

Äthanol aus nachwachsenden Rohstoffen als alternativer Kraftstoff für Fahrzeuge

Von Wilhelm Batel, Michael Graef, Gerd-Jürgen Mejer, Frithjof Schoedder und Gerhard Vellguth, Braunschweig-Völkenrode*)

Mitteilung aus dem Institut für landtechnische Grundlagenforschung der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode

DK 633:663.52:662.754

Die Vergärung zucker-, stärke- und zellulosehaltiger Biomasse zu Äthanol gilt als aussichtsreiches Verfahren zur Erzeugung von Kraftstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen.

Dieser Beitrag gibt einerseits einen Überblick über die heute bekannten Möglichkeiten, Äthanol allein oder zusammen mit weiteren Kraftstoffen in Otto- oder Dieselmotoren zu nutzen, und stellt andererseits die derzeitigen Verfahren der Rohstoffherzeugung und -umwandlung in Äthanol mit Hilfe von Energie- und Stoffbilanzen dar.

Inhalt

1. Einleitung
2. Betrieb von Verbrennungsmotoren mit Äthanol
 - 2.1 Energieströme im Verbrennungsmotor bei Äthanol im Vergleich zu Benzin und Dieselmotoren
 - 2.2 Betrieb von Ottomotoren mit Äthanol
 - 2.3 Betrieb von Dieselmotoren mit Äthanol
 - 2.4 Eignung von Äthanol als Kraftstoff – Zusammenfassung
3. Landwirtschaftliche Produktion von Rohstoffen für die Äthanolherzeugung
 - 3.1 Zuckerrübenanbau
 - 3.2 Weizenanbau
4. Umwandlung landwirtschaftlicher Produkte in Äthanol
 - 4.1 Verfahrensgrundlagen
 - 4.2 Energiebilanzen
5. Bewertung der Äthanolproduktion aus Biomasse aus energetischer Sicht
6. Einsatz von Äthanol in der landwirtschaftlichen Produktion

1. Einleitung

Die im letzten Jahrzehnt aufgetretene und sich voraussichtlich auch künftig weiterentwickelnde Verteuerung der verschiedenen fossilen Energieträger (Brenn- und Kraftstoffe) hat die Bemühungen um neue Energiequellen und ihre Nutzung in eine unerwartet hohe Rangordnung gestellt.

Grundsätzlich kann jeder Energieträger zur Energienutzung herangezogen werden. Ob ein solcher Schritt jedoch sinnvoll ist, wird im wesentlichen von der Wertigkeit der Energie und dem davon abhängenden Preis-Kosten-Verhältnis bestimmt. Zusätzlich oder

in Verknüpfung können Einflüsse aus den vielschichtigen Rahmenbedingungen bedeutende, oft sogar bestimmende Faktoren liefern, wie beispielsweise die Verfügbarkeit von Energie. Dabei ist zu denken an den Katastrophenfall, politische Konflikte, monopolistische Strukturen oder die Menge noch abbauwürdiger Reserven fossiler Energieträger, um nur einige Beispiele zu nennen.

Die jetzige Gewinnung von Energieträgern basiert in den industrialisierten Ländern im wesentlichen auf fossilen Stoffen. Wenn man die derzeitige Energiesituation verbessern will, so bieten sich vor allem zwei Wege an, nämlich die Förderung fossiler Energieträger bei vertretbaren Kosten zu steigern und/oder neue regenerative Energiequellen zu erschließen. Im Rahmen des zuletzt genannten Weges gewinnen die nachwachsenden Rohstoffe, die vor der industriellen Entwicklung die vorherrschenden Energieträger waren, wieder an Bedeutung.

Dieser Bericht beschränkt sich auf solche Energieträger aus nachwachsenden Rohstoffen, die als flüssige Kraftstoffe für den Antrieb von Fahrzeugen geeignet sind. Derartige Kraftstoffe besitzen eine hohe Wertigkeit und sind vergleichsweise schwer zu substituieren.

Von den nachwachsenden Rohstoffen, die beim Wachstum bereits in einer Form anfallen, daß sie als flüssige Kraftstoffe dienen können, ist derzeit nur das Pflanzenöl zu nennen. Das Öl wird aus entsprechenden Pflanzenteilen vorwiegend durch physikalische Verfahren gewonnen. Solche Öle, die derzeit im wesentlichen für die Ernährung produziert werden, sind bei entsprechender Behandlung auch als Kraftstoffe einsetzbar, wie in einem Bericht im einzelnen dargelegt ist [1].

Man kann flüssige Kraftstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen aber auch durch biologische Umwandlung gewinnen. Zu den so erzeugten Kraftstoffen gehört der Äthylalkohol (Äthanol; Ethanol).

Die Frage, ob das mit Hilfe einer biologischen Umwandlung produzierte Äthanol nach dem derzeitigen Stand der Technik als Kraftstoff wettbewerbsfähig ist oder nicht, soll nicht Gegenstand der folgenden Untersuchungen sein. Im Mittelpunkt stehen vielmehr die Einsatzmöglichkeiten von Äthanol, die derzeit bestehenden oder realisierbaren Gewinnungs- und Herstellungsverfahren, die zugrunde liegenden Energiebilanzen und ihre Wertung. Daraus ergeben sich erstens Antworten auf die Frage, ob und unter welchen Bedingungen Äthanol ein geeigneter Kraftstoff ist und wie man die Herstellung aus Biomasse technisch-energetisch zu bewerten hat, sowie zweitens Ansatzpunkte für technische Entwicklungsmöglichkeiten.

Diese technischen Daten können auch Grundlagen für ökonomische Betrachtungen einschließlich der als Folge sich schnell verändernder Rahmenbedingungen notwendigen Fortschreibung liefern. Wenn dennoch in diesem Bericht auch einige Kosten genannt werden, so im wesentlichen als Kriterien für bestimmte Betrachtungen.

Ein besonders wichtiges Kriterium bei derartigen Untersuchungen ist die schon wiederholt genannte Wertigkeit der Energie. Diese läßt sich letztlich nur in Verbindung mit dem Anwendungsfall definieren und diskutieren, so daß hierzu vorab keine allgemeingültigen Aussagen entwickelt werden.

*) Prof. Dr.-Ing. W. Batel ist Leiter des Instituts für landtechnische Grundlagenforschung, Dipl.-Ing. M. Graef, Dipl.-Ing. G.-J. Mejer, Dr. F. Schoedder und Dipl.-Ing. G. Vellguth sind wissenschaftliche Mitarbeiter in diesem Institut der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode.

2. Betrieb von Verbrennungsmotoren mit Äthanol

Von den Energieträgern aus nachwachsenden Rohstoffen ist Äthanol zum Betrieb von Verbrennungsmotoren im Grundsatz geeignet.

Über die Verwendbarkeit als Kraftstoff für die gebräuchlichen Motoren geben bestimmte Eigenschaften Aufschluß, wie chemische Zusammensetzung (Kohlenstoff-, Wasserstoff-, Aschegehalt u.a.), Siedeverhalten (bzw. Flüchtigkeit), Dichte, Viskosität, Schmierverhalten, Mischbarkeit, Lagerfähigkeit, brenntechnisches Verhalten (Heizwert, Zündwilligkeit, Klopfestigkeit, Rauch-, Flamm- und Brennpunkt). Diese Eigenschaften lassen sich durch entsprechende Kennwerte beschreiben, Tafel 1.

Je nach der Verwendung eines Kraftstoffes in Otto- oder Dieselmotoren unterscheiden sich die maßgeblichen Kennwerte. So ist z.B. für die Verwendung eines Kraftstoffes im Ottomotor die Klopfestigkeit mit der Oktanzahl als Kennwert eine wichtige Größe, für die Verwendung im Dieselmotor die Zündwilligkeit mit der Cetanzahl als Kennwert.

Da das zur Diskussion stehende Äthanol eine gegenüber Dieseldieselkraftstoff und auch Normal- bzw. Superbenzin hohe Klopfestigkeit (s. ROZ Tafel 1) aufweist, eignet es sich im Grundsatz besser für den Einsatz im Ottomotor. Wegen der schlechten Zündwilligkeit, die mit der hohen Klopfestigkeit einhergeht, ist Äthanol für den Dieselmotor nur geeignet, wenn die Einleitung der Verbrennung gesichert wird durch entsprechende konstruktive Maßnahmen bzw. durch Kraftstoffe als Zündöle oder wenn eine Steigerung der Zündwilligkeit durch Additive zum Kraftstoff erfolgt.

2.1 Energieströme im Verbrennungsmotor bei Äthanol im Vergleich zu Benzin und Dieseldieselkraftstoff

Wichtigster Kennwert für die energetische Bewertung von Kraftstoffen ist der spez. Heizwert H_u . Er gibt den Energieinhalt bezogen auf die Masseneinheit an, z.B. in kJ/kg. Der dem Motor mit dem Kraftstoff zugeführte Energiestrom \dot{E} ist

$$\dot{E} = \dot{m} H_u = \dot{V} \rho H_u \quad (1),$$

worin ρ die Dichte, \dot{m} den Massenstrom des Kraftstoffes (Masse pro Zeiteinheit) und \dot{V} den Volumenstrom des Kraftstoffes (Kraftstoffvolumen pro Zeiteinheit) darstellen.

Bei der Verwendung von Äthanol (Index A) bzw. Benzin (Index B) im gleichen Motor unter unveränderten Bedingungen ergibt sich als Verhältnis der Energieströme

$$\frac{\dot{E}_A}{\dot{E}_B} = \frac{\dot{V}_A \rho_A H_{uA}}{\dot{V}_B \rho_B H_{uB}} = \frac{\dot{V}_A \cdot 0,79 \cdot 26,8}{\dot{V}_B \cdot 0,735 \cdot 43,5} = 0,66 \frac{\dot{V}_A}{\dot{V}_B} \quad (2),$$

d.h. bei unverändertem Volumenstrom ($\dot{V}_A/\dot{V}_B = 1$) erfährt der Motor eine Leistungsminderung auf 66 % (Stoffwerte bei 20 °C).

Nach Gl. (2) ergibt sich, daß zur Erzeugung der gleichen Leistung ($\dot{E}_A/\dot{E}_B = 1$) theoretisch der 1,51fache Volumenstrom an Äthanol im Vergleich zu Benzin erforderlich ist. Das bedeutet, daß bei gleichem Tankvolumen die Reichweite oder Einsatzzeit auf 66 % schrumpft und daß der Literpreis für Äthanol nur 66 % des Literpreises für Benzin betragen dürfte, wenn beim Betrieb vergleichbarer Motoren die Kraftstoffkosten gleich sein sollen.

Kennwert	Einheit	Äthanol	Methanol	Benzin		Dieseldieselkraftstoff
				(Normal-)	(Super-)	
Heizwert H_u	MJ/kg	26,8	19,7	43,5	42,7	40,6 ÷ 44,4 (42,4)
Dichte ρ bei 20 °C	kg/l	0,79	0,79	0,72 ÷ 0,75	0,73 ÷ 0,78	0,81 ÷ 0,85 (0,829)
kin. Viskosität bei 20 °C	mm ² /s	1,4	0,9	0,6		4
Siedetemperatur	°C	78	65	25 ÷ 210		150 ÷ 360
Schmelztemperatur bei 1013 mbar	°C	- 114	- 98	- 30 ÷ - 50		- 30 ¹⁾
Verdampf.-Wärme	kJ/kg	904	1110	377 ÷ 502	419	544 ÷ 795
Abkühlung des Kraftstoff-Luft- Gemisches bei Verdampfung	K	etwa 82	etwa 132	etwa 19		
Klopfestigkeit ROZ (Oktanzahl) MOZ		111,4 ²⁾ 94,0 ²⁾	114,4 ²⁾ 94,6 ²⁾	>91 >82	>97,4 >87,2	
Zündwilligkeit (Cetanzahl) CZ		8 ²⁾	3 ²⁾			>45
Luftbedarf m_L/m_K (theoret.)	kg/kg	9,0	6,4	14,8	14,7	14,5

1) die Grenze der Filtrierbarkeit ist nach DIN 51770 im Sommer bis 0 °C, im Winter bis - 12 °C zu gewährleisten,

2) nach Wolf [3]

Diese unter Zugrundelegen konstanter Verhältnisse abgeleiteten Werte können sich verändern, wenn der Vergleich mit Motoren erfolgt, die speziell für den Alkoholbetrieb konstruiert oder für diesen Betrieb mit entsprechendem Aufwand angepaßt sind.

Die bessere Klopfestigkeit der Alkohole gestattet es, höhere Werte des Verdichtungsverhältnisses anzuwenden, z.B. etwa 14 : 1 statt üblicherweise etwa 9 : 1. Die größere Verdampfungswärme der Alkohole trägt u.a. zur besseren Zylinderladung der Motoren bei, so daß im Vergleich zu Benzin die gleiche Motorgröße für größere Leistungen oder ein kleinerer Motor für die gleiche Leistung eingesetzt werden kann. Dies führt zu besseren thermischen und mechanischen Wirkungsgraden der Energieumsetzung, so daß sich das tatsächliche Verhältnis der Kraftstoffvolumenströme von Äthanol zu Benzin von 1,51 auf 1,4 bis 1,2 verbessern läßt [4, 5]. Bei optimierten, hoch verdichteten Alkoholmotoren kann so der Äthanolverbrauch um bis 20 % gegenüber auf Benzin abgestimmten Motoren sinken [6, 7].

Mit den Kennwerten der Tafel 1 ergibt sich für das Verhältnis der Energieströme bzw. der Volumenströme von Äthanol (Index A) und Dieseldieselkraftstoff (Index D):

$$\frac{\dot{E}_A}{\dot{E}_D} = 0,60 \frac{\dot{V}_A}{\dot{V}_D} \quad (3),$$

und damit ein ähnliches Verhältnis wie beim Vergleich von Äthanol und Benzin.

Tafel 1. Kennwerte von konventionellen und alternativen Kraftstoffen [2].

2.2 Betrieb von Ottomotoren mit Äthanol

Äthanol wird als Kraftstoff für Ottomotoren bereits seit längerer Zeit verwendet. Zumischen von Äthanol zum Benzin erhöhen die Klopfestigkeit und steigern bei Rennmotoren die volumenbezogene Leistung und den Wirkungsgrad. In letzter Zeit hat die Energiesituation zum Einsatz von Äthanol-Benzin-Mischungen und auch von Reinäthanol als Ottomotor-Kraftstoff geführt.

Unter normalen Bedingungen ist ein Betrieb von Benzin-Ottomotoren mit Äthanol kurzzeitig ohne weiteres möglich. Für einen störungsfreien Dauerbetrieb, den Betrieb unter erschwerten Bedingungen, z.B. bei hohen und tiefen Temperaturen, und zur Optimierung des Kraftstoffverbrauchs und der Fahreigenschaften, z.B. der Beschleunigung, sind jedoch Anpassungen erforderlich, die zu speziellen Motoren für den Reinalkohol-Betrieb führen.

Die Betankung, Förderung, Gemischbildung und Zündung läßt sich bei Äthanol wie bei Benzin vornehmen. Um die Unterschiede in den Heizwerten und die daraus resultierenden Unterschiede der Kraftstoffvolumenströme zu berücksichtigen, die in Abschn. 2.1 abgeleitet wurden, sind der Kraftstoffbehälter, die Kraftstoffpumpe und die Vergaser- bzw. Einspritzanlage in ihren Abmessungen bzw. Durchlaßquerschnitten anzupassen, wenn man gleiche Fahrstrecken und Motorleistungen erreichen will. Einen Teil des volumetrischen Mehrverbrauchs kann man einsparen, wenn die höhere Klopfestigkeit von Äthanol ausgenutzt und das Verdichtungsverhältnis erhöht wird. Dies ist durch andere Kolben, Zylinder oder Kurbelwellen zu erreichen. Verdichtungsverhältnisse von etwa $\epsilon = 14$ sind möglich.

Der im Vergleich zu Benzin niedrige Dampfdruck von Äthanol, **Bild 1**, und die hohe Verdampfungswärme können bei Reinalkohol-Betrieb Schwierigkeiten beim Start des kalten Motors verursachen. Durch Zugabe leichtsiedender Stoffe, durch Vorwärmung des Kraftstoffes oder auch durch Zweistoff-Betrieb, d.h. Alkohol-Betrieb erst nach dem Anlassen und einer Warmlaufphase mit Benzin, lassen sich diese Probleme beseitigen.

Eine entscheidende Verbesserung des Kaltstart- und Fahrverhaltens ist auch durch Zumischen von 5 bis 10 % Benzin zum Äthanol ("Ethyl-fuel") zu erreichen [5].

Nach der Gemischbildung im Vergaser besteht eine Entmischungsneigung durch Kondensation von Äthanol im Einlaßsystem. Sie führt zu ungewollten Veränderungen im Kraftstoff-Luft-Verhältnis und trägt zur ungleichmäßigen Ladung der einzelnen Zylinder bei. Abhilfe ist durch intensive Erwärmung der Zuführeinrichtungen z.B. mit heißen Abgasen möglich.

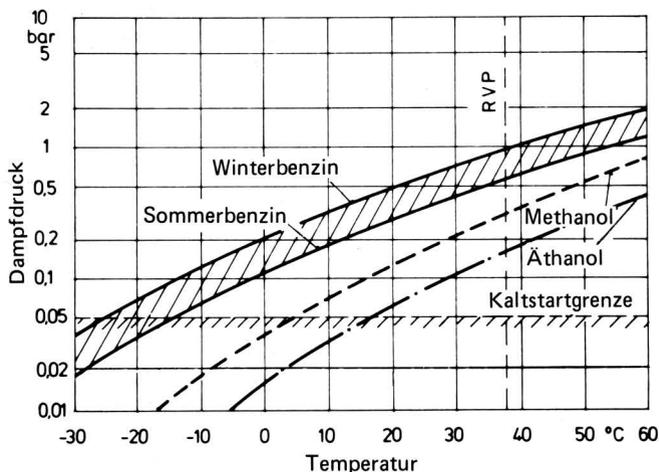


Bild 1. Dampfdruck in Abhängigkeit von der Temperatur für Äthanol und Benzin; RVP: Reid Vapour Pressure nach DIN 051754 nach [8].

Zur Erzielung einer optimalen Verbrennung empfiehlt es sich, die Zündspannung zu erhöhen, den Zündzeitpunkt zurückzunehmen und den Elektrodenabstand der Zündkerzen (Funkenstrecke) zu vergrößern [5].

Nahezu problemlos ist der Betrieb von für Benzin optimierten Ottomotoren mit Benzin-Alkohol-Mischungen, wenn die Zumischung 20–25 % [8] bzw. 30 % [9] Äthanol nicht überschreitet. Dann kann man auf umfangreiche technische Anpassungen verzichten, und es besteht die Möglichkeit, jederzeit wieder mit unvermishtem Benzin zu fahren.

Bei der Verwendung von wasserhaltigem Alkohol zur Herstellung von Benzin-Alkohol-Mischungen besteht die Gefahr der Entmischung und daraus resultierenden Betriebsstörungen. Sie läßt sich durch Zugabe von Lösungsvermittlern verringern [7, 8].

Zusammenfassend ist festzustellen, daß der für den Benzinbetrieb optimierte Ottomotor mit Äthanol betrieben werden kann. Aus energetischen Gründen sollte man aber Äthanol in speziell optimierten, technisch entwickelten – in einigen Ländern auch schon handelsüblichen – Ottomotoren einsetzen.

2.3 Betrieb von Dieselmotoren mit Äthanol

Beim konventionellen Dieselverfahren wird die angesaugte Luft so hoch verdichtet, daß dadurch eine Erwärmung auf eine Temperatur erfolgt, bei der sich das Kraftstoff-Luft-Gemisch entzündet. Eine maßgebliche Kenngröße für Dieselmotor-Kraftstoffe ist deshalb die Zündwilligkeit, die in Prüfmotoren ermittelt und als Cetanzahl angegeben wird, Tafel 1.

Äthanol hat eine so geringe Zündwilligkeit, daß es als Ersatz für Dieselmotor-Kraftstoff nicht ohne weiteres geeignet ist. Hauptziel aller Maßnahmen ist daher, die Zündwilligkeit des Äthanol-Luft-Gemisches zu verbessern. Es gibt sowohl Möglichkeiten, den Kraftstoff so zu verändern, daß er in herkömmlichen Dieselmotoren verwendbar ist, als auch Möglichkeiten, die Motoren technisch so zu gestalten, daß sie mit Äthanol als vollständigem oder teilweise Ersatz des Dieselmotor-Kraftstoffes zu betreiben sind.

Zur Anpassung des Kraftstoffes an den Motor für Reinäthanol-Betrieb wurden Versuche mit Zündbeschleunigern (z.B. Amylnitrat [10] und Kerobrisol (Cyclohexanolnitrat [3]) durchgeführt.

Da diese Zündbeschleuniger hochexplosive Stoffe sind, sollten sie direkt nach der Herstellung mit dem Alkohol vermischt werden [11]. Nach *Mischke u.a.* [12] ist ein Volumenanteil von 15–16 % Amylnitrat erforderlich, um Äthanol so zündwillig wie Dieselmotor-Kraftstoff zu machen. Durch eine Änderung des Vorgehens bei der Nitrirung können jedoch neuerdings Zündverbesserer aus Äthanol (Diäthylenglykoldinitrat bzw. Triäthylenglykoldinitrat (TEGN)) hergestellt werden, die so viel wirksamer sind, daß eine Zumischung von nur 4–6 % erforderlich ist und dadurch der Betrieb eines Dieselmotors deutlich wirtschaftlicher sein soll als ein im Zweistoffverfahren (s. unten) mit Äthanol betriebener [12]. Ein soweit an den Motor angepaßter Alkoholkraftstoff hat den großen Vorteil, daß am Motor nur geringe Änderungen notwendig sind.

Dieselmotoren mit Reinäthanol zu betreiben, ist auch durch Ansaugluftvorwärmung, z.B. durch partielle Abgasrückführung, möglich. Dies wurde an einem Erprobungsschlepper mit umschaltbarer Kraftstoffanlage gezeigt. Nach dem Kaltstart und einer Warmlaufphase mit Dieselmotor-Kraftstoff kann auf Äthanolbetrieb umgeschaltet werden, da durch die Vorwärmung die erforderliche Zündtemperatur bei der Verdichtung erreicht wird [10].

Vielversprechende Ergebnisse wurden bei Versuchen mit Motoren für Zweistoff-Verfahren (Dual-Fuel-Engines) erreicht. Bei diesen Verfahren wird zur Aufrechterhaltung der Zündung nach dem Dieselmotorprinzip weiterhin Dieselmotor-Kraftstoff verwendet, aber ein mehr oder weniger großer Anteil des Energiestromes in Form von Äthanol zugeführt.

Als mögliche Verfahren zur Gemischbildung wurden untersucht:

- Vergaser-Diesel-Verfahren [13] bzw. Verfahren mit Alkohol-Saugrohreinjection.
- Dieselkraftstoff-Alkohol-Emulsionsverfahren [14] und
- Alkohol-Direkteinspritz-Verfahren [15].

Beim Vergaser-Diesel-Verfahren bzw. der Saugrohreinjection wird der vom Motor angesaugten Luft Äthanol beigemischt. Die Zündung erfolgt durch den konventionell eingespritzten Dieselkraftstoff, der auch durch Pflanzenöl ersetzt werden kann. Dieses Verfahren hat den Vorteil der deutlichen Verminderung der Rauchemission bei Vollast. Im Teillastbereich können Probleme bei der Verbrennung auftreten in Form von Zündaussetzern und erhöhter HC- und CO-Emission. Insgesamt kann bei diesem Verfahren ein Massenanteil von etwa 70 % des Dieselkraftstoffs durch Äthanol ersetzt werden. Im Teillastbereich ist der Anteil für einen störungsfreien Betrieb niedriger zu halten. Werden Pflanzenöle statt Dieselkraftstoff als Zündöl verwendet, sind höhere Äthanol-Anteile möglich [13].

Das Emulsionsverfahren geht von einer Mischung von Dieselkraftstoff (Zündöl) und Alkohol aus. Mischungen aus Dieselkraftstoff und Alkohol entmischen schon bei geringen Wassergehalten. Deshalb muß man durch Zusätze (Lösungsvermittler, Emulgatoren) bzw. durch eine intensive Vermischung im Kraftstoffsystem mit mechanischen Mitteln versuchen, eine möglichst homogene Mischung aufrechtzuerhalten [10, 12, 14]. Bei herkömmlichen Dieselmotoren ergeben sich Probleme für die Zündwilligkeit von Äthanol-Dieselmotoren, wenn der Äthanolanteil mehr als 15 % beträgt [8].

Das günstigste Betriebsverhalten und der weitestgehende Ersatz von Dieselkraftstoff wird mit dem Alkohol-Direkteinspritz-Verfahren erreicht. Die konventionelle Einspritzanlage mit Dieselkraftstoff wird zum Anlassen des Motors und zur Aufrechterhaltung der Zündung durch einen Zündstrahl (deshalb auch Zündstrahl-Verfahren genannt) benutzt. Ein zweites System mit Kraftstoffbehälter, Leitungen, Regler, Einspritzpumpe und Einspritzdüsen ermöglicht die Einspritzung des Äthanols direkt in die Zylinder. Es muß für den erforderlichen, im Vergleich zum Dieselkraftstoff größeren Volumenstrom des Äthanols ausgelegt sein. So kann der Massenanteil des Dieselkraftstoffs bis auf einen Rest von etwa 5 % durch Äthanol ersetzt werden [15]. Es erscheint nach den bisherigen Erkenntnissen über die Eignung von Pflanzenölen als Dieselkraftstoffersatz möglich, auch diesen Rest noch zu ersetzen, z.B. durch Rapsöl [1]. Nachteilig an diesem Verfahren ist der hohe maschinentechnische Aufwand, vorteilhaft ist, daß jederzeit, sogar während des Betriebes, auf ein beliebiges Äthanol-Dieselmotoren-Verhältnis und auch auf hundertprozentigen Dieselkraftstoffbetrieb übergangen werden kann. Besonders wegen dieser Möglichkeiten und der dadurch gegebenen Betriebssicherheit kann das Alkohol-Direkteinspritz-Verfahren als aussichtsreich bezeichnet werden. Zur Verbesserung des Verbrennungsverlaufs in den Zylindern und der Abgaszusammensetzung werden mit verschiedenen Anordnungen der Einspritzdüsen zueinander Experimente durchgeführt [15].

Im Grundsatz ist für den Äthanol-Einsatz bei Dieselmotoren auch die Ausrüstung mit einer Fremdzündung möglich. Wegen der Art der für einen optimalen Betrieb erforderlichen Änderungen ist es jedoch dann nicht möglich, den Motor alternativ mit Dieselkraftstoff zu betreiben.

Neben der Verwendung von Reinäthanol als Kraftstoff wurde auch der Einsatz von wasserhaltigem Äthanol untersucht, das in der Herstellung kostengünstiger und energetisch weniger aufwendig ist, da besondere Entwässerungsverfahren (z.B. Absolutierung) entfallen [10].

Die Zündwilligkeit von wasserhaltigem Äthanol ist aber noch geringer als die von Reinäthanol, so daß ähnlich wie für wasserhaltiges Methanol [3] ein größerer Zusatz von Zündbeschleunigern notwendig ist, um bei Einstoffverfahren die erforderliche Cetanzahl zu erreichen.

Als Mischungskomponente der Dieselmotoren-Äthanol-Gemische für das Emulsionsverfahren ist wasserhaltiges Äthanol wegen der leichten Entmischbarkeit nicht zu empfehlen [10].

Wasserhaltiges Äthanol läßt sich aber bei den Zweistoffverfahren verwenden. Bei einem Volumenanteil des Wassers bis 20 % zeigen sich Vorteile besonders im Hinblick auf das Abgasverhalten, während sich der Wirkungsgrad bei den verwendeten Motoren nur unwesentlich ändert [15, 16].

Wegen der Aggressivität von Äthanol ist die Verwendung von äthanolresistenten Materialien erforderlich bzw. muß die Korrosivität der Äthanolkraftstoffe durch Zusätze vermindert werden [3].

2.4 Eignung von Äthanol als Kraftstoff – Zusammenfassung

Nach vorstehenden im Schrifttum mitgeteilten Ergebnissen ist Äthanol ein voll geeigneter Kraftstoff.

Für den herkömmlichen Ottomotor ist bei Benzin eine Zumischung bis 30 % möglich. Für Reinäthanol bleibt dieser Motor in seiner Grundkonzeption unverändert. Über einige Konstruktionsdaten ist der Motor jedoch für diesen Kraftstoff zu optimieren. Ein solcher Motor ist derzeit bereits Stand der Technik.

Für das Dieselmotorenverfahren bieten sich zwei Wege an. Der eine ist die Zugabe von Zündbeschleunigern zu Äthanol. Die dann am Motor noch notwendigen Veränderungen sind gering. Der andere Weg ist das Zweistoffverfahren, für das zwei komplette Einspritzsysteme, je eins für Dieselkraftstoff und Äthanol, vorzusehen sind. Dieses Verfahren ermöglicht auch den Einsatz wasserhaltigen Äthanols, das deutlich preisgünstiger als Reinäthanol herzustellen ist. Nachteilig sind die höheren Anschaffungskosten des Motors. Ein Betrieb herkömmlicher unveränderter Dieselmotoren mit reinem Äthanol ist nicht möglich.

Nach diesen Ausführungen, die die Eignung von Äthanol als Kraftstoff für Otto- und Dieselmotoren zeigen, wird im weiteren dargelegt, mit welchem energetischen Aufwand sich Äthanol durch biologische Umwandlung nachwachsender Rohstoffe herstellen läßt.

3. Landwirtschaftliche Produktion von Rohstoffen für die Äthanolherzeugung

Als Rohstoffe für die alkoholische Gärung kommen zucker-, stärke- und zellulosehaltige Pflanzen und Pflanzenteile in Betracht. Während zuckerhaltige Substrate direkt der alkoholischen Gärung unterworfen werden können, müssen bei den stärke- und zellulosehaltigen Substraten die höhermolekulare Kohlehydrate erst in die Form vergärbare Zucker überführt werden.

Gegenwärtig spielen in Deutschland als Rohstoffe für die Erzeugung von Alkohol in Trinkqualität eine Rolle:

- Weinbeeren und Obst für Wein, Sekt und Obstbrände,
- Gerste und in geringem Umfang Weizen für die Bierbrauerei,
- Kartoffeln, Roggen und Weizen für die Branntweinherstellung.

Als Rohstoffe für die Alkoholerzeugung stehen in Gebieten der warmen Klimate Zuckerrohr und Maniok und von den Körnerfrüchten ertragreiche Arten von Mais und Hirse im Vordergrund des Interesses.

In Mitteleuropa kommen beim gegenwärtigen Stand der Technik, bei dem für die Vergärung frischer grüner Biomasse zu Alkohol keine hinreichenden Erfahrungen vorliegen, als Rohstoffe der Alkoholgewinnung auch in naher Zukunft die ertragreichen, im Anbau bewährten stärke- und zuckerreichen Feldfrüchte in Frage: Getreide, Kartoffeln und Zuckerrüben, wobei die Sortenwahl dem Produktionsziel anzupassen ist. Im folgenden werden exemplarisch für Zuckerrüben und Weizen die Anbauverfahren angesprochen, die für die Produktion notwendigen Aufwendungen an Energie und die mit der Ernte erzielten Energiemengen abgeleitet.

3.1 Zuckerrübenanbau

Rüben zur Zuckergewinnung werden in Deutschland seit nahezu 200 Jahren angebaut. Der Rübenanbau hat sich wegen der hohen Erträge pro Flächeneinheit ausgedehnt von den tiefgründigen, von Natur nährstoffreichen Lößlehmböden auch auf die leichten Böden. Die statistischen Werte zum Zuckerrübenanbau, **Tafel 2**, zeigen, daß der Anteil der Zuckerrübenfläche an der gesamten Ackerfläche mit 5,39 % relativ gering ist. Der Grund dafür liegt weniger in den pflanzenbaulichen Ansprüchen der Zuckerrübe als vielmehr darin, daß bei der Zuckererzeugung in der EG meist ein Überschuß besteht und Anbauquoten festgelegt sind. Bei Änderung der Marktverhältnisse ist daher ein Anwachsen der Anbauflächen wahrscheinlich, weil ein höheres Anbaupotential zur Verfügung steht.

1. Landw. genutzte Fläche	12314000	ha
2. Ackerfläche insgesamt	7290000	ha
3. Mit Zuckerrüben bebaute Fläche	393000	ha
als Anteil der Ackerfläche	5,39 %	
als Anteil der landw. gen. Fläche	3,19 %	
4. Durchschnittsertrag an Rüben	466,4	dt/ha
5. gesamte Erntemenge	18340000	t

Tafel 2. Zuckerrübenanbau in der Bundesrepublik Deutschland 1979 [17].

Für den Zuckerrübenanbau wird ein tief bearbeiteter Boden mit guter Nährstoffversorgung verlangt. Die Aufwendungen an technischen Mitteln für den Zuckerrübenanbau, **Tafel 3**, weisen daher für das Energieäquivalent des aufzuwendenden Düngers und für das Energieäquivalent des Kraftstoffverbrauchs bei Bestellung, Ernte und Transport relativ hohe Werte aus. Diese ergeben sich einmal aus der notwendigen, tiefen Bodenbearbeitung und dem Aufwand bei der Herstellung eines feinkrümeligen Saatbettes zur Sicherung eines gleichmäßigen Auflaufens des relativ empfindlichen Saatgutes, zum anderen daraus, daß bei der Ernte unter oft schwierigen Bodenverhältnissen große Massen aus dem Boden gelöst und transportiert werden müssen. Im Rahmen der gesamten Aufwendungen für die Rübenproduktion bleiben die Energieäquivalente für das Saatgut und für den Pflanzenschutz relativ gering.

Einen Überblick über die mit der Ernte erzielbaren Energieäquivalente gibt **Tafel 4**. Die der Tafel zugrundeliegenden Werte entstammen bezüglich der Ernteerträge dem statistischen Jahrbuch für 1979 [17] und bezüglich der durchschnittlichen Zusammensetzung von Rüben, Blatt und Köpfen den Futterwerttabellen der DLG [24]. Die Energiewerte für die nach der Weender Analyse bestimmten Inhaltsstoffe der Pflanzenteile sind als Brennwerte H_o im Schrifttum der Tierernährung zu finden [25]. In diesem Beitrag wird als Maß für die Energie der Heizwert der wasserfrei gedachten Substanz H_u^* angesetzt. Das heißt, ausgehend vom Brennwert H_o der Stoffe, ist entsprechend dem H-Gehalt der Stoffe die Verdampfungswärme des bei der Verbrennung sich bildenden Wassers abgezogen. Die dem Wassergehalt der landwirtschaftlichen Produkte entsprechende Verdampfungswärme wird nicht abgezogen, da im allgemeinen die Produkte selbst nicht einer technischen Verbrennung zugeführt werden, bei der die Verdampfungswärme des Wassers nicht zu nutzen ist. Bei der Äthanolerzeugung werden die landwirtschaftlichen Produkte einer Verarbeitung unterworfen, bei der verfahrensbedingt unterschiedliche Wassergehalte auftreten. Ein Abzug des jeweiligen Betrags für die Verdampfungswärme würde dazu führen, daß das Energiemaß nicht konstant bleibt und eine Bilanzierung unübersichtlich würde. Andererseits ist das Endprodukt Äthanol mit dem Maßstab zu messen, der für die Bewertung technisch genutzter Energie allgemein üblich ist,

Dünger	Aufwand kg/ha	Energieäquivalent GJ/ha
N	160	12,80
P ₂ O ₅	135	1,89
K ₂ O	300	2,70
CaO + MgO	600	3,61
		21,00 GJ/ha
Saatgut (Monogerm, pilliert)	6	0,6 GJ/ha
Pflanzenschutz 3 Behandlungsgänge		0,79 GJ/ha
Pflanzenpflege 1 x Hacken		0,18 GJ/ha
Bestellung, Ernte, Transport		5,97 GJ/ha
Maschinen, Geräte, auch landwirtsch. Gebäude		2,00 GJ/ha
Aufwendungen an techn. Mitteln		30,53 GJ/ha

Tafel 3. Aufwendungen an technischen Mitteln für den Zuckerrübenanbau [18 bis 23].

Zuckerrüben	Massenanteil %	spez. Energie MJ/kg	Produkt Massenanteil x spezifische Energie MJ/kg
Rohfett	0,1	36,42	0,036
Roheiweiß	1,3	22,34	0,290
Rohfaser	1,3	14,55	0,189
N-freie Extraktst.	20,2	15,12	3,054
Spez. Energie der Rübe (bezogen auf feuchte Gesamtmasse) 3,569 MJ/kg			
Rübenblatt und Köpfe			
Rohfett	0,3	36,42	0,109
Roheiweiß	2,0	22,34	0,447
Rohfaser	1,8	14,55	0,262
N-freie Extraktst.	7,9	15,12	1,194
Spez. Energie von Blatt und Köpfen (bezogen auf feuchte Gesamtmasse)			2,012 MJ/kg
Energie in der Erntemenge von 1 ha			
Rüben	466,4 dt/ha		166,5 GJ/ha
Köpfe + Blatt	373,1 dt/ha		75,1 GJ/ha
			241,6 GJ/ha

Tafel 4. Zusammensetzung und spez. Energie (Heizwert der wasserfrei gedachten Substanz) von Zuckerrüben und von Blatt mit Köpfen [17, 24, 25].

mit dem Heizwert H_u . Nur in diesem Energiemaß sind auch die Energieäquivalente für die bei den landwirtschaftlichen und technischen Prozessen eingesetzten technischen Mittel (Kraftstoffe, chemische Produktionsmittel, Maschinen, Geräte, Gebäude) verfügbar.

Die Aufstellung zeigt, daß der Energieertrag der Rüben ganz überwiegend in Form der N-freien Extraktstoffe anfällt, daß bei Köpfen und Blättern daneben auch ein größerer Anteil aus den Eiweißstoffen stammt. Der auf die feuchte Gesamtmasse bezogene Wert der spezifischen Energie ist in den Rüben etwa 1,8mal so groß wie in Blatt und Köpfen und da im Durchschnitt auch der Rübenenertrag 1,25mal so hoch ist wie die Masse von Blatt und Köpfen, liegen nahezu 70 % der Energie in den Rüben vor. Das Energieäquivalent für Blatt und Köpfe ist mit 75,1 GJ/ha größer als das einer mittleren Ernte an Weizenkörnern (70,5 GJ/ha). Aus energetischer Sicht ist daher eine Nutzung von Blatt und Köpfen beispielsweise als Futter dringend geraten. Werden Blatt und Köpfe untergeflügt, so kann für den Düngewert wegen des hohen Gehalts an Mineralstoffen und an Roheiweiß ein Anteil von etwa 50 % des Düngaufwandes für den Zuckerrübenanbau angesetzt werden, entsprechend 10,5 GJ/ha, dabei wird jedoch die Wirkung der Zufuhr von organischem Material auf Bodenlebewesen und Bodenstruktur nicht berücksichtigt.

Wird die Energie in der Erntemenge von 1 ha (Tafel 4) auf das Energieäquivalent der Aufwendungen an technischen Mitteln (Tafel 3 zuzüglich 0,72 GJ/ha für die Blattbergung) bezogen, so ergibt sich ein Output/Input-Verhältnis $241,6/31,25 = 7,73$. Der Energiewert des extrahierbaren Zuckers beträgt 125,3 GJ/ha, das sind 51,9 % des Energieäquivalentes der insgesamt anfallenden Ernte.

3.2 Weizenanbau

Der Getreidebau ist in der pflanzlichen Produktion der Bundesrepublik Deutschland von überragender Bedeutung. So werden 42,5 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche und 71,8 % der Ackerfläche mit Getreide bestellt, **Tafel 5**. Im langjährigen Durchschnitt 1973/1979 betrug die mit Weizen bebaute Fläche 1,61 Mill. ha mit nur geringen Schwankungen. Übertroffen wird diese Fläche nur von der Fläche für den Gerstenanbau, die von 1,67 Mill. ha 1973 auf 1,99 Mill. ha 1979 angewachsen ist.

Landw. genutzte Fläche	12 314 000	ha
Ackerfläche insgesamt	7 290 000	ha
Getreidefläche insgesamt	5 234 000	ha
Weizenfläche	1 627 000	ha
Getreidefläche als Anteil der landw. genutzten Fläche	42,5	%
als Anteil der Ackerfläche	71,8	%
Weizenfläche als Anteil der landw. genutzten Fläche	13,2	%
als Anteil der Ackerfläche	22,3	%
als Anteil der Getreidefläche	31,1	%
Ø Ertrag	Getreide	43,7 dt/ha
Ø Ertrag	Weizen	49,5 dt/ha
Erntemenge	Getreide	22 872 000 t
Erntemenge	Weizen	8 061 000 t

Tafel 5. Getreideanbau in der Bundesrepublik Deutschland 1979 [17].

Hinsichtlich der Flächenenerträge steht im langjährigen Durchschnitt der Weizen an der Spitze; betrachtet man aber nur die Wintergerste, deren Anteil am Gerstenanbau von 37,5 % im Jahre 1973 auf 55 % 1979 angewachsen ist, dann lagen deren Erträge im langjährigen Durchschnitt höher als bei Weizen. In den letzten Jahren hat jedoch Weizen mit 50,1 dt/ha (1978) und 49,5 dt/ha (1979) die höchsten Erträge gebracht.

Die Energieäquivalente für die Aufwendungen im Weizenanbau wurden für die üblichen Anbau- und Ernteverfahren berechnet [18 bis 23] und in **Tafel 6** aufgelistet. Wie allgemein bei intensiver Pflanzenproduktion stehen die Energieäquivalente für den Düngeraufwand mit etwa 62 % der Energie an erster Stelle, die übrigen Anteile sind hieran gemessen recht niedrig. Der Aufwand für Saatgut, der nur die spez. Energie der Körner wiedergibt und nicht evtl. notwendige weitere Energieäquivalente für Reinigung, Aufbereitung, Transport umfaßt, liegt hier insbesondere im Vergleich mit Raps (0,24 GJ/ha) oder Zuckerrüben (0,6 GJ/ha) sehr hoch und ergibt sich aus der relativ geringen Reproduktion des Weizenkorns. Insgesamt ist mit einem Energieäquivalent für die Weizenproduktion von 25,22 GJ/ha zu rechnen, ein Wert, der deutlich hinter dem für Zuckerrübenanbau gültigen von 30,53 GJ/ha zurückbleibt.

Dünger	Aufwand kg/ha	Energieäquivalent GJ/ha
N	150	12,00
P ₂ O ₅	75	1,05
K ₂ O	100	0,90
CaO + MgO	300	1,80
		15,75 GJ/ha
Saatgut	200	2,88 GJ/ha
Pflanzenschutz		
3 Behandlungsgänge		0,79 GJ/ha
Bestellung, Ernte, Transport, Trocknung		3,80 GJ/ha
Maschinen, Geräte, auch landwirtsch. Gebäude		2,00 GJ/ha
Aufwendungen an techn. Mitteln		25,22 GJ/ha

Tafel 6. Aufwendungen an technischen Mitteln für den Weizenanbau [18 bis 23].

Der Durchschnittsertrag an Weizen wird im statistischen Jahrbuch für 1979 mit 49,5 dt/ha angegeben [17]. Bei einem durchschnittlichen Korn/Stroh-Verhältnis von 1 : 1,3 ergibt sich eine Strohernte von 64,35 dt/ha. Die durchschnittliche Zusammensetzung und die Energiewerte für Korn und Stroh sind in **Tafel 7** aufgeführt. Für das Korn ist ein Feuchtegehalt von 15,9 % zugrundegelegt. Der errechnete untere Heizwert der wasserfrei gedachten Substanz bezogen auf die feuchte Gesamtmasse von 14,2 MJ/kg korrespondiert gut mit dem Brennwert $H_u = 16$ MJ/kg, wie er von vielen Autoren für Weizen mit Lagerfeuchte (etwa 13 % Feuchtegehalt) genannt wird. Für Stroh wurden in einer neueren Arbeit von *Hofstetter* die Heizwerte ermittelt [26]. Danach ist der Heizwert des Strohs der verschiedenen Getreidearten unterschiedlich, für Wintergerste wurde der niedrigste Heizwert, für Winterroggen der höchste ermittelt, Weizenstroh liegt etwa in der Mitte. Ausgehend von dem Heizwert (H_u) des wasserfreien Strohs von 17,19 MJ/kg wird hier für Stroh mit einem Feuchtegehalt von 14 % der auf die feuchte Gesamtmasse bezogene Heizwert der wasserfrei gedachten Substanz mit 14,782 MJ/kg angesetzt.

Körner	Massenanteil	spez. Energie	Produkt Massenanteil x spezifische Energie	
	%	MJ/kg	MJ/kg	
Rohfett	1,7	36,42	0,619	
Roheiweiß	11,0	22,34	2,457	
Rohfaser	2,3	14,55	0,335	
N-freie Extraktst.	67,1	16,08	10,790	
Spez. Energie des Weizenkorns (bezogen auf feuchte Gesamtmasse)			14,201 MJ/kg	
Spez. Energie des Weizenstrohs (bezogen auf feuchte Gesamtmasse)			14,782 MJ/kg	
errechnet für einen Feuchtegehalt U = 14 % aus dem von Hofstetter [26] angegebenen Heizwert der wasserfreien Substanz H _u = 17,188 MJ/kg als Mittelwert für Weizenstroh				
Energie in der Erntemenge von 1 ha				
Weizen	49,5 dt/ha		70,5	GJ/ha
Stroh	64,35 dt/ha		95,1	GJ/ha
(Korn-Stroh-Verhältnis: 1 : 1,3)				
				165,6 GJ/ha

Tafel 7. Zusammensetzung und spez. Energie der wasserfrei gedachten Substanz von Weizenkörnern und Stroh [17, 24, 25, 26].

Da die Gewichtseinheit Stroh nahezu ebenso energiereich ist wie das Korn, ergibt sich aus dem Korn/Stroh-Verhältnis, daß die im Stroh geerntete Energiemenge etwa auch das 1,3fache der Energie in den Körnern beträgt. Aus der Energie der gesamten Ernte (Tafel 7) und dem Energieäquivalent für die Aufwendungen an technischen Mitteln (Tafel 6) folgt ein Output/Input-Verhältnis $165,6/25,22 = 6,57$. Wird das Stroh nicht genutzt, ergibt sich ein Verhältnis von $70,5/25,22 = 2,80$.

4. Umwandlung landwirtschaftlicher Produkte in Äthanol

Bei der Äthanolgärung wird Zucker unter Luftabschluß in wäßriger Lösung mit Hefe zu Äthanol und CO₂ vergoren. Liegen die Kohlehydrate des Rohstoffes in Form von Stärke vor, so ist die Stärke zuvor in Zucker umzuwandeln.

Für die technische Realisierung der Gärung sind folgende Schritte erforderlich:

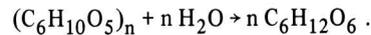
1. Gewinnen bzw. Herstellen der Zuckerlösung (Saft) (bei Stärke Verzuckerung)
2. Führen des Gärprozesses
3. Abtrennen des Alkohols aus der wässrigen Lösung
4. Verwerten bzw. Trocknen der nicht vergärbaren Stoffe.

4.1 Verfahrensgrundlagen

4.1.1 Gewinnen bzw. Herstellen der Zuckerlösung

Zuckerrüben werden zunächst gewaschen und anschließend in Schnitzelmaschinen zerkleinert. Die Zuckerlösung wird gewonnen durch Auslaugen der Schnitzel mit Wasser bei etwa 70–75 °C. Man erreicht einen Restzuckergehalt von etwa 0,2–0,4 %. Die Zuckerlösung ist direkt vergärbar.

Die in Getreide und Kartoffeln enthaltene Stärke ist von den Hefen nicht direkt vergärbar. Deshalb erfolgt zuvor ein Aufschluß der Polysaccharide zu Monosacchariden. Durch entsprechende Behandlung (Druck, Temperatur, pH-Wert, mechanische Scherkräfte) werden die Stärkezellen geöffnet. Die so freigelegte Stärke wird dann durch Spaltung und Wasseranlagerung verzuckert, d.h. zu direkt vergärbaren Monosacchariden abgebaut nach der Bruttogleichung



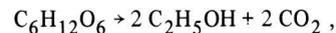
Die energetisch günstigsten Werte liefert der kontinuierliche Stärkeaufschluß mit enzymatischer Verzuckerung durch Amylasen [27].

Im Interesse niedrigen Energieeinsatzes sind beim Stärkeaufschluß hohe Trockensubstanzgehalte und niedrige Aufschlußtemperaturen anzustreben. Durch das bei der Wasseranlagerung (Hydrolyse) aufquellende Stärkekorn kommt es jedoch zu Viskositätsspitzen, welche den Trockensubstanzgehalt begrenzen. Hier ist das "Supramylverfahren" [28, 29] zu nennen, bei dem in einer Stiftmühle von der Oberfläche des in Quellung befindlichen Stärkekorns die einzelnen bereits gequollenen Stärkemoleküle durch mechanische Scherkräfte abgetrennt werden und so die Viskositätsspitze abgebaut wird. Für dieses Verfahren wird der Energiebedarf (thermische plus mechanische Energie) mit 0,7–1,2 MJ/l reinen Alkohol (r.A.) angegeben [28].

Die in Holz, Stroh usw. enthaltene Zellulose ist wie die Stärke ein aus Glukose aufgebautes hochmolekulares Polysaccharid und damit grundsätzlich für die Verzuckerung und anschließende Vergärung geeignet. Auch für die Zellulose ist zunächst der Schritt der Hydrolyse erforderlich. Dabei ist der Aufwand sowohl für die enzymatische wie auch für die thermisch-chemische Spaltung vergleichsweise hoch, so daß eine mit Zucker oder Stärke konkurrenzfähige Äthanolherzeugung noch nicht möglich ist. Dies ist u.a. durch die chemische Struktur des Grundmaterials bedingt, wobei mit zunehmendem Ligninanteil in verholzten Pflanzenteilen aufgrund der Zellulose-Inkrustierung die Spaltung erschwert wird.

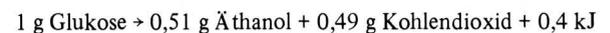
4.1.2 Gärung

Für den fermentativen Abbau von Glukose (Fruchtzucker) bei der alkoholischen Gärung lautet die Bruttogleichung



d.h. aus einem Glukosemolekül entstehen zwei Äthanolmoleküle. Auch andere Zucker wie Saccharose, Galaktose, Laktose und Maltose werden direkt zu Äthanol vergoren.

Die theoretische Umwandlungsrate entsprechend der obigen Bruttogleichung:



wird im praktischen Betrieb nicht erreicht, da es sich hier nicht um rein chemische Reaktionen, sondern um komplizierte biochemische Stoffwechselfvorgänge lebender Organismen handelt. Im einzelnen werden z.B. vom eingesetzten Zucker (100 %) etwa 3–5 % in Glycerin und 0,6–1 % in höhere Alkohole umgewandelt. 3–5 % werden für die Anzucht der Hefe (Hefezuwachs) benötigt. Je nach Gärführung und Gärdauer bleiben in Mitteleuropa 0,1–0,2 %, in Übersee bis zu 2 % des Zuckers unvergoren, und etwa 0,5 % des Äthanol verdunsten zusammen mit dem CO₂ bzw. gehen bei der Destillation in Verlust.

Von wesentlichem Einfluß auf den Prozeß der Alkoholbildung und damit auf die Äthanolausbeute und die Fermentationszeit sind [30]

- Zuckergehalt der Lösung
- Temperatur
- pH-Wert
- Stickstoff- und Vitamingehalt
- Sauerstoffpartialdruck und Redoxpotential.

Unter praktischen Bedingungen werden aus 100 kg Zucker (Saccharose) im Mittel etwa 61 l und aus 100 kg Stärke etwa 64 l reines Äthanol (r.A.) gewonnen [31, 32]. Energetisch gesehen finden sich also etwa 86 % der im Zucker enthaltenen Energie im Äthanol wieder. Da der Gärprozeß leicht exotherm abläuft, ist der Einsatz von Fremdenergie mit etwa 0,06–0,1 MJ/l r.A. gering [29].

4.1.3 Rektifikation – Absolutierung

Im Gegensatz zur Methangärung, bei der das gasförmige Methan sich praktisch selbsttätig vom Substrat trennt, befindet sich das Äthanol in der vergorenen Maische zunächst in wässriger Lösung, aus der es abgetrennt werden muß. Als technisch bisher einzig brauchbares Verfahren wird dafür zur Zeit nur die Rektifikation eingesetzt. Energiebedarf, Ausbeute und Wassergehalt des so gewonnenen Äthanols hängen ab von

- der Äthanolkonzentration in der Maische
- vom Destillationsdruck
- vom Schleppmittel für die Absolutierung
- von der Wärmewirtschaft der Anlage.

Die energetisch günstigsten Werte liefern Verfahren mit mehrstufiger Druckdestillation-Rektifikation, Mehrfach-Wärmenutzung und Benzol als Schleppmittel für die Absolutierung, falls diese erforderlich ist. Die Mehrfach-Wärmenutzung wird erreicht, indem man die Einzelprozesse bzw. Prozeßkombinationen thermisch so miteinander verknüpft, daß die Ausgangswärme des vorausgehenden Apparates jeweils als Heizwärme für den folgenden Apparat wiederverwendet wird, so wie dies z.B. bei mehrstufigen Verdampferanlagen üblich ist [33].

Bei Äthanolkonzentrationen von 8–10 % in der Maische wird dann der Energiebedarf für die Rektifikation und Absolutierung mit 6,12 MJ/l r.A. angegeben [32, 33].

4.1.4 Verwertung bzw. Beseitigung der Nebenprodukte

Neben den zunächst auf dem Feld verbleibenden Pflanzenteilen wie Wurzelmasse, Rübenblatt oder Getreidestroh sind auch die in der Äthanolfabrik anfallenden erheblichen Mengen nicht vergorener Pflanzenteile zu verwerten oder umweltneutral zu beseitigen. Menge, Wassergehalt und Energiegehalt sind bei den einzelnen Energiepflanzen unterschiedlich, so daß auch die Möglichkeiten der Verwertung bzw. der Aufwand für die umweltfreundliche Beseitigung unterschiedlich sind.

Die Bagasse, die bei der Zuckersaftgewinnung aus Zuckerrohr in der Fabrik anfällt, hat etwa 50 % Trockensubstanzgehalt. Sie kann direkt verbrannt werden und so den gesamten Energiebedarf der Äthanolfabrikation decken. Bei thermisch gut ausgelegten Anlagen verbleibt noch ein für andere Zwecke verfügbarer Energieüberschuß.

Rübenschnitzel mit etwa 15 % Trockensubstanzgehalt können als Futtermittel genutzt werden. Größere Transportwege und angestrebte Lagerfähigkeit veranlassen meist eine Konservierung durch Trocknung. Der Energieaufwand hierfür liegt mit 6,34 MJ/l r.A., entsprechen 12,68 MJ/kg Trockenschnitzel, in der Größenordnung des Heizwertes $H_u = 15,6$ MJ/kg Trockensubstanz (TS), so daß auch eine (unter Berücksichtigung des Kesselwirkungsgrades nahezu energieneutrale) Schnitzelverbrennung in Betracht kommt, wenn für die Verwertung der Schnitzel als Futtermittel kein Bedarf besteht.

Schlempe fällt bei allen Rohstoffen in großen Mengen (10 bis 15 l/l r.A.) und mit einem Trockensubstanzgehalt von ca. 7 % bei Getreide und von ca. 1 % bei Zuckerrohr und Zuckerrüben an, wenn der Zuckersaft vor der Gärung geklärt wird, bzw. von etwa 2,4 % an [31], wenn der Rohsaft ungeklärt vergoren wird und damit die nicht vergärbaren Extraktstoffe als Schlempeinhaltsstoffe anfallen. Eine direkte Verfütterung ist möglich, meistens ist jedoch wegen größerer Transportwege sowie zur Sicherung der Lagerfähigkeit eine Eindickung auf einen Trockensubstanzgehalt von ca.

70 % notwendig. Hierfür wird bei guter Wärmeverbundwirtschaft in der Fabrik ein Energieaufwand von ca. 5 MJ/l r.A. angegeben [32]. Demgegenüber steht der Energiegehalt der Schlempeinhaltsstoffe (Heizwert der Trockensubstanz) von ca. 1,5–2,5 MJ/l r.A. (ca. 10 MJ/l r.A. bei Getreideschlempe). Da die ungeklärte Einleitung in Vorfluter wegen des hohen biologischen Sauerstoffbedarfes beim Abbau der organischen Substanz aus Gründen des Umweltschutzes unzulässig ist, sind weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung bei der Schlempeverwertung bzw. Beseitigung zu untersuchen. Schlempe aus Zuckerrohr mit einem Trockensubstanzgehalt von etwa 1 % wird z.B. in Brasilien weitgehend verregnet. Damit wird eine Einsparung von Düngemitteln erreicht. Wegen der hohen Kalium- und Magnesiumgehalte der Schlempe besteht bei der Schlempeverregnung jedoch langfristig die Gefahr der Bodenverkrustung [34].

Schlempe aus Getreide wird am günstigsten in unmittelbarer Nähe der Äthanolfabrik verfüttert. Die Bedingungen hierfür sind günstiger als bei Zuckerrohr und Zuckerrüben, da der Trockensubstanzgehalt und damit der Nährwert von Getreideschlempe sehr viel höher ist und Getreide das ganze Jahr über verarbeitet werden kann. Weiterhin läßt sich bei Getreide durch Schlemperückführung beim Einmischen des Mehles der Trockensubstanzgehalt der Schlempe weiter erhöhen und damit die anfallende Schlempemenge verringern.

Die Erzeugung von Biogas aus Schlempe ist energetisch gesehen grundsätzlich interessant. Theoretisch kann aus der Getreideschlempe, die bei der Erzeugung von 1 l Äthanol anfällt, Biogas mit 6–10 MJ gewonnen werden, so daß die Kombination Getreidebrennerei – Biogasanlage ohne Bedarf an Fremdenergie auskommen könnte. Eine solche Lösung bedeutet jedoch einen beträchtlichen Investitionsaufwand [28].

Grundsätzlich ist die kostengünstige und umweltneutrale Schlempeverwertung ein gewichtiges Problem bei der Erzeugung von Gärungsäthanol. Dieser Bereich erfordert daher noch Forschungs- und Entwicklungsarbeit in besonderem Maße.

4.2 Energiebilanzen

4.2.1 Energiebewertung

Seit Jahrtausenden ist die alkoholische Gärung, seit Jahrhunderten die Brennerei für Genußzwecke und seit Jahrzehnten die Destillation für technische Zwecke bekannt. Entsprechend alt bzw. aus heutiger Sicht veraltet ist ein großer Teil der bekannten und bewährten Verfahren der Alkoholerzeugung. Die großen Unterschiede bei den Angaben im Schrifttum insbesondere bezüglich der Energiebilanzen erklären sich aus dem unterschiedlichen Entwicklungsstand und den unterschiedlichen Optimierungskriterien bzw. Zielsetzungen der betrachteten Anlagen. Um einen Vergleich mit anderen Energieträgern zu ermöglichen, werden hier Anlagen zugrundegelegt, wie man sie derzeit als Produktionsanlagen ohne technische Erprobungsaufgaben erstellen würde.

Bei der Interpretation der Energiebilanzen sind nicht nur die Energiemengen wichtig, vielmehr ist auch die Wertigkeit der verschiedenen Energieformen bzw. der eingesetzten Energieträger mit zu berücksichtigen. Dabei ist die Wertigkeit eines Energieträgers oder einer Energieform stets in bezug auf die spezielle Anwendung und die Möglichkeit anderweitiger Nutzung zu sehen. Neben dem in der Thermodynamik und Energietechnik eingeführten Bewertungskriterium nach dem Grad der Umwandelbarkeit einer Energieform, gekennzeichnet durch den Anteil an Exergie (unbeschränkt umwandelbarer Teil der Energie) und Anergie (nicht umwandelbarer Teil der Energie) [35] sind bei der Kraftstoffherstellung aus landwirtschaftlichen Rohstoffen weitere Kriterien wie z.B. Nährwert, Verdaulichkeit, Energiedichte, Lagerfähigkeit und Umweltverträglichkeit in die Bewertung mit einzubeziehen.

Für die Bewertung der beim Prozeß der Äthanolgewinnung aus landwirtschaftlichen Rohstoffen auftretenden unterschiedlichen Energieformen wird folgende Einteilung gewählt:

- A Energie von Nahrungs- und Futtermitteln
- B Hochwertige Energie, wie z.B. die Energie des erzeugten oder eingesetzten Kraftstoffes bzw. das Energieäquivalent für technische Mittel
- C Niederwertige Energie in Form von Wärme oder Prozeßenergie
- D Kostenlose Energie, Sonnenenergie
- E Nicht mehr nutzbare Energie, z.B. Abwärme.

Zu A: Die Wertigkeit der bei der Äthanolherstellung eingesetzten landwirtschaftlichen Produkte und der gewonnenen Nebenprodukte ergibt sich einerseits rein energetisch aus den Möglichkeiten ihrer technischen Nutzung, sie ist andererseits bei Einsatz als Nahrungs- oder Futtermittel bestimmt durch den Energiewert, die Verdaulichkeit und den Gehalt an Wirk- und Schutzstoffen.

Zu B: Ziel der hier betrachteten Prozesse ist die Erzeugung von Kraftstoff. Von der brutto im erzeugten Kraftstoff gespeicherten Energie ist für die Prozeßbewertung die für die Erzeugung benötigte gleichwertige Energie abzuziehen, z.B. Energie der Kraftstoffe für Bestellung, Ernte und Transport sowie der Energieaufwand an sonstigen technischen Mitteln. Nach Abzug verbleibt die netto im Kraftstoff verfügbare Energie.

Zu C: Bei der Kraftstoffherstellung allgemein und bei der Äthanolherstellung im besonderen, handelt es sich um die Umwandlung vorhandener, aber für mobile Zwecke nicht oder nur schlecht einsetzbarer Primärenergieträger in eine für die mobile Anwendung geeignete Form. Für die Bewertung der als Prozeßenergie jeweils eingesetzten Primärenergie spielt die Möglichkeit ihrer anderweitigen Verwendung oder Umwandlung eine entscheidende Rolle. Für die Bagasse des Zuckerrohrs z.B. bestehen neben der direkten Verbrennung sehr viel weniger Möglichkeiten einer anderweitigen Verwendung oder Umwandlung als z.B. für Schweröl. Unter Berücksichtigung dieser Wertigkeiten ist das Verhältnis von Aufwand an Prozeßenergie und netto mit dem Kraftstoff verfügbarer Energie ein gutes Vergleichsmaß für die energetische Bewertung verschiedener Methoden der Kraftstoffherstellung, z.B. Methanolerzeugung aus Braunkohle, Verflüssigung von Steinkohle, Cracken von Schweröl, Äthanolherstellung aus Zuckerrüben. Bei den hier betrachteten modernen Prozessen und Anlagen ist bereits eine gute Wärmewirtschaft sowie eine Wärme-Kraft-Kopplung zugrundegelegt. Das bedeutet, daß die im Fabrikationsprozeß erforderliche elektrische und mechanische Energie, z.B. für den Antrieb von Mühlen, Pumpen und sonstigen Förderanlagen aus dem angegebenen Bedarf an Prozeßenergie gedeckt wird.

Zu D: Die Sonnenenergie, die durch Biosynthese von der Pflanze gebunden und gespeichert wird, ist kostenlos. (In Mitteleuropa sind aber die für nachwachsende Rohstoffe zur Kraftstoffherstellung verfügbaren Flächen begrenzt und zumeist in anderweitiger Nutzung.) Energetisch gesehen ist die Nutzung der Anbauflächen umso besser, je mehr Sonnenenergie in der Pflanzenmasse gebunden wird. Für die Kraftstoffherstellung aussagekräftiger ist jedoch eine Größe, die auch für die landwirtschaftliche Erzeugung und die Umwandlung erforderlichen Energien berücksichtigt, z.B. die pro Flächeneinheit netto verfügbare Kraftstoffmenge.

Zu E: Nicht mehr nutzbare Energie, z.B. Abwärme, tritt bei jedem technischen Prozeß auf. Der Anteil der nicht mehr nutzbaren Energie am Gesamtenergiestrom des Prozesses ist entscheidend für die Güte des Prozesses. Dieser Anteil ist zum einen durch die thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten als theoretischer Mindestbedarf festgelegt, zum anderen dadurch bestimmt, wie weit der technische Prozeß dem thermodynamischen Idealprozeß angenähert ist. Die in den Energieflußbildern angegebenen Werte spiegeln den derzeitigen Stand der Entwicklung wider.

Aus den zuvor abgeleiteten Daten lassen sich die im folgenden wiedergegebenen Energieflußbilder für die Herstellung von Äthanol aus landwirtschaftlichen Produkten zusammenstellen.

Diese Energieflußbilder sollen dazu dienen, die Energieströme in den einzelnen Verfahrensstufen vom landwirtschaftlichen Anbau bis zum Endprodukt Äthanol aufzuzeigen, um so die Bewertung

und den Vergleich mit anderen Verfahren der Kraftstoffherzeugung zu ermöglichen.

Entsprechend den Erläuterungen bei Tafel 4 wird auch in den Energieflußbildern als Energiemaß für die landwirtschaftlichen Produkte und die Nebenprodukte der Heizwert der wasserfrei gedachten Substanz verwendet, für die Energieäquivalente der Prozeßenergie und der technischen Mittel der Heizwert.

4.2.2 Äthanol aus Zuckerrüben

Die genannten Daten ergeben das vereinfachte Massendiagramm, Bild 2, und das in Bild 3 dargestellte Energieflußbild mit den wichtigsten Stoffmengen und gewählten Verfahrensschritten.

Die durchschnittliche Ernte betrug 1979 46640 kg/ha Zuckerrüben mit einem mittleren Zuckergehalt von 16,8 % und 37310 kg/ha Rübenkopf und -blatt. Der Energiegehalt des Hauptproduktes, der Rüben, beträgt 166,5 GJ/ha, der des Nebenproduktes Kopf und Blatt 75,1 GJ/ha (Düngewert 10,5 GJ/ha bei Unterpflügen) und der der ganzen Ernte 241,6 GJ/ha. Dabei handelt es sich zum ganz überwiegenden Teil um gebundene Sonnenenergie. Die Aufwendungen an technischen Mitteln für den Zuckerrübenanbau (Tafel 3) als hochwertige Energie von 30,5 GJ/ha schaffen die notwendigen Voraussetzungen für die Ausnutzung der Sonnenenergie.

Hochwertige technische Energie muß auch aufgewendet werden für die Errichtung und Erhaltung der Äthanolfabrik. Nach Houben [32] sind dafür 460 kJ/l r.A. entsprechend 2,4 GJ/ha aufzuwenden. Für den Betrieb der gewählten Äthanolfabrik ist Prozeßenergie von 95,7 GJ/ha erforderlich.

In der ersten Fabrikationsstufe erfolgt die Gewinnung des vergärbaren Zuckersaftes. Hier ist zunächst beim innerbetrieblichen Transport und bei der Reinigung mit ca. 0,5 % Verlust der Rübenmasse zu rechnen. Der Heizwert der Trockensubstanz des ungeklärten Saftes, in dem außer dem Zucker auch noch andere Stoffe gelöst sind, beträgt 125,3 GJ/ha. Der Heizwert der vergärbaren Substanz (Zucker) beträgt 114,0 GJ/ha. Der Aufwand an Prozeßenergie, vorwiegend Dampf, für die Stufe der Saftgewinnung einschließlich Sterilisation erfordert 3300 kJ/l r.A. entsprechend 15,2 GJ/ha.

Bei der Gärung wird entsprechend Abschnitt 4.1.2 aus den 7536,5 kg/ha Zucker 4597 l/ha Äthanol mit dem Heizwert 98,4 GJ/ha erzeugt. Diese Stufe ist nicht verlustfrei, d.h. ein Teil der im Saft enthaltenen Energie wird für die Stoffwechsellvorgänge der Hefe verbraucht, ein anderer Teil verbleibt in Form von Nebenprodukten in der Schlempe. Der Aufwand an Prozeßenergie für diese Prozeßstufe ist mit 0,3 GJ/ha gering.

Den größten Anteil an Prozeßenergie erfordert die Abtrennung des Wassers, das sind

- Rektifikation und Absolutierung des Äthanols mit 6,12 MJ/l r.A. entsprechend 28,1 GJ/ha,
- Schlempeindickung mit 5,0 MJ/l r.A. entsprechend 23 GJ/ha,
- Schnitzeltrocknung mit 6,34 MJ/l r.A. entsprechend 29,1 GJ/ha.



Bild 2. Stammbaum (Massenflußbild für 1 ha) für die Herstellung von Äthanol aus Zuckerrüben.

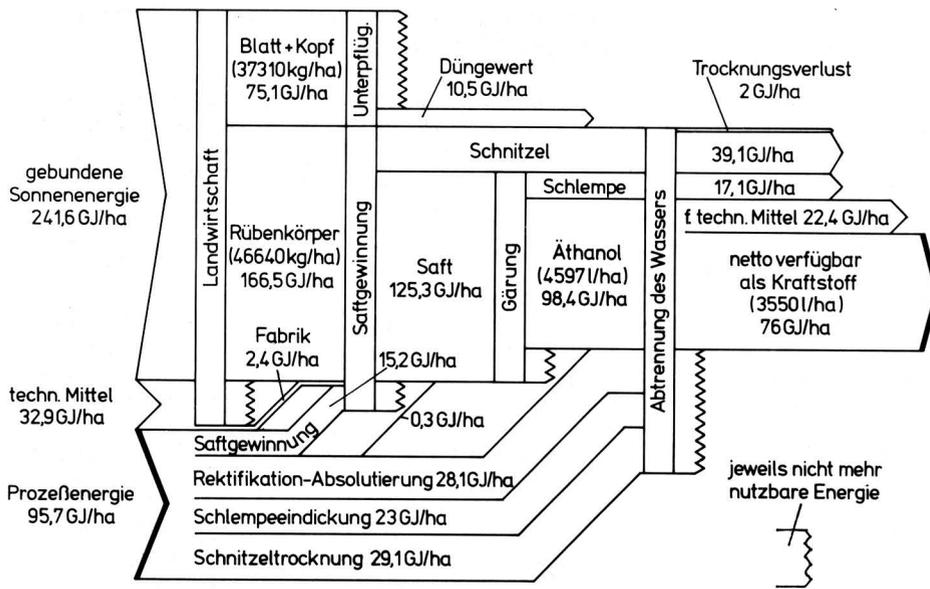


Bild 3. Energieflußbild für die Erzeugung von Äthanol aus Zuckerrüben; zugrundegelegt sind die im Bild genannten, erprobten Verfahrensschritte aufbauend auf der Extraktion von Rübenschnitzeln.

Auf Möglichkeiten, diesen Energieaufwand zu senken, findet man in Abschn. 4.1.4 Hinweise.

Summarisch gesehen werden pro ha 4597 l reines (wasserfreies) Äthanol mit einem Heizwert von 98,4 GJ/ha hergestellt. Neben dem Äthanol werden Trockenschnitzel mit 39,1 GJ/ha und eingedickte Schlempe mit 17,1 GJ/ha gewonnen. Dafür ist außer der Prozeßenergie von 95,7 GJ/ha ein Energieäquivalent für die technischen Mittel von 32,9 GJ/ha aufzuwenden. Wenn Blatt und Köpfe zur Düngung untergepflügt werden, verringert sich dieser Aufwand um den Düngewert des Blattes in Höhe von 10,5 GJ/ha auf 22,4 GJ/ha. Zieht man dieses Energieäquivalent von der gleichwertigen Energie des erzeugten Kraftstoffes ab, so verbleiben als netto verfügbarer Kraftstoff 3550 l/ha, entsprechend 76,0 GJ/ha, wobei allerdings die notwendige Prozeßenergie noch nicht berücksichtigt ist.

4.2.3 Äthanol aus Weizen

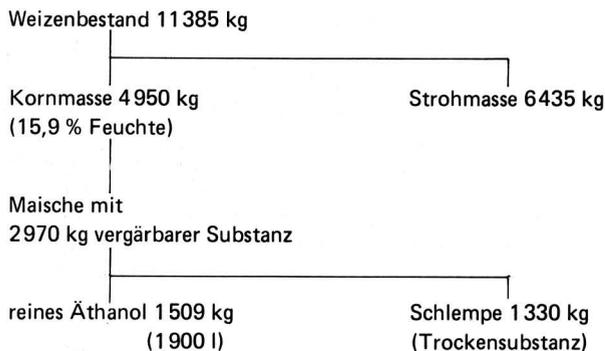


Bild 4. Stammbaum (Massenflußbild für 1 ha) für die Herstellung von Äthanol aus Weizen.

Bild 4 zeigt das vereinfachte Massendiagramm für die Erzeugung von Äthanol aus Weizen, **Bild 5** das dazugehörige Energieflußbild entsprechend den genannten Daten. Die durchschnittliche Ernte beträgt 4950 kg/ha Korn mit einem Heizwert der Trockensubstanz von 70,5 GJ/ha und 6435 kg/ha Stroh mit 95,1 GJ/ha. Für die landwirtschaftliche Erzeugung sind 25,2 GJ/ha, für die Errichtung und Erhaltung der Äthanolfabrik 0,9 GJ/ha, jeweils hochwertige technische Energie erforderlich. Der Aufschluß der Stärke nach dem Supramylverfahren [28] erfordert 800 kJ/l r.A. \cong 1,5 GJ/ha und die Gärung 60 kJ/l r.A. \cong 0,1 GJ/ha. So entstehen aus 2970 kg/ha Stärke 1900 l/ha Äthanol mit dem Heizwert von 40,7 GJ/ha. Rektifikation und Absolutierung erfordern 6000 kJ/l r.A. \cong 11,4 GJ/ha, die Schlempeeindampfung 5000 kJ/l r.A. \cong 9,5 GJ/ha.

Summarisch gesehen werden pro ha neben dem Äthanol mit einem Heizwert von 40,7 GJ/ha eingedickte Schlempe mit dem Heizwert 25,8 GJ/ha und Stroh mit dem Heizwert 95,1 GJ/ha erzeugt. Dafür ist neben der Sonnenenergie ein Aufwand an Prozeßenergie von 22,5 GJ/ha erforderlich. Wenn die Schlempe nicht eingedickt, sondern naß verfüttert wird, vermindert sich die erforderliche Prozeßenergie auf 13,0 GJ/ha. Weiterhin ist ein Aufwand an hochwertiger Energie für technische Mittel von 26,1 GJ/ha erforderlich. Zieht man dieses Energieäquivalent von der gleichwertigen Energie des erzeugten Kraftstoffes ab, so verbleiben als netto verfügbarer Kraftstoff 682 l/ha entsprechend 14,6 GJ/ha, wobei die Prozeßenergie nicht berücksichtigt ist.

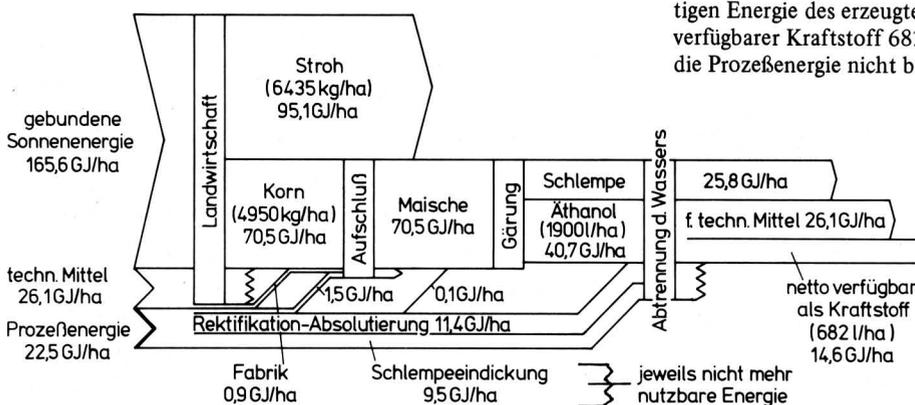


Bild 5. Energieflußbild für die Erzeugung von Äthanol aus Weizen.

4.2.4 Äthanol aus Zuckerrohr

Das nach Daten von *Houben* [32] zusammengestellte vereinfachte Massendiagramm für die Erzeugung von Äthanol aus Zuckerrohr zeigt **Bild 6**, **Bild 7** ist das zugehörige Energieflußbild.

Der jährliche mittlere Zuckerrohrertrag liegt bei 70 t/ha. Für die landwirtschaftliche Erzeugung muß jährlich hochwertige Energie für technische Mittel von 9,6 GJ/ha aufgewendet werden. Für die Errichtung und Erhaltung der Äthanolfabrik sind 463 MJ/l r.A. entsprechend 2,3 GJ/ha anzusetzen. Für die Saftgewinnung werden 6000 kJ/l r.A. entsprechend 29,4 GJ/ha benötigt, für die Rektifikation und Absolutierung 6100 MJ/l r.A. \approx 29,9 GJ/ha und für die Schlempeindampfung 5000 MJ/l r.A. \approx 24,5 GJ/ha. Von Vorteil bei der Verarbeitung von Zuckerrohr zu Äthanol ist, daß bei der Rohsaftgewinnung etwa 25 % der Zuckerrohrmasse als Bagasse anfallen. Die Bagasse ist das abgepreßte Zuckerrohr, das mit einem Feuchtegehalt von etwa 50 % und einem spez. Heizwert $H_u = 8800$ kJ/kg durch Verbrennung Energie von 154 GJ/ha liefert. Diese Energie deckt den gesamten Prozeßenergiebedarf der Äthanolfabrik, und es verbleibt noch ein Überschuß von 70,2 GJ/ha, der für andere Zwecke verfügbar ist.

Summarisch gesehen wird jährlich pro ha neben dem Äthanol mit einem Heizwert von 104,9 GJ/ha noch eingedickte Schlempe mit 9,24 GJ/ha und ein Überschuß an Verbrennungswärme von 70,2 GJ/ha erzeugt. Dafür ist neben der Sonnenenergie ein Aufwand an hochwertiger Energie für technische Mittel von 11,9 GJ/ha erforderlich. Zieht man auch hier dieses Energieäquivalent von der gleichwertigen Energie des erzeugten Kraftstoffs ab, so verbleiben als netto verfügbarer Kraftstoff 4344 l/ha, entsprechend 93,0 GJ/ha.

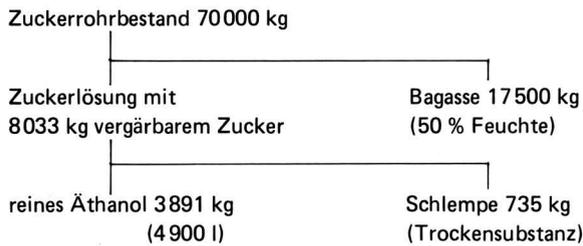


Bild 6. Stammbaum (Massenflußbild für 1 ha) für die Herstellung von Äthanol aus Zuckerrohr.

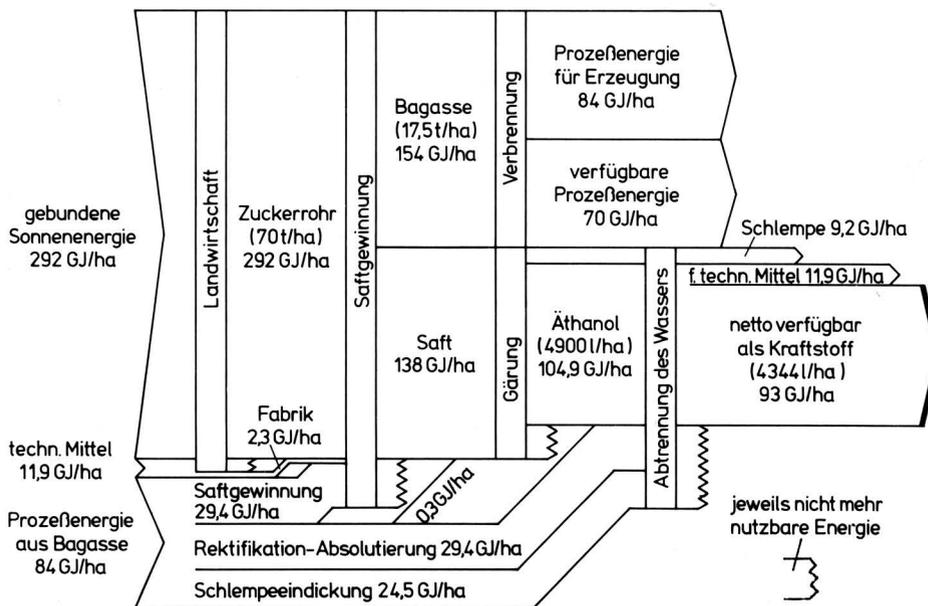


Bild 7. Energieflußbild für die Erzeugung von Äthanol aus Zuckerrohr.

5. Bewertung der Äthanolproduktion aus Biomasse aus energetischer Sicht

Eine grundlegende Aussage darüber, ob und unter welchen Bedingungen die Herstellung von Äthanol aus Biomasse in energetischer Hinsicht positiv zu bewerten ist, geben die Energieflußbilder u.a. durch Vergleich des Inputs an Energie für technische Mittel und Prozeßenergie mit dem Output an Energie im erzeugten Äthanol.

Würde man für den Energieinput zur Herstellung von Äthanol aus Zuckerrüben ausschließlich Kraftstoffe, also hochwertige Energieträger wie Heiz- und Dieselöl, einsetzen, dann würde der Prozeß mit einem Verlust an hochwertiger Energie ablaufen. Die Energieflußbilder weisen nämlich als Hauptergebnis aus, daß die Herstellung von Äthanol über die alkoholische Gärung bei dem derzeitigen Stand der Entwicklung grundsätzlich nur dann sinnvoll ist, wenn für die Prozeßenergie Energieträger geringer Wertigkeit zur Verfügung stehen. Beim Rohstoff Zuckerrohr ist diese Bedingung dadurch erfüllt, daß bei dem Prozeß Bagasse anfällt, die mehr als die gesamte Prozeßenergie abdeckt. Die Äthanolherstellung auf der Basis zuckerhaltiger Rübenpflanzen ist damit grundsätzlich an niederwertige externe Prozeßenergie gebunden. Würde man beispielsweise Braunkohle zur Abdeckung der notwendigen Prozeßenergie einsetzen, so gäbe das eine energetische Ausbeute von etwa 75 % (Heizwert des netto verfügbaren Äthanol bezogen auf den Heizwert der eingesetzten Braunkohle). Bei der synthetischen Herstellung von Benzin aus Steinkohle rechnet man derzeit mit einer energetischen Ausbeute von etwa 60 %, wenn die Energieäquivalente zur Herstellung, Montage und Inbetriebnahme der Großanlage, zur Kohleförderung und zum Betrieb der Anlage berücksichtigt werden mit einem Gesamtwirkungsgrad von etwa 30 % [32]. Auch an Stroh als Energieträger, an Biogas aus Nebenprodukten oder Abwärme aus Kraftwerken ist zu denken, um weitere Beispiele zu nennen.

Diese Bewertung kann sich in dem Maße verschieben, wie es durch Energieeinsparung insbesondere im Bereich der Prozeßenergie gelingt, das energetische Output-Input-Verhältnis deutlich günstiger zu gestalten. Hauptansatzpunkte sind oben genannt, beispielsweise Einsparungen bei der Rektifikation, insbesondere aber bei der umweltneutralen Schnitzel- und Schlempeverwertung. Diese grundsätzliche Bewertung schlägt sich auch in einer kostenmäßigen Beurteilung des Verfahrens nieder, bei der noch andere Faktoren wie beispielsweise die Rohstoff- und die Investitionskosten zu berücksichtigen sind.

Die eingangs gestellte Frage, ob die Herstellung von Äthanol aus Zuckerrüben für die Verwendung als Kraftstoff energetisch sinnvoll ist, läßt sich mit ja beantworten, wenn bei dem derzeitigen Stand der Entwicklung externe niederwertige Prozeßenergie zur Verfügung steht.

Energieeinsparungen dienen derzeit im wesentlichen der Kostensenkung, zu der noch weitere wichtige Schritte gehören wie die Verbesserung der landwirtschaftlichen Erzeugung des Rohstoffes und die Entwicklung einer Verbundwirtschaft, die auch die Behandlung der Nebenprodukte mit einschließt.

Hinsichtlich der Kosten der Äthanolerzeugung findet man im Schrifttum je nach den zugrundegelegten Bedingungen (Umfang der Anlage, Rohstoffkosten) eine entsprechende Bandbreite [31, 32, 36, 37, 38]. Die in **Tafel 8** aufgeführten Werte von *Houben* [32] und *Reinefeld, Wagner u. Winner* [31] für die Erzeugung von Äthanol aus Zuckerrüben stimmen relativ gut überein. Sie basieren auf einer Kampagnedauer von 3 Monaten und legen beim Ansatz der Rohstoffkosten die bei der Zuckererzeugung üblichen Preise von Zuckerrüben zugrunde.

Für entsprechend ausgewählte Standorte, jährlich 300 Tage Betriebsdauer durch Verarbeitung mehrerer Rohstoffe und weitere kostensenkende Maßnahmen werden auch Preise von 1,20 bis 1,40 DM/l kalkuliert, z.B. [37]. Aber auch dann würde der Fabrikabgabepreis von Äthanol, auf den gleichen Heizwert bezogen, immer noch mehr als das Doppelte des Preises von Benzin ab Raffinerie betragen. Dieser Hinweis macht, unbeschadet der künftig zu erwartenden Rohölpreise, die noch zu leistende Entwicklungsarbeit deutlich. Einige grundlegende Wege hierzu zeigen die vorgelegten Energieflußbilder.

	nach <i>Houben</i> DM/l	nach <i>Reinefeld u.a.</i> DM/l
Kapitalkosten	0,89	0,97
Rüben u. Hilfsstoffe	0,92 ¹⁾	0,95 ¹⁾
Löhne	0,06	0,06
Reparaturkosten	0,06	0,16
Energiekosten	0,08 ²⁾	0,15
Summe	2,01	2,29
Erlös für Trockenschnitzel		0,13
	2,01	2,16

1) Rübenpreis 9,00 DM/dt

2) 0,30 DM/l Schweröl, ohne Schnitzeltrocknung

Tafel 8. Kosten der Äthanolerzeugung aus Zuckerrüben für eine Fabrik mit 200 m³/d Äthanol und 3 Monate jährlicher Betriebsdauer; nach Daten von *Houben* [32] und *Reinefeld, Wagner und Winner* [31].

6. Einsatz von Äthanol in der landwirtschaftlichen Produktion

Die Motorisierung der deutschen Landwirtschaft ist gekennzeichnet durch einen Besatz von knapp 1,5 Mio. Schleppern, die, wie auch Mähdrescher und andere Arbeitsmaschinen mit Eigenantrieb, mit Dieselmotoren ausgerüstet sind. Der Verbrauch an Dieselmotorkraftstoff in der Landwirtschaft betrug im Jahre 1979 1,3 Mio. Tonnen.

Die Frage, ob dieser Kraftstoff durch Äthanol substituierbar ist, wird im wesentlichen mit Abschn. 2.4 beantwortet. Für den Betrieb mit Äthanol sind zwei Lösungen denkbar. So die Verwendung von Reinäthanol mit Zündbeschleunigern. Dies wäre ein Kraftstoff für Dieselmotoren auf Basis Äthanol, wobei die Anpassungsmaßnahmen an den Schleppermotoren gering bleiben. Eine andere Lösung ist das Zweistoffverfahren, bei dem zwei Kraftstoffe, nämlich Dieselmotorkraftstoff zur Sicherung des Zündvorganges und Äthanol als Hauptkraftstoff gleichzeitig über zwei Systeme zugeführt werden. Dieses Verfahren beinhaltet eine wesentliche Umrüstung der Schlepper.

Beide Verfahren befinden sich in der technischen Entwicklung. Sie sind aber noch nicht handelsüblich. Aufgrund der gegebenen Marktsituation an Kraftstoffen ist derzeit auch nicht zu erkennen, daß demnächst entsprechende Lösungen auf dem Markt angeboten werden.

Insgesamt läßt sich somit feststellen, daß in naher Zukunft mit einem Einsatz von Äthanol als Kraftstoff in der Landwirtschaft nicht zu rechnen ist.

Wenn in der Bundesrepublik Äthanol als Kraftstoff verwendet werden sollte, dann wird der erste Schritt darin bestehen, dem Benzin für Ottomotoren einen gewissen Anteil Äthanol zuzumischen. Die dadurch freiwerdende Menge an Benzin könnte dem Dieselmotorkraftstoff beigemischt werden, was bis zu einem Anteil von 30 % ohne Schwierigkeiten möglich ist.

Die weiteren sich daran anschließenden in diesem Bericht genannten möglichen Entwicklungen lassen sich derzeit noch nicht abschätzen.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] *Batel, W., M. Graef, G.-J. Mejer, R. Möller u. F. Schoedder:* Pflanzenöle für die Kraftstoff- und Energieversorgung. *Grundl. Landtechnik* Bd. 30 (1980) Nr. 2, S. 40/51.
- [2] ● *Bosch:* Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, 18. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag 1976.
- [3] *Wolf, W.:* Alkohole und ihre motorische Verbrennung. Erdöl und Kohle, Petrochemie, Ergänzungsband COMPEN-DIUM 1974/75, S. 666/86.
- [4] *Heitland, H.H.:* Referat über Brasiliens Alkohol-Programm, "Kraftstoff, der nachwächst". *VDI-Z.* Jg. 122 (1980) Nr. 13, S. 520.
- [5] *Heitland, H.H., H.W. Czaschke u. N. Pinto:* Alkoholgewinnung aus Biomasse und Alternativen als Motorkraftstoffe in Brasilien. *Proceedings of the International Symposium on Alcohol Fuel Technology* (1977) Bd. II, Abschn. 1-3, S. (1)-(8).
- [6] *König, A.:* Packt die Wolfsmilch in den Tank. *VDI-Nachrichten* Jg. 34 (1980) Nr. 16, S. 15.
- [7] *Menrad, H.:* Äthanol als Kraftstoff für Ottomotoren. *Automobiltechn. Zeitschr. ATZ* Jg. 81 (1979) Nr. 6, S. 279/82.
- [8] *Seiffert, U. u. W. Held:* Alternative Kraftstoffe: Chancen und Aufgaben. *Chem.-Ing.-Techn.* 53 (1981) Nr. 2, S. 82/89.
- [9] *Bernhardt, W. u. A. König:* Alternative Energien für den Verkehr am Ende des Erdölzeitalters. *VDI-Nachrichten* Jg. 31 (1977) Nr. 35, S. 10.
- [10] *Mühlberg, E.:* MAN-M-Vielstoffmotor mit partieller Abgasrückführung für Alkoholbetrieb. *Automobiltechn. Zeitschr. ATZ* Jg. 65 (1963) Nr. 1, S. 16/24.
- [11] Das große Sparen. *Nutzfahrzeug*, Juni 1978, S. 21/22.
- [12] *Mischke, A., H. Hardenberg u. A. Schäfer:* Aspekte alternativer Kraftstoffe für Dieselmotoren. *Automobiltechn. Zeitschr. ATZ* Jg. 82 (1980) Nr. 12, S. 633/38.
- [13] *Havemann, H.A., M.R.K. Rao u. T.L. Narasimhan:* Leistungssteigerung durch das "Vergaser-Diesel-Verfahren" mit Alkohol. *Motortechn. Zeitschr. MTZ* Jg. 19 (1958) Nr. 2, S. 50/55.
- [14] *Wrage, K.E. u. C.E. Goering:* Technical feasibility of diesohol. *Transact. ASAE* Bd. 23 (1980) No. 6, S. 1338/43.
- [15] *Pischinger, F., C. Havenith u. G. Finsterwalder:* Eignung verschiedener dieselmotorscher Brennverfahren für die Nutzung von Alkoholkraftstoffen. *FISITA-Congress 1980, VDI-Gesellschaft Fahrzeugtechnik*, Nr. 80.4.8.3. *VDI-Berichte* Nr. 370, S. 331/38.

- [16] *Pischinger, F. u. C. Havenith*: The suitability of different alcohol-fuels for diesel engines by using the direct-injection method. Proceedings of the IV International Symposium on alcohol fuels technology. Vol. II, Paper B-57, Guarujá-SP-Brasil, 5–8 Oct. 1980.
- [17] ● Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland 1979. Hrsg.: Bundesmin. Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. 23. Jg. (1979) Münster-Hiltrup: Landwirtschafts-Verlag 1979.
- [18] *Steinkampf, H.*: Energieeinsparung in der Pflanzenproduktion – Bereich Agrartechnik. Berichte über Landwirtschaft 195. Sonderheft, S. 157/67, Hamburg u. Berlin: Paul Parey 1979.
- [19] *Steinkampf, H.*: Energieverbrauch und Möglichkeiten zur Einsparung am Beispiel der Zuckerrübenproduktion. Die Zuckerrübe 28. Jg. (1979) Nr. 6 (Nov.), S. 18/23.
- [20] ● Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau. 9. Aufl. Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag 1980.
- [21] *Hollmann, P.*: Struktur des Energieeinsatzes und der Energiekosten in Betriebsgrößen und Betriebsformen. Berichte über Landwirtschaft 195. Sonderheft, S. 114/34. Hamburg u. Berlin: Paul Parey 1979.
- [22] *Heyland, K.-U. u. S. Solansky*: Energieeinsatz und Energieumsetzung im Bereich der Pflanzenproduktion. Berichte über Landwirtschaft 195. Sonderheft, S. 15/30. Hamburg u. Berlin: Paul Paery 1979.
- [23] *Diercks, R.*: Energieeinsparung in der Pflanzenproduktion im Bereich Pflanzenschutz. Berichte über Landwirtschaft 195. Sonderheft, S. 142/56. Hamburg u. Berlin: Paul Parey 1979.
- [24] ● *Richter, K.*: Futterwerttabellen der DLG – Schweine. Arbeiten der DLG Bd. 50. Frankfurt: DLG-Verlag 1961.
- [25] ● *Schiemann, R., K. Nehring, L. Hofmann, W. Jentsch u. A. Chudy*: Energetische Futterbewertung und Energienormen. Berlin: VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag 1971.
- [26] *Hofstetter, E.M.*: Feuerungstechn. Kenngrößen von Getreidestroh. Diss. TU München 1978.
- [27] *Misselhorn, K.*: Äthanolherstellung unter energiewirtschaftlichem Aspekt – Stand der Technik. Die Branntweinwirtschaft Jg. 120 (1980) S. 91/94.
- [28] *Misselhorn, K.*: Ethanol als biotechnologische Energiequelle. Chemie-Ing.-Techn. Bd. 53 (1981) Nr. 1, S. 47/50.
- [29] *Misselhorn, K.*: Supramyl – ein Verfahren zur Herstellung von Energiealkohol. Chem. Rundschau 33. Jg. (1980) Nr. 38, S. 1, 5 u. 8.
- [30] *Kolbusch, P. u. W. Schäfer*: Biologisch-technische Systeme zur Energiegewinnung. Studie der Dormier-System GmbH. Hrsg. Bundesministerium für Forschung und Technologie, Bonn 19.
- [31] *Reinefeld, E., F. Wagner u. C. Winner*: Die Zuckerrübe als Energiepflanze? Zuckerindustrie Bd. 105 (1980) Nr. 1, S. 25/35.
- [32] *Houben, H.*: Motortreibstoff (Ethanol) aus Ein- und Zweijahrespflanzen wie Zuckerrüben, Manioka, Zuckerrohr. Zuckerindustrie Bd. 105 (1980) Nr. 1, S. 37/44.
- [33] *Stegemann, J.*: Energiesparende Äthanol-Destillieranlagen. Vortrag im Rahmen des Informationstages "Agrotechnik" der Buckau R. Wolf AG anlässlich der Messe Hannover 1980.
- [34] *Rudolph, K.*: Energiealkohol aus Biomasse. VDI-Nachrichten Jg. 34 (1980) Nr. 41, S. 36.
- [35] *Baehr, H.D.*: Energie, Exergie, Anergie. In: Energie und Exergie. Hrsg.: VDI-Fachgruppe Energietechnik, Düsseldorf: VDI-Verlag 1965.
- [36] ● *Paul, J.K. (Hrsg.)*: Ethyl alcohol production and use as a motor fuel. Park Ridge, New Jersey: Noyes Data Corporation, 1979.
- [37] *Meinhold, K., P. Hollmann u. H. Kögl*: Anlagenkonfiguration, technische und ökonomische Daten sowie Annahmen zur verbesserten Absicherung von Wirtschaftlichkeitsanalysen für die Ethanolproduktion. Arbeitsbericht 4/81 des Instituts für Betriebswirtschaft der FAL, 1981.
- [38] *Meekhof, R., M. Gill u. W. Tyner*: Gasohol: prospects and implications. Agric. Economic Rep. No. 458, U.S. Department of Agriculture. Washington 1980.

Die erreichbare Energieeinsparung bei der Warmwasserbereitung durch Milchwärmerückgewinnung

Von Mjongsu Pak und Willi Petry, Köln*)

DK 620.97:637.133:644.62:683.97

Rückgewinnung von Wärme bei der Kühlung von Milch und deren Einsatz zur Warmwasserbereitung ist ein aussichtsreiches Verfahren bei der Energieeinsparung im landwirtschaftlichen Betrieb. Diese Arbeit untersucht bei

Annahme eines einfachen Kaltdampfprozesses mit Frigen 22, in welchem Maß sich verschiedene Parameter auf die Energieeinsparung bei der Warmwasserbereitung auswirken. Die erreichbare jährliche Energieeinsparung wird unter Zugrundelegen des durch die Statistik gegebenen Jahresganges der täglichen Milchleistung berechnet und in Form von Diagrammen und mit einer einfachen Gerdengleichung dargestellt, mit deren Hilfe der Anwender eine individuelle Wirtschaftlichkeitsrechnung mühelos durchführen kann.

*) Prof. Dr.-Ing. M. Pak vertritt das Fachgebiet Mechanik und Thermodynamik, Ing. (grad.) W. Petry ist Laboringenieur im Fachbereich Landmaschinentechnik der Fachhochschule Köln.