreichende Verweilzeit und die Verhinderung der Schichtenbildung in der Anlage. Methanbakterien sind bei Temperaturen zwischen drei und etwa 70 °C aktiv und steigern die Geschwindigkeit der Fäulnisprozesse mit zunehmender Temperatur. Bezogen auf die verschiedenen Temperaturzonen werden in der Praxis psychrophile Stämme (unter 20 °C), mesophile Stämme (25 bis 35 °C) und thermophile Stämme (über 45 °C) unterschieden.

### 6.2.2 Vergärungsverfahren

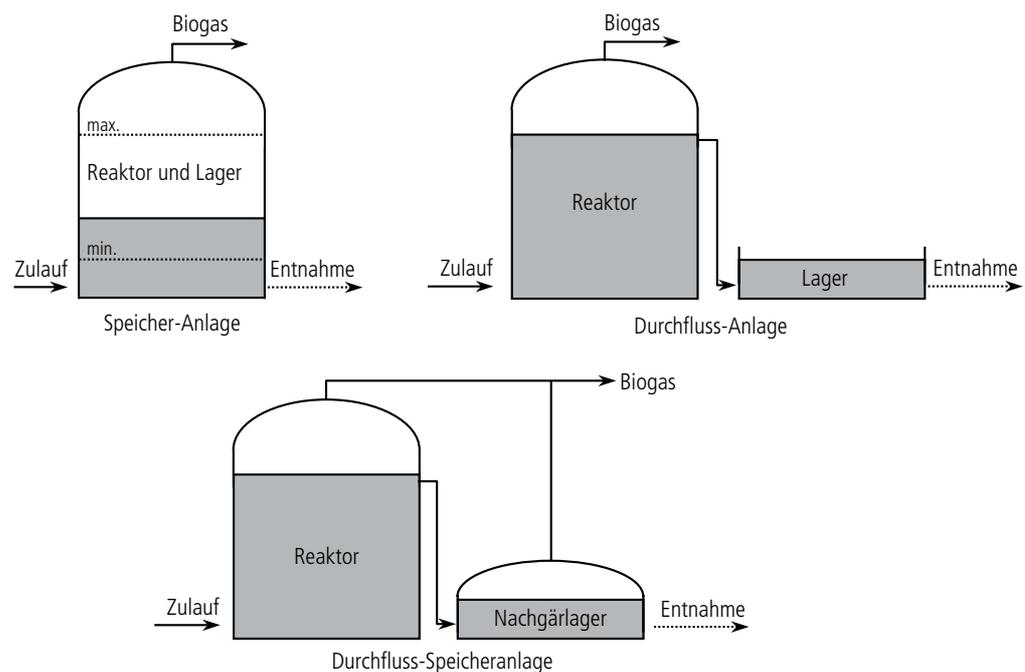
Die wichtigsten Verfahren der Biogasproduktion sind die Nass-Vergärung und die Trocken-Vergärung.

Die Nass-Vergärung erfordert ein Substrat mit einem Trockensubstanzgehalt von maximal 15 %, wodurch Gülle meist als wichtigster Rohstoff eingesetzt und in der Regel durch Kofermente ergänzt wird. Die Nass-Vergärung lässt sich in kontinuierliche und diskontinuierliche Verfahren unterteilen. Bei den diskontinuierlichen oder Batch-Verfahren wird das

Substrat nicht regelmässig zugeführt. Der Gärbehälter wird nach der Befüllung verschlossen und erst nach dem Ausfallvorgang wieder entleert. Bei Speicher-Biogasanlagen dient der Biogasreaktor gleichzeitig als Lagerbehälter. Optimale Gasausbeuten sind mit einem solchen System nicht erzielbar, da der Gärprozess zur Vermeidung hoher Wärmeverluste meist unterhalb der optimalen Betriebstemperatur durchgeführt werden muss und durch den zeitlich veränderlichen Befüllungsgrad des Reaktors keine konstante Stoffumsatzleistung erreicht werden kann. Unregelmässigkeiten in der Gasmenge und Gaszusammensetzung versucht man über die zeitversetzte Befüllung mehrerer Fermenter auszugleichen. Bisher konnten sich diskontinuierliche Verfahren nur in geringem Umfang durchsetzen.

Bei den kontinuierlichen Verfahren, die den Markt weitgehend beherrschen, unterscheidet man zwischen ein- oder mehrstufigen Verfahren. Neben dem Durchflussverfahren sind hier Durchfluss-Speicherverfahren (oder Speicher-Durchflussverfahren) zu nennen (Abb. 18). Durchfluss- und Durchfluss-Speicheranlagen werden mehrfach täglich beschickt, wobei gleichzeitig die entsprechende Menge an ausgefaultem Substrat aus dem Reaktor entnommen wird. Im Unterschied zu reinen Durchflussanlagen, bei denen der Gärrückstand in einem offenen Lagerbehälter gesammelt wird, ist bei Durchfluss-Speicheranlagen der Lagerbehälter gasdicht ausgeführt und mit dem Gasspeicher verbunden, so dass durch Nachgärung gebildetes Biogas mitverwertet werden kann. Je nach Betriebsweise des kontinuierlich durchströmten Biogasreaktors und abhängig von der Art der verwerteten Substrate werden im Nachgärlager nochmals 5–15 % der im Durchflussreaktor erzeugten Biogasmenge gewonnen.

Abb. 18: Typische Anlagensysteme für Vergärungsverfahren.



Während weitgehend alle derzeit bestehenden Anlagen über die Verfahren der Flüssigvergärung betrieben werden, eröffnet sich über Technologien der Trockenvergärung ein grosses Potenzial für die effektive energetische Nutzung von Rohstoffen, die bisher in Biogasanlagen nur bedingt bzw. lediglich unter Einsatz einer hohen Prozessenergie und Wassermenge eingesetzt werden konnten. Für den Vergärungsprozess ist wie bei der Nassfermentation ein feuchtes Milieu notwendig, das Substrat ist jedoch anders als bei der Nassfermentation nicht pumpfähig. Der Trockensubstanzgehalt bei der Trockenfermentation liegt zwischen 25–60 %. Die Anlagen, die sich vor allem für Grüngut, Festmist und speziell angebaute Energiepflanzen eignen, werden als gasdichte Räume konzipiert, die befüllt und erst nach einigen Wochen Faulzeit wieder geöffnet werden. Die Gärrückstände werden

anschliessend kompostiert und einer weiteren Verwertung in der Landwirtschaft zugeführt. Während der Verweilzeit wird das Gut mit der aus dem Substrat austretenden Flüssigkeit von oben her benetzt und somit fortlaufend mit Bakterien beimpft (Abb. 19). Die Vorteile der Trocken-Vergärung liegen insbesondere in einer kompakten Bauweise, die durch die Verwendung von Biomasse mit bis 50 % Trockenmasse bedingt ist, einer gegenüber der Flüssigvergärung nur geringfügig niedrigeren Gasausbeute mit Methangehalten bis zu 80 % und einem geringen Prozessenergieverbrauch, welcher unter 15 % der erzeugten Energie liegt.

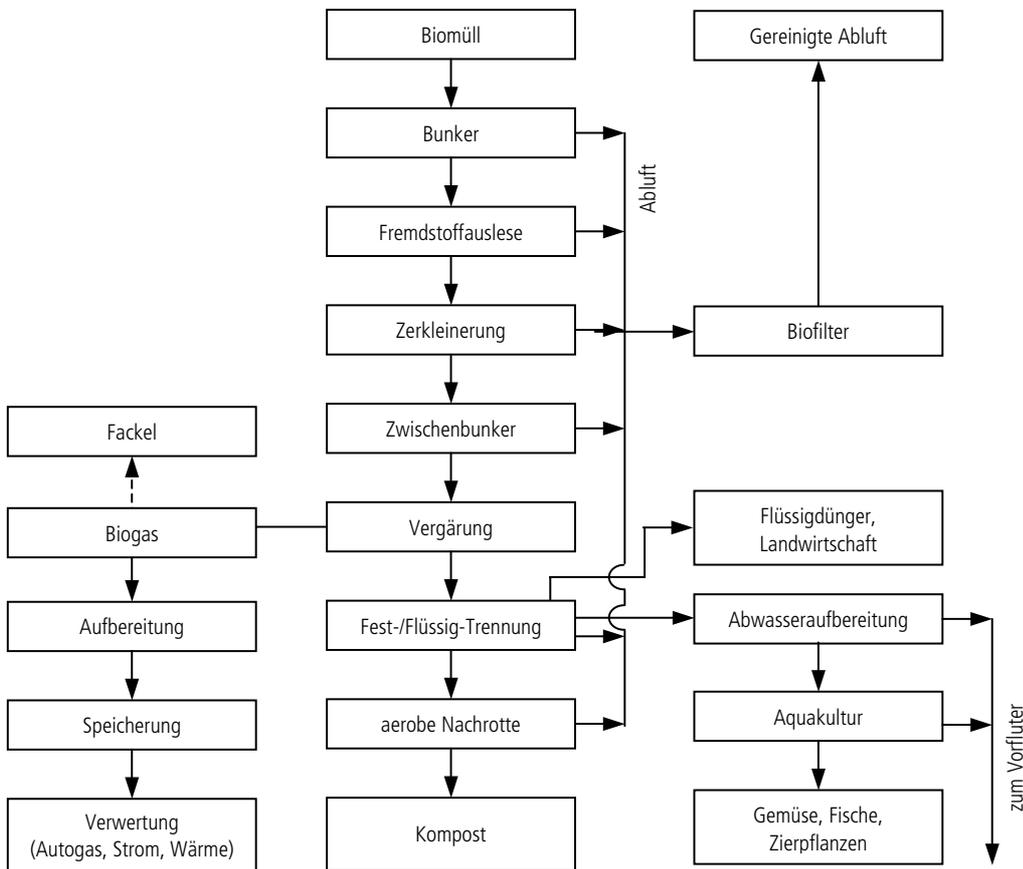


Abb. 19: Verfahrensablauf der Kompogas-Biogas-anlage in Otelfingen.

Der Biogasertrag hängt stark von der Verweilzeit im Fermenter ab. Theoretisch kann die Rohstoffenergie fast vollständig in Biogas umgewandelt werden, da unter anaeroben Bedingungen keine nennenswerte Wärmebildung stattfindet. In der Praxis ist die Verweilzeit, bei Biogasanlagen im mesophilen Temperaturbereich, aus wirtschaftlichen Gründen meist auf 30 bis 50 Tage begrenzt. Bei Anlagen, die im thermophilen Temperaturbereich betrieben werden, liegt die Verweilzeit normalerweise zwischen 15 und 25 Tagen. Dies führt dazu, dass ein Teil des Biomasseheizwertes in der Biomasse verbleibt.

### 6.2.3 Biogasaufbereitung

Um das Biogas als Treibstoff im Verkehrsbereich nutzen zu können, muß es aufbereitet werden. Für die Aufbereitung von Biogas stehen verschiedene Verfahrensprinzipien zur Verfügung: Absorption (physikalisch), Absorption (chemisch), Adsorption (Druckwechsel), Membranverfahren (Gaspermeation), Membranverfahren (Flüssigmembrane), Biotropfkörper, Bioreaktor und Kondensation (Kyrogene Behandlung). Welche Verfahren zur Anwendung kommen, hängt nicht nur von der geforderten Qualität des aufbereiteten Gases ab, sondern auch von der Durchsatzmenge. Manche Verfahren sind kostenintensiv und werden erst ab einem gewissen Volumenstrom wirtschaftlich.

Die Biogasaufbereitung erfolgt in mehreren Schritten:

- Entfernung fester und flüssiger Bestandteile und Trocknung des Gases (Filterung von Stäuben, Kondensatabscheidung und Trocknung)
- Entschwefelung
- Kohlendioxidabtrennung
- Entfernung von weiteren Gasbegleitstoffen wie zum Beispiel Halogenkohlenwasserstoffen, Silizium, Ammoniak

Nachfolgend werden die einzelnen Schritte näher erläutert.

### **Kohlendioxidabtrennung**

Der entscheidende Schritt zur Erhöhung des Methangehaltes ist die Kohlendioxidabtrennung. Unaufbereitetes Biogas hat einen Methangehalt zwischen 50 und 75 Prozent, der auf über 96 Prozent erhöht werden muss, um das Gas als Treibstoff verwenden zu können. Vier Verfahren finden grosstechnisch oder in Pilotprojekten ihre Anwendung.

#### *Absorption*

Bei den absorptiven Verfahren unterscheidet man im Wesentlichen zwischen physikalischen und chemisch-physikalischen Wäschen. Bei beiden Methoden wird die unterschiedliche Wasserlöslichkeit von Methan und Kohlendioxid ausgenutzt, wobei sich CO<sub>2</sub> unter Druck stärker löst als Methan.

Beim rein physikalischen Verfahren, auch Druckwasserwäsche genannt, wird das CO<sub>2</sub> im Gegenstromverfahren bei zirka 20 °C und einem Druck von 10 bis 12 bar mittels Brauchwasser oder einer Polyethylen-Lösung absorbiert. Durch die Zusätze erhöht sich die Löslichkeit von Kohlendioxid, wodurch weniger Absorptionsflüssigkeit zum Einsatz kommen muss. Es können Methangehalte von 96 % oder mehr bei 100 % Feuchte erreicht werden.

Im Gegensatz zur rein physikalischen Gaswäsche nutzt das chemisch-physikalische Verfahren die chemische Absorptionsfähigkeit der beigemengten Flüssigkeiten. Hierbei handelt es sich um Monoethylenglykol (MEG) oder Triethylenglykol (TEG). Der wesentliche Unterschied liegt aber in der Regeneration. So wird das beladene H<sub>2</sub>O-MEG Gemisch nicht bei erhöhtem Druck gereinigt, sondern durch Erwärmen auf zirka 170 °C regeneriert. Die hierfür benötigte Wärme wird unter anderem durch Verbrennen eines Teiles des Gases produziert.

#### *Adsorption*

Das am weitesten verbreitete Verfahren ist die Druckwechsel-Adsorption. Das Biogas wird auf zirka 8-10 bar verdichtet und in den Adsorptionsbehälter gepresst. Das CO<sub>2</sub> wird dort an Aktivkohle oder an Molekularsieben auf Kohlenstoffbasis adsorbiert. Es werden immer mindestens vier Adsorptionsbehälter gleichzeitig betrieben, um eine kontinuierliche Reinigung gewährleisten zu können. Das bei der Regeneration mittels Druckentspannung desorbierte Kohlendioxid wird in die Atmosphäre abgeführt. Mit dieser Technik lassen sich Methankonzentrationen von mehr als 96 % erreichen.

#### *Membran-Trennverfahren*

Beim Membran-Trennverfahren wird die unterschiedliche Permeabilität der Membranen für verschiedene Gasmoleküle ausgenutzt. So durchströmt CO<sub>2</sub> oder H<sub>2</sub>S diverse Membranen bis zu 20-mal schneller als CH<sub>4</sub>. Durch den Einsatz verschiedener Membranen lässt sich entweder eine selektive Abtrennung von Kohlendioxid und Schwefelwasserstoff durchführen, oder beide werden in einem Schritt entfernt.

Bei der Weiterbehandlung der abgetrennten Gasströme unterscheidet man zwischen nassem und trockenem Membranverfahren. Beim ersteren werden die abgetrennten Gasbestandteile in Waschlösungen absorbiert, beim trockenem Verfahren gasförmig ausgetra-

gen. Das für das Verfahren benötigte Druckgefälle wird durch einen auf der Rohgasseite aufgebrachten Überdruck gewährleistet. Dieser erhöhte Druck erleichtert auch die Einspeisung in ein Gasnetz.

#### *Gasverflüssigung*

Bei dieser Methode nutzt man die unterschiedlichen Siedepunkte der Gaskomponenten aus. So wird  $\text{CO}_2$  bei einem Druck von 50 bar bei  $15\text{ }^\circ\text{C}$  flüssig,  $\text{CH}_4$  aber erst bei  $-80\text{ }^\circ\text{C}$ . Nach einer Verdichtung auf 200 bar werden die Gasbegleitstoffe wie  $\text{CO}_2$  mit Hilfe von Molekularsieben adsorbiert. Das verflüssigte Gasgemisch wird anschliessend mittels Niedertemperaturdestillation aufgetrennt. Mit der Gasverflüssigungen können sehr hohe Gasreinheiten ( $> 97\%$ ) erzielt werden, es ist aber aufgrund des hohen Energieaufwands zur Kühlung sehr kostenintensiv.

#### **Entschwefelung**

Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) ist ein Nebenprodukt, das bei der Vergasung im Fermenter entsteht. Neben seiner Giftigkeit wirkt sich Schwefelwasserstoff stark korrosiv auf Leitungen und Anlagen aus. Der  $\text{H}_2\text{S}$ -Gehalt ist sehr stark vom verwendeten Substrat abhängig. So ist die  $\text{H}_2\text{S}$ -Konzentration bei Biogas aus Gülle wesentlich höher als bei Biogas aus Energiepflanzen.

#### *$\text{H}_2\text{S}$ -Oxidation*

Die häufigste Methode der Entschwefelung ist das Einblasen von geringen Mengen von Luft in den Fermenter. Hierbei wandeln Mikroorganismen den Schwefelwasserstoff auf aerobem Weg in Schwefel um, der sich an der Fermenterwand ablagert. Dieser wird dann zusammen mit dem Ausbringen des fermentierten Materials entfernt. Diese biologische Oxidation kann auch extern durch Biofiltration im Rieselbett erfolgen. Vor allem bei grösseren Anlagen wird dieses Verfahren verstärkt eingesetzt, da man optimale Betriebsbedingungen für die Entschwefelung schaffen kann. Dabei ist allerdings zu beachten, dass durch die Zufuhr von Luft auch der Stickstoffgehalt des Biogases ansteigt.

#### *Adsorption von Schwefelwasserstoff*

Alternativ zur Schwefelwasserstoffoxidation wird vereinzelt auch die chemische Adsorptionstechnik angewandt. Diese kann unter Verwendung katalytischer Aktivkohle erfolgen, wobei die Aktivkohle nach vollständiger Beladung regeneriert werden muss. Deswegen müssen bei diesem Verfahren mindestens zwei Adsorber vorhanden sein, um eine kontinuierliche Aufbereitung gewährleisten zu können.

#### *Chemische Fällung*

Eine andere Möglichkeit besteht darin, mit Hilfe von Eisenhydroxid und Sauerstoff den Schwefelwasserstoff zu Schwefel umzuwandeln. Da für diese Methode zusätzlich Wasser benötigt wird, wird das Biogas zuvor nicht getrocknet. Das beladene Eisenoxid muss in regelmässigen Abständen mit Sauerstoff regeneriert werden. Da diese Reaktion stark endotherm abläuft, besteht die Gefahr einer Selbstentzündung. Während der Regeneration wird wiederum ein zweiter Reinigungsfilter benötigt, um das Biogas kontinuierlich aufbereiten zu können. Alternativ besteht die Möglichkeit, Schwefelwasserstoff mittels einer chemischen Absorption (Einsatz von Natronlauge) bzw. mit Hilfe von semipermeablen Membranen zu entfernen.

#### **Gastrocknung**

Um die Bildung von flüssigem Wasser zu vermeiden, muss das Biogas entwässert werden. Konventionelle Biogasanlagen verwenden zu diesem Zweck meist Kondensatabschei-

der und Schmutzfilter. Hierbei trifft das Biogas nach Verlassen des beheizten Fermenters auf eine kühlere Umgebung, das Wasser kondensiert dabei aus. Der Schmutzfilter dient dazu, mitgerissene Feststoffe aus dem Gasstrom zu entfernen. Zu diesem Zweck werden Kiestöpfe als Grobfilter eingesetzt. Meist müssen nach dieser Grobentfeuchtung weitere Schritte unternommen werden, um den Wassergehalt für weitere Aufbereitungsschritte zu vermindern. Drei Verfahren stehen dazu zur Verfügung.

#### *Kondensation von Wasser*

Bei diesem Verfahren wird der Wasserdampf mit Hilfe von Kühlenergie kondensiert. Anschliessend wird das Wasser aus dem Gasstrom durch Zentrifugalkräfte abgeschieden. Die Temperaturen können maximal auf 0,5 °C bis 1 °C gesenkt werden, da bei tieferen Temperaturen das Kondensat vereisen würde und nicht mehr abgeführt werden könnte. Mittels Kondensation kann ein Taupunkt von 5 °C beim aufbereiteten Biomethan erreicht werden. Der Vorteil dieser Methode ist, dass keine zusätzlichen Absorptions- bzw. Adsorptionsmittel benötigt werden. Negativ bei diesem Verfahren ist der hohe Energieaufwand.

#### *Adsorption von Wasser*

Als Adsorption bezeichnet man die Bindung von Gasen an der Oberfläche von festen Stoffen. Um möglichst gute Adsorptionsergebnisse zu erreichen, ist es wichtig, eine möglichst grosse Kontaktfläche zur Verfügung zu stellen. Die Adsorptionsverfahren können auf der Bindemöglichkeit von Aktivkohle, Silicagel, Aluminiumoxid oder Molekularsieben basieren. Da diese Adsorptionsmittel nach vollständiger Beladung wieder regeneriert werden müssen, benötigt man für einen kontinuierlichen Betrieb mindestens zwei Adsorber. Ein wesentlicher Vorteil gegenüber der Kondensation ist, dass das aufbereitete Biomethan Taupunkte bis –60 °C aufweist. Die Kosten sind aber erheblich höher.

#### *Absorption von Wasser*

Absorption ist die Lösung von Gasen in Flüssigkeiten. Das kann in physikalischer Form geschehen, oder mittels einer chemischen Reaktion stattfinden. Ein Verfahren, das vor allem in der Erdgasindustrie angewandt wird, ist die Glykolwäsche. Als Absorber wird entweder Monoethylenglykol oder Triethylenglykol verwendet. Dabei wird das Wasser in der Gasphase physikalisch gebunden. Das Glykol muss danach in einem geschlossenen Kreislauf bei zirka 200 °C regeneriert werden. Mit dem Verfahren kann Reingas erzeugt werden, das einen Taupunkt von –15 °C aufweist. Nachteilig wirken sich die erhöhten Kosten für den zusätzlichen Glykolkreislauf aus, zudem sind beide Absorber giftig.

### **6.3 Eigenschaften**

Die Zusammensetzung des Biogases hängt im Wesentlichen von der Art der eingesetzten Rohstoffe ab und kann durch die Prozessführung in begrenztem Umfang beeinflusst werden. Die durchschnittliche Biogaszusammensetzung und die typischen Eigenschaften sind in den Tabellen 21 und 22 aufgezeigt.

### **6.4 Nutzung als Treibstoff**

Biogas ist ein hochwertiger Energieträger, der nach entsprechender Aufbereitung sowohl zur Wärme- und Stromerzeugung als auch als Treibstoff genutzt werden kann. In dieser Studie wird lediglich auf die Nutzung als Treibstoff eingegangen.

Die Nutzung von Biogas als Treibstoff ist für grössere Biogasanlagen eine Alternative zur Verstromung, wenn die bei der Stromerzeugung anfallende Abwärme nicht genutzt oder vermarktet werden kann. Der Einsatz von Biogas im Treibstoffsektor stellt allerdings

**Tab. 21. Zusammensetzung von Biogas (Abweichungen in Abhängigkeit der zur Vergärung eingesetzten Substraten möglich).**

Stoff		Chemische Bezeichnung	Anteil [%]	Wirkung
Methan	Vol.-%	CH <sub>4</sub>	50–75	Brennbare Biogaskomponente
Kohlendioxid	Vol.-%	CO <sub>2</sub>	25–50	Vermindert den Brennwert Fördert Korrosion (schwache Kohlensäure)
Wasserdampf	Vol.-%	H <sub>2</sub> O	1–10	Korrosion
Stickstoff	Vol.-%	N <sub>2</sub>	0–5	Vermindert Brennwert
Sauerstoff	Vol.-%	O <sub>2</sub>	0–2	–
Wasserstoff	Vol.-%	H <sub>2</sub>	0–1	–
Ammoniak	Vol.-%	NH <sub>3</sub>	0–1	NO <sub>x</sub> -Emission Giftig
Schwefelwasserstoff	Vol.-%	H <sub>2</sub> S	0–1	Korrosion SO <sub>2</sub> -Emission Giftig

**Tab. 22. Eigenschaften von Biogas und Erdgas (Abweichungen in Abhängigkeit der zur Vergärung eingesetzten Substraten möglich).**

Eigenschaften		Biogas	Erdgas
Heizwert	kWh/m <sup>3</sup>	4 – 7,5 (abhängig vom Methangehalt)	9,94
Brennwert	kWh/m <sup>3</sup>	6,64 (für 60% Methan)	11,07
Dichte	kg/m <sup>3</sup>	1,2	0,7
Dichteverhältnis zu Luft	–	0,9	0,54
Zündtemperatur	°C	700	650
Verbrennungsgeschw.	m/s	0,25	0,39
Explosionsgrenzen	Vol.-%	6–12	5–15

hohe Ansprüche an die Gasqualität, da sowohl die Lagerung, Betankung als auch die Nutzung als Treibstoff mit den für Erdgas entwickelten Techniken kompatibel sein muss. Damit das aufbereitete Biogas ins Erdgasnetz eingespeist werden kann, muss es auf 200 bar komprimiert werden. Weiterhin sind zur Vermeidung von Korrosionen Schwefelwasserstoff und Ammoniak zu entfernen. Zusätzlich ist eine Trocknung und Filterung des Gases notwendig, um Verstopfungen an Düsen und in Leitungen durch Eisbildung oder Feststoffpartikel zu vermeiden. In Tabelle 23 sind die Mindestanforderungen an die Biogasqualität, die bereits in Schweden für den Einsatz von Biogas als Treibstoff Gültigkeit haben, dargestellt.

Durch den Einsatz von Biogas werden die fahrzeugspezifischen Emissionen an Stickoxiden (NO<sub>x</sub>), Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) und höheren Kohlenwasserstoffen deutlich reduziert. Weitere Vorteile des Einsatzes von Biogas im Treibstoffsektor sind die für Erdgastreibstoff vorhandene Infrastruktur und das Vorhandensein von Erdgasfahrzeugen. In einigen europäischen Staaten ist der Einsatz von Biogas im Verkehrssektor schon realisiert. Vor allem Schweden und die Schweiz können als Vorreiter genannt werden.

### Beispiel Schweiz

In der Schweiz wird schon seit Jahren intensiv an der Aufbereitung von Biogas gearbeitet. Zahlreiche Projekte wurden seit 1995 realisiert, im Jahr 2001 waren sieben Aufberei-

**Tab. 23. Anforderungen an Biogas für den Einsatz als Fahrzeugtreibstoff bzw. für die Einspeisung in das Gasnetz in Schweden.**

Bestandteile		Rohgas	Biogas-Treibstoff
Methan	Vol.-%	50–70	> 96
Kohlendioxid	Vol.-%	25–50	< 3
Wasser	g/m <sup>3</sup>	10–50	0,032
Stickstoff	Vol.-%	0–5	k.A.
Sauerstoff	Vol.-%	0–2	< 1
Wasserstoff	Vol.-%	0–1	0,5
Ammoniak	Vol.-%	0–1	k.A.
Schwefelwasserstoff	Vppm	0–6000	15
Feststoffpartikel	µm	< 100	< 5

tungsanlagen in Betrieb. Da die meisten Betriebe in der Nähe von Ortsverteilungsnetzen lokalisiert sind, ergeben sich geringe Anforderungen an die Gasverdichtung. Ein Grossteil des aufbereiteten Biogases wird als Treibstoff für Fahrzeuge verwendet. Derzeit gibt es in der Schweiz etwa 1250 Bio-/Erdgasfahrzeuge, die an 50 Tankstellen betankt werden können. Die Anforderungen für Erdgas bzw. Biogas als Treibstoff werden in der Schweiz durch die Richtlinie 13G des Schweizerischen Vereins des Gas- und Wasserfaches geregelt. Sie trat am 1.1.2004 in Kraft.

Im Grosse Raum Zürich wird das aufbereitete Biogas unter dem Markennamen «Kompogas» vertrieben. Es wird zu einem Teil in das öffentliche Erdgasnetz eingespeist oder direkt an Tankstellen als Treibstoff für Motorfahrzeuge zur Verfügung gestellt. Das Biogas wird mit den üblichen Reinigungsverfahren aufbereitet: Entschwefelung, Gastrocknung und CO<sub>2</sub>-Abscheidung durch Druckwechseladsorption (Schulz 2003).

Die Grünabfälle der Produktionsbetriebe und Restaurants der Genossenschaft Migros Zürich werden seit Anfang 2001 zu 100 % zu Anlagen der Kompogas AG gebracht und dort zu Biogas vergärt. Das Biogas wird entweder in einer Kraft-Wärme-Kopplung Anlage verstromt oder aufbereitet und in das Erdgasnetz eingespeist bzw. als Treibstoff eingesetzt. Acht Nutzfahrzeuge der Firma Migros fahren ausschliesslich mit Biogas. Mit den 2500 Tonnen Biomüll, in Biogas umgewandelt, können die diese Fahrzeuge etwa 606 000 Kilometer pro Jahr unterwegs sein. Aufgrund dieser positiven Erfahrungen überlegt das Unternehmen weitere Biogasanlagen zu errichten.

## 6.5 Nutzung der Nebenprodukte

### Dünger

Im Vergleich zur Verbrennung bleiben bei der Biogasproduktion sämtliche Nährstoffe erhalten und werden in ihrer Düngewirksamkeit teilweise sogar verbessert, so dass eine nutzbringende Rückführung in den landwirtschaftlichen Stoffkreislauf möglich ist. Beim Einsatz nachwachsender Rohstoffe kann somit ein nahezu geschlossener Nährstoffkreislauf erreicht werden, der eine ressourcenschonende Einsparung an Mineraldünger ermöglicht. Da bei der Methangärung auch Indole, Skatole und Fettsäuren abgebaut werden, die den unangenehmen Geruch von Gülle verursachen, können durch die energetische Nutzung der Wirtschaftsdünger auch Geruchsemissionen vermindert werden.

## 7. BtL-Treibstoffe (Biomass-to-Liquid)

BtL-Treibstoff (Biomass to Liquid) wird als Treibstoff der 2. Generation bezeichnet. Dabei handelt es sich um einen Biotreibstoff, der über den Zwischenschritt der Synthesegasherstellung erzeugt wird. Während die übrigen Biotreibstoffe mit Hilfe von extraktiven oder fermentativen Herstellungsverfahren eher einfach konzipiert sind, handelt es sich hierbei um ein thermochemisches Verfahren, das aus hochkomplexen Produktionsketten besteht. Neben synthetischen Diesel- und Benzintreibstoffen lassen sich auch Methanol, Methan und Wasserstoff aus Synthesegas herstellen. Nachfolgend wird ausschliesslich auf den synthetischen Dieseltreibstoff Bezug genommen.

### 7.1 Rohstoffe

Grundsätzlich eignet sich fast jede Form von Biomasse zur Herstellung von BtL-Treibstoffen. Insbesondere lignocellulosehaltige Biomasse ist im Gegensatz zu den Herstellungsverfahren der übrigen Biotreibstoffe als Rohstoff hervorragend geeignet. In Flüssigkeit gelöste oder sehr feuchte Biomasse eignet sich jedoch nicht für die Vergasung, da in der Regel je nach Technologie, ausschliesslich trockene Biomasse eingesetzt werden kann. Als Rohstoffe eignen sich vor allem:

- Stroh und sonstige landwirtschaftliche Rohstoffe,
- Ganzpflanzengetreide; Energiepflanzen, zum Beispiel schnellwachsende Baumarten; Miscanthus,
- Landschaftspflegeholz, Waldrestholz, Industrieholz,
- Sägereholz, wie Hackschnitzel; Hobelspäne; unbelastetes Altholz (A1 und A2).

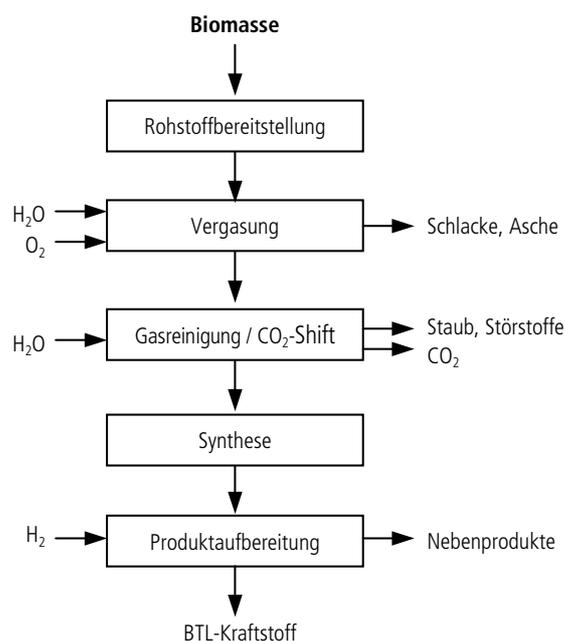
### 7.2 Herstellung von BtL-Treibstoffen

Synthetische Treibstoffe aus Biomasse sind eine relativ neue, am Markt noch nicht verfügbare Entwicklung. Derzeit existieren nur kleine Forschungs- und Pilotanlagen. Synthetische Treibstoffe aus Biomasse lassen sich mit zwei grundsätzlich verschiedenen Methoden herstellen. Zum einen gibt es die bekannten Verfahren mit Vergasung und anschließender Verflüssigung der Biomasse. Zum anderen gibt es den Prozess der Direktverflüssigung. Hierbei wird in der Regel der Rohstoff, zum Beispiel Biomasse, durch hohen Druck und hohe Temperatur in Treibstoff umgewandelt.

Derzeit führend in der Entwicklung von BtL-Treibstoffen ist das Unternehmen Choren Industries GmbH. Diese Firma errichtet zusammen mit dem Mineralölkonzern «Shell» die weltweit erste grösste technische Fertigungsanlage für BtL-Treibstoffe. Die Anlage soll demnächst mit einer Gesamtkapazität von 15 000 Tonnen BtL-Treibstoff im Jahr in Betrieb gehen. 2008 soll eine weitere Anlage mit einer Gesamtkapazität von 200 000 Tonnen im Jahr gebaut werden.

Der Herstellungsprozess synthetischer Biotreibstoffe besteht im Wesentlichen aus den Prozessstufen Biomassevergasung und Fischer-Tropsch (FT)-Synthese (Abb. 20). Während die Synthese von Kohlenwasserstoffen aus Synthesegas mittels FT-Synthese Stand der Technik ist, war in der Vergangenheit kein geeignetes Verfahren verfügbar, welches alle Anforderungen der Herstellung von Synthesegas aus stückiger Biomasse ausreichend erfüllte. Nachfolgend werden beide Prozessstufen erläutert.

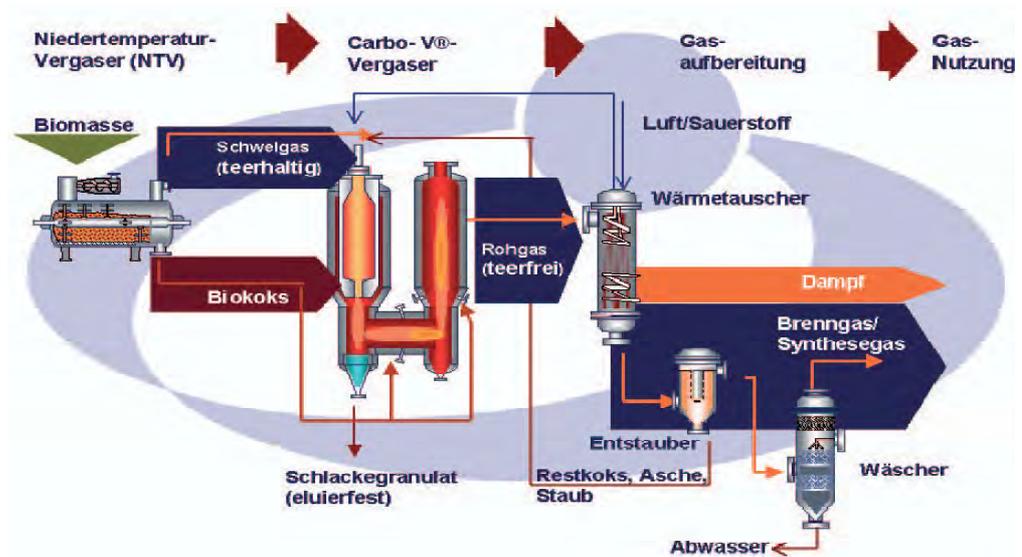
Abb. 20: Vereinfachter Verfahrensablauf der BtL-Herstellung.



### 7.2.1 Herstellung von Synthesegas aus Biomasse

Das hier vorgestellte Konzept zur Herstellung von Synthesegas aus Biomasse ist das Carbo-V®-Verfahren der Choren Industries GmbH (Abb. 21).

Abb. 21: Vereinfachtes Verfahrensschema der Herstellung von Synthesegas aus Biomasse nach dem Carbo-V®-Verfahren der Choren Industries GmbH (Quelle: Choren Industries GmbH).



Über einen mehrstufigen Prozess, der die Vorteile einer Flugstromvergasung mit denen der Niedertemperaturvergasung vereint, wird dabei ein hochwertiges, teerfreies Gas hergestellt. Bei diesem Verfahren wird zunächst die getrocknete Biomasse, welche einen Wassergehalt von 15 bis 25 Masse-% aufweist, in einem Niedertemperaturvergaser durch die autotherme Verschwelung mit Luft bei 400–600 °C in feste und flüchtige Bestandteile zersetzt. Dabei entsteht ein teerhaltiges Schwefelgas und Biokoks (Holzkohle). Anschliessend wird das teerhaltige Schwefelgas bei einem Druck von fünf bar und einer Temperaturen von 1400–1500 °C mit Luft oder Sauerstoff im Kopf des nachgeschalteten Flugstromvergasers (Hochtemperaturvergaser) zu internem Vergasungsmittel nachoxidiert. Die hohen Temperaturen ermöglichen, dass alle langkettigen Kohlenwasserstoffe und somit auch die Teere vollständig in CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> und Wasserdampf umgewandelt werden. Es entsteht ein Gas, welches im Wesentlichen nur aus N<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> und Wasserdampf besteht. Im letzten Schritt wird das intern erzeugte Vergasungsmittel mit Brennstaub aus der erzeugten Holzkohle im unteren Teil des Flugstromvergasers beladen, mit dem es endotherm zu Rohgas reagiert. Hierbei wird von oben nachströmendes CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O mit Hilfe des Koks zu CO und H<sub>2</sub> reduziert. Das Rohgas verlässt den Hochtemperaturvergaser mit einer Temperatur von 800 °C. Anschliessend wird es abgekühlt, entstaubt und durch eine Gas- und CO<sub>2</sub>-Wäsche weiter aufbereitet. Das Synthese-Rohgas kann entweder als Brenngas zur Strom-, Dampf- und Wärmeerzeugung oder als Synthesegas für die Herstellung von BtL-Treibstoffen verwendet werden.

Bei der Herstellung von Synthesegas wird ein möglichst hoher Anteil von Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H<sub>2</sub>) angestrebt. Neben CO und H<sub>2</sub> sind auch CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, geringe Mengen CH<sub>4</sub> sowie C<sub>2</sub>+ und, falls Sauerstoff als Vergasungsmittel eingesetzt wurde, erhebliche Mengen an Stickstoff im Rohgas enthalten (Hartmann 2002).

### 7.2.2 Herstellung von BtL-Treibstoffen aus Synthesegas mittels Fischer-Tropsch-Synthese

Für die Herstellung von synthetischen Benzin- und Dieseltreibstoffen eignet sich die Fischer-Tropsch-Synthese. Hierbei handelt es sich um ein grosstechnisches Verfahren zur Umwandlung von Synthesegas in flüssige und feste paraffinische Kohlenwasserstoffe. Die flüs-

sigen Kohlenwasserstoffe werden als Treibstoffe verwendet, die festen Kohlenwasserstoffe sind hochreine Wachse, die als Rohstoff in der chemischen oder pharmazeutischen Industrie genutzt werden.

Bei der Fischer-Tropsch-Synthese reagieren Wasserstoff und Kohlenmonoxid zu langkettigen Kohlenwasserstoffen. Hierzu ist ein stöchiometrisches Molverhältnis von Kohlenmonoxid zu Wasserstoff von eins zu zwei erforderlich. Die Basisreaktion der Fischer-Tropsch-Synthese lautet folgendermassen:  $\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightarrow (-\text{CH}_2-) + \text{H}_2\text{O}$ . Die Reaktion läuft n-mal ab. Dabei entsteht eine gerade Kette von n-CH<sub>2</sub>-Komponenten. Die Reaktion verläuft exotherm. Das bedeutet, dass die Wärmeabfuhr eine entscheidende verfahrenstechnische Herausforderung darstellt. Für die Synthese muss eine bestimmte Temperatur konstant eingehalten werden. Ein deutlicher Anstieg der Temperatur würde zu einer schnellen Verkokung des Katalysators und damit zum Abbruch der Synthese führen. Als Katalysatoren kommen Eisen und Kobalt zum Einsatz. In der Praxis werden Legierungen (Zusätze: Alkalimetalle, Kupfer, Ammoniak, Mangan, Vanadium, Titan) eingesetzt, mit denen man bestimmte Produktzusammensetzungen erzielen kann.

Die Synthesebedingungen der Fischer-Tropsch-Synthese lauten: 160–350 °C und 1–30 bar. Dabei führen hohe Temperaturen ( $T > 330$  °C) zur vermehrten Bildung von Leichtsiestern, das heisst kurzkettigen Kohlenwasserstoffen wie zum Beispiel Roh-Benzin oder auch Naphtha genannt. Um einen hohen Anteil an Dieseltreibstoff zu erzeugen, erfolgt eine Verschiebung in Richtung langkettiger Kohlenwasserstoffe ( $T < 250$  °C). Damit fällt auch ein relativ hoher Anteil von Wachsen an, der beim anschliessenden Hydrocracking durch Zufuhr von Wasserstoff gezielt in kürzere Ketten der Dieselfraktion aufgespalten wird.

### 7.3 Nutzung als Treibstoff

Bei BtL-Treibstoffen handelt es sich um synthetische Treibstoffe, die genau auf die Bedürfnisse moderner Motoren angepasst werden können. Dies hat zur Folge, dass BtL-Treibstoffe und moderne Verbrennungsmotoren aufeinander abgestimmt werden können. Die Folge ist eine effiziente und vollständige Verbrennung mit geringen Abgasemissionen. Gegenüber Rapsöl, Rapsölmethylester und Bioethanol besitzen BtL-Treibstoffe demzufolge deutliche Vorteile.

## 8. Versuche mit einem Diesel-Bioethanol-Gemisch

Bezüglich der Frage, welchen Einfluss eine Bioethanol-Beimischung im konventionellen Dieseltreibstoff aufweist, wurde eine Untersuchung hinsichtlich des Emissionsverhaltens an zwei Nutzfahrzeug Motoren vorgenommen.

Die Untersuchung wurde an der Forschungsanstalt ART in Tänikon an zwei heute gebräuchlichen Motoren für Traktoren (Stufe 0 und Stufe 2) durchgeführt. Eingriffe in die Motoren oder die Motorensteuerung wurden dabei nicht vorgenommen. Gemessen wurden neben den reglementierten Schadstoffen (CO, NOx, HC, PM) ebenfalls der Treibstoffverbrauch und die Leistung.

### 8.1 Treibstoff

Die Basismischungen wurden mit einem handelsüblichen Dieseltreibstoff nach SN EN 590 durchgeführt. Für die Vergleichsmessungen wurde eine Mischung von 90,3 % Diesel, 7,7 % Bioethanol und 2 % Solubilizer (Lösungsmittelvermittler) verwendet. In Tabelle 24 sind die im Auftrag von ART durchgeführten Treibstoffanalysen zusammengestellt.

Wie aus Tabelle 24 ersichtlich, zeigt die Diesel-Bioethanolmischung erwartungsgemäss einen für Dieseltreibstoff zu niedrigen Flammpunkt. Demnach dürfte eine solche Treibstoffmischung nicht als Dieseltreibstoff nach SN EN 590 bezeichnet werden. Bezüglich einer

**Tab. 24. Analyse der Treibstoffspezifikation von Diesel und Diesel-Bioethanolmischung.**

Analyse	Einheit	Diesel	Diesel-Bioethanol-Mischung	Zulässiger Bereich		Prüfmethode
				Minimum	Maximum	
Dichte (bei 15 °C)	kg/m <sup>3</sup>	824,0	826,2	800	845	EN ISO 12185
Viskosität (bei 40 °C)	mm <sup>2</sup> /s	2,100	2,083	1,50	4,00	ISO 3104
Flammpunkt	°C	59,0	< 20 (!)	55		ISO 2719
Cloudpoint	°C	-18	-10		-10	ISO 3015
CFPP	°C	-29	-28		-20	EN 116
Schwefel	mg/kg	13	10,9		50	EN ISO 20846
Kohlenstoff	Mass.%	85,57	82,84			ASTM D 5291
Wasserstoff	Mass.%	14,34	14,38			ASTM D 5291
Cetanindex	-	52,4	49,8	46,0		ISO 4264
Siedeanalyse (101,3 kPa)						ISO 3405
Angefangen bei:						
180 °C	Vol.-%	0,9	11,9 (!)		10	
250 °C	Vol.-%	50,8	50,8			
340 °C	Vol.-%	96,9	94,9 (!)	95		
350 °C	Vol.-%	98,1	96,5			
Siedebeginn:	°C	170	76			
10 Vol.-% angefangen bis	°C	201	171			
50 Vol.-% angefangen bis	°C	249	249			
90 Vol.-% angefangen bis	°C	308	322			
95 Vol.-% angefangen bis	°C	326	341			

Markteinführung müsste dieses Treibstoffgemisch als Spezialtreibstoff ausgewiesen werden. Die anderen Parameter sind bis auf die Siedeanalyse normkonform. Hinsichtlich Transport und Lagerung gelten für das Diesel-Bioethanolgemisch die Sicherheitsvorschriften der Gefahrenklasse A 2.

## 8.2 Versuchsdurchführung

Die durchgeführten Messungen fanden auf dem Motorprüfstand der ART statt. Die Messungen wurden sowohl an einem Versuchsmotor (Tab. 25) direkt am Schwungrad, als auch an einem in Betrieb stehenden Stufe-2 Traktor der Firma John Deere (Tab. 26) an der Zapfwelle durchgeführt. Hierbei wurden neben der Messung der Leistung und des Treibstoffverbrauchs auch die Abgasemissionen Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC) und Stickoxide (NOx) sowie die Partikelanzahl nach ISO 8178 Typ C (8-Stufen Test) gemessen.

**Tab. 25. Spezifikationen des Versuchsmotors.**

Traktor	Versuchsmotor
Typ	–
Motor	Same Hürlimann
Typ	1000.4WT
Zulassung	Euro 0
Treibstoff	Diesel
Anz. Zylinder	4
Hubraum	4000 cm <sup>3</sup>
Leistung	66 kW, bei 2500 min <sup>-1</sup>
Leerlaufdrehzahl	2650 min <sup>-1</sup>
Einspritzpumpe	Steckpumpe
Regler	elektronisch

**Tab. 26. Spezifikationen des John Deere Motors.**

Traktor	John Deere
Typ	6620
Motor	John Deere
Typ	H912860
Zulassung	Euro 2
Treibstoff	Diesel
Anz. Zylinder	6
Hubraum	6788 cm <sup>3</sup>
Leistung	92 kW, bei 2300 min <sup>-1</sup>
Leerlaufdrehzahl	2650 min <sup>-1</sup>
Einspritzpumpe	Common Rail
Regler	elektronisch

## 8.3 Ergebnisse

Die Messergebnisse am Stufe-0 Versuchsmotor sind in den Abbildungen 22 und 23 dargestellt. Infolge der Bioethanolbeimischung sanken die CO-Emissionen um 19,5 %. Ebenfalls, jedoch in vernachlässigbarer Masse (3,8 %), sind die NOx-Emissionen gesunken. Eine Erhöhung der Werte um 7,7 % konnte infolge der Bioethanolbeimischung bei den HC-Emissionen festgestellt werden. Ebenfalls zugenommen hat der Treibstoffverbrauch, dieser lag um 2,2 % höher als bei reinem Dieselbetrieb.

Die Bioethanolbeimischung bewirkte eine Senkung der Partikelanzahl pro kWh um 12,4 %. Ebenfalls konnte nach zwei weiteren Versuchen (Rauchmessung nach Bosch; Trübung bei freier Beschleunigung) eine Russminderungen bis etwa 20 % festgestellt werden. Die Bioethanolzumischung bewirkte eine Reduktion der Nennleistung um etwa 2 %.

Die Messergebnisse am Stufe-2 John Deere Motor sind in den Abbildungen 24 und 25 dargestellt. Auch hier sanken die CO-Emissionen infolge der Bioethanolbeimischung am stärksten, nämlich um 12,3 %. Hingegen sind NOx-Emissionen und die HC-Emissionen um 6,3 % bzw. 10,7 % angestiegen. Der Treibstoffverbrauch nahm um 4,6 % zu.

Die Partikelmessung am John Deere Motor ergab hingegen keine Verbesserung der Partikelemission durch die Zugabe der Bioethanolbeimischung. Die festgestellten Werte der Anzahl Partikel lagen auf leicht höherem Niveau (+1,5 %). Lediglich bei der Rauchmessung

Abb. 22: Emissionen der reglementierten Schadstoffe (CO, NOx, HC) und Treibstoffverbrauch des Versuchsmotors im 8-Stufen Test.

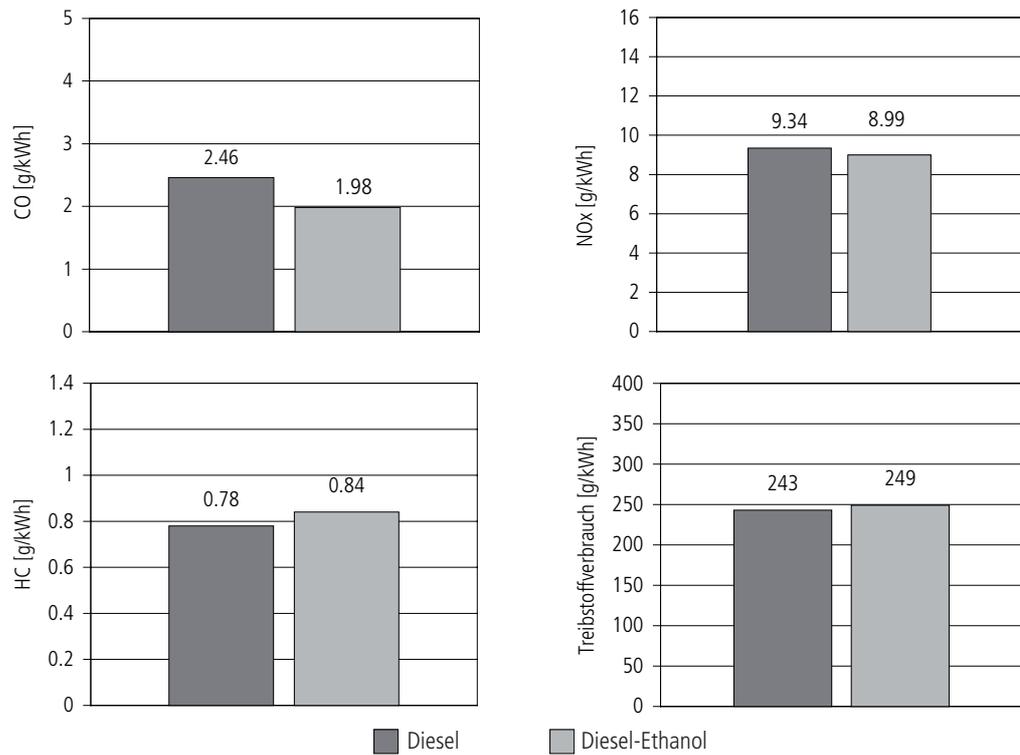
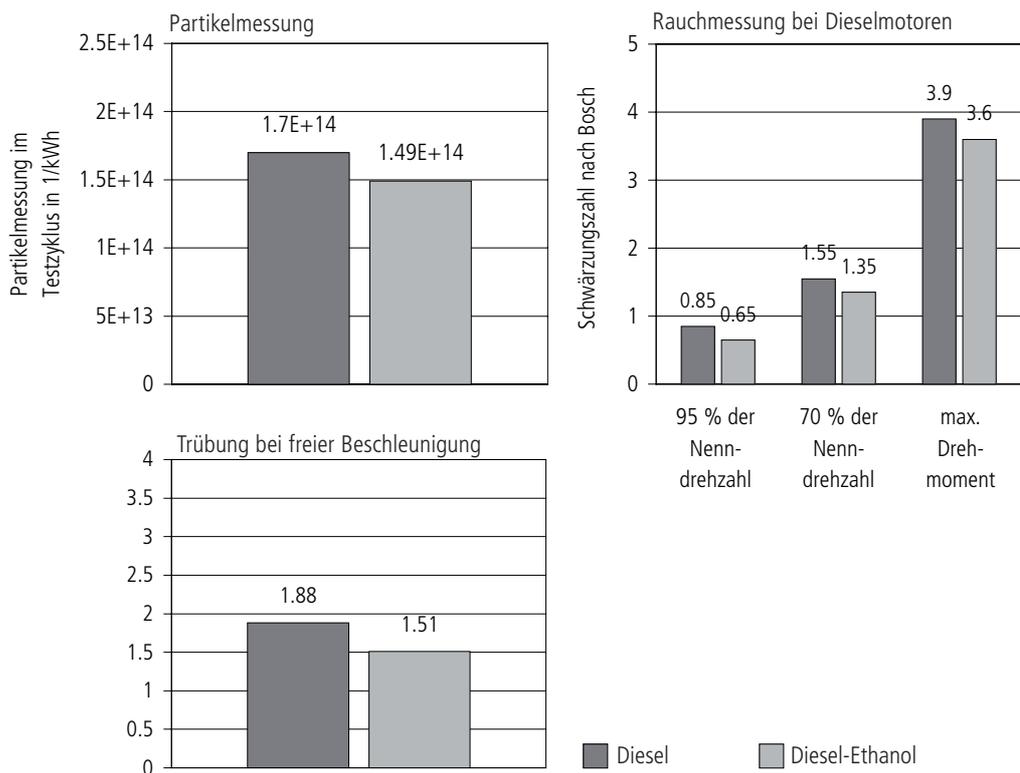


Abb. 23: Partikelmessung.



bei Dieselmotoren (nach Bosch) wurde eine Russminderung um 33,3 % bei 70 % der Nenn-drehzahl festgestellt. Die Trübung bei freier Beschleunigung lag mit Bioethanolbeimischung um 2,4 % höher.

Die Bioethanolzumischung bewirkte eine Reduktion der Leistung um etwa 7,5 % bei der Drehzahl der maximalen Leistung.

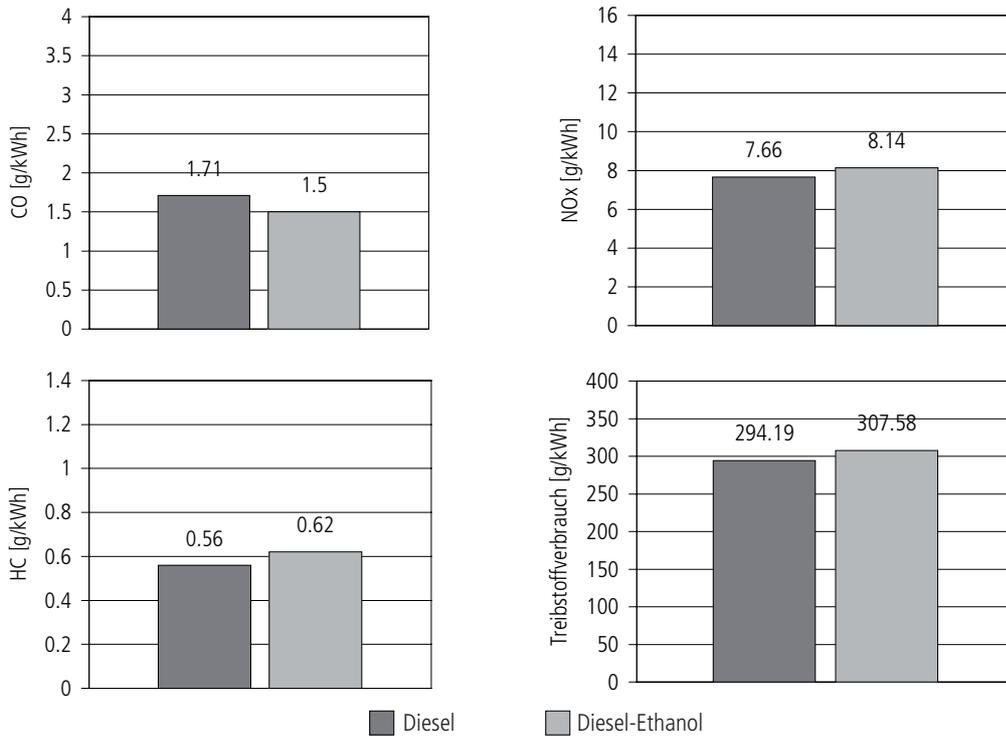


Abb. 24: Emissionen der reglementierten Schadstoffe (CO, NOx, HC) und Treibstoffverbrauch des John Deere Motors im 8-Stufen Test.

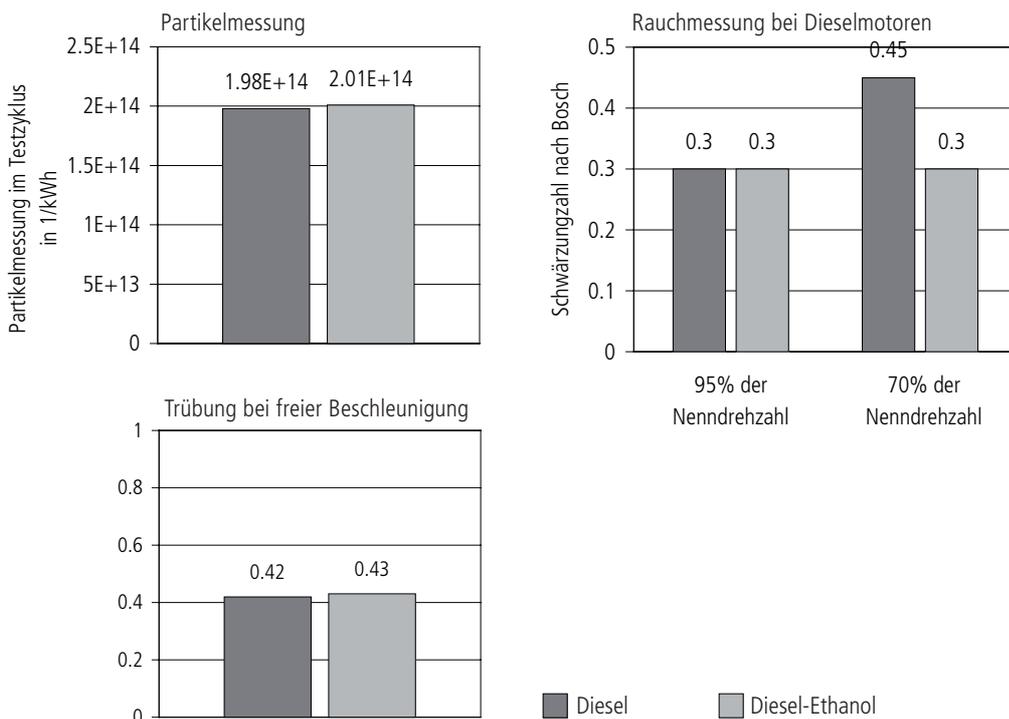


Abb. 25: Partikelmessung.

### 8.4 Interpretation

Die Veränderungen der Emissionen (CO, NOx, HC, PM) könnten auf die niedrigere Cetanzahl des Diesel-Bioethanolgemischs zurück zu führen sein. Grund für diese Annahme ist, dass die Cetanzahl einen Einfluss auf den Zündverzug hat, was sich auf den Verbrennungsbeginn und die Emissionen auswirkt. Eine weitere Annahme für die veränderten Emissionen könnte der höhere Sauerstoffanteil des Diesel-Bioethanolgemisches gegenüber dem Referenztreibstoff sein, der eine bessere Verbrennung des Treibstoffs ermöglicht.

Der bei beiden Motortypen erhöhte Treibstoffverbrauch ist auf den geringeren Heizwert des Bioethanols zurück zu führen.

Durch das Diesel-Bioethanolgemisch ist ebenfalls bei beiden Motortypen die Leistung gesunken. Diese Minderung wird vermutlich durch den geringeren Heizwert sowie durch die verminderte Cetanzahl gegenüber dem Referenztreibstoff bewirkt.

Diese Untersuchung zeigt, dass hinsichtlich der Emissionen das untersuchte Diesel-Bioethanolgemisch bei Stufe-0 Motoren geringere Emissionen verursacht, als der Referenztreibstoff. Bei neueren Motortypen, welche besser an den jeweiligen Treibstoff angepasst sind, ist dies nicht der Fall. Insbesondere ist bei neueren Motoren keine Verbesserung – eher eine leichte Erhöhung – der Partikelanzahl festzustellen. Da die Schwärzungszahl nach Bosch mit dem Gemisch etwas besser ist, lässt sich vermuten, dass sich die Partikelbildung zu kleineren Partikeln verschiebt, also anzahlmässig gleich bleibt, aber massenmässig abnimmt. Ob diese Vermutung gerechtfertigt ist, müsste anhand weiterer Versuche mit zusätzlicher Partikelmassemessung ermittelt werden.

## 9. Schlussfolgerungen

Das Ziel der Arbeit war, verschiedene Informationen und Daten der aktuellen und zukünftigen Biotreibstoffe zusammen zu stellen, wobei der Fokus auf die chemisch-technischen Verfahren zur Treibstoffherstellung gelegt wurde. Rohstoffe, Treibstoffherstellung, Eigenschaften und die Nutzung folgender Treibstoffe werden dargestellt:

- Rapsöl
- Rapsölmethylester (RME)
- Bioethanol aus zucker-, stärke- und lignocellulosehaltigen Rohstoffen
- Biogas
- Biomass-to-Liquid (BtL)

### 9.1 Rohstoffe

In der Schweiz ist das Angebot an geeigneten Rohstoffen derzeit aus klimatischen und topografischen Gründen beschränkt. Der Anbau spezieller Energiepflanzen für Treibstoff ist mindestens kurzfristig kaum zu erwarten.

- Für Pflanzenöltreibstoff und Pflanzenölmethylester eignet sich hauptsächlich Raps. 2003 wurden für Treibstoffgewinnung 1123 ha angebaut mit einem Hektarertrag von 2,83 t/ha Rapskörner, was rund 1150 l/ha Rapsöl ergibt. Somit wurden rund 1,3 Mio. Liter Rapsöl-Treibstoff erzeugt. Das Flächenpotenzial für Treibstoffraps wird auf 25 000 ha geschätzt, was etwa 30 Mio. Liter Rapsöltreibstoff ergeben würde.
- Für Bioethanol kommt als zuckerhaltiger Rohstoff die Zuckerrübe in Frage. 2003 wurden davon für die Zuckerproduktion 17 500 ha angepflanzt mit einem Hektarertrag von 72,1 t/ha. Das würde 7750 l/ha ergeben (für 1 m<sup>3</sup> Ethanol braucht es 9,3 t Zuckerrüben). Man rechnet mit einer möglichen Verdoppelung der Anbaufläche, das heisst, man könnte rund 135 Mio Liter Bioethanol gewinnen.

Von den stärkehaltigen Rohstoffen eignen sich Mais, Kartoffeln und Getreide, wobei die Kartoffeln aus verschiedenen Gründen für die Ethanolherstellung als problematisch gelten. Aus Kartoffeln könnten zirka 3300 l/ha und aus Mais knapp 3600 l/ha erzeugt werden.

Die lignocellulosehaltigen Rohstoffe werden zukünftig die wichtigste Grundlage für Bioethanol darstellen, da ihr Rohstoffpotenzial sowohl flächen- als auch ertragsmässig um ein Mehrfaches grösser ist. Heute ist allerdings die Herstellungsmethode noch nicht ausgereift.

- Für die Biogasproduktion stehen im Wesentlichen alle biogenen Reststoffe aus der Landwirtschaft, der Nahrungsmittelverarbeitung, aus Haushalten und Gewerbe sowie auch nachwachsende Rohstoffe als Substrate zur Verfügung. Es kann mit einem sehr grossen, noch weitgehend unerschlossenen Potenzial gerechnet werden.
- Die Herstellung von BtL-Treibstoffen befindet sich noch in Entwicklung. Die Versuche konzentrieren sich bisher auf die Verwendung von Holz und Stroh als Rohstoffe. Wenn dereinst der Einsatz von jeglicher Art von Biomasse möglich ist, wird wohl hier das grösste Potenzial für Biotreibstoffe vorhanden sein.

### 9.2 Herstellung

Bei der Herstellung der verschiedenen Biotreibstoffe sind grosse Unterschiede beim technischen Aufwand festzustellen.

- Die Produktion von Rapsöltreibstoff besteht aus wenigen relativ einfachen Verarbeitungsschritten. Diese müssen jedoch sehr sorgfältig und mit konstanter, ständig

überprüfter Qualität ausgeführt werden. Die Anforderungen an den Rapsöltreibstoff sind hoch und müssen dem Weihenstephaner Standard (Vornorm DIN V 51605) entsprechen. Die Produktionskapazität einer solchen Anlage kann zwischen 0,5 und 25 t Ölsaar pro Tag betragen. Solche Produktionsanlagen eignen sich für eine dezentrale, betriebliche oder gewerbliche Produktion von Rapsöltreibstoff.

- Für die Herstellung von Rapsölmethylester aus gepresstem Rapsöl ist eine Anlage für die Umesterung des Öls notwendig. Das Verfahren ist relativ unkompliziert, erfordert aber eine Anlage mit einigen verfahrenstechnischen Komponenten, deren Betrieb und Bedienung einige spezifische Kenntnisse erfordert. Die Einhaltung der genau definierten Treibstoff-Kenngrößen gemäss der europäischen Norm EN 14214 ist für den problemlosen Einsatz des RME-Treibstoffs unabdingbar. Die Qualität der Produktion muss laufend überwacht werden. Umesterungsanlagen eignen sich nicht für betriebliche oder gewerbliche Produktion. Aus Rentabilitätsgründen besteht eine starke Tendenz zu immer grösseren Anlagen. Es sind Grossanlagen mit einer Jahreskapazität von > 100 000 t RME in Planung. Neuerdings gibt es auch modular konzipierte Anlagen mit einer Jahreskapazität von wenigen tausend Tonnen Rapsmethylester, die sich für eine gewerbliche Produktion anbieten. Über Produktionsqualität, Konstanz und Rentabilität liegen noch keine Langzeiterfahrungen vor.
- Bei der Bioethanolherstellung geschieht im ersten Schritt die Rohstoffaufbereitung zu Glucose. Für zuckerhaltige und stärkehaltige Rohstoffe sind die Verfahren bekannt, wobei bei letzteren die Stärke vorgängig durch Hydrolyse verzuckert werden muss. Bei lignocellulosehaltigen Rohstoffen müssen die Celluloseketten in vergärbare Zucker aufgeschlossen werden, was eine verfahrenstechnische Herausforderung darstellt und bisher erst labor- bzw. pilotmässig angewendet werden kann.  
Die Vergärung (Fermentation) der Glucose, die anschliessende mehrstufige Destillation und die Rektifikation zu 97 %igem Alkohol ist bekannt. Für die Verwendung von Bioethanol als Treibstoff muss dieser durch einen Entwässerungsschritt noch zu 99,9 %igem Alkohol aufkonzentriert werden. Bioethanol eignet sich nicht für die Produktion in dezentralen gewerblichen Anlagen. Auch dieser Treibstoff wird in industriellen Grossanlagen erzeugt.
- Für die Biogasproduktion sind verschiedene Vergärungsverfahren bekannt und werden auf landwirtschaftlichen Betrieben oder (klein-)gewerblich eingesetzt. Allerdings nimmt auch hier tendenziell die Kapazität neuer Anlagen zu.  
Die Aufbereitung von Biogas soll jedenfalls eine Filtrierung von Stäuben, die Kondensatabscheidung, eine Gastrocknung sowie eine Entschwefelung umfassen. Diese Verfahrensschritte können für die Nutzung des Biogases vor Ort relativ einfach ausgestaltet sein. Die Nutzung als Fahrzeugtreibstoff oder die Einspeisung ins Gasnetz bedingen aber weitergehende Aufbereitung. In der Regel genügt ein einfaches Entschwefelungsverfahren nicht, zusätzlich ist eine Methan-Aufkonzentrierung (>96 %) durch Kohlendioxidabtrennung erforderlich. Derartige Gasaufbereitung wird vornehmlich in zentralen grösseren Anlagen durchgeführt.
- Die Herstellung von BtL-Treibstoffen erfolgt im Wesentlichen in drei Verfahrensschritten: Biomassevergasung zu Synthesegasen, Erzeugung von Kohlenwasserstoffen aus den Synthesegasen mittels Fischer-Tropsch-Verfahren sowie Produktaufbereitung aus den Kohlenwasserstoffen zum gewünschten Treibstoff (Diesel oder Benzin). Der zweite und dritte Schritt sind bekannt und werden bereits in anderem Zusammenhang gross-technisch angewendet. Für den ersten Schritt sind derzeit verschiedene Verfahren in Erprobung und werden erst labor- bzw. pilotmässig angewendet. Eine Produktion wird dereinst nur in industriellen Grossanlagen in Frage kommen, man spricht von Anlagen mit einer jährlichen Produktionskapazität von 200 000 t Biotreibstoff aus 1 Mio. t Biomasse.

### 9.3 Weiterer Studienbedarf

- In einem nächsten Schritt sind für die Schweiz zu den vorliegenden Zahlen ergänzende Abschätzungen und Berechnungen der Flächen- und Ertragspotenziale für die verschiedenen Rohstoffe zu machen. Daraus sind die möglichen Beiträge der verschiedenen Biotreibstoffe an die Substitution von fossilem Treibstoff abzuschätzen.
- Für alle Verfahrensvarianten der Biotreibstoff-Herstellung sind die Massen- und Energieströme zu eruieren und darzustellen.
- Als Entscheidungsgrundlage für Politik und Interessenten der Rohstoffproduktion und/oder von Herstellungsanlagen sind energetische, ökologische und finanzielle Bilanzen der verschiedenen Biotreibstoffe zu erstellen.

## Literatur

- Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, Ludwigstrasse 2, 80539 München, [www.stmlf.bayern.de](http://www.stmlf.bayern.de).
- Bundesamt für Energie BFE, Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2004. Vertrieb BBL, Vertrieb Publikationen, 3003 Bern, [www.bbl.admin.ch/bundespublikationen](http://www.bbl.admin.ch/bundespublikationen).
- Choren Industries GmbH, Frauensteiner Strasse 59, Freiberg (D), [www.choren.com](http://www.choren.com).
- Eder B. und Eder F., 2004. Pflanzenöl als Kraftstoff. Ökobuch Verlag, Staufen bei Freiberg.
- Eidgenössische Zolldirektion (EZD), Monbijoustrasse 40, 3003 Bern, [www.ezv.admin.ch](http://www.ezv.admin.ch).
- Europäische Akademie GmbH, zur Erforschung von Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen, Bad Neuenahr-Ahrweiler, [www.europaeische-akademie-aw.de](http://www.europaeische-akademie-aw.de), [europaeische.akademie@eaaw.de](mailto:europaeische.akademie@eaaw.de).
- European Commission, 2004a. Member States Reports in the frame of Directive 2003/30/EC. [http://www.europa.eu.int/comm/energy/res/legislation/biofuels\\_members\\_states\\_en.htm](http://www.europa.eu.int/comm/energy/res/legislation/biofuels_members_states_en.htm).
- European Commission, 2004b. Excise Duty Tables, Part II – Energy products and Electricity (intermediate report, May 2004) REF1.0.19.
- European Council, 2003a. Directive 2003/30/EC of the European Parliament and of the Council of 8 May 2003 on the promotion of the use of biofuels or other renewable fuels for transport.
- European Council, 2003b. Directive 2003/96/EC of 27th October 2003 restructuring the Community framework for the taxation of energy products and electricity.
- Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Hofplatz 1; 18276 Gülzow, [www.fnr.de](http://www.fnr.de), [info@fnr.de](mailto:info@fnr.de).
- Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) [www.fvv-net.de](http://www.fvv-net.de), Studie zur CO<sub>2</sub>-freien Mobilität – CO<sub>2</sub> neutrale Wege zukünftiger Mobilität durch Biokraftstoffe: Eine Bestandesaufnahme, FVV Vorhaben Nr. 814, 2004.
- Hartmann H. und Kaltschmitt M., 2002. Biomasse als erneuerbare Energie. Landwirtschaftsverlag, Schriftenreihe «Nachwachsende Rohstoffe», Band 3.
- International Energy Agency (IEA) (2004): Biofuels For Transport. An International Perspective.
- International Energy Agency (IEA) (2006): Biofuels For Transport. An International Perspective.
- Kaltschmitt M. und Hartmann H. (Hg), 2001. Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag, Berlin.
- Licht F.O., 2003. World Ethanol Markets. The outlook to 2012. London: Agra Europe.
- Licht F.O., 2004. World Ethanol and Biofuels Report. London: Agra Europe.
- Reis T., 1996. Umesterung von Rapsöl zu Rapsölmethylester. Studienarbeit am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Kraftwerkstechnik TU München, München.
- Remmele Edgar, 2003. Eigenschaften von Rapsölkraftstoff und Qualitätssicherung. In: Rapsölkraftstoff in Traktoren und Blockheizkraftwerken. Shaker Verlag, Aachen. S. 51-60.
- Richtlinie 2003/30/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Mai 2003 zur Förderung der Verwendung von Biokraftstoffen oder anderen erneuerbaren Kraftstoffen im Verkehrssektor (ABl. L 123 vom 17.5.2003, S. 42); <http://europa.eu/scadplus/leg/de/lvb/l21061.htm>.
- Richtlinie 2003/96/EG zur Restrukturierung der gemeinschaftlichen Rahmenvorschriften zur Besteuerung von Energieerzeugnissen und elektrischem Strom.
- SBV, Schweizerischer Bauernverband, 2004. Statische Erhebungen und Schätzungen, Brugg.
- Schmitz N., 2003. Bioethanol in Deutschland. Landwirtschaftsverlag, Schriftenreihe «Nachwachsende Rohstoffe», Band 21, Münster (D).
- Schulz W., Hille, M. und Tentscher, W., 2003. Untersuchung zur Aufbereitung von Biogas zur Erweiterung zur Nutzungsmöglichkeiten.
- UFOP Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V., Haus der Land- und Ernährungswirtschaft, Claire-Waldoffstr. 7, 10117 Berlin, [www.ufop.de](http://www.ufop.de)
- Wäsche A., 1994. Grosstechnische Ölgewinnung und Entwicklungsperspektiven der Ölmühlentechnik. VDI Berichte, Nr. 1126, VDI Verlag, Düsseldorf.
- Widmann B., 1994. Verfahrenstechnische Massnahmen zur Minderung des Phosphorgehaltes von Rapsöl bei der Gewinnung in dezentralen Anlagen. Dissertation, Technische Universität München.
- Wolfensberger, U. et al., 1993. Rapsmethylester als Treibstoff für Dieselmotoren. FAT-Bericht Nr. 427, Ettenhausen.
- [http://www.aecc.be/de/Emissions\\_Legislation.html](http://www.aecc.be/de/Emissions_Legislation.html) -> für Literaturzitat Europäische Kommission 2005 und EN 14214.
- Der Abgasnorm EU-Abgas-Norm Euro IV liegt die Richtlinie 98/69/EG zugrunde, welche man unter <http://europa.eu/scadplus/leg/de/lvb/l21047.htm> findet.

**Weiterführende Literatur**

- Bach H. (Hg.), Schmidt A., Wohlmeyer H., Maierhofer E., Priewasser R., 1985. Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung. Schriftenreihe für Agrarpolitik und Agrarsoziologie, Bd. XLI.
- Batel W., 1981. Pflanzenöle für die Kraftstoff- und Energieversorgung. Grundlagen der Landtechnik 2/4, 1980/1981, S.40 / S. 125.
- Batel W., Graef M., Mejer G.J., 1981. Äthanol aus nachwachsenden Rohstoffen als alternativer Kraftstoff für Fahrzeuge. Grundl. Landtechnik, Band 31, S. 125-137.
- Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (Hg.), 2005. Synthetische Biokraftstoffe. Techniken - Potenziale - Perspektiven. Landwirtschaftsverlag, Schriftenreihe «Nachwachsende Rohstoffe», Münster (D), Band 25.
- El Bassam N., 1993. Möglichkeiten und Grenzen der Bereitstellung von Energie aus Biomasse. Landbauforschung Völkenrode, Braunschweig (D), H. 2/3, S.101-111.
- Flaig H. und Mohr H., 1993. Energie aus Biomasse. Eine Chance für die Landwirtschaft. Springer-Verlag, Berlin.
- Flcury J., 2005. Biogasproduktion in Österreich. Agrarforschung H. 4, Posieux, S. 168-170.
- Goering C.E., 1993. Äthanol als erneuerbare Energiequelle. Der Förderungsdienst, H. 1, S. 1-4.
- Kaltschmitt M., 1992. Ländliche Energiequellen. Potentiale und Kosten einer Energiegewinnung aus Stroh, Biogas und Restholz. Landtechnik, H. 12, S. 601-605.
- Kaltschmitt M., 1993. Energieträgerproduktion auf pflanzlicher Basis. Landtechnik, H. 8/9, S. 400-406.
- Kaltschmitt M., 1993. Biogas - Potentiale und Kosten. Möglichkeiten und Grenzen einer Biogaserzeugung aus Reststoffen der landwirtschaftlichen Tierhaltung in der Bundesrepublik Deutschland. 2. Aufl.. KTBL-Arbeitspapier, Nr. 178.
- Kaltschmitt M und Reinhardt G. A. (Hg.), 1997. Nachwachsende Energieträger. Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung. Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden.
- Knopf U.C., 1991. Zur Einführung erneuerbarer Flüssigtreibstoffe in der Schweiz. Landwirtschaft Schweiz, H. 12, S. 647-653.
- Knopf U. C., 1992. Ein Konzept zur Steigerung der Äthanolproduktion mit Beteiligung der schweizerischen Landwirtschaft. Landwirtschaft Schweiz, H. 7, S. 363-366.
- Krahl J., 2002. Rapsölmethylester in dieselmotorischer Verbrennung. Emissionen, Umwelteffekte, Optimierungspotenziale. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 233.
- Kröger J., 1993. Raps als nachwachsender Rohstoff. Betriebswirtschaftliche Mitteilungen, Kiel (D), Nr. 460, S. 43-49.
- Mann S., 1998. Nachwachsende Rohstoffe. Ulmer, Stuttgart (Hohenheim).
- Meier U. und Hersener J.-L., 2004. Biogasproduktion: Neue Wege der Vergärung. Schweizer Landtechnik H. 3, S. 12-13.
- Perl J., 1988. Energie aus Biomasse. Verlag TÜV Rheinland, Köln.
- Plötz W. und Salchenegger S., 2005. Biogas als Treibstoff. Biogastreibstoff – Aufbereitungsanlagen und Bioethanolanlagen in Schweden. Österreichischer Biomasse-Verband.
- Richter W., Sarreiter R., Hammer K., 1984. Biogasproduktion mit einer industriell gefertigten Anlage. Bayer. Landw. Jahrbuch, H. 7, S. 967-974.
- Richter T., 2000. Biogas (sieben Artikel). Bauen für die Landwirtschaft 3.
- Rinaldi M., 2003. Praktischer Einsatz von Rapsöl-Kerosin-Gemisch als Dieseltreibstoff. Positive Erfahrungen im Langzeiteinsatz, jedoch mit einigen ungelösten Problemen. Ettenhausen. FAT-Berichte Nr. 596.
- Rinaldi M., 2003. Rapsöl-Kerosin-Gemisch als Dieseltreibstoff: Von der Idee zur kleingewerblichen Anwendung. In: Zwölftes Symposium ENERGIE AUS BIOMASSE, Biogas, Flüssigkraftstoffe, Festbrennstoffe, Ettenhausen, S.147-152.
- Schmid H., 1993. Neue Biogasanlage. Die Grüne, Nr. 26, S. 28-29.
- Schweiz. Bauernverband, Geschäftsbereich Statistik, 2005. Statistische Erhebungen und Schätzungen über Landwirtschaft und Ernährung. 2004. (81. Jahreshaft). Schweiz. Bauernverband, Brugg.
- Sieg K., 2005. Zuckersüsse Alternative. Die Grüne, Nr. 21, S. 54-57.
- Studer R., 1990. Inländischer Treibstoff aus nachwachsenden Rohstoffen. Pro und contra aus schweizerischer Sicht. Landwirtschaft Schweiz, H. 11, S. 625-628.
- Studer R., 1993. Nachwachsende Rohstoffe. Die Grüne, Nr. 8, S. 27-29.
- Thuncke K. / Wilharm T. / Stotz K., 2005. Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Rapsöl als Kraftstoff und dem Motorenöl in pflanzenöлтаuglichen Motoren. Berichte aus dem TFZ 7, Straubing.
- Wellinger A./ Egger K./ Sutter K., 1985. Biogasproduktion und -verbrauch: biologische und verfahrenstechnische Grundlagen. Schriftenreihe der FAT, Nr.23.

Wesselink W., 2003. Ethanol: Treibstoff auf pflanzlicher Basis. UFA-Revue H. 9, S. 12-13.

Wiegand S., 2005. Dezentrale Biodieselproduktion in der Landwirtschaft. Landtechnik H. 1, S. 18-19.

Wolfensberger U. und Dinkel F., 1997. Beurteilung nachwachsende Rohstoffe in der Schweiz in den Jahren 1993 –1996. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, Tänikon.

Zilmans R. und Rauschmair E., 1991. Einfluss der Zumischung von Ethanol zu Dieselmotorkraftstoff auf das Emissions- und Betriebsverhalten von Nutzfahrzeugen, insbesondere auf die Freisetzung von derzeit als krebserregend geltenden Stoffen. Bayerischen Staatministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, München.

## Schriftenreihe der FAL

---

22 – 49:	www.art.admin.ch >Dokumentation >Art Shop		
50	La structure du sol – observer et évaluer 2004 Gerhard Hasinger, Jakob Nievergelt, Milan Petrasek & Peter Weisskopf	F	CHF 45.–
51	Umweltmonitoring gentechnisch veränderter Pflanzen in der Schweiz 2004 Olivier Sanvido, Franz Bigler, Franco Widmer & Michael Winzeler	D	CHF 30.–
52	Integrierter und biologischer Anbau im Vergleich – Anbausystemversuch Burgrain 2004 Urs Zihlmann <i>et al.</i>	D	CHF 30.–
53	Ökobilanzierung des Landwirtschaftsbetriebs 2004 Dominique Rossier & Gérard Gaillard	D	CHF 30.–
54	Schwermetallbilanzen von Landwirtschaftsparzellen der nationalen Bodenbeobachtung 2005 Armin Keller, Nicolas Rossier & André Desaulles	D	CHF 30.–
55	Koexistenz verschiedener landwirtschaftlicher Anbausysteme mit und ohne Gentechnik – Konzept 2005 Olivier Sanvido <i>et al.</i>	D	CHF 30.–
56	Evaluation der Ökomassnahmen – Bereich Biodiversität Évaluation des mesures écologiques – Domaine biodiversité 2005 Felix Herzog & Thomas Walter	D/F	CHF 40.–
57	Evaluation der Ökomassnahmen – Bereich Stickstoff und Phosphor Évaluation des mesures écologiques – Domaine de l'azote et du phosphore 2005 Felix Herzog & Walter Richner	D/F	CHF 40.–
58	Ökobilanzierung von Anbausystemen im schweizerischen Acker- und Futterbau 2006 Thomas Nemecek, Olivier Huguenin-Elie, David Dubois & Gérard Gaillard	D	CHF 40.–

**Diese Serie wurde ersetzt durch die ART-Schriftenreihe**

---

## FAT-Schriftenreihe

---

33 – 63:	www.art.admin.ch >Dokumentation >Art-Shop		
64	Wirkungsanalyse der Allgemeinen Direktzahlungen 2004 Stefan Mann & Gabriele Mack	D	CHF 14.–
65	Treibstoffverbrauch und Emissionen von Traktoren bei landwirtschaftlichen Arbeiten 2005 Manfred Rinaldi, Stefan Erzinger & Ruedi Stark	D	CHF 12.–
66	Konzeptionelle Überlegungen zur Neugestaltung des Direktzahlungssystems der schweizerischen Landwirtschaft auf der Basis der Tinbergen-Regel 2005 Stefan Mann	D	CHF 8.–
67	Analyse der Repräsentativität im schweizerischen landwirtschaftlichen Buchhaltungsnetz 2005 Beat Meier	D	CHF 18.–
68	Landtechnik im Alpenraum. Tagung 10./11.5.2006 in Feldkirch 2006 Robert Kaufmann & Günther Hütl (Redaktion)	D	CHF 23.–
69	Landwirtschaftliches Bauen und Landschaft (BAULA) 2006 Antje Heinrich & Robert Kaufmann (Redaktion)	D	CHF 28.–
70	La croissance de la productivité de l'agriculture suisse, 1990–2001: Une Approche non paramétrique 2006 Ali Ferjani	F	CHF 14.–
71	Influence of alternative semi-outdoor housing systems in comparison with the conventional indoor housing on carcass composition and meat and fat quality of finishing pigs 2006 Hans Ulrich Bärlocher	E	CHF 17.–

**Diese Serie wurde ersetzt durch die ART-Schriftenreihe**

---

## ART-Schriftenreihe

---

1	Ecological impacts of genetically modified crops – Experiences from ten years of experimental field research and commercial cultivation 2006 Olivier Sanvido, Michèle Stark, Jörg Romeis & Franz Bigler	E	CHF 40.–
2	Agrarstrukturwandel im Berggebiet 2006 Stefan Lauber	D	CHF 40.–
3	1. Tänniker Melktechniktagung 2007 Robert Kaufmann & Dusan Nosal (Redaktion)	D	CHF 40.–
4	Evaluation ausgewählter agrarpolitischer Massnahmen im pflanzlichen Bereich 2007 Stefan Mann, Ali Ferjani, Markus Lips & Helmut Ammann	D	CHF 40.–

---

### Bestelladresse:

Bibliothek, Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Tänikon, CH-8356 Ettenhausen  
Telefon +41 (0)52 368 31 31, Telefax +41 (0)52 365 11 90; E-Mail: doku@art.admin.ch



## ART-Schriftenreihe 5

### Biotreibstoffe

Der weltweit steigende Verbrauch fossiler Energieträger und die damit einhergehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen haben in letzter Zeit eine zunehmend negative Wirkung auf Umwelt- und Klima. Wesentlich zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen trägt der Transportsektor bei, denn rund ein Drittel des Energiebedarfs entfällt auf den Verkehr. Neben der Holznutzung im Wärmebereich wird deshalb im Verkehrsbereich ein grosses Potenzial für die Energiesubstitution durch Biotreibstoffe geortet.

In der ganzen Kette vom Rohstoff bis zur Anwendung sind die chemisch-technischen Verfahren zur Biotreibstoff-Herstellung im Agrarsektor und bei den politischen Entscheidungsträgern relativ wenig bekannt. Gerade diese Verfahren entscheiden jedoch die wichtige Frage, ob eine kleingewerbliche, dezentrale Produktion möglich oder eher eine industrielle Grossproduktion sinnvoll ist.

Mit Fokus auf den chemisch-technischen Verfahren werden in dieser Schriftenreihe verschiedene Informationen und Daten der aktuellen und zukünftigen Herstellung von Biotreibstoffen zusammengeführt. Detailliert werden Rohstoff, Herstellung, Eigenschaften und die Nutzung folgender Biotreibstoffe dargestellt:

- Rapsöl
- Rapsölmethylester (RME)
- Bioethanol aus zucker-, stärke- und lignocellulosehaltigen Rohstoffen
- Biogas
- Biomass-to-Liquid (BtL)

ISSN 1661-7584 ART-Schriftenreihe  
ISBN 978-3-905733-06-8  
Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART  
Tänikon, CH-8356 Ettenhausen  
info@art.admin.ch, www.art.admin.ch



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Volkswirtschafts-  
departement EVD  
**Forschungsanstalt**  
**Agroscope Reckenholz-Tänikon ART**