



TAB

Monitoring
„Nachwachsende Rohstoffe“
Pflanzliche Öle und andere Kraftstoffe
aus Pflanzen
Dritter Sachstandsbericht

Inhalt

Zusammenfassung	3
Vorwort	7
I. Einleitung	9
II. Rohstoffbereitstellung.....	11
1. Anbauumfang	12
2. Erträge	18
3. Produktionsbedingungen.....	20
III. Biokraftstoffproduktion	25
1. Rapsölgewinnung.....	25
2. Rapsölraffination	28
3. Rapsölumesterung zu Biodiesel	29
4. Rapsölkonversion zu Dieselkraftstoff	31
5. Herstellung von Bioethanol	33
IV. Nebenprodukte der Biokraftstoffproduktion.....	39
1. Rapsschrot	39
2. Glycerin	42
3. Nebenprodukte der Bioethanolvergewinnung	43

V. Biokraftstoffe im Einsatz	45
1. Rapsöl in Spezialmotoren.....	46
2. Einsatz von Biodiesel in Dieselmotoren.....	48
3. Bioethanol und ETBE als Benzinverbesserer	50
VI. Kostenbetrachtungen	53
1. Kosten der Bereitstellung von Biokraftstoffen	53
2. Wettbewerbsfähigkeit durch Steuerbefreiung	56
VII. Nutzen von Biokraftstoffen.....	59
1. Volkswirtschaftliche Effekte.....	59
2. Ökologische Effekte.....	61
VIII. Stand und Perspektiven der Biokraftstoffe	65
1. Stand der Biokraftstoffproduktion.....	65
2. Perspektiven der Biokraftstoffe.....	65
IX. Fazit und Ausblick	65
Literatur	65
Anhang.....	65
1. Tabellenverzeichnis.....	65
2. Abbildungsverzeichnis	65
3. Abkürzungen.....	65

Zusammenfassung

Unsere Mobilität basiert bisher auf dem uneingeschränkten Verbrauch von fossilen Kraftstoffen. Deren Ressourcen sind jedoch begrenzt und ihre Nutzung ist mit teilweise hohen Umweltbelastungen verbunden. Die Substitution von Mineralöldiesel durch Biodiesel aus Rapsöl in Dieselmotoren ist eine Variante zur Minderung von Umweltbelastungen. Sie ist mittlerweile umfangreich erforscht und demonstriert. Die inländischen Kapazitäten zur Biodieselproduktion wurden mit Hilfe staatlicher Förderung aufgestockt. Mehr als 700 Tankstellen bieten inzwischen Biodiesel an, und die Anzahl biodieseltauglicher Fahrzeugmodelle nimmt weiter zu. Da Kraftstoffe aus Pflanzen in Deutschland von der Mineralölsteuer befreit sind, kann der Verbraucher gegenwärtig Biodiesel fast zum gleichen Preis tanken wie Mineralöldiesel.

Vor Steuern ist der Preis für Biodiesel allerdings fast doppelt so hoch wie der Preis für Dieselkraftstoff. Nur durch den vollständigen, zeit- und mengenmäßig unbefristeten staatlichen Verzicht auf die Mineralölsteuer kann eine annähernde Gleichheit zwischen dem Tankstellenabgabepreis von Biodiesel und Mineralöldiesel erreicht werden. Darüber hinaus wird der Anbau von Raps und anderen Pflanzen zur Produktion von biogenen Kraftstoffen auf stillgelegten Flächen indirekt durch die Gewährung der Flächenstilllegungsprämie gefördert.

Der Kostenunterschied zwischen Biodiesel und Mineralöldiesel vor Steuern wird voraussichtlich auch mittelfristig Bestand haben. Es gibt derzeit keine erkennbaren Anzeichen dafür, daß das aktuelle Preisband für Rohöl in absehbarer Zeit deutlich und dauerhaft überschritten werden könnte. Außerdem besteht wenig Hoffnung, die Kosten der Biokraftstoffherzeugung mittelfristig auf ein wettbewerbsfähiges Niveau senken zu können. Dies gilt auch unter Berücksichtigung produktions- und verfahrenstechnischer Fortschritte und im Falle einer verstärkten Herstellung von Biodiesel aus preiswerten biogenen Altölen und -fetten. Biodiesel und andere Kraftstoffe aus Pflanzen werden deshalb auf absehbare Zeit auf staatliche Fördermaßnahmen, beispielsweise in Form verringerter Mineralölsteuersätze, angewiesen sein.

Steuermindereinnahmen als Folge des Mineralölsteuerverzichts bei Biokraftstoffen können gesellschaftspolitisch erwünscht und vertretbar sein, wenn sie mit positiven volkswirtschaftlichen und ökologischen Effekten verbunden sind, die nicht über Marktmechanismen bewirkt werden können. Für den Fall des Biodiesels läßt sich dies nicht umstandslos bejahen:

- Die Auswirkungen des Biodieselabsatzes auf das Einkommen der Landwirte und auf die Beschäftigungslage im ländlichen Raum sind bescheiden. Und dies obwohl der "Biodiesel-Rapsanbau" die derzeit wichtigste Produktionsalternative auf stillgelegten Flächen ist. Der überwiegende Teil der Stilllegungsfläche wird mangels ökonomischer Vorteile derzeit nicht zur Erzeugung nachwachsender Rohstoffe genutzt. Dies gilt jedoch nicht für flächenarme Veredlungsbetriebe, da hier die mit dem (Raps)Anbau verbundenen Möglichkeiten zur Gülleverwertung betriebswirtschaftliche Vorteile bringen.
- Auch bei einer Steigerung der Biodieselnachfrage durch weitergehende finanzielle Anreize ist nicht zwangsweise mit einer spürbaren Verbesserung der Einkommens- und Beschäftigungssituation zu rechnen. Denn auch Biodiesel, der auf der Basis importierter Pflanzenöle erzeugt wird, kommt in den Genuß der Steuerbefreiung. Somit kann es geschehen, daß die entgangenen Steuereinnahmen nicht der inländischen Landwirtschaft und Biokraftstoffproduktion zugute kommen, sondern ihre Wirkung in anderen europäischen oder außereuropäischen Ländern entfalten.
- Der Anbau von Raps zur Produktion von Biodiesel hat einige deutliche ökologische Vorteile, aber auch einige Nachteile. Im Grundsatz unterscheidet sich die Erzeugung der Rapssaat nicht vom Rapsanbau zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion. Der Einsatz an Dünge- und Pflanzenschutzmitteln ist bei der Produktion von "Biodiesel-Raps" sogar tendenziell geringer. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die Flächenstilllegungsprämie ertragsunabhängig gewährt wird und der Erzeugerpreis für "Biodiesel-Raps" geringer ist als der für Nahrungsrap. Erst bei einem erheblich größeren Anbauumfang als gegenwärtig würde es ökologisch bedenklich werden, weil Raps dann auch auf weniger geeigneten Standorten angebaut würde und es zu Fruchtfolgeverengungen käme. Verglichen mit einer begrüneten Flächenstilllegung sind die Auswirkungen auf die Qualität der Grund- und Oberflächengewässer und auf den Boden dagegen bereits heute ungünstiger.
- Auch beim Vergleich der Abgaszusammensetzung von Rapsöl, Biodiesel und Bioethanol mit den substituierten fossilen Kraftstoffen ergeben sich sowohl Vorteile als auch Nachteile. Biodiesel hat beispielsweise Vorteile bei den Schwefel-, Kohlenmonoxid-, Kohlenwasserstoff- und Partikelemissionen, aber Nachteile bei den Stickoxidemissionen, einem zunehmendem Umweltproblem nicht nur im Verkehrssektor. Unbestrittene Pluspunkte der Biokraftstoffe sind ihr Beitrag zur Verringerung des Verbrauchs an fossilen Rohstoffen und der Freisetzung an zusätzlichem Kohlendioxid, dem wich-

Zusammenfassung

tigsten Treibhausgas. Die Reduzierung der CO₂-Emissionen pro substituierter fossiler Energieeinheit ist jedoch deutlich weniger positiv als bei der energetischen Nutzung von Festbrennstoffen aus Pflanzen. Durch den Anbau von holzigen oder grasartigen Energiepflanzen pro Flächeneinheit könnte deutlich mehr CO₂ gebunden und mehr fossile Energie ersetzt werden.

Angesichts der begrenzten inländischen Möglichkeiten zur Rohstoffherzeugung und der hohen Produktionskosten sollten Biodiesel und andere Biokraftstoffe aus Pflanzen bevorzugt in den Bereichen zum Einsatz kommen, in denen sie den größten ökologischen Nutzen bringen. Insbesondere wegen der geringeren Wassergefährdung und der besseren biologischen Abbaubarkeit im Vergleich zum Schiffsdiesel auf Mineralölbasis sollte ein verstärkter Einsatz von Biodiesel auf Wasserwegen und Binnengewässern in Erwägung gezogen werden.

Der Einsatz von Biodiesel in der gewerblichen Binnenschifffahrt ist derzeit jedoch besonders unwirtschaftlich, da die dort eingesetzten Mineralölkraftstoffe von der Mineralölsteuer befreit sind. Ähnlich ungünstig ist die Situation beim Einsatz von Biokraftstoffen in der Landwirtschaft, die über die Gasölbeihilfe einen Teil der Mineralölsteuer auf Dieselkraftstoff erstattet bekommt. Rechtliche Regelungen zum Einsatz von Biodiesel und anderen umweltfreundlichen Kraftstoffen im Bereich der privaten Nutzung von Wasserfahrzeugen hätten keine Wettbewerbsnachteile zur Folge; sie könnten allerdings nur eine begrenzte Kraftstoffmenge in den Markt bringen.

Eine Erweiterung der Steuerbefreiung für Pflanzenkraftstoffe auch auf den biogenen Anteil in Mischkraftstoffen würde zu stärker anwachsenden Einsatzmengen und Steuermindereinnahmen führen, sofern die Steuerbefreiung nicht auf ein festgelegtes Kontingent begrenzt wird. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn außerdem bestehende agrarpolitische Markthemmnisse abgebaut werden. Zu diesen gehört zum einen die Kopplung des Anbaus nachwachsender Rohstoffe an die Flächenstilllegung, die wiederum vom Angebots- und Nachfrageverhältnis für Nahrungs- und Futtermittel auf dem Weltmarkt abhängt. Die jährliche Neufestlegung des Umfangs an stillzulegender Fläche führt zu stark schwankenden Mengen bei der Bereitstellung von Raps zur Biodieselproduktion. Zum anderen ist nach den Regelungen des Blair-House-Abkommens die Verwertung der bei der Ölpflanzenerzeugung auf Stilllegungsflächen anfallenden Ölschrote als Futtermittel in der EU auf 1 Million Tonnen Sojamehläquivalente pro Jahr begrenzt. Eine Verwertung des Rapschrots außerhalb des Futtermittelbereichs, zum Beispiel als Brennstoff oder Dünger, wäre mit deutlich

geringeren Erlösen und höheren Biodieselpreisen verbunden und würde die Wirtschaftlichkeit der Biodieselproduktion weiter verschlechtern.

Den steigenden Steuermindereinnahmen eines zunehmenden Biodieseleinsatzes stehen eher bescheidene Beiträge zur Umweltentlastung, Arbeitsplatzschaffung und Einkommenssicherung in der Landwirtschaft gegenüber. Die Ausdehnung des Einsatzes von Biokraftstoffen anstelle fossiler Kraftstoffe ist ein technisch einfacher und rasch realisierbarer, aber gleichzeitig ein vergleichsweise teurer Weg, um die CO₂-Emissionen des Straßenverkehrs zu verringern. Dies wäre bei einer möglichen Ausweitung von Fördermaßnahmen im Bereich Biodiesel und anderer Kraftstoffe aus Pflanzen zu bedenken.

Unabhängig von der Verwendung des auf stillgelegten Flächen angebauten Rapses als Biodiesel erscheinen Bemühungen zur Lockerung oder Aufhebung der Anbaueinschränkungen durch das Blair-House-Abkommen empfehlenswert. Eine stärkere Ausdehnung der Ölsaatenproduktion für Nichtnahrungszwecke könnte nämlich dazu beitragen, den geringen Selbstversorgungsgrad an pflanzlichen Eiweißfuttermitteln in der EU zu erhöhen und deren Abhängigkeit von einigen wenigen Sojaproduzenten zu verringern.

Vorwort

Im Rahmen des Arbeitsprogramms des TAB kommt dem Arbeitsbereich Monitoring besondere Bedeutung zu. Seine Zielsetzung besteht in

- der Beobachtung wichtiger wissenschaftlich-technischer Trends und damit zusammenhängender gesellschaftlicher Entwicklungen und in
- der Verfolgung und Auswertung wichtiger TA-Projekte innerhalb und außerhalb der Bundesrepublik Deutschland.

Angestrebt wird unter anderem die frühzeitige Unterrichtung des Ausschusses für Bildung, Wissenschaft, Forschung, Technologie und Technikfolgenabschätzung über potentiell bedeutsame TA-Themen und ihre parlamentarische Relevanz. Im Arbeitsfeld Monitoring werden vertiefende Untersuchungen zu einzelnen Technikfeldern und Analysen zu gesellschaftlichen Problemfeldern mit technologiepolitischen Implikationen durchgeführt. Dazu gehören Themen, wie z.B. Technikakzeptanz und Kontroversen über Technik oder Stand und Perspektiven von Technologien zur Nutzung regenerativer Energieträger.

Das Monitoring-Vorhaben "Nachwachsende Rohstoffe" wurde auf Beschluß der Berichterstatterinnen und Berichterstatter für Technikfolgen-Abschätzung des Ausschusses für Bildung, Wissenschaft, Forschung, Technologie und Technikfolgenabschätzung im November 1995 begonnen. Der erste Sachstandsbericht im Rahmen des Monitoring-Vorhabens beschäftigt sich mit der Verbrennung von Biomasse zur Wärme- und Stromerzeugung, der zweite Sachstandsbericht mit der Vergasung und Pyrolyse zur besseren energetischen Nutzung von Holz und halmartiger Biomasse (TAB-Arbeitsberichte Nr. 41 und 49).

Der vorliegende Sachstandsbericht "Pflanzliche Öle und andere Kraftstoffe aus Pflanzen" beschäftigt sich mit den wichtigsten Entwicklungen beim Einsatz von Biokraftstoffen in Otto- und Dieselmotoren seit Vorlage des Berichts "Nachwachsende Rohstoffe" der Enquete-Kommission "Technikfolgenabschätzung und -bewertung". Der Bericht befaßt sich schwerpunktmäßig mit Rapsöl und daraus hergestelltem Rapsölfettsäuremethylester (kurz Biodiesel genannt) sowie mit aus Zuckerrüben und Getreide erzeugtem Bioethanol. Die Gewinnung von Methanol und flüssigem Wasserstoff aus Pflanzen wurde bereits im Sachstandsbericht "Vergasung und Pyrolyse von Biomasse" (TAB 1996) behandelt.

I. Einleitung

Das gesellschaftspolitische Interesse an Biokraftstoffen entspringt unterschiedlichen Zielen. Zu den Vorteilen, die man sich von einem verstärkten Einsatz von pflanzlichen Ölen und anderen Kraftstoffen aus Pflanzen verspricht, gehören:

- lokale und globale Umweltentlastungen, z.B. durch eine reduzierte Freisetzung klimarelevanter Gase und eine gute biologische Abbaubarkeit,
- Produktionsalternativen für stillgelegte Flächen, die zum Erhalt ländlicher Beschäftigungsstrukturen und Einkommensmöglichkeiten beitragen,
- Verringerung der Abhängigkeit von Importölen durch eine Kraftstoffproduktion auf der Basis regenerativer Rohstoffe aus dem Inland.

Während der letzten 25 Jahre hat sich die Gewichtung der erwarteten Vorteile von Biokraftstoffen verändert. Mitte der 70er Jahre haben Befürchtungen über die Abhängigkeit von Ölimporten und die Langzeitverfügbarkeit von fossilen Energieträgern die Forschung, Entwicklung und Demonstration auf dem Gebiet der Biokraftstoffe in zahlreichen Ländern stimuliert. Mitte der 80er Jahre verschwanden die Bedenken bezüglich der Versorgungssicherheit. An ihre Stelle traten die Probleme mit den wachsenden Agrarüberschüssen und der Zwang zur Flächenstillegung. Seit Anfang der 90er Jahre wird das Interesse an der Energiegewinnung aus Pflanzen getragen von Befürchtungen über unerwünschte Umweltauswirkungen und über Klimaveränderungen als Folge eines weiter steigenden Verbrauchs an fossilen Energieträgern.

Pflanzliche Öle und andere flüssige Kraftstoffe aus Pflanzen können fossile Energieträger in verschiedenen Einsatzbereichen ersetzen. Sie können als Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren von Kraftfahrzeugen (Pkw, Lkw, Busse, Traktoren) und Schiffen, als Kraftstoffe zum Antrieb stationärer (Stromerzeuger, Wasserpumpen usw.) oder mobiler (Rasenmäher, Motorsägen usw.) Anlagen sowie als Brennstoffe für Heizungsanlagen oder Blockheizkraftwerke eingesetzt werden.

In Kapitel II des vorliegenden Berichts werden die gegenwärtige Situation und das Potential des Anbaus von öl-, zucker- und stärkehaltigen Pflanzen zur Produktion von Biokraftstoffen unter den gegenwärtigen agrarpolitischen Rahmenbedingungen dargestellt. Die verschiedenen Wege zur Umwandlung pflanzlicher Rohstoffe in Biokraftstoffe, deren Bedeutung und Perspektiven werden in Kapitel III ausgeführt. Die bei der Biokraftstoffproduktion anfallenden

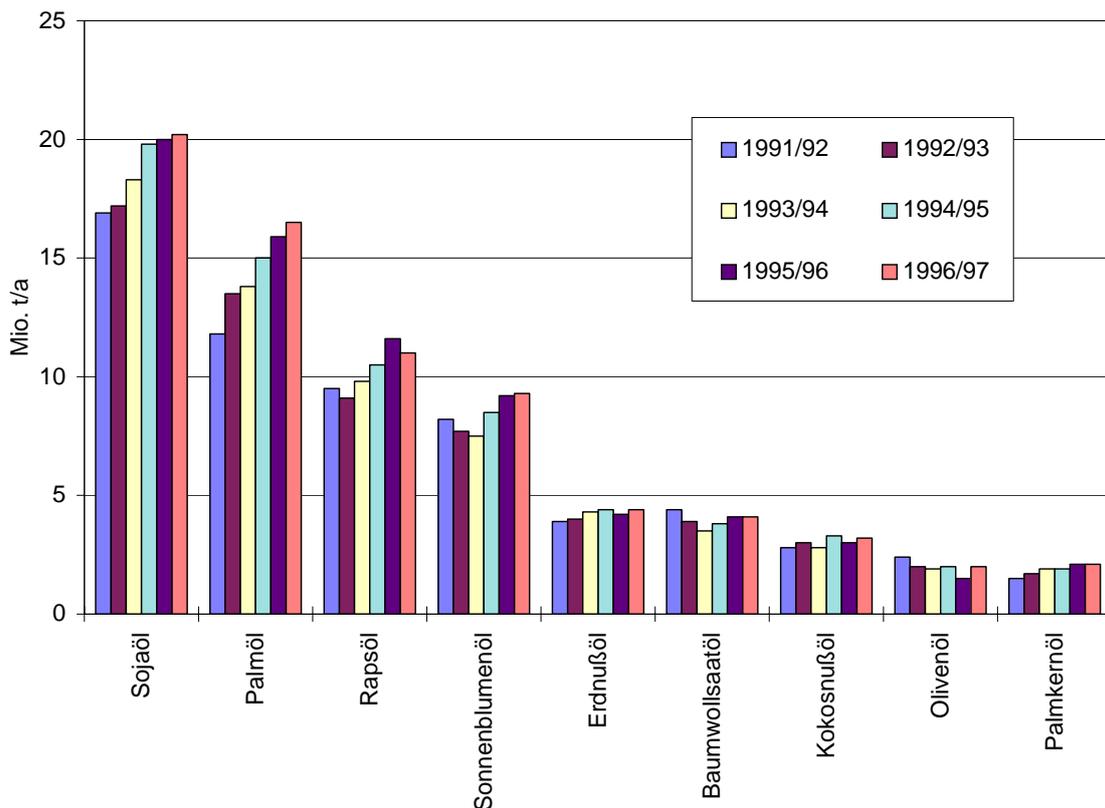
I. Einleitung

Nebenprodukte und die Möglichkeiten ihrer Nutzung sind Gegenstand von Kapitel IV. Die Verwendung unterschiedlicher Kraftstofftypen aus Pflanzen sowie die Rahmenbedingungen, die den Einsatzumfang bestimmen, werden in Kapitel V behandelt. In Kapitel VI werden Kostenbetrachtungen angestellt und in Kapitel VII Aussagen über die volkswirtschaftlichen und ökologischen Effekte eines Einsatzes von Biokraftstoffen gemacht. Der Stand und die Perspektiven des Einsatzes von Biokraftstoffen werden in Kapitel VIII diskutiert. Abschließend wird in Kapitel IX ein Fazit hinsichtlich des Einsatzes von Biokraftstoffen gezogen.

II. Rohstoffbereitstellung

Zur Erzeugung von Pflanzenölen stehen verschiedene Kulturpflanzen zur Verfügung. Fast in allen Klimagebieten der Erde können Ölpflanzen angebaut werden, nur wenige von ihnen sind jedoch von wirtschaftlicher Bedeutung. Der Weltmarkt für pflanzliche Öle und Fette wird gegenwärtig von Sojaöl dominiert (Abb. 1). Bis zur Jahrtausendwende könnte jedoch Palmöl zum weltweit bedeutendsten Pflanzenöl avancieren (Uhlmann 1997). Raps, Sonnenblume, Soja und Öllein sind die wichtigsten inländischen Ölpflanzen. Unter ihnen hat Raps das größte Verbreitungsgebiet und das höchste Ertragspotential. Sonnenblume, Soja und Öllein sind aus klimatischen und ertragsphysiologischen Gründen nur für bestimmte Anbaulagen geeignet.

Abb. 1: Welterzeugung an pflanzlichen Ölen



Quelle: Uhlmann 1997

II. Rohstoffbereitstellung

Zur Gewinnung von Bioethanol¹ kommen verschiedene zucker-, stärke- oder cellulosehaltige Rohstoffpflanzen in Frage. Die Zuckerrübe ist nach dem Zuckerrohr die bedeutendste Zuckerpflanze, von der 40 % der weltweit erzeugten Zuckermenge (100 Mio. t/a) stammen. In Deutschland können neben der Zuckerrübe und Zuckerhirse auch zuckerhaltige (z.B. Melassen oder Zuckersäfte aus Zuckerfabriken), stärkehaltige (z.B. Getreide, Kartoffeln, Mais) oder inulinhaltige Rohstoffe (z.B. Topinambur, Zichorie) verwendet werden. Unter den hiesigen Klima- und Anbaubedingungen erreicht die Zuckerrübe den mit Abstand höchsten Massen- und Zuckerertrag unter den zuckerhaltigen Pflanzen. Die Kartoffel ist die inländisch wichtigste Stärkepflanze und liefert den höchsten Stärkeertrag pro Hektar. Körnermais kommt wegen seiner Wärmeansprüche nur für ausgewählte Standorte in Frage. Die Getreidearten besitzen einen niedrigeren flächenspezifischen Stärkeertrag als die Kartoffeln. Sie haben jedoch den Vorteil, daß sie auf den meisten Ackerstandorten problemlos angebaut werden können und daß Getreide ein gut lager- und transportierbarer Rohstoff ist.

Der vorliegende Bericht beschäftigt sich aufgrund der pflanzenbaulichen Anbaueignung mit Winterraps als Rohstoff zur Pflanzenölgewinnung und mit Zuckerrüben, Getreide und Kartoffeln als Rohstoffe zur Bioethanolgewinnung. Der Anbau von lignocellulosehaltigen Rohstoffpflanzen zur Bioethanolgewinnung in Form von Schnellwuchsholz wird nicht näher betrachtet. Zum einen befinden sich die Verfahren der Bioethanolgewinnung aus Lignocellulose noch im Labor- oder Versuchsstadium. Zum anderen ist daran gedacht, als Rohstoffbasis preiswertes Wald- und Industrierestholz zu nutzen.

1. Anbauumfang

In Deutschland wurden 1997 auf rd. 366.000 ha nachwachsende Rohstoffe für energetische und stoffliche Anwendungen angebaut. Davon wurde knapp ein Drittel auf Stilllegungsflächen erzeugt. Die Ölsaaten sind im Schnitt (1993-1997) auf fast 95 % der mit nachwachsenden Rohstoffen bepflanzten Stilllegungsfläche anzutreffen. Auf fast zwei Dritteln der zur Ölsaatenerzeugung herangezogenen Stilllegungsfläche wird erucasäurefreier und glucosinularmer Raps (sogenannter 00-Raps) zur Kraftstoffherstellung angebaut (Tab. 1). Im Anbaujahr 1995 wurde auf 22 % der Stilllegungsfläche Raps (331.000 ha) für energetisch und chemisch-technische Zwecke angebaut. In den darauffolgenden

¹ Synonym werden auch die Begriffe Ethanol, Äthanol oder Gärungsalkohol verwendet.

1. Anbauumfang

Jahren sank der prozentuale Anteil des Rapsanbaus auf 18 % der stillgelegten Fläche oder 234.000 ha (1996) bzw. auf 13 % der stillgelegten Fläche oder 104.000 ha (1997). Im Schnitt der Jahre 1995-97 wurden 76 % des auf Stilllegungsflächen angebauten Non-food-Rapses zur Kraftstoffgewinnung verwendet.

Tab. 1: Ölsaaterzeugung auf inländischen Stilllegungsflächen (in ha)

	1993	1994	1995	1996	1997*
• stillgelegte Fläche	1.477.363	1.599.891	1.500.175	1.290.000	782.000
• davon mit NR-Anbau	65.707	160.725	361.587	245.178	120.000
• davon Ölsaaten	61.000	147.000	350.000	239.000	112.000
• davon 00-Raps	54.547	125.738	325.253	230.438	100.000
• davon als Kraftstoff- ersatz	50.456	99.894	250.796	198.163	70.000
• davon Eruca-Raps	5.859	7.005	5.698	3.976	4.000
• davon Sonnenblumen	258	14.094	17.189	6.711	3.000
• davon Öllein	1.895	4.755	3.269	1.355	1.300

* vorläufige Angaben

Quelle: BML 1997a, FNR 1997

Ein Anbau von stärkehaltigen Rohstoffpflanzen (Kartoffeln, Getreide) oder Zuckerrüben zur Gewinnung von Bioethanol für energetische Zwecke findet derzeit weder auf stillgelegten noch auf nicht stillgelegten Flächen statt.

Außer in Deutschland werden noch in Frankreich, Italien und Österreich in nennenswertem Umfang Pflanzen zur Biokraftstoffproduktion (überwiegend Raps, aber auch Sonnenblumen) auf stillgelegten Flächen angebaut. So wurden im Wirtschaftsjahr 1996/97 in Frankreich 180.000 ha Ölpflanzen (davon 150.000 ha Raps), in Italien 28.000 ha Ölpflanzen (davon 3.000 ha Raps) und in Österreich 4.000 ha Raps für Nichtnahrungszwecke angebaut (Ufop 1997).

II. Rohstoffbereitstellung

In Deutschland wurden 1996 und 1997 auf nicht stillgelegten Produktionsflächen (Basisflächen)² mehr nachwachsende Rohstoffe erzeugt als auf stillgelegten Flächen (Tab. 2). Es handelt sich dabei überwiegend um Rohstoffpflanzen zur Erzeugung von Stärke, Zucker und Öl für chemisch-technische Anwendungen. Anbaubestimmend sind die Stärkepflanzen mit einem Flächenanteil von 58 % im Durchschnitt der letzten drei Jahre. Der Rapsanbau für Nichtnahrungszwecke spielt auf nicht stillgelegten Flächen derzeit keine nennenswerte Rolle.

Tab. 2: Anbau nachwachsender Rohstoffe in Deutschland (in ha)

	<i>nicht stillgelegte Fläche</i>			<i>Stillegungsfläche</i>		
	<i>1995</i>	<i>1996</i>	<i>1997*</i>	<i>1995</i>	<i>1996</i>	<i>1997*</i>
• Stärke	130.000	135.000	135.000	2.700	62	12
• Zucker	8.000	9.000	9.000	0	0	0
• Rapsöl	5.000	5.000	5.000	331.000	234.000	104.000
• Leinöl	54.000	86.000	70.000	3.250	1.350	700
• Sonnenblumenöl	13.000	23.300	23.300	17.000	7.000	3.000
• Flachs und Hanf	3.370	6.000	4.600	10	22	1
• Heilstoffe	4.000	4.000	4.000	800	600	868
• Sonstiges	1.400	1.400	1.400	7.100	5.900	4.000
gesamt	218.770	269.700	252.300	355.751	248.934	112.581

* vorläufige Angaben

Quelle: BML 1997a, FNR 1997

Die Angaben in Tabelle 2 zeigen, daß der Rapsanbau auf Stillegungsflächen um mehr als 75 %, verglichen mit dem Höchstwert im Jahr 1995, zurückgegangen ist. Dieser Rückgang korreliert mit der Verringerung des Flächenstilllegungssatzes von 15 % (1993 und 1994) auf 12 % (1995), 10 % (1996) und zu-

2 Seit der EU-Agrarreform 1992 gibt es bei der Produktion von Getreide, Ölsaaten, Eiweißpflanzen (Hülsenfrüchten) und Öllein direkte Anbauhilfen in Form von flächenbezogenen Ausgleichszahlungen. Um in deren Genuß zu kommen, sind die Landwirte (soweit es sich nicht um Kleinerzeuger handelt) verpflichtet, einen bestimmten Prozentsatz ihrer ausgleichsberechtigten Antragsflächen (Basisflächen) stillzulegen.

1. Anbauumfang

letzt 5 % (1997). Der Flächenstilllegungssatz für das Wirtschaftsjahr 1997/98 wurde vom EU-Agrarrat wiederum auf 5 % festgelegt. Das bedeutet, daß in Deutschland ca. 750.000 ha für einen Anbau nachwachsender Rohstoffe zur Verfügung stehen, zuzüglich der freiwillig stillgelegten Flächen.

In der EU wird die Ausdehnung der Ölsaatenbaufläche für Nichtnahrungszwecke durch das Blair-House-Abkommen³ mit den USA begrenzt. Dem Abkommen zufolge dürfen die Nebenerzeugnisse beim Ölsaatenanbau auf stillgelegten Flächen 1 Million Tonnen Sojamehläquivalente nicht überschreiten. Dies entspricht zur Zeit einer Fläche von ungefähr 836.000 ha Ölsaaten. Eine EU-Regelung zur Beschränkung des Anbaus von Ölsaaten auf stillgelegten Flächen bei einer Überschreitung dieses Mengenkontingents besteht derzeit noch nicht, ist allerdings in Vorbereitung⁴.

Einer Ausdehnung des Rapsanbaus auf stillgelegten und nicht stillgelegten Flächen stehen neben den erwähnten agrarpolitischen Begrenzungen auch pflanzenbauliche (insbesondere Fruchtfolge- und Ertragsprobleme) und betriebswirtschaftliche Restriktionen entgegen (Tab. 3). Die inländische Rapsanbaufläche für Nahrungszwecke (rd. 900.000 ha) und Nichtnahrungszwecke (rd. 120.000 ha) zusammen umfaßt gegenwärtig 8,8 % der Ackerfläche. Aus pflanzenbaulicher Sicht wäre eine Ausdehnung des Rapsanbaus auf 20-25 % der Ackerfläche ohne Fruchtfolgeprobleme möglich. Unter Berücksichtigung von Standortrestriktionen erscheint ein Rapsanteil von 15-20 % an der Ackerfläche jedoch als realistischere Obergrenze.

Ausgehend von dem oben genannten, durch Fruchtfolge- und Standortrestriktionen auf 15-20 % begrenzten Rapsanteil an der Ackerfläche könnten in Deutschland (mit rd. 11,6 Mio. ha Ackerfläche) im Prinzip 1,7-2,3 Mio. ha Raps für Nahrungs- und Nichtnahrungszwecke angebaut werden. Zieht man hiervon den Flächenbedarf zur Produktion von Nahrungs- und Futterraps ab (hierfür werden rd. 1 Mio. ha⁵ angesetzt), so verbleiben für die Erzeugung von

3 Das sogenannte Blair-House-Abkommen beinhaltet einen Beschluß des Rates der Europäischen Gemeinschaft über den Abschluß eines erläuternden Vermerkes über bestimmte Ölsaaten im Rahmen des GATT vom 8. Juni 1993 (93/355/EWG).

4 In der EU-Kommission werden zwei Wege zur Einhaltung des Blair-House-Abkommens diskutiert: Zum einen könnte bei Überschreitung der Schrotmenge eine zwingende Verwendung außerhalb des Nahrungs- und Futtermittelbereiches vorgeschrieben werden, zum anderen könnte die Stilllegungsprämie gekürzt werden. In beiden Fällen hätte dies Folgen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit des Rapsanbaus zur Kraftstoffproduktion.

5 Der Ölsaatenanbau für Nahrungszwecke lag 1996 (836.000 ha) und 1997 (670.000 ha) deutlich unterhalb der inländischen Ölsaatenangarantiefäche (BML 1997). Zur Ernte 1997 wurde der Ölsaatenanbau auf 930.000 ha (inkl. Kleinerzeuger) ausgedehnt (dav. Raps: 900.000 ha).

II. Rohstoffbereitstellung

Raps für energetische und chemisch-technische Zwecke noch zwischen 0,7-1,3 Mio. ha Ackerfläche. Der untere Wert der Spanne entspricht in etwa der gegenwärtig bei einer Stilllegungsquote von 5 % verfügbaren Fläche (ca. 782.000 ha). Dieses Potential zum Anbau von Nichtnahrungsraps wird derzeit nur zu 13 % ausgeschöpft.

Tab. 3: Gründe gegen eine Ausdehnung des Rapsanbaus

	<i>Anzahl der Nennungen in verschiedenen Betriebsgrößenklassen</i>				<i>Anteil insgesamt in %</i>
	<i><20 ha</i>	<i>20-100 ha</i>	<i>100-500 ha</i>	<i>>500 ha</i>	
• Fruchtfolgeprobleme	7	26	85	90	52,3
• innerbetriebliche Verwertung von Alternativfrüchten	2	10	6	15	8,3
• Standortverhältnisse	0	5	12	11	7,0
• mangelnde Wirtschaftlichkeit	1	5	9	6	5,3
• Arbeitsengpässe	0	1	5	10	4,0
• Sonstiges	11	15	30	36	23,1

Quelle: Schefski/Kleinhanß 1995

Der Anbau von Raps zur Biodieselproduktion wird gegenwärtig offensichtlich weniger von agrarpolitischen oder pflanzenbaulichen Begrenzungen bestimmt als vielmehr von denen für die meisten Landwirte unzureichender betriebswirtschaftlicher Rentabilität. Die mit der Erzeugung von Pflanzen zur Biokraftstoffproduktion erzielbaren Erlöschancen hängen in besonderem Maße von den standortspezifischen Ertragsverhältnissen, den Produktionsbedingungen und von den erzielbaren Erzeugerpreisen ab. Angesichts der im Vergleich zu Nahrungsraps deutlich geringeren Erzeugerpreise, die derzeit beim Verkauf von Raps zur Biodieselproduktion erzielt werden können, ist der finanzielle Anreiz für einen Rapsanbau auf stillgelegten Flächen eher bescheiden. Dies gilt jedoch nicht für flächenarme Veredlungsbetriebe, da hier die mit dem Rapsanbau verbundenen Möglichkeiten zur Gülleverwertung betriebswirtschaftliche Vorteile bringen.

1. Anbauumfang

In Deutschland findet derzeit wohl ein Anbau von Zuckerrüben, Kartoffeln oder Getreide zur Produktion von Bioethanol für den Lebensmittelsektor und für den chemisch-pharmazeutischen bzw. medizinischen Bereich, aber nicht für die Produktion von Bioethanol als Kraftstoffsubstitut statt. Für die genannten nicht energetischen Anwendungsgebiete wurden 1996 rd. 1,7 Mio. hl Bioethanol aus speziell angebauten Rohstoffpflanzen hergestellt. Als Rohstoffe wurden zu 75 % Stärkepflanzen, insbesondere Kartoffeln, Körnermais und Getreide herangezogen. Weitere 1,2 Mio. hl Bioethanol wurden aus Rest- und Abfallstoffen, die z.B. bei der Zellstoffgewinnung und bei den Monopolbrennereien anfallen, produziert. In geringem Umfang wurden auch Melassen aus der Zuckergewinnung eingesetzt. Der Flächenbedarf zur Produktion stärkehaltiger Rohstoffe für die nicht energetische Bioethanolherstellung lag bei umgerechnet rd. 31.000 ha Getreide (Weizen, Roggen, Triticale) und 19.000 ha Kartoffeln⁶ (Schäfer 1995). Die Alkoholproduktion im landwirtschaftlichen Bereich wird hierzulande durch das Gesetz über das Branntweinmonopol, einer Art nationaler Marktordnung aus dem Jahr 1922, geregelt.

Mit Ausnahme von Frankreich findet derzeit auch in den anderen EU-Mitgliedsstaaten kein Rohstoffanbau zur Bioethanolproduktion statt. In Frankreich werden dagegen nennenswerte Mengen an Zuckerrüben und Weizen zur Bioethanolproduktion angebaut (Tab. 4).

Tab. 4: Anbau von Pflanzen zur Ethanolherzeugung in Frankreich

	1992/93	1993/94	1994/95	1995/96
• Ethanolanbaufläche (ha/a)	12.424	12.929	15.100	26.000
• davon Weizen (ha/a)	7.824	7.689	8.850	15.000
• Ethanolherzeugung (t/a)	27.500	38.500	37.900	67.500

Quelle: Gaouyer 1996

6 Zum Vergleich: In Deutschland wurden 1996 insgesamt 512.000 ha Zuckerrüben, 335.000 ha Kartoffeln (davon ein Viertel Stärkekartoffeln) und 6,7 Mio. ha Winterweizen für Nahrungs- und Futterzwecke angebaut (Statistisches Jahrbuch 1996).

2. Erträge

Die Erlöse, die der Landwirt durch den Anbau von Pflanzen zur Biokraftstoffproduktion erzielen kann, hängen entscheidend von den Ertragsverhältnissen und vom Produktionsmitteleinsatz ab. Beim Winterraps unterliegen die erzielbaren Erträge starken witterungs- und standortbedingten regionalen Schwankungen. Der Ertragsdurchschnitt beim Anbau von Nahrungsrapsschwankte in den letzten Jahren zwischen 20 dt/ha und 32 dt/ha (Tab. 5). Die mittleren Erträge beim Anbau von Winterraps zur energetisch-technischen Verwendung lagen im selben Zeitraum zwischen 19 dt/ha und 26 dt/ha und damit am unteren Ende der Ertragsspanne für Nahrungsrapsschwankungen. Ungünstige natürliche Standortbedingungen, Frostschäden und ein erhöhter Krankheits- und Schädlingsdruck (wenn die Anbaupausen weniger als drei bis vier Jahre betragen) können zu noch niedrigeren Erträgen führen.

Das im Vergleich zu den Getreidearten deutlich geringere Ertragsniveau der Rapsorten ist unter anderem darauf zurückzuführen, daß bei der Rapszüchtung Qualitätsziele zunächst wichtiger waren als Ertragssteigerungen. Durch die Züchtung von erucasäurefreien und glucosinulatarmen Rapsorten (sogenannte 00-Sorten) konnten die Einsatzmöglichkeiten des Rapsöls als Nahrungsöl und des Rapsschrots als Tierfutter wesentlich verbessert werden. Auch beim Anbau von Raps, dessen Öl später als Treibstoff oder zur Erzeugung von Biodiesel genutzt werden soll, kommen überwiegend 00-Rapsorten zum Einsatz. Dies hat den großen Vorteil, daß der bei der Ölgewinnung als Nebenprodukt anfallende Rapsschrot zur Erzeugung von Mischfuttermitteln genutzt werden kann. Außerdem ist es gemäß dem Äquivalenz-Prinzip möglich, anstelle des real zur Biokraftstoffproduktion angebauten Rapses an anderer Stelle eine gleich große Menge an Nahrungsrapsschwankungen zur Produktion von Rapsöl für energetische Zwecke zu nutzen. Dadurch können lange Transportwege und eine getrennte Lagerung der Ausgangserzeugnisse entfallen.

Im Falle einer erfolgreichen Einführung neuer ertragreicher Hybridrapssorten könnten in den nächsten Jahren spürbare Ertragssteigerungen möglich werden. Erste Rapshybridsorten zeigen Ertragsvorteile von etwa 5 % gegenüber den besten Liniensorten. Der potentielle Mehrertrag neuer Hybridrapssorten soll bei 10-20 % liegen (Agra-Europe 1997a).

II. Rohstoffbereitstellung

barwerden der Unkräuter) ausgebracht und hierdurch der Pestizidaufwand verringert werden.

Die Pflanzensorten, die zur Zucker- und Stärkeproduktion für energetische Zwecke angebaut werden, unterscheiden sich nicht von denen, die für einen Einsatz im Nahrungs- und Futtermittelsektor oder im chemisch-pharmazeutischen Bereich bestimmt sind. Im Schnitt der Jahre 1993-96 lagen die Erträge pro Hektar und Jahr bei rd. 510 dt Zuckerrüben, 350 dt Kartoffeln und 69 dt Winterweizen (BML 1997b). Die Kartoffel weisen mit 72 dt/ha Stärke einen fast doppelt so hohen flächenspezifischen Stärkeertrag auf als Weizen (39 dt/ha).

Bei Kartoffeln und Weizen kann mit einem linearen Ertragszuwachs von jährlich 1-2 % gerechnet werden. Bei der vegetativ vermehrten Kartoffel wird im Gegensatz zu Mais und Weizen bereits seit mehreren Jahrzehnten gezielt auf einen hohen Stärkeertrag selektiert. Stärkekartoffeln enthalten derzeit etwa 18 % Stärke, bezogen auf die Frischmasse. Durch züchterische Fortschritte ist ein Anstieg des Stärkegehalts auf 20-25 % möglich. Bei Weizen könnte der Stärkegehalt nur unter Vernachlässigung der Backfähigkeit und auf Kosten des Proteingehalts erhöht werden.

3. Produktionsbedingungen

Die Produktionsbedingungen beim Anbau von öl-, zucker- oder stärkehaltigen Rohstoffpflanzen zur Biokraftstoffproduktion werden von der Pflanzenart und von der Anbauintensität (Bodenbearbeitung, Düngung, Pflanzenschutz) bestimmt. Die optimale Anbauintensität hängt wiederum von den Standortfaktoren (Boden, Klima), von betriebswirtschaftlichen und makroökonomischen Aspekten und von den agrar- und umweltpolitischen Rahmenbedingungen ab.

Zu den wichtigsten agrarpolitischen Regelungen zur Förderung des Anbaus nachwachsender Rohstoffe gehört, daß der Landwirt auf seinen stillgelegten Flächen pflanzliche Produkte erzeugen kann, ohne dabei den Anspruch auf Flächenstilllegungsprämie zu verlieren. Die Stilllegungsprämie, die maximal 600 ECU/ha⁹ betragen darf, wird cofinanziert durch die EU und die jeweiligen Mitgliedsstaaten. Die Prämienhöhe wird von den Ländern selbst bestimmt, basierend auf dem mit der Stilllegung einhergehenden Einkommensverlust, den er-

9 Stilllegungsprämien über 600 ECU/ha (= 1.150-1.200 DM/ha) können bezahlt werden, wenn dies durch ökologische Aspekte gerechtfertigt ist und von den Länder selbst finanziert wird.

3. Produktionsbedingungen

warteten Umweltauswirkungen und dem Bedarf, einen ausreichenden Anreiz zur Erreichung der Stilllegungsquote zu setzen. Die Prämien-gestaltung ist in den einzelnen EU-Staaten unterschiedlich (Tab. 6). In Deutschland lag der durchschnittliche Flächenstilllegungsausgleich zur Ernte 1997 bei 385 ECU/ha bzw. 750 DM/ha (BML 1997a). Die regionale Spannweite der Ausgleichshöhe reichte je nach Ertragsniveau von 560 DM/ha (Region 5 in Niedersachsen) bis zu 965 DM/ha (Region 2 in Niedersachsen).

Tab. 6: Flächenstilllegungsprämien in EU-Mitgliedsländern (ECU/ha·a)

	<i>Minimum*</i>	<i>Maximum*</i>	<i>fixe Prämie*</i>
• Dänemark			226
• Deutschland	275	595	
• Finnland			513
• Frankreich			375
• Großbritannien	146	566	
• Irland			600
• Italien	310	600	
• Luxemburg	162	243	
• Österreich	290	604	
• Portugal			464
• Schweden	260	530	
• Spanien	158	525	

* Stand 1995 bei einem Kurs von 1 ECU = 1,31 US\$

Quelle: OECD 1997a

Der Anbau nachwachsender Rohstoffe unterscheidet sich in der Praxis kaum von der Produktionsweise mit der gegenwärtig der überwiegende Teil der Nahrungs- und Futtermittel erzeugt wird. Aufgrund des geringeren Preises für pflanzliche Rohstoffe, die energetisch genutzt werden, ist die Anbauintensität sogar tendenziell niedriger als bei der Erzeugung von Nahrungs- und Futtermitteln. Die Kosten der Raps-erzeugung auf ausgleichsberechtigten Basisflächen liegen je nach Intensitätsstufe und Ertragsniveau derzeit zwischen 1,52 DM/l (rd. 2.000 DM/ha) und 1,87 DM/l (2.400 DM/ha) und damit weit über dem

II. Rohstoffbereitstellung

Weltmarktpreis für Rapsöl von 0,78 DM/l. Nur durch die im Rahmen der Marktordnung gewährte Flächenbeihilfe (im Bundesdurchschnitt rd. 1.120 DM/ha zur Ernte 1997) kann inländisch erzeugtes Rapsöl zu wettbewerbsfähigen Preisen angeboten werden. Zusammen mit dem Erlös aus dem Rapsverkauf von rd. 970 DM/ha (bei einem mittleren Ertrag von 27 dt/ha) muß ein Betrag von im Schnitt rd. 2.100 DM/ha ausreichen, um die variablen und fixen Kosten des Rapsanbaus zu decken, die zwischen 1.670 DM/ha und 2.400 DM/ha liegen (Hartmann/ Strehler 1995).

Beim Rapsanbau auf stillgelegten Flächen können von den Erzeugungskosten die eingesparten Aufwendungen für die Begrünung und Pflege (ca. 250 DM/ha) abgezogen werden. Die verbleibenden Kosten der Rapserzeugung liegen zwischen 635 DM/ha und 720 DM/ha (Tab. 7). Die variablen Kosten und die erzielbaren Erträge sind niedriger als beim Rapsanbau auf nicht stillgelegten Flächen (Tab. 5), da die Produktionsintensität wie bereits erwähnt auf stillgelegten Flächen im allgemeinen geringer ist.

Nach Verrechnung der Erlöse aus dem Rapssaatverkauf und nach Berücksichtigung der Flächenstillegungsprämie (im Bundesdurchschnitt: 750 DM/ha verbleibt ein Deckungsbeitrag, der bei einem erzielbaren Marktpreis von 27 DM pro dt Raps zwischen 790 DM/ha und 975 DM/ha liegt. Im Vergleich zur Flächenstillegung, bei der nach Abzug der Pflegekosten ein Deckungsbeitrag von 500 DM/ha übrigbleibt, führt der Rapsanbau auf stillgelegten Flächen zu einem Mehrertrag, der sich je nach Ertragsniveau zwischen 290 DM/ha und 475 DM/ha bewegt.

Dieser Erlös muß ausreichen, um die Kapitalkosten, die Entlohnung der Familienarbeitskräfte (90-220 DM/ha) und die Flächennutzungskosten¹⁰ (320-640 DM/ha) zu decken (Hartmann/Strehler 1995) und das Umlaufvermögen zu verzinsen. Bei der Berechnung des Deckungsbeitrags in Tabelle 7 wird jedoch davon ausgegangen, daß insbesondere in Familienbetrieben die Produktionsfaktoren Arbeit und Kapital entscheidungsunabhängig und deshalb kostenlos verfügbar sind. Außerdem wird unterstellt, daß die Nutzungskosten des Bodens bei Null liegen, da keine alternativen Verwendungsmöglichkeiten für stillgelegte Flächen bestehen, solange es Stillegungsverpflichtungen gibt.

10 Flächennutzungskosten sind Kosten, die dem Betrieb durch die Inanspruchnahme der Fläche, beispielsweise in Form eines ortsüblichen Pachtzinses, entstehen. Sie sind in der Regel proportional zur natürlichen Ertragsfähigkeit der Böden.

3. Produktionsbedingungen

Tab. 7: Kosten des Rapsanbaus auf Stilllegungsflächen

<i>Marktpreis</i>	<i>DM/dt</i>	<i>27</i>			<i>30</i>		
<i>Ertrag</i>	<i>dt/ha</i>	<i>25</i>	<i>30</i>	<i>35</i>	<i>25</i>	<i>30</i>	<i>35</i>
• Erlöse	DM/ha	675	810	945	750	900	1050
• variable Kosten*	DM/ha	635	680	720	635	680	720
• Deckungsbeitrag (DB)	DM/ha	40	130	225	115	220	330
• DB mit Flächenbeihilfe**	DM/ha	790	880	975	865	970	1080

* ohne Ansätze für Arbeit und Flächennutzungskosten und nach Abzug der eingesparten Kosten für die Begrünung und Pflege der Flächen (250 DM/ha)

** 750 DM/ha

Quelle: eigene Berechnungen nach Kroll/Jäger 1994 und BML 1995

Die Angaben in Tabelle 7 zeigen, daß der Rapsanbau auf Stilllegungsflächen unter den gegenwärtigen Rahmenbedingungen nur dann eine betriebswirtschaftlich interessante Alternative zur begrüneten Stilllegung darstellt, wenn die Stilllegungsflächen eine hohe natürliche Ertragsfähigkeit aufweisen, die variablen Kosten niedrig sind und hohe Erzeugerpreise für die Rapssaat erzielt werden können.

Die Erzeugerpreise für Biodieselraps lagen 1996 bei durchschnittlich 27 DM/dt Raps. Im Vergleich dazu konnten beim Verkauf von Nahrungsraps aufgrund der weltweit relativ geringen Rapsproduktion und der gestiegenen Nachfrage deutlich höhere Preise zwischen 40 DM/dt und 41 DM/dt Raps erzielt werden. Im Vorjahr lagen die erzielbaren Preise für Nahrungsraps deutlich niedriger mit Preisen zwischen 33 und 36 DM/dt Raps (Ufop 1997).

Erst bei Preisen von 29 DM pro dt Energieraps würden alle verfügbaren, gut geeigneten Stilllegungsflächen mit Raps bestellt werden. Auch bei Preisgleichheit zwischen Nahrungsraps und Nichtnahrungsraps würde schätzungsweise nur knapp ein Drittel der Stilllegungsfläche mit Industrieraps bepflanzt werden (Schefski und Kratzsch 1994). Wesentlicher Grund hierfür ist, daß angesichts der geringen Ertragsaussichten auf weniger geeigneten Standorten sich nur 20 % der begrünenden Landwirte in der Lage sehen, mehr als 30 dt Raps pro Hektar zu erwirtschaften (Haris et al. 1996).

Eine Sonderstellung nehmen Veredlungsbetriebe ein, da hier die mit dem Rapsanbau auf stillgelegten Flächen verbundenen Möglichkeiten zur Güllever-

II. Rohstoffbereitstellung

wertung betriebswirtschaftliche Vorteile bringen. Dies gilt insbesondere für Betriebe mit einem hohen Viehbesatz und geringer Flächenausstattung, da diese auf ihre gesamte Ackerfläche angewiesen sind, um die anfallende Gülle aus der Tierhaltung ordnungsgemäß verwerten zu können. Ohne die Möglichkeit eines Anbaus von Energieraps oder anderer nachwachsender Rohstoffe wären sie gezwungen, die Gülle auf außerbetrieblichen Flächen auszubringen oder ihren Viehbestand abzustocken.

III. Biokraftstoffproduktion

Die Verfahren zur Produktion von pflanzlichen Biokraftstoffen unterscheiden sich je nach Rohstoffart und angestrebter Kraftstoffverwendung. Die Gewinnung von Rapsöl oder anderen pflanzlichen Ölen ist ein verhältnismäßig einfaches Verfahren, da das Öl als solches bereits in den Pflanzen vorliegt und nur noch extrahiert und von störenden Bestandteilen befreit werden muß. Das gereinigte Pflanzenöl kann direkt in speziellen Pflanzenölmotoren eingesetzt, über raffinerietypische Aufbereitungsstufen in mineralölähnliche Komponenten umgewandelt oder zu Biodiesel umgeestert werden. Die mikrobielle Bioethanologewinnung aus zucker-, stärke- oder cellulosehaltigen Agrarrohstoffen ist dagegen ein vergleichsweise aufwendiger industrieller Prozeß.

1. Rapsölgewinnung

Rapsöl kann im Prinzip sowohl in kleinen dezentralen Ölgewinnungsanlagen (0,5-5 t Saat pro Tag) als auch in großen Ölmühlen (1.000-3.000 t Saat pro Tag) gewonnen werden. Bei der Ölgewinnung in kleintechnischen Anlagen, die beispielsweise bei landwirtschaftlichen Genossenschaften angesiedelt sein können, reduziert sich die Prozeßkette auf die Verfahrensschritte Saattrocknung und Saatreinigung sowie Ölpressung und Ölreinigung.

Einstufige Ölpressen erreichen einen Abpreßgrad von 75-85 %. Durch zweistufige Preßverfahren kann die Ölausbeute weiter erhöht werden. Einerseits ist dieses sogenannte Kaltpressen mit einem vergleichsweise hohen Energiebedarf und einer geringen Durchsatzleistung verbunden. Andererseits bleiben wertvolle Inhaltsstoffe erhalten, und unerwünschte Begleitstoffe (z.B. Phospholipide) werden nur in sehr geringem Umfang in das Öl übergeführt. Das gewonnene Rapsöl enthält in Abhängigkeit von der Qualität der Ölsaart und von den Verfahrensbedingungen zwischen 1 und 13 Gew. % Feststoffe, die anschließend durch Sedimentation und Filtration entfernt werden müssen. Eine Zentrifugation zur Reinigung des Öls ist ebenfalls möglich, aber relativ aufwendig.

Der als Nebenprodukt anfallende Rapskuchen (rd. 590 kg pro Tonne Rapsaat) enthält einen Restfettgehalt von 5-15 % und ist deshalb nach Abkühlung nur einige Wochen lagerfähig. Ein erhöhter Ölgehalt im Schrot (bis 10 %) kann von Vorteil sein, wenn hierdurch das ansonsten notwendige Hinzufügen einer

III. Biokraftstoffproduktion

zusätzlichen Fettkomponente bei der Mischfutterherstellung entfällt. Er steigert den Energiegehalt, aber nicht im gleichen Maße den Futterwert des Rapsschrots.

Die Ölgewinnung in dezentralen Anlagen kann zur Verringerung der Umweltbelastung durch Transportbewegungen und zur Steigerung der Wertschöpfung in der Landwirtschaft beitragen. Außerdem haben dezentrale Anlagen Vorteile hinsichtlich der Logistik und Transportwege und begünstigen das Wirtschaften in Stoffkreisläufen. Im Vergleich zu den großen, zentral gelegenen Ölmühlen haben die dezentralen Ölgewinnungsanlagen jedoch folgende Nachteile:

- Die Ölausbeute ist um etwa 10 % geringer.
- Die Konversionskosten sind auch bei Vernachlässigung des Arbeits- und Gebäudebedarfs höher. (Bei der Verarbeitung der Rapssaat in durchsatzstarken Ölmühlen können Kostendegressionseffekte genutzt werden, ohne daß diese durch steigende Kosten beim Rohstofftransport wieder kompensiert würden.)
- Die Erzielung einer gleichbleibend hohen Produktqualität ist schwieriger.
- Bei einer Weiterverarbeitung der Produkte (Rapsöl zu Biodiesel und Rapschrot zu Mischfuttermitteln) fällt ein getrennter, meist teurer und weniger umweltverträglicher Transport durch Straßenfahrzeuge anstelle von Binnenschiffen (zur Beförderung der Rapssaat) an.

Wegen der genannten Nachteile und der in Deutschland fest etablierten Ölmühlenindustrie konnte die einfache kleintechnische Ölgewinnung hierzulande bislang keine Bedeutung erlangen. Die deutsche Ölmühlenindustrie verfügt über 14 Ölsaatenverarbeitungsbetriebe. Deren Verarbeitungskapazitäten bewegen sich insgesamt zwischen 6,5 Mio. t/a und 7,7 Mio. t/a (Schöne-Warnefeld 1997). Davon entfallen etwa 45 % auf Sojabohnen und 40 % auf Raps. Die Standorte für die Sojaverarbeitung konzentrieren sich auf den Hafen Hamburg und den Mittelrhein, da diese Anlagen nahezu ausschließlich auf Importe angewiesen sind. Raps- und Sonnenblumensaatverarbeiter suchen dagegen eher die Nähe zu deutschen Anbaugebieten. Sie sind infolgedessen breiter gestreut, an folgenden Standorten angesiedelt: Kiel, Hamburg, Salzgitter, Riesa, Leer, Brake, Hamm, Spyck/Emmerich, Neuss, Krefeld, Mainz, Mannheim. Von diesen Ölmühlen ist die Ölmühle Leer Connemann GmbH in Ostfriesland bislang die einzige Ölmühle in Deutschland, die eine eigene Raffination und eine Anlage zur Herstellung von Biodiesel betreibt. Die Ölmühle in Leer kann pro Jahr 250.000 t/a Raps- und Sonnenblumenkerne verarbeiten und zwischen 70.000 und 80.000 t Biodiesel erzeugen.

1. Rapsölgewinnung

Bei der industriellen Ölgewinnung in Ölmühlen wird die Rapssaat vor der Pressung zerkleinert¹¹ und durch Dampferhitzung konditioniert. Bei der Konditionierung wird die Ölsaat auf ein bestimmtes Temperatur- und Feuchtigkeitsniveau eingestellt, um die Ölausbeute bei der anschließenden Pressung zu verbessern. Mit kontinuierlich arbeitenden Schneckenpressen können 75-85 % des in der Rapssaat enthaltenen Öls gewonnen werden. Im Anschluß an die mechanische Ölgewinnung wird in den großen Ölmühlen üblicherweise eine chemische Ölgewinnung mittels Extraktion mit einem Lösungsmittel (in der Regel Hexan) durchgeführt¹². Damit das Lösungsmittel besser einwirken kann, wird zuvor die Oberfläche des zusammengepreßten Rapskuchens durch Flockierwalzen vergrößert.

Nach der Extraktion befindet sich das Lösungsmittel zum einen Teil in der sogenannten Miscella, die 20-30 % Öl enthält (70-80 % Hexan), und zum anderen Teil in dem weitgehend ölfreien Extraktionsschrot (23-35 % Hexan). Der überwiegende Teil des Lösungsmittels wird nach Abtrennung von der Miscella und dem Extraktionsschrot gereinigt und wieder in den Prozeß zurückgeführt. Nur sehr geringe Mengen des Lösungsmittels verbleiben im Öl bzw. im Schrot oder gelangen mit der Abluft bzw. dem Abwasser in die Umwelt. Das gereinigte Pflanzenöl darf höchstens 0,1 % Hexan und der Rapsextraktionsschrot bei Verwendung als Futtermittel nicht mehr als 0,05 % Hexan enthalten. In der Praxis werden meist deutlich geringere Werte erreicht, sowohl was den Restgehalt an Hexan im Öl (0,01-0,05 %) als auch im Schrot (0,01-0,03 %) anbelangt.

Das chemisch extrahierte Öl wird mit dem Pflanzenöl aus der mechanischen Pressung zusammengeführt. Ausgehend von einem Ölgehalt in der Rapssaat von 41 % können die Ölmühlen über das zweistufige Verfahren mit Vorkonditionierung ca. 0,405 t Rapsöl pro Tonne Rapssaat erzielen. Die Ölausbeute bezogen auf das in der Saat enthaltene Öl liegt damit bei 99 %. Das bedeutet, daß bei einem mittleren Rapsertag von 30 dt/ha und einer Ölausbeute von 0,4 t pro

11 Zur Verringerung des Energieverbrauchs kann zuvor eine Saatschälung durchgeführt werden (Schliephake 1994). Dieser Verfahrensschritt ist bislang noch nicht Praxis.

12 Alternativ hierzu kann das Rapsöl auch nur durch Pressung oder Extraktion oder durch Herauslösen mit überkritischem CO₂ unter Druck gewonnen werden. Das zweistufige Abpressen hat an Bedeutung verloren, weil der Energiebedarf hierfür hoch ist und ein Restölgehalt im Preßkuchen <5 % nicht erzielbar ist. Die Direktextraktion wird i.d.R. bei Ölsaaten mit geringen Ölgehalten angewandt, weil es höhere Ölausbeuten und eine einfachere Prozeßführung als eine Kombination aus Pressung und Extraktion ermöglicht. Das CO₂-Verfahren befindet sich noch im Entwicklungsstadium.

Tonne Rapssaat mit einem Hektarertrag von rd. 1,2 t Rapsöl und 1,8 t Rapsextraktionsschrot gerechnet werden kann.

2. Rapsölraffination

Das in den großen Ölmühlen gewonnene Rapsöl ist weder motorentauglich noch für die Umesterung geeignet, da es verschiedene Begleitstoffe enthält, die den Ölabbau fördern und die Haltbarkeit beeinträchtigen bzw. eine Weiterbearbeitung erschweren. Zu den wichtigen Störstoffen gehören insbesondere freie Fettsäuren, Farbstoffe, Aldehyde, Ketone, Phospholipide und Schleimstoffe. Die Entfernung dieser unerwünschten Substanzen aus dem pflanzlichen Rohöl kann durch eine chemische oder physikalische Raffination erfolgen.

Bei der chemischen Raffination wird das Rapsöl entschleimt, entsäuert (neutralisiert), entfärbt (gebleicht) und gedämpft (desodoriert). Zur Entschleimung¹³ wird das Rohöl mit Wasser und Säure (meist Phosphorsäure) vermischt, wodurch die Schleimstoffe aufquellen (dehydratisieren) und einen ö unlöslichen Schlamm bilden, der abgetrennt werden kann. Zur Entsäuerung¹⁴ werden die freien Fettsäuren mit schwach alkalischen Lösungen (z.B. mit verdünnter Natronlauge) verseift. Dieser Vorgang wird auch Neutralisation genannt. Die Seifenlösung wird durch Zentrifugieren oder Dekantieren vom Öl abgetrennt. Die Entfärbung des Öls, im Fachjargon auch Bleichung¹⁵ genannt, erfolgt mit Adsorptionsmitteln. In der Regel wird hierzu Bleicherde verwendet. Nach einer abschließenden Dämpfung bzw. Desodorierung¹⁶ mit Hilfe einer Wasserdampfdestillation gilt das Öl als "vollraffiniert".

Bei der physikalischen Raffination werden die Fettsäuren im Gegensatz zur chemischen Raffination nicht durch Neutralisation, sondern durch Destillation entfernt. Dadurch wird es möglich, die beiden destillativen Verfahrensschritte Entsäuerung und Dämpfung zusammenzulegen. Üblicherweise werden auch die Entschleimung und die Bleichung gekoppelt, so daß nur noch zwei Raffinationsschritte erforderlich sind. Im Vergleich zur chemischen Raffination ist die

13 Ziel ist die Entfernung eines Gemischs an Schleimstoffen (z.B. an Phospholipiden), die die Fettsäurespaltung fördern.

14 Ziel ist die Entfernung der 1-3 % freien Fettsäuren im Rohöl.

15 Ziel der Bleichung ist die Entfernung von Farbstoffen, Resten von Schleimstoffen, Spurenmetallen und Oxidationsprodukten.

16 Ziel der Desodorierung ist die Entfernung geruchs- und geschmacksintensiver Begleitstoffe (Ketone, Aldehyde, Kohlenwasserstoffe, freie Fettsäuren).

3. Rapsölmesterung zu Biodiesel

physikalische Raffination mit einem niedrigeren Bedarf an Prozeßchemikalien sowie mit geringeren Abwassermengen und Raffinationsverlusten verbunden. Wegen der besseren Umweltverträglichkeit des Verfahrens und der höheren Akzeptanz der Verbraucher gegenüber einem Pflanzenöl, das auf rein physikalischem Wege gereinigt wurde, wird bei der Speiseölherstellung inzwischen verstärkt die physikalische Raffination angewandt.

Bei der Nutzung von Rapsöl in Spezialmotoren und auch bei der Verwendung von Rapsöl zur Biodieselherstellung kann aus (verfahrens)technischen Gründen auf eine Teilraffination des Rohöls nicht verzichtet werden. Vielfach ist sogar eine Vollraffination erforderlich, um die Anforderungen der Motorenhersteller bzw. Veresterungsanlagen an die Ölqualität erfüllen zu können. Besonders hohe Anforderungen werden bei der Ölreinigung an die Entfernung der Phospholipide gestellt, da sie beim Zutritt von Wasser zu Ablagerungen im Tank und zum Verstopfen der Filter und im Langzeitbetrieb zur Bildung von Verkokungen an Kolben, Einspritzdüsen und Ventilen führen können. Durch Wasserentschleimung kann der Phospholipidgehalt im Rapsöl auf 70-250 ppm und durch Säureentschleimung auf 28-100 ppm gesenkt werden. In vollraffinierten Ölen liegt der Phosphorgehalt unter 2,5 ppm (Widmann 1994).

3. Rapsölmesterung zu Biodiesel

Rapsöl besteht zu 95-98 % aus Triglyceriden, deren wichtigste Fettsäure die Ölsäure mit einem Anteil von 54-64 % ist, gefolgt von der Linolsäure (16-22 %) und der Linolensäure (8-10 %). Der hohe Gehalt an hochmolekularen Triglyceriden ist verantwortlich für die höhere Dichte und Viskosität des Rapsöls im Vergleich zu Dieselkraftstoff. Durch einen als Umesterung¹⁷ bezeichneten katalytischen Konversionsprozeß wird der in den Triglyceriden enthaltene dreiwertige Glycerin-Alkohol durch einen einwertigen Alkohol (Methanol oder Ethanol) ersetzt. Der so entstandene Rapsölfettsäuremethyl-ester (RME), nachfolgend vereinfachend Biodiesel genannt, zeichnet sich durch eine niedrigere Viskosität und eine höhere Cetanzahl aus als Rapsöl (Tab. 8). Er kann aufgrund seiner Ähnlichkeit mit Mineralöldiesel ohne nennenswerte Stabilitätsprobleme mit diesem vermischt werden. Biodiesel ist zündwilliger als naturbelassenes

17 Die Bezeichnung Umesterung weist darauf hin, daß die ursprüngliche Bindungsform (Esterbindung) erhalten bleibt.

III. Biokraftstoffproduktion

Rapsöl und hat auch hinsichtlich der Cetanzahl, Verkokungsneigung und Wintertauglichkeit Vorteile.

Die Umesterung von Rapsöl zu Biodiesel wird in einem kontinuierlichen, drucklosen Verfahren bei 70°C in Großanlagen (>100.000 t/a) durchgeführt. Je nach Umesterungsverfahren sind unterschiedlich hohe Ölqualitäten erforderlich. Durch eine Teilraffination (Entschleimung und Entsäuerung) des Rapsöls kann sichergestellt werden, daß möglicherweise enthaltene Störstoffe (z.B. Wasser, Fettsäuren), die zu einer Deaktivierung der Katalysatoren führen können, entfernt werden.

Tab. 8: Technische Kennwerte für Dieselkraftstoff, Rapsöl und Biodiesel

<i>Kennwert</i>	<i>Einheit</i>	<i>DIN-Norm</i>	<i>Diesel</i>	<i>Rapsöl</i>	<i>Biodiesel</i>
• Dichte (15°C)	g/ml	0,815-0,855	0,84	0,914-0,922	0,88
• Viskosität (20°C)	mm²/s	2-8	3,08	78,7	6,8
• Flammpunkt	°C	>55	68	324	135
• Filtriergrenze	°C	0-(-12)	-7	+5	-9
• Cetanzahl CZ	-	>45	>50	37-38	54-55
• Koksrückstand	Gew.-%	<0,1	0,04	0,20-0,30	<0,1
• Schwefelgehalt	Gew.-%	<0,20	0,045	0,009	0,006
• Heizwert (H _u)	MJ/l	-	35,9	33,0	32,7

Quelle: nach Hartmann/Strehler 1995

Die Umesterung von Rapsöl zu Biodiesel ist eine Gleichgewichtsreaktion. Deshalb wird in den meisten Umesterungsanlagen mit einem Überschuß an Methanol gearbeitet, um die Ausbeute an Biodiesel zu erhöhen. Durch Abziehen der sich im Verlauf der Reaktion bildenden wässrigen Glycerin-Phase und durch erneute Zufuhr von Methanol kann die Ausbeute von 90-92 % auf bis zu 98 % Biodiesel (RME) erhöht werden. Zur Beschleunigung der Umesterung werden Katalysatoren (meist alkalische Verbindungen wie NaOH oder KOH) eingesetzt und nach der Umsetzung wieder neutralisiert (z.B. mit Zitronensäure). Zur Produktion einer Tonne Biodiesel werden 1.010-1.040 kg Rapsöl, 6-7 kg Katalysator (meist NaOH) und 109 kg Methanol und je nach Verfahren auch 1-2 kg Säure eingesetzt. Als Nebenprodukt der Veresterung fallen 93-106 kg Rohglycerin (100 %ig) an. Vor einer weiteren Verwendung müssen sowohl der rohe Biodiesel als auch das Rohglycerin aufbereitet werden.

4. Rapsölkonversion zu Dieselkraftstoff

4. Rapsölkonversion zu Dieselkraftstoff

Neben dem Verfahren der Umesterung von Rapsöl zu Biodiesel in speziellen Anlagen gibt es einen weiteren Weg zur Angleichung der Eigenschaften von Rapsöl an die von Mineralöldiesel. Dieser zweite Weg führt über die gemeinsame Verarbeitung von Rapsöl¹⁸ und Mineralöl in bestehenden Anlagen der Mineralölindustrie.

Tab. 9: Technische Werte von Diesel- und Rapsöl-Dieselmkraftstoffen (DKR)

	Einheit	DIN 51601 100 % DK		DK mit 30 % DKR	
				Hydrocracker	Hydrotreater
• Dichte (15°C)	g/ml	0,82-0,86	0,84	0,83	0,83
• Schwefel	g/100g	<0,2	0,19	0,04	0,04
• Stickstoff	mg/kg		137	71	81
• Wasserstoff	g/100g		13,2	13,8	13,8
• Cetanzahl		>45	55	67	69
• Cloudpoint	°C	-	3	5	5
• CFPP	°C	0	-9	-2	-2
• Viskosität (20°C)	mm²/s	2-8	4,9	5,0	5,8
• Wassergehalt	mg/kg	<200	83	98	39
• Heizwert (Hu)	MJ/l		36,0	35,7	35,7

Quelle: Baldauf/Balfanz 1994

Die Umwandlung von Rapsöl zu rapsölstämmigem Dieselmkraftstoff (DKR) kann über eine sanfte (das sogenannte Hydrotreating-Verfahren)¹⁹ oder über eine aggressivere Behandlung mit Wasserstoff (das sogenannte Hydrocracking-

18 Das Rapsöl sollte <1 ppm Phosphor und Kalzium enthalten, um Probleme beim Langzeitverhalten der Katalysatoren durch Ablagerung von Kalziumphosphaten zu vermeiden.

19 Beim Hydrotreating wird das Rapsöl bei mittlerem Druck und einer Temperatur um 350°C mit Wasserstoff behandelt. Dieser Verfahrensschritt dient im Raffinationsprozeß vornehmlich dem Abbau von Heteroverbindungen, deren Reaktionsprodukte einerseits Ammoniak, Schwefelwasserstoff und Wasser und andererseits Kohlenwasserstoffreste sind.

III. Biokraftstoffproduktion

Verfahren)²⁰ erfolgen (Tab. 9). Beim Hydrotreating wird verglichen mit dem Hydrocracking weniger als die Hälfte des Wasserstoffs verbraucht (Baldauf/Balfanz 1994). Entsprechend günstiger ist das energetische Input-Output-Verhältnis des Hydrotreating-Verfahrens im Vergleich zum Hydrocracking-Verfahren.

Die Rapsölkonversion in bestehenden Anlagen der Mineralölindustrie hat den Vorteil, daß keine gesonderten Anlagen erstellt werden müssen und die Umwandlungsprodukte über bestehende Verteilungssysteme rasch in den Markt eingeführt werden können. Ein weiterer Vorteil ist, daß der Rapsöleinsatz den Angebots- und Preisverhältnissen auf dem Pflanzenölmarkt flexibel angepaßt werden kann, da das Mischungsverhältnis von Pflanzenöl zu Mineralöl variabel ist. Die maximal einsetzbare Menge an rapsölstämmigen Komponenten im Mischkraftstoff wird durch die in den DIN-Vorschriften geforderten Kraftstoffqualitäten bestimmt. Nach dem derzeitigen Kenntnisstand ist ein Zusatz von bis zu 30 Gew.-% Rapsöl zum Mitteldestillat im Hydrotreater erscheint ohne Qualitätseinbußen für die Mineralölprodukte möglich. Auch scheint der Mischkraftstoff ohne Einschränkung in konventionellen Diesel- und Ottomotoren einsetzbar. Das Einspritzverhalten in die Mischkammer des Motors dürfte sich durch die rapsölstämmigen Produktanteile kaum verändern, da die Viskosität nahezu gleich bleibt (Tab. 9).

Das mit Hilfe des Cloud-Punktes (CP) und des Cold Filter Plugging Point (CFPP) charakterisierte Kälteverhalten des Kraftstoffs verschlechtert sich jedoch und begrenzt die Zumischung von Rapsöl zum Mitteldestillat bzw. den möglichen DKR-Gehalt von Mineralöldiesel. Marktüblicher Winterdiesel wird heute auf einen CFPP-Wert von unter -22°C eingestellt. Wegen der eingeschränkten Kältestabilität des Kraftstoffs sollte die Zumischung von Rapsöldieselkraftstoff im Winter auf 1,5 % und im Sommer auf 5 % der Kraftstoffmenge begrenzt werden (Baldauf/Balfanz 1994). Beim gegenwärtigen Verbrauch an Dieselkraftstoff in Deutschland (23 Mio. t/a) könnten demnach jährlich bis zu 850.000 t Rapsöl in den Mineralölraffinerien zur Herstellung von DKR verwendet werden.

Trotz der genannten Vorteile wird in Deutschland (im Gegensatz zu Frankreich) die Beimischung von rapsölstämmigen Komponenten zum Mineralöldiesel derzeit für wenig aussichtsreich angesehen und daher nicht weiter verfolgt. Die wesentlichen Gründe hierfür sind der Verlust des Sauerstoffgehalts und

20 Beim zweistufigen Hydrocracking (bei 400°C und 130 bar) steht die Spaltung der Kohlenwasserstoffverbindungen und die Absättigung der Bruchstücke mit Wasserstoff im Vordergrund.

5. Herstellung von Bioethanol

damit der guten biologischen Abbaubarkeit sowie die für biogene Anteile in Mischkraftstoffen nicht geltende Mineralölsteuerbefreiung.

5. Herstellung von Bioethanol

Bioethanol kann im Gegensatz zu den pflanzlichen Ölen nicht mittels einfacher mechanischer Verfahren direkt aus den Pflanzen gewonnen werden. Die Herstellung von Bioethanol aus pflanzlichen Rohstoffen (Zucker, Stärke, Cellulose) erfolgt über relativ aufwendige biotechnologische Verfahren.

Zur Bioethanolproduktion können im Prinzip alle Pflanzenrohstoffe herangezogen werden, die mikrobiell vergärbare Zucker enthalten oder in solche überführt werden können. Das bedeutet, daß außer Zuckerrüben und Zuckerhirsen auch stärkehaltige (z.B. Kartoffeln, Mais und Weizen) und cellulosehaltige (z.B. Holz, Stroh) Rohstoffe eingesetzt werden können. Voraussetzung hierfür ist allerdings, daß die Stärken, Cellulosen und Hemicellulosen zuvor in vergärbare Zuckereinheiten umgewandelt wurden.

Die mikrobielle Umsetzung zuckerhaltiger Lösungen zu Bioethanol wird meist mit der Hefe **Saccharomyces cerevisiae** in einem kontinuierlichen Verfahren durchgeführt. Bei der Vergärung werden pro kg Glucose ($C_6H_{12}O_6$) rd. 0,51 kg Bioethanol (C_2H_5OH) und 0,49 kg Kohlendioxid (CO_2) erzeugt. Die vergorene Flüssigkeit bzw. Maische enthält 5-12 % Bioethanol. Bei einer höheren Alkoholkonzentration verlangsamen die Hefezellen ihr Wachstum und sterben ab. Durch Destillation wird der abgetrennte Bioethanolanteil auf bis zu 97 Vol. % aufkonzentriert. Durch Absolutierung²¹ kann eine Reinheit von mehr als 99,8 Vol.-% erreicht werden.

Neben der klassischen Hefevergärung kann die Bioethanolgewinnung auch mit Hilfe des Bakteriums **Zymomonas mobilis** erfolgen. Das Bakterium bietet die folgenden Vorteile:

- Es hat eine höhere Produktivität als Hefe. Die Gärung ist nach 20 Stunden (im Vergleich zu 35-50 Stunden bei Hefe) abgeschlossen.
- Die Umsetzung zu Bioethanol verläuft kontinuierlich, da das Bakterium gut alkoholverträglich ist.

21 Bei der Absolutierung (Aufkonzentrierung von Alkohol) wird das Wasser-Bioethanol-Gemisch einer modernen Molekularsiebdestillation unterzogen oder mit sogenannten Schlepptmitteln (z.B. Cyclohexan) vermischt, um die für eine Nutzung als Kraftstoff-Mischkomponente erforderlichen Ethanolreinheiten von mehr als 99,8 Vol.-% zu erreichen.

III. Biokraftstoffproduktion

- Das Bakterium bildet weniger Nebenprodukte als Hefe.

Diesen Vorteilen steht die Anforderung an eine absolut sterile Arbeitsweise gegenüber. Die geforderte Sterilität des Prozeßablaufes konnte zumindest in der Pilotanlage der Stärkefabrik von Pfeifer&Langen in Dormagen bei Köln, wo die bakterielle Fermentation im technischen Maßstab Anfang der 80er Jahre getestet wurde, nicht erreicht werden. Wegen Infektionen durch Milchsäurebakterien mußte dort der angestrebte kontinuierliche Fermentationsprozeß bereits nach wenigen Wochen aufgegeben werden.

Bei der Bioethanolgewinnung aus Zuckerrüben werden diese zunächst gewaschen und zerkleinert, um die nachfolgende Rohsaftgewinnung²² zu vereinfachen. Das Waschwasser wird anaerob oder aerob geklärt und in den Vorfluter geleitet. Die beim Waschen anfallenden Erd- und Kalkschlämme, können zu Bodenverbesserungsmitteln aufgearbeitet werden. Deren Vermarktung bereitet wegen der darin enthaltenen pflanzenschädlichen Erreger (Nematoden, Pilze) jedoch zunehmende Schwierigkeiten. Der zuckerhaltige Rohsaft wird auf einen Zuckergehalt von 55 % konzentriert und teilweise einer Pasteurisierung unterzogen, um mikrobiologischen Problemen bei der anschließenden Vergärung vorzubeugen. Als Nebenprodukte fallen Zuckerrübenschnitzel und auch Schlempen (Destillationsrückstände) an. Die Schlempen können ohne weitere Aufbereitung oder nach anaerober Behandlung anlagenintern rezykliert werden.

Die als Pülpe anfallenden nassen Rübenschnitzel (5 % TS) können als Tierfutter verwendet werden, sind aber nur begrenzt transportwürdig und müssen innerhalb von 1-2 Wochen verwendet werden. Durch Abpressen des Wassers kann der TS-Gehalt der Rübenschnitzel auf gut 70 % und durch eine nachfolgende Hochtemperaturtrocknung auf 90 % erhöht werden. Diese sogenannten Trockenschnitzel sind ein hochwertiges Futtermittel, das gut lagerbar ist und über weitere Entfernungen vermarktet werden kann.

Melasse, die als Reststoff bei der Extraktion und Kristallisation von Weißzucker für Nahrungszwecke zurückbleibt, kann als zuckerhaltiger Rohstoff ebenfalls zur Bioethanolproduktion für energetische Zwecke verwendet werden. Dieser Weg der Melasseverwertung ist besonders für Gebiete mit regional hoher Konzentration an Rübenerzeugung und -verarbeitung bei gleichzeitig geringer Viehdichte interessant, weil hier die Melasseverfütterung keine nennenswerte Rolle spielt.

22 Bei der Extraktion mit Wasser im Gegenstromverfahren wird die im Wurzelkörper der Zuckerrübe gespeicherte Saccharose nahezu vollständig abgetrennt.

5. Herstellung von Bioethanol

Bei der Bioethanolgewinnung aus Zuckerrüben (20-24 % TS) können die höchsten Bioethanolerträge pro Tonne Rohstoff und pro Hektar Rohstofffläche erzielt werden (Tab. 10). Bei einer ausschließlichen Bioethanolgewinnung aus Zuckerrüben sind die Anlagen jedoch nicht ausgelastet, weil die im Herbst geernteten Zuckerrüben bis Ende Februar des darauffolgenden Jahres verarbeitet sein müssen. Durch Auslegung der Anlagen auf einen Mehrstoffbetrieb kann die Auslastung verbessert und das Anbauspektrum verbreitert werden. Die technische Machbarkeit des Mehrstoffbetriebs mit Kartoffeln, Zuckerrüben, Getreide, Corn-Cob-Mix und Topinambur wurde in einer großen Bioethanolgewinnungsanlage (144.000 hl/a) in Ahausen-Eversen (Niedersachsen) von 1985-1990 demonstriert.

Tab. 10: Bioethanolerträge verschiedener Rohstoffpflanzen

	<i>Hektarertrag</i>	<i>Rohstoffbedarf</i>	<i>Ethanolertrag</i>	
	<i>(t/ha)</i>	<i>(t/t Ethanol)</i>	<i>(t/ha)</i>	<i>(l/ha)</i>
• Zuckerrüben	66	12,6	5,15	6.600
• Kartoffeln	35	10,0	3,5	4.410
• Getreide*	7	3,46	1,925	2.420
• Getreide**	9	3,53	2,475	3.120
• Mais	6-7	3,2	1,82-2,22	2.270-2.780
• Lignocellulose***	10	4,2-7,15	1,4-2,4	1.770-3.020

* über den Trockenprozeß

** über das Naßverfahren

*** über die chemische Hydrolyse

Quelle: eigene Berechnungen nach Institut Wallon 1994, Poitrat 1996

Die Bioethanolgewinnung aus stärkehaltigen Rohstoffen ist technisch machbar, jedoch deutlich aufwendiger als die Vergärung von zuckerartigen Pflanzeninhaltsstoffen, weil hierfür zwei vorgelagerte Aufbereitungsschritte erforderlich sind. Zuerst muß die Stärke durch enzymatische oder thermische Quellung hydrolysiert werden. Anschließend müssen die dabei entstehenden Oligosaccharide in einem als Verzuckerung bezeichneten Prozeß mit Hilfe von Enzymen oder Säuren in vergärbare Monosaccharide aufgespalten werden.

Zur Bioethanolgewinnung aus Getreide (85 % TS) gibt es zwei unterschiedliche Verfahren. Zum einen kann das gesamte Getreidekorn vermahlen, mit

III. Biokraftstoffproduktion

Wasser vermischt und fermentiert werden (Naßverfahren). Zum anderen kann das Getreide zuerst in seine Bestandteile zerlegt und nur die Stärke hydrolysiert und fermentiert werden (Trockenverfahren). In beiden Fällen wird die Stärke durch enzymatische Hydrolyse in einem zweistufigen Prozeß (Verflüssigung und Verzuckerung)²³ in Glucoseeinheiten zerlegt. Das Trockenverfahren ist mit höheren Investitionskosten verbunden als das Naßverfahren, hat jedoch den Vorteil, daß die Stärke in höherwertige A-Stärke bzw. minderwertige B-Stärke separiert, die A-Stärke an die Nahrungsmittelindustrie verkauft und die B-Stärke zur Bioethanolproduktion verwendet werden kann²⁴.

Die bei der Bioethanolgewinnung aus Getreide anfallenden Schlemphen können in Dick- und Dünnschlemphen getrennt werden. Ein Teil der Dünnschlempe wird in das Maischeverfahren als Frischwasserersatz zurückgeführt. Die nicht rezyklierte Dünnschlempe wird eingedampft und zusammen mit der Dick- schlempe getrocknet. Das Endprodukt DDGS (distiller's dried grains with solubles) stellt mit einem Eiweißgehalt von 24-30 % und einem Wassergehalt von 10 % ein hochwertiges, transport- und handelsfähiges Futtermittel dar.

Die Bioethanolgewinnung aus Kartoffeln erfolgt analog zur Bioethanolgewinnung aus Weizenstärke über Vergärung und Destillation. Einziger Unterschied ist, daß aus verfahrenstechnischen Gründen die Schlemphen nur in geringen Mengen (etwa 15 %) rezykliert werden, weil aufgrund der hohen Wassermengen eine Schlempeneindampfung mit einem hohen Energieaufwand verbunden wäre. Deshalb werden Kartoffelschlemphen entweder direkt verfüttert, auf Ackerflächen ausgebracht oder über aerobe bzw. anaerobe Behandlungsverfahren bis zur Vorfluterqualität aufgearbeitet. Die Unterbringung von Kartoffelschlemphen in der Tierfütterung ist allerdings selbst bei kostenloser Abgabe und Anlieferung inzwischen schwierig geworden.

Die umweltverträgliche Entsorgung der Abwässer - bei der Bioethanolgewinnung aus stärkereichen Kartoffeln fallen bedingt durch den hohen Feuchtegehalt des Rohstoffs erhebliche Mengen an Abwasser an - ist wegen der hohen Gehalte an Kalium und nichtkoagulierbaren Stickstoffverbindungen mit hohen Kosten verbunden. Die traditionelle Entsorgung der Abwässer durch Verregung auf umliegenden landwirtschaftlichen Flächen wird wegen der Gefahr von Umweltbeeinträchtigungen immer weniger praktiziert. Die Aufarbeitung der

23 Bei der Verflüssigung werden die Stärkemoleküle enzymatisch (Alpha amylase) in Dextrine gespalten, und bei der Verzuckerung werden die Dextrine unter veränderten Reaktionsbedingungen in fermentierbare Zucker überführt.

24 Die Bioethanolgewinnung auf der Basis von B-Stärke aus Weizenmehl wurde in den 80er Jahren in einer Annexanlage zu einer Stärke- und Glucosefabrik in Dormagen bei Köln untersucht.

5. Herstellung von Bioethanol

Abwässer zur Eiweißentfernung aus dem Kartoffelfruchtwasser verringert die Abwasserbelastung. Außerdem kann hierdurch ein hochwertiges Viehfutter erzeugt werden. Die verbleibende abwasserbedingte Umweltbelastung ist jedoch immer noch nennenswert.

Bioethanol wird gegenwärtig nahezu ausschließlich aus zucker- oder stärkehaltigen Pflanzen erzeugt. Bei der Bioethanolgewinnung aus stärkehaltigen Pflanzen wird Getreide bevorzugt, da die Nutzung von Kartoffeln als Bioethanolrohstoff mit einem höheren Transportaufwand, einer eingeschränkteren Rohstofflagerbarkeit und größeren Abwassermengen verbunden ist. Die Bioethanolgewinnung aus vergärbaren Zuckern ist technisch ausgereift und demonstriert. Sie wird jedoch nur in den Ländern praktiziert, wo staatliche Förderhilfen zur Erzeugung und zum Einsatz von Bioethanol gewährt werden.

Die mangelnde Wettbewerbsfähigkeit von Bioethanol auf dem Kraftstoffmarkt ist maßgeblich auf die hohen Rohstoffkosten zurückzuführen, die ca. 40 % der gesamten Bioethanolproduktionskosten ausmachen. Die hohen Rohstoffkosten würden sich signifikant verringern, wenn anstelle eigens für die Bioethanolproduktion angebaute Zucker- oder Stärkepflanzen preisgünstiges Wald- und Industrierestholz eingesetzt werden könnte. Um dieses Ziel zu erreichen, werden in den USA, Kanada und Schweden Forschungsarbeiten zur Bioethanolgewinnung aus billigem Rest- und Abfallholz durchgeführt (Bull 1994).

Die Bioethanolgewinnung aus Lignocellulose ist verfahrenstechnisch schwierig, da die aus Glucoseeinheiten aufgebaute Cellulose und Hemicellulose kristalline Strukturen besitzen, die den Zugang von Enzymen oder sauren Katalysatoren erschweren, und das Lignin die beiden wirksam vor einem enzymatischen Abbau schützt. Zur Abtrennung des nicht fermentierbaren Lignins gibt es verschiedene, mehr oder weniger aggressive physikalische und chemische Behandlungsverfahren.

Nach dem derzeitigen Kenntnisstand kann die Konversion von Lignocellulose im Prinzip über zwei verschiedene Prozesse erreicht werden: über den Säureaufschluß oder die enzymatische Hydrolyse. Der Säureaufschluß wird bereits seit der Jahrhundertwende untersucht; in Krisenzeiten wurde er auch genutzt. Der Säureaufschluß besitzt aufgrund der bestehenden technischen Probleme, der Unwirtschaftlichkeit und Umweltunverträglichkeit eher geringe Zukunftschancen. Eine bessere Umweltverträglichkeit besitzen sanftere Aufschlußverfahren, wie das Dampfaufschluß-Verfahren oder das alkoholische Organosolv-Verfahren.

Interessant erscheint auch der enzymatische Hydrolyseaufschluß. Die technische Eignung enzymatischer Konversionsprozesse wurde bereits in Pilotanla-

III. Biokraftstoffproduktion

gen in Frankreich, Österreich, Japan, Kanada und in den USA für verschiedene stroh- und holzartige Rohstoffe getestet (Gregg/Saddler 1996). Sie sind bislang jedoch weder großtechnisch noch ökonomisch erprobt. Um die Forschung, Entwicklung und Demonstration einer enzymatischen Bioethanolgewinnung aus unterschiedlichen lignocellulosehaltigen Rohstoffen weiter voranzubringen, hat die Internationale Energieagentur (IEA) ein Netzwerk "Biotechnologie zur Konversion von Lignocellulose" etabliert.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß die Bioethanolgewinnung aus Lignocellulose mit einer komplexen und derzeit noch kostspieligen Vorbehandlung und Fraktionierung verbunden ist, um das Substrat in hydrolysierbare und fermentierbare Verbindungen umzuwandeln und die dabei entstehenden Nebenprodukte zu verwerten. Auch ist die Prozeßführung aufgrund der größeren Variabilität bei der Rohstoffzusammensetzung deutlich anspruchsvoller als bei der Bioethanolgewinnung aus Zucker oder Stärke. Obwohl in den letzten Jahren Fortschritte bei der enzymatischen Hydrolyse von Cellulose in fermentierbare Glucoseeinheiten erzielt wurden, steckt die Entwicklung eines Prozesses zur Konversion von Lignocellulose in Bioethanol erst in den Anfängen. Im Falle einer erfolgreichen Weiterentwicklung und Kommerzialisierung der enzymatischen Bioethanolgewinnung aus Lignocellulose ständen dem Verfahren jedoch gute Zukunftsaussichten bevor, da lignocellulosehaltige Rest- und Abfallstoffe (Stroh, Altpapier usw.) aus gegenwärtiger Sicht eine preisgünstige Rohstofffraktion darstellen. Dies könnte sich jedoch mittel- und langfristig durch die Demonstration und Markteinführung von effizienten und zuverlässigen Verbrennungs- und Vergasungsanlagen für holziges und holzartiges Abfall- und Restholz ändern.

IV. Nebenprodukte der Biokraftstoffproduktion

Bei der Produktion von Biokraftstoffen aus Pflanzen fallen je nach Pflanzenart und Verfahrensprozeß verschiedene Nebenprodukte bzw. Rest- und Abfallstoffe an. Marktfähige Nebenprodukte können einen Beitrag zur Wirtschaftlichkeit der Biokraftstoffproduktion leisten. Nachfolgend werden deshalb die bei der Gewinnung von Rapsöl und bei der Herstellung von Biodiesel entstehenden Nebenprodukte Rapsschrot und Glycerin sowie die bei der Bioethanolproduktion aus zucker- und stärkehaltigen Rohstoffen anfallenden nutzbaren Rückstände und deren Verwertung als Futtermittel betrachtet. Die beim Anbau der Rohstoffpflanzen aufkommenden stroh- oder krautartigen Rückstände werden aufgrund der bislang eher theoretischen Möglichkeiten ihrer Nutzung als Energieträger oder Futtermittel nicht diskutiert.

1. Rapsschrot

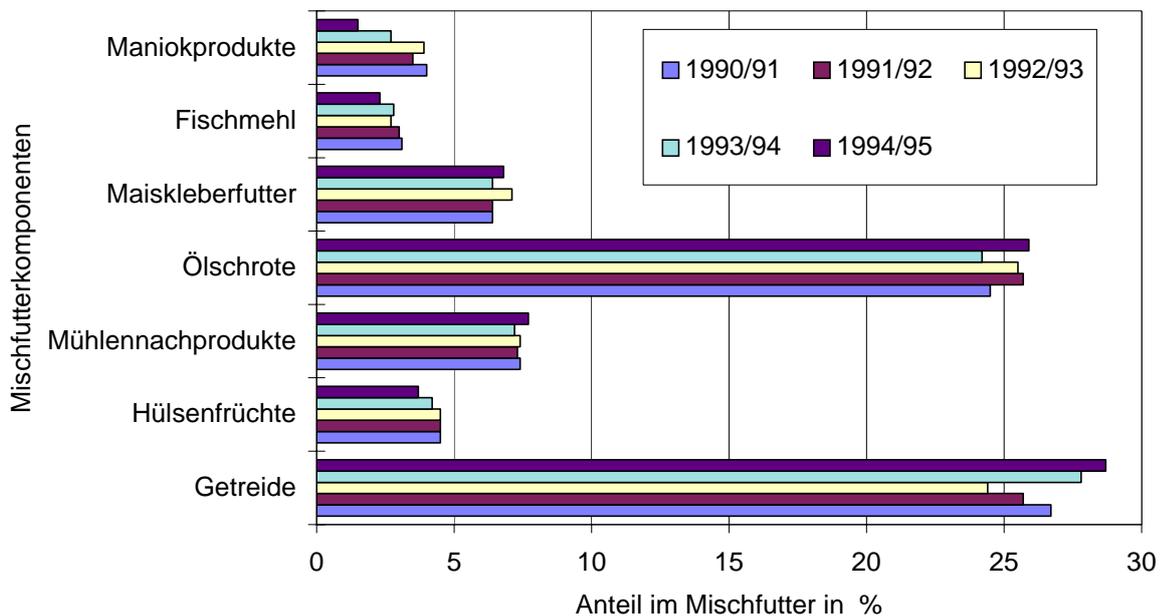
Bei der Produktion von 1 t Rapsöl (1.100 l) fallen rd. 1,5 t Rapsschrot an, die aufgrund ihres hohen Rohproteingehalts (über 33 %) als Eiweißkomponente zur Herstellung von Mischfuttermitteln verwendet werden können. In Deutschland werden 6,24 Mio. t/a Schweinemischfutter, 4,14 Mio. t/a Mischfutter für Mastgeflügel und Legehennen und 7,91 Mio. t/a Rindermischfutter erzeugt (Agrar-Europe 1997b). Mit einem Anteil von rd. 25 % sind die Ölschrote die zweitwichtigste Mischfutterkomponente nach Getreide (Abb. 2). Den Löwenanteil unter den Ölschroten in Mischfuttermitteln nehmen die Ölkuchen und Extraktionsschrote von Soja (44 %) ein. Der Anteil von Rapsölkuchen und Rapsextraktionsschroten (RES) liegt bei 28,7 % (= 1,37 Mio. t), bezogen auf den Einsatz an Ölschroten bei der Futtermittelherstellung.

Rapsschrot bzw. RES kann zwischen 20 % (bei Mastschweinen) und 43 % (bei Rindern) in der Mischfütterration ausmachen. Fütterungsversuche haben ergeben, daß RES bei sachgerechten Rationen ein vollwertiger Sojaschrot- und Getreideersatz sein kann. Die Abnehmer sind jedoch nicht bereit, einen aus Fütterungsversuchen abgeleiteten Preis zu bezahlen (Knoflacher et al. 1991). Der erzielbare Preis für RES und Rapsschrot lag in der Vergangenheit bei ca.

IV. Nebenprodukte der Biokraftstoffproduktion

zwei Dritteln des Erlöses für Sojaschrot²⁵. Je nach Angebot und Wechselkurs bewegen sich die Preise für Rapsschrot meist zwischen 280 DM/t und 320 DM/t. Kurzfristig lagen die Preise auch schon unter 200 DM/t (LAB 1996). Die starken Preisschwankungen sind eine Folge fehlender Lagermöglichkeiten für Rapsschrot und RES bei den Ölmühlen mit hohen Produktionskapazitäten. Bei einem Anstieg der Biodieselproduktion und einem daraus hervorgehenden höheren Schrotaufkommen muß mit sinkenden Preisen für RES gerechnet werden.

Abb. 2: Anteil von Ölschroten und anderen Komponenten im Mischfutter



Quelle: Agra-Europe 1997b

Die Verwertung von RES als Mischfutterkomponente wird bei weiter ansteigenden Produktionsmengen durch das Blair-House-Abkommen eingeschränkt. In jüngster Zeit sind deshalb neue Wege zur Verwertung von Rapsschrot erforscht worden. Hierzu gehören die Nutzung von RES als Brennstoff oder als Düngemittel. Bei der anaeroben Vergärung von RES wird energetisch nutzbares Biogas und ein als Sekundärrohstoffdünger einsetzbarer Vergärungsrückstand erzeugt. Aufgrund der relativ geringen Gasausbeuten und des Energieeigenbedarfs der Anlage stellt die Biogasausbeute im Vergleich zur möglichen

25 Der Weltmarktpreis für Sojaschrot lag 1996/97 bei 450 DM/t im Vergleich zu 390 DM/t und 320 DM/t in den Vorjahren (BML 1997b). Aufgrund guter Ernteverhältnisse wird für 1997/98 mit einem Preis von 390 DM/t Sojaschrot gerechnet (Agra-Europe 1997b).

1. Rapsschrot

Nutzung des Gärrückstandes als Dünger in der Landwirtschaft oder im Gartenbau ein Nebeneffekt dar²⁶.

Rapsschrot bzw. RES hat einen Heizwert von rd. 18 MJ/kg (bei 8-12 % H₂O) und kann als Brennstoff genutzt werden. Im Vergleich zu anderen Brennstoffen enthält RES einen höheren Stickstoff-, Schwefel- und Aschegehalt (Tab. 11), was zu Problemen bei der Verbrennung führen kann. Die Technologieentwicklung für eine thermische Nutzung von RES wird vermutlich innerhalb der nächsten Jahre abgeschlossen sein.

Tab. 11: Vergleich von Rapsextraktionsschrot mit anderen Brennstoffen

	<i>Heizwert</i> (MJ/kg)	<i>Flüchtige</i> (%)	<i>Asche</i> (%)	<i>C</i>	<i>H</i>	<i>N</i>	<i>O</i> (%)	<i>S</i>	<i>Cl</i>
• Steinkohle	31,8	38,8	6,3	79,4	5,1	1,5	6,6	1,0	<0,2
• Braunkohle	27,0	55,0	7,6	68,4	5,5	1,8	15,4	1,3	-*
• Fichtenholz	18,7	84,0	0,3	50,9	6,6	0,2	42,0	0,02	0,01
• Weizenstroh	17,1	79,6	5,3	46,7	6,3	0,4	41,2	0,1	0,4
• Rapsstroh	17,0	78,7	6,5	48,3	6,3	0,7	38,0	0,2	-*
• Rapsextraktionsschrot	18,1	67,0	7,2	43,2	6,0	5,6	36,4	0,93	0,023

* keine Angabe

Quelle: Heinisch/Barz 1997

Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zur Verbrennung oder Vergasung von RES in Wirbelkammerreaktoren zur Wärme- bzw. Kraft-Wärme-Gewinnung haben gezeigt, daß die Kosten der Energieversorgung bei kostenfreier Bereitstellung von RES deutlich unterschritten werden könnten (Heinisch/Barz 1997). Bereits bei einem RES-Preis zwischen rd. 100 DM (bei rein thermischer Nutzung) und 150 DM/t (bei Kraft-Wärme-Kopplung) würde jedoch Kostengleichheit mit fossilen Energieträgern eintreten. Höhere Preise für RES als Brennstoff sind gegenwärtig nicht erzielbar, da diese zu einer deutlichen Verteuerung der Energieproduktion führen würden. Verglichen mit einer Verwertung als Mischfutterkomponente wäre die energetische Nutzung von RES also mit erheblichen

26 Die Biogasgewinnung aus Rapsschrot ist Gegenstand eines vom BMELF geförderten und kürzlich abgeschlossenen Vorhabens der sächsischen Firma Bi-Utec GmbH.

IV. Nebenprodukte der Biokraftstoffproduktion

Mindererlösen verbunden. Dies gilt ebenso für die Verwendung von Rapsschrot als Dünger. Der theoretische Wert für RES als Dünger liegt bei rd. 100 DM/t; der in der Praxis erzielbare Preis liegt jedoch deutlich darunter.

2. Glycerin

Bei der Umesterung von Rapsöl zu Biodiesel fallen pro Tonne erzeugtem Biodiesel 93-106 kg Rohglycerin ($C_3H_8O_3$) an. In großen Veresterungsanlagen ist eine Aufarbeitung des verunreinigten Rohglycerins zu technisch hochreinem Glycerin wirtschaftlich lohnend. Das erzeugte Reinglycerin stellt aufgrund seiner gesundheitlichen Unbedenklichkeit und seiner chemisch-physikalischen Eigenschaften (z.B. Geruchs- und Farblosigkeit) ein hochwertiges Nebenprodukt dar. Die bekanntesten Anwendungsgebiete für Glycerin sind die Sprengstoffherstellung (4 %) und die Tabakverarbeitung (3 %). Die wichtigsten Absatzfelder für Reinglycerin liegen jedoch in der Herstellung von Kosmetika (10 %), pharmazeutischen Produkten (11 %) und Kunstharz (11 %).

Der Absatzmarkt für Glycerin ist sehr eng. Das Marktvolumen für Reinglycerin beträgt weltweit rd. 550.000 t/a. Der Markt wird zu ca. 75 % von Glycerin bedient, der als Koppelprodukte bei der Verseifung natürlicher Fette anfällt; die restlichen 25 % werden synthetisch erzeugt. In Deutschland werden 80.000-90.000 t/a Glycerin produziert (davon 25 % synthetisches) und 34.600 t/a Rohglycerin sowie 19.400 t/a synthetisches Glycerin importiert. Eine stärkere Ausweitung der klassischen Anwendungsgebiete für Glycerin ist nicht erkennbar. Deshalb muß das bei der Biodieselproduktion anfallende Glycerin, um in den Markt zu kommen, entweder synthetisches Glycerin verdrängen oder neue Anwendungsfelder erschliessen. Bei einer Vervierfachung der derzeitigen inländischen Umesterungskapazitäten für Rapsöl könnte theoretisch bereits das gesamte importierte bzw. in Deutschland erzeugte synthetische Glycerin (40.000 t/a) substituiert werden.

Die Marktpreise für Reinglycerin liegen bei bis zu 1.400 DM/t. Es ist jedoch damit zu rechnen, daß bei einem Anstieg des Glycerinaufkommens der enge Markt für Glycerin empfindlich gestört wird und es zu einem Preisverfall kommt. Abschätzungen zur Entwicklung der Glycerinerlöse nach Ausschöpfung der Substitutionspotentiale sind angesichts der vielfältigen Verwendungsmöglichkeiten von Glycerin schwierig. Zudem ist fraglich, ob nicht bestimmte Einsatzbereiche, in denen eine hohe Qualität erforderlich ist, synthetisch produziertem Glycerin vorbehalten bleiben.

3. Nebenprodukte der Bioethanolgewinnung

Bei der Bioethanolgewinnung aus stärkehaltigen Rohstoffen fallen je nach Rohstoff, Maischekonzentration und Destilliervorgang pro 100 Liter Bioethanol 1.100-1.400 Liter Schlempe²⁷ an (Pieper/Senn 1991). Bei bestimmten Verfahren der Bioethanolgewinnung aus Getreide (z.B. beim Hohenheimer Dispergier-Maisch-Verfahren) kann der Schlempeanfall durch Rückführung um bis zu 50 % reduziert werden. Die hierbei gewonnenen Dickschlempen weisen einen erhöhten Gehalt an wertbestimmenden Inhaltsstoffen auf.

Schlempen können feucht oder getrocknet als Futter- oder Düngemittel eingesetzt werden. Die Verwertung der Frischschlempen in der Wiederkäuer- und Schweinefütterung ist wegen der geringen Haltbarkeit unmittelbar an die Produktion gekoppelt. Die Herstellung von Trockenschlempen ist technisch kein Problem, belastet aber die Energiebilanz der Bioethanolherstellung erheblich (Schäfer 1995). Der Futterwert der Schlempen hängt von ihrer Zusammensetzung und Verdaulichkeit ab. In Tabelle 12 sind die Futterwerte verschiedener Schlempearten dargestellt. Bei der Bioethanolproduktion aus Zuckerrüben fallen pro Tonne Bioethanol 0,89 t Trockenschnitzel mit Schlempe (angetrocknet) an, die einen Futterwert von 0,73 t Getreideeinheiten haben.

Tab. 12: Zusammensetzung und Futterwert verschiedener Schlempen

	<i>Kartoffeln</i>	<i>Mais</i>	<i>Weizen</i>
• Schlempeanfall (in t getrocknet) bei der Produktion von 1 t Bioethanol (1.260 l)	1,176	1,216	1,25
• Futterwert in Getreideeinheiten (GEt)	0,605	0,547	0,562
• TS (%)	7,3	7,1	5,7
• Rohprotein (%)	30,7	28,4	36,9
• Rohfett (%)	1,7	11,6	6,8
• Rohfaser (%)	8,1	9,3	11,2
• umsetzbare Energie (MJ/kg)	10,0	13,9	-*
• Verdaulichkeit der organischen Substanz (%)	78,3	81,0	-*

* keine Angabe

Quelle: eigene Zusammenstellung nach Krell et al. 1994

27 Unter Schlempe versteht man die Rückstände, die nach der Bioethanoldestillation aus vergorenen Maischen zurückbleiben.

IV. Nebenprodukte der Biokraftstoffproduktion

Die Schlemphen, die bei der Bioethanolgewinnung aus Kartoffeln und Weizen anfallen, besitzen einen Eiweißgehalt von 28-37 %, einen relativ hohen umsetzbaren Energiegehalt und eine gute Verdaulichkeit der organischen Substanz. Sie können als getrocknete Schlemphen (bei der Zuckerrübe zusammen mit den Trockenschnitzeln) als Futtermittel vermarktet werden. Die derzeit erzielbaren Erlöse für Trockenschnitzel liegen zwischen 190 DM/t und 250 DM/t (ZMP 1997).

Von besonderer Bedeutung sind die Erlöse aus dem Verkauf der Nebenprodukte, die bei der Bioethanolherstellung aus Mais entstehen. Mais spielt jedoch in Europa keine nennenswerte Rolle als Rohstoff für die Bioethanolerzeugung. In den USA trägt der bei der Bioethanolproduktion entstehende Maiskleber (corn gluten feed), der wegen seines geringen Rohfasergehalts und seines hohen Eiweiß- und Farbstoffgehalts als wertvolles Geflügelfutter in die EU exportiert wird, dagegen maßgeblich zur Wirtschaftlichkeit der Bioethanolproduktion aus Mais bei²⁸.

Die Entsorgung von nassen Schlemphen über Kläranlagen stellt insbesondere bei der Bioethanolproduktion aus Getreide wegen des hohen chemischen Sauerstoffbedarfs (aufgrund des Anteils suspendierter Feststoffe) und des niedrigen pH-Wertes der Schlemphen hohe Anforderungen an die Klärtechnik (Pieper et al. 1993). Der Schlempeverwertung zur Biogasgewinnung oder als organischer Sekundärrohstoffdünger kommt deshalb besondere Bedeutung zu. Die energetische Verwertung der Schlempe in einer Biogasanlage hat darüber hinaus den Vorteil, daß die dabei erzeugte Energie zur Dampferzeugung für die Destillation herangezogen werden kann.

28 Die Bioethanolgewinnung findet in den USA zu 90 % auf der Basis von Mais statt. Zwei Drittel der Produktion erfolgt über das Naßverfahren (wet milling), das im Vergleich zum Trockenverfahren mit höheren Investitionskosten, aber auch mit höheren Erlösen durch die Vermarktung der dabei anfallenden Nebenprodukte Maisöl (3 %) und Maiskleber (26 %) verbunden ist.

V. Biokraftstoffe im Einsatz

Biokraftstoffe können im Prinzip in allen Kraftfahrzeugtypen (Pkw, Lkw, Busse, Traktoren, Schiffe) eingesetzt werden. Die Anforderungen an die Eigenschaften und die Qualität des Biokraftstoffs sind je nach Motorenkonzept unterschiedlich und haben dazu geführt, daß sich verschiedene Einsatzformen für Biokraftstoffe herausgebildet haben.

Der Einsatz von reinem Rapsöl (0,92 kg/l, 36,7 MJ/kg) in seriengefertigten modernen Dieselmotoren mit Direkteinspritzung führt zu Ablagerungen (Verkokungen) an der Einspritzdüse und in der Verbrennungskammer, welche langfristig zum Ausfall des Motors führen können. Auch bei der Kraftstoffzuführung können aufgrund der deutlich höheren Viskosität von Rapsöl verglichen mit Dieselkraftstoff Probleme auftreten. Deshalb kommt eine Nutzung von Rapsöl nur für modifizierte großvolumige Kammermotoren, wie sie z.B. in Schleppern eingesetzt werden, in Frage. Der Nachteil dieser Motoren ist, daß sie in ihrem Einsatzspektrum eingeschränkt sind und einen relativ hohen Kraftstoffverbrauch haben. Außerdem muß zum Anlassen und Abstellen dieser im Prinzip pflanzenölauglichen Motoren Dieselkraftstoff eingesetzt werden, damit auch bei niedrigen Temperaturen (wenn das Pflanzenöl wegen seiner Viskosität nicht mehr gezündet werden kann) ein störungsfreier Betrieb möglich ist. Mit Rapsöl betriebene Schlepper enthalten deshalb meist ein zweites Kraftstoffsystem. Das Kaltstartverhalten ($<0^{\circ}\text{C}$) von mit Rapsöl gefahrenen Motoren kann auch durch den Einbau einer Kraftstoffförderpumpe und elektrisch beheizter Kraftstofffilter, Tank- und Kraftstoffleitungen verbessert werden (May et al. 1994).

Angesichts der technischen Probleme beim Einsatz von Rapsöl in bestehenden Motoren wurden in den letzten Jahren verstärkt Bemühungen unternommen, um speziell für den Betrieb mit pflanzlichen Ölen konzipierte Motoren zu entwickeln, die gute Wirkungsgrade und geringe Abgasemissionen aufweisen. Die Anpassung von Motorenkonzepten, die sich beim Einsatz von fossilen Kraftstoffen bewährt haben, an biogene Kraftstoffe ist technisch möglich; sie führt jedoch dazu, daß konventionelle Kraftstoffe nicht mehr ohne weiteres verwendet werden können bzw. zu schlechteren Motorleistungen und einem ungünstigeren Abgasverhalten führen.

Alternativ zur Modifikation konventioneller, für den Einsatz von Mineralöldiesel konzipierter Motoren wurde versucht, die kraftstoffspezifischen Eigen-

V. *Biokraftstoffe im Einsatz*

schaften von Rapsöl durch Zumischungen und Zusätze so zu verändern, daß der biogene Kraftstoff auch in modernen direkteinspritzenden Dieselmotoren eingesetzt werden kann. Ein bekanntes Beispiel für einen Rapsöl-Mischkraftstoff ist der sogenannte Tessel-Naturdiesel, der 80 % Rapsöl (Vollraffinat), 14 % Spezialbenzin und 6 % Isopropanol enthält. Die sehr niedrige Cetanzahl von Tessel, die sich kaum von reinem Rapsöl unterscheidet, und die gegenüber Diesel deutlich schlechtere Viskosität machen Tessel zu einem wenig geeigneten Dieselsubstitut (Maurer 1993).

Ein weiterer Nachteil von Tessel war, daß er wegen des Anteils an fossilem Treibstoff nicht mehr in den Genuß der Mineralölsteuerbefreiung kam. Um diesen schwerwiegenden Nachteil zu beheben, wurde 1994 unter der Bezeichnung "Tessel II" ein auf rein pflanzlicher Basis erzeugter Tesseltreibstoff (65 % Rapsöl, 30 % Biodiesel und 5 % Bioethanol) angeboten, der nicht mehr mineralölsteuerpflichtig ist. Motortechnische Kenndaten zur Leistung, Betriebssicherheit und Langzeitstabilität der Motoren und Ergebnisse zum Emissionsverhalten liegen nicht vor. Bei Tessel II besteht (wie auch bei Tessel I) das Problem, daß das Herstellungsverfahren kaum eine dezentrale Bereitstellung erlaubt.

Im Gegensatz zum Einsatz von Pflanzenöl bzw. Pflanzenölmischungen hat der aus Rapsöl hergestellte Biodiesel den großen Vorteil, daß er mit Dieselkraftstoff mischbar ist und sich für materialtechnisch modifizierte Fahrzeuge mit konventionellen Dieselerbrennungsmotoren eignet. Die alternative oder gemeinsame Verwendung von Biodiesel und Mineralöldiesel in vorhandenen Dieselmotoren hat den Vorteil, daß der neue Biokraftstoff über die bestehenden Distributionsnetze schnell und flächendeckend in den Markt eingeführt werden kann.

Bioethanol kann ebenfalls in verschiedenen Mischungsverhältnissen in Otto- und Dieselmotoren eingesetzt werden. Die Beimischung von Bioethanol zu Ottokraftstoffen ist in einer Größenordnung von 5-22 Vol.-% möglich. Im Mischung mit Dieselkraftstoff können bis zu 5-10 Vol.-% eingesetzt werden. Wenn Lösungsvermittler zugegeben werden, die die Entmischung von Bioethanol und Dieselkraftstoff verhindern, können sogar bis zu 25 Vol.-% beigemischt werden. Reiner Bioethanol kann ebenso wie reines Pflanzenöl (insbesondere Rapsöl) nur in Spezialmotoren eingesetzt werden.

1. Rapsöl in Spezialmotoren

Pflanzenölmotoren sind gekennzeichnet durch große Brennräume, eine starke Verwirbelung des Pflanzenöl-/Luft-Gemisches und hohe Verbrennungstemperaturen. Pflanzenöлтаugliche Vor- oder Wirbelkammermotoren²⁹ haben besonders große Zylindereinheiten. Die Verbrennung wird unter hohem Druck, Kraftstoffüberschuß und Sauerstoffmangel, die Nachverbrennung unter geringerem Druck, relativ niedriger Temperatur, Luftüberschuß und starker Verwirbelung durchgeführt. Durch dieses zweistufige Vorgehen kann eine nahezu vollständige Verbrennung des Pflanzenöls erreicht werden, was eine geringere Rückstandsbildung und niedrigere Abgasemissionen zur Folge hat (Jurisch/Meyer-Pittroff 1995). Diese Vorteile werden jedoch mit einem Mehrverbrauch an Kraftstoff (von bis zu 15 %) und einem niedrigeren Wirkungsgrad der Kammermotoren im Vergleich zum Direkteinspritzer-Motor erkauft.

Direkteinspritzende Pflanzenölmotoren haben als charakteristisches Merkmal eine halbkugelförmige Brennmulde im Kolben bzw. Zylinderkopf und Einloch-Einspritzdüsen zur besseren Zerstäubung des hochviskosen Kraftstoffes. Der bekannteste pflanzenöлтаugliche Direkteinspritzer ist der von Ludwig Elsbett entwickelte Duotherm-Motor³⁰, bei dem der Kraftstoff in einen Wirbel der Verbrennungsluft, der sich im halbkugelförmigen Verbrennungsraum des Kolbenbodens bildet, eingespritzt wird. Dieses »Duotherm« genannte Verfahren hat den Vorteil, daß durch die Verbrennung im Kern des Wirbels die außenliegende isolierende Luftschicht die Wärmeverluste aus dem Verbrennungsraum vermindert³¹. Die Wärmeverluste werden durch einen speziellen Graugußkolben weiter verringert. Dadurch kann der Wirkungsgrad auf 40 % gesteigert werden gegenüber 31 % beim herkömmlichen Dieselmotor und 28 % beim Ottomotor.

Durch den höheren Wirkungsgrad sinkt der Kraftstoffverbrauch bei gleicher Motorleistung. Der Elsbett-Motor verbraucht nur etwa die Hälfte des Kraftstoff-

29 Die Klöckner-Humboldt-Deutz AG, Köln, und die Motorenfabrik Mannheim AG (MWM) bieten speziell luftgekühlte, pflanzenöлтаugliche Wirbelkammermotoren für Schlepper an.

30 Der Duotherm-Motor von Elsbett ist eine konsequente Weiterentwicklung des Dieselmotors und wie dieser ein Selbstzündermotor. Er war der erste schnellaufende Pkw-Motor nach dem Dieselpinzip mit Direkteinspritzung des Kraftstoffes.

31 Das Hauptproblem bei der Verwendung von reinem Pflanzenöl als Kraftstoff ist die normalerweise starke Bildung von Ölkohle an den Wänden der Verbrennungsräume im Motor. Bei dem von Elsbett entwickelten Verbrennungsverfahren wird die Berührung von Kraftstoffpartikeln mit den Wänden und damit die Ablagerung von Ölkohle verhindert.

fes eines von der Leistung her vergleichbaren Benzinmotors und nur etwa zwei Drittel des Kraftstoffes eines konventionellen Dieselmotors. Durch den hohen Wirkungsgrad fällt auch weniger Abwärme an. Der Elsbett-Motor benötigt deshalb nur einen Ölkühler und keine Wasser- und Luftkühlung. Der Pflanzenölmotor kann mit verschiedenen Mischungen aus Pflanzenölen betrieben werden, daneben auch mit Dieselkraftstoff.

Die Verwendung von Rapsöl in pflanzenöлтаuglichen Dieselmotoren und in speziellen Pflanzenölmotoren, wie z.B. dem Elsbett-Motor, wurde in zahlreichen Projekten demonstriert. Nach längerer Laufzeit traten allerdings oftmals Probleme auf, die erhebliche Reparaturen erforderlich machten. Von den bislang getesteten Pflanzenölmotoren besitzt noch keiner die Praxisreife, die für den Start einer Serienproduktion erforderlich wäre. Es wird jedoch erwartet, daß die Entwicklung von Pflanzenölmotoren in spätestens 3-5 Jahren die Kommerzialisierungsphase erreichen wird.

2. Einsatz von Biodiesel in Dieselmotoren

Biodiesel besitzt ähnliche verbrennungstechnische Eigenschaften wie Mineralöldiesel und kann ohne motortechnische Veränderungen als Kraftstoff in vorhandenen Dieselmotoren eingesetzt werden. Zuvor sind allerdings materialseitige Anpassungen erforderlich, da Biodiesel die im Fahrzeugbau für Dichtungen und Kraftstoffleitungen eingesetzten Kunststoffe angreift und ein gutes Lösemittel für Fahrzeuglacke darstellt. Eine Reihe von Fahrzeugherstellern bietet biodieselbeständige Nachrüstsätze an oder hat bei einigen ihrer neuen Serienfahrzeugmodelle entsprechende Materialveränderungen im gesamten Kraftstoffsystem (Tank, Leitungen, Schläuche, Dichtungen) vorgenommen. In jüngster Zeit erteilen zunehmend mehr Motorenhersteller für ihre neuen Fahrzeugmodelle Freigaben für den Einsatz von Biodiesel und übernehmen die volle Gewährleistung, sofern qualitativ hochwertiger Biodiesel eingesetzt wird. Biodieseltaugliche Schlepper werden von

- AEBI, Bucher, Case, Deutz-Fahr, Fendt, Fiat-Agri, Ford, Holder, Hürliemann, John Deere, Kubota, Lamborghini, Landini, Lindner, Massey-Ferguson, Mercedes-Benz, Rasant, Reform, Renault, Same, Steyr, Valmet, Zetor,
- biodieseltaugliche Pkw von Audi, Ford, Mercedes, Opel, Seat, Volvo, VW und

2. Einsatz von Biodiesel in Dieselmotoren

- biodieseltaugliche Lkw von Iveco-Magirus, MAN, Mercedes angeboten (Wörgetter 1996).

Biodiesel sollte möglichst wenig Wasser (<300 mg/kg) enthalten, da es ansonsten zu Korrosionen (Einspritzpumpe) und Verstopfungen der Kraftstofffilter und -leitungen kommt. Um Polymerisationen von Rückständen und Ablagerungen im Brennraum (Kolbenringe) zu vermeiden, sollte die Jodzahl³² unter 115 liegen (Kossmehl 1996). Der Phosphorgehalt sollte wegen der Gefahr einer irreversiblen Beschädigung des Abgaskatalysators unter 10 mg/kg und der Anteil an freiem Glycerin und an Glyceriden wegen deren Aggressivität gegenüber Buntmetallen und Chromlegierungen unter 0,02 % liegen.

Erste Qualitätsstandards für Biodiesel gibt es in Deutschland (DIN E 51606 für Kraftstoffe auf Fettsäuremethylbasis), Österreich (ÖNORM C 1190 für Biodiesel und ÖNORM C 1191 für Fettsäuremethylester) und Tschechien (CZN 656507). In Frankreich existieren ebenfalls Qualitätsanforderungen für Biodiesel, und für Mineralöldiesel mit 5 % Biodiesel gelten die Europäischen Standardwerte für Diesel (EN 590). Auch der National Biodiesel Board (NBB), eine Handelsvereinigung zur Kommerzialisierung und Industrialisierung von Biodiesel in den USA, hat inzwischen erste Mindestqualitätsstandards für Biodiesel entwickelt.

Die französischen Mineralölfirmen Elf-Aquitaine, Shell und Total setzen Biodiesel (5 %) als Dieseladditiv ein, um dem Diesel die als Folge der Entschwefelung verloren gegangene Schmierfähigkeit zurückzugeben. Das Produkt wird unter dem Namen "Diester" und "Bio-Gazole" zum gleichen Preis angeboten wie normaler Dieselkraftstoff. Höhere Biodieselizeusätze (bis 30 %) werden vom "Club des Villes Diester" unter der Ägide der französischen Ölsaaten- und Leguminosenerzeuger (Sofiproteol) in kommunalen Fahrzeugen von 40 Städten erprobt. Der Automobilhersteller Renault hat Freigaben für die Nutzung von Diesel mit 30 % Biodieselizeusatz in seinen kommunalen Nutzfahrzeugmodellen (Busse und Lkw) erteilt.

Beim Einsatz von Biodiesel (0,88 kg/l, 37,1 MJ/kg) in serienmäßigen Dieselmotoren ist der Wirkungsgrad praktisch gleich wie bei der Verwendung von Dieselkraftstoff (0,84 kg/l, 42 MJ/kg). Der volumetrische Kraftstoffverbrauch ist aufgrund des geringeren Heizwertes von Biodiesel jedoch um 10-16 % höher (Maack et al. 1997). Die Unterschiede sind für den Praxisbetrieb jedoch nicht wesentlich, da das Fahrverhalten sowie die motortechnischen Einstellun-

32 Die Jodzahl gibt Auskunft über den Anteil an ungesättigten Fettsäuren, die reaktiv sind und z.B. beim Eintrag ins Motoröl negative Effekte (durch Ölverdickung) hervorrufen können.

gen einen weitaus größeren Einfluß auf den Verbrauch und die Leistung des Motors haben als die Kraftstoffart. Der Wirkungsgrad des Motors bei Nennlast ist bei beiden Kraftstoffarten gleich. Der Leistungsabfall als Folge des geringeren volumetrischen Energiegehalts kann durch veränderte Einstellungen an der Einspritzpumpe ausgeglichen werden.

Niedriglastbetrieb und Dauerbetrieb im Nennlastbereich wirken sich wegen der Gefahr der Schmierölverdünnung, der Leistungseinbußen bzw. des Kraftstoffmehrverbrauchs ungünstig auf den Biodieseleinsatz aus. Bei kurzen Laufzeiten des Motors und niedrigen Außentemperaturen kann es ebenfalls zu einer Schmierölverdünnung durch Biodiesel kommen. Manche Fahrzeughersteller empfehlen deshalb eine Verkürzung der Ölwechselintervalle beim Betrieb mit Biodiesel (Neuhaus/Dierschke 1995).

3. **Bioethanol und ETBE als Benzinverbesserer**

Bioethanol kann als Mischkraftstoff oder Additiv sowohl in konventionellen Ottomotoren als auch in Dieselmotoren eingesetzt werden. Die Beimengung von Bioethanol zu fossilen Kraftstoffen ist bis zu bestimmten Mischungsanteilen ohne motortechnische Veränderungen möglich. In Mischung mit Dieselmotoren können bis zu 20-25 Vol.-% Bioethanol eingesetzt werden, wenn durch Zugabe von Lösungsvermittlern die Bildung stabiler, lagerungsbeständiger Gemische gewährleistet wird. Um 100 % Bioethanol ohne Zusätze in Dieselmotoren verbrennen zu können, sind aufgrund der Zündunwilligkeit sehr hohe, technisch aufwendige Verdichtungsverhältnisse des Motors erforderlich. Zündzusätze (10-12 %) führen zu einer Verbesserung der Zündwilligkeit, aber auch zu einer Verteuerung (10-15 %) des Kraftstoffs (BML 1995).

Die Beimischung von Bioethanol zu Ottokraftstoff ist ein etabliertes Verfahren. In den USA werden Benzin-Bioethanol-Mischungen verwendet, die bis zu 10 Vol.-% Bioethanol (Gasohol) enthalten. In Brasilien³³ wurden bereits Benzin-Bioethanol-Mischungen mit einem Bioethanolanteil von bis zu 22 Vol.-% eingesetzt, ohne daß Änderungen am Motor vorgenommen wurden. Aufgrund gesetzlicher Rahmenbedingungen ist der Grad der Bioethanolzumischung in der

33 In Brasilien wird reiner Bioethanol aus Zuckerrohr in Spezialfahrzeugen eingesetzt. Der Start von Ottomotoren mit reinem Bioethanol ist bei $4,4^{\circ}\text{C}$ schwierig, da Bioethanol weniger volatil ist als Benzin (Houghton-Alico 1982). Durch den Einsatz von reinem Bioethanol kann die spezifische Leistung eines Fahrzeugs um 5-10 % im Vergleich zum Benzinbetrieb erhöht werden (Holmann et al. 1991).

3. Bioethanol und ETBE als Benzinverbesserer

EU auf
5 Vol.-% begrenzt³⁴.

Durch Zugabe von Bioethanol zu Ottokraftstoffen kommt es zu einer Reihe von Veränderungen bei den Kraftstoffkenndaten. Von besonderer Bedeutung ist die Erhöhung der Oktanzahl³⁵. Aufgrund der höheren Oktanzahl von Bioethanol (ROZ: 91-105)³⁶ im Vergleich zu bleifreiem Benzin (ROZ: 95), kann Bioethanol als Oktanzahlverstärker anstelle von Blei³⁷ eingesetzt werden. Bei niedrigen Rohölpreisen ist es jedoch für gewöhnlich kostengünstiger, aufwendigere Raffinerieprozesse zu nutzen, um ein Benzin mit hoher Oktanzahl zu erzeugen. Ein weiterer Vorteil der Beimischung von Bioethanol zu Ottokraftstoffen ist die Erhöhung des Sauerstoffgehalts und die damit verbundene vollständigere Verbrennung des Kraftstoffs.

Die Nachteile einer Beimischung von Bioethanol sind die Destabilität der Mischung durch den Wasseranteil im Alkohol, die Materialunverträglichkeit gegenüber Elastomeren und Metallen und das veränderte Fahrverhalten. Die Eigenschaft der Benzin-Bioethanol-Gemische Wasser zu adsorbieren kann ab einem Wassergehalt von ca. 0,5 % zur Ausbildung von zwei Schichten, einerseits mit Benzin und andererseits mit Alkohol und Wasser führen.

Beim Einsatz von nicht wasserfreiem Bioethanol (>99,8 Vol.-%) steigt mit zunehmendem Alkoholgehalt die Gefahr einer Entmischung an, die zu Betriebsstörungen (z.B. durch Korrosionen) führen kann. Um eine Entmischung zu verhindern, sind spezifische Transport- und Lagerungsmaßnahmen erforderlich, die mit entsprechenden Mehrkosten verbunden sind. Ein weiterer Nachteil von Benzin-Bioethanol-Mischungen ist, daß durch den Zusatz von Bioethanol (5-10 %) der Dampfdruck des Mischkraftstoffs steigt und mehr flüchtige Kohlenwasserstoffe verdunstet werden als beim Betrieb mit reinem Ottokraftstoff.

34 In der EU dürfen gemäß einer ECE-Regelung von 1985 in unverbleitem Normalkraftstoff bis zu 5 Vol.-% Bioethanol enthalten sein, wobei der Sauerstoffgehalt zwischen 2,5 und 3,7 Gew.-% liegen darf. Bei der Umsetzung dieser Richtlinie in nationales Recht wurde in der DIN 51607 "Unverbleite Ottokraftstoffe" von 1988 ein nationaler Grenzwert von 5 Vol.-% Ethanol und maximal 2,8 Gew.-% Sauerstoff festgelegt.

35 Die Oktanzahl ist ein Maß für die Klopfestigkeit, d.h. der Beständigkeit des Kraftstoffs gegenüber einer Selbstentzündung. Je höher die Oktanzahl ist, desto klopfester ist der Kraftstoff.

36 ROZ: Research-Oktanzahl, ein weltweit genormtes Maß für das Beschleunigungsklopfen.

37 Aus Sorge über den Einfluß von Blei auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt und wegen der Einführung von abgasreduzierenden Katalysatoren, die durch Blei deaktiviert werden, wird inzwischen flächendeckend bleifreies Benzin eingesetzt. Um bleifreies Benzin mit einer hohen Oktanzahl anbieten zu können, muß das Benzin entweder mit einem Oktanzahlverstärker vermischt oder stärker raffiniert werden.

V. Biokraftstoffe im Einsatz

Durch die Veresterung von Bioethanol mit Isobutylen zu Ethyl-Tertiärbutyl-Ether (ETBE) verschwinden die genannten Nachteile. ETBE löst sich gut in Benzin, ist wenig korrosiv und hat ein gutes Start- und Fahrverhalten. Aus diesen Gründen wird in Frankreich die Beimischung von ETBE dem Einsatz von Bioethanol zur Erhöhung der Oktanzahl vorgezogen. ETBE ist technisch nahezu identisch mit dem Sauerstoffträger MTBE, das auf der Basis von Methanol erzeugt wird (Tab. 13). Der Energiegehalt von ETBE ist mit rd. 27 MJ/l etwas höher als der von MTBE (26 MJ/l) und um gut ein Viertel höher als der von Bioethanol.

Tab. 13: Eigenschaften von Benzin, Methanol, Bioethanol, ETBE und MTBE

	<i>Oktanzahl</i> <i>(Motor)</i>	<i>Dampfdruck</i> <i>(ROZ)</i>	<i>Siedepunkt</i> <i>(kPa)</i>	<i>Energiegehalt</i>	
				<i>t (°C)</i>	<i>(H_w) in MJ/l</i>
• Benzin	82-88	92-98	70-100	26-230	32,23
• Methanol	99	133	414	65	15,63
• Bioethanol	96	130	124	78	21,2-21,4
• MTBE	101	118	55	55	26,04
• ETBE	102	118	28	72	27

Quelle: LAB 1996 und Hery 1996

ETBE hat im Vergleich zu MTBE darüber hinaus den Vorteil, daß es den Dampfdruck des Kraftstoffgemisches senkt und die Oktanzahl bei gleichem Sauerstoffanteil im Gemisch um 25 % stärker erhöht, wodurch der Anteil an Aromaten im Gemisch und an unerwünschten Emissionen (Benzol, Schwefel) verringert wird (Absatzförderungsfonds 1994).

VI. Kostenbetrachtungen

In diesem Kapitel werden Angaben zu den Kosten der Bereitstellung von Biokraftstoffen unter gegenwärtigen Produktionsbedingungen gemacht und Ausblicke auf die weitere Entwicklung der Energiepreise gegeben. Die Wettbewerbsfähigkeit der Biokraftstoffe im Vergleich zu den fossilen Kraftstoffen ist dabei von besonderem Interesse.

1. Kosten der Bereitstellung von Biokraftstoffen

Die Kosten der Bereitstellung von Biokraftstoffen ergeben sich aus den Kosten für die Erzeugung, Ernte, Lagerung und den Transport der Pflanzenrohstoffe sowie für die Kraftstoffgewinnung. Die Kosten für die Rohstoffbereitstellung sind vom natürlichen Ertragsniveau und von der Produktionsintensität abhängig und davon, ob Ansätze für Fixkosten, Arbeitslöhne und Flächennutzungskosten gemacht werden und eine Verzinsung des eingesetzten Eigenkapitals (Umlaufvermögen und Grund und Boden) erfolgt. Die Kosten der Raps'erzeugung auf stillgelegten Flächen liegen zwischen rd. 1.385 DM und 1.470 DM pro Hektar (Tab. 7) bzw. zwischen ca. 1,04 DM und 1,37 DM pro Liter Rapsöl. Nach Abzug der Flächenstilllegungsprämie (750 DM pro Hektar und Jahr) verringern sich die Kosten der Raps'erzeugung auf 635-720 DM/ha bzw. auf 0,51-0,63 DM/l Rapsöl.

Die Umrüstung bestehender Dieselmotoren bzw. die Anschaffung von Spezialmotoren zur direkten Nutzung von Rapsöl sind mit Mehrkosten verbunden, die zwischen 0,15 DM/l und 0,20 DM/l Rapsöl liegen. Diese Mehrkosten würden sich verringern oder sogar entfallen, falls man die Pflanzenölmotoren in Serie und in größeren Stückzahlen produziert. Die Kosten für die chemische Umesterung von Rapsöl zu Biodiesel, die eine Kraftstoffnutzung in direkteinspritzenden Dieselmotoren ermöglicht, liegen ebenfalls zwischen 0,15 DM und 0,20 DM pro Liter Rapsöl. Verkaufserlöse für das Glycerin, welches als Nebenprodukt bei der Umesterung anfällt, sind dabei als monetäre Gutschrift bereits berücksichtigt. Bei einem Anstieg der Biodieselproduktion ist allerdings mit einem Verfall der Glycerinpreise und mit höheren Kosten für die Umesterung zu rechnen.

VI. Kostenbetrachtungen

Beim Einsatz von Biodiesel (32,7 MJ/l) fallen Mehrkosten durch den volumetrischen Mehrverbrauch im Vergleich zu Dieselkraftstoff (35,4 MJ/l) an. Dieser ist mit 0,05-0,10 DM/l Biodiesel zu veranschlagen. Inklusive der Kosten für den Transport und den Vertrieb der rapsölstämmigen Biokraftstoffe und abzüglich der Erlöse aus dem Verkauf von Rapsschrot als Mischfutterkomponente ist die Bereitstellung von Rapsöl, rapsölstämmigem Dieselkraftstoff (DKR) und Biodiesel vor Steuern zwei- bis dreimal teurer als die Kosten für Mineralöldiesel vor Steuern (0,41 DM/l). Wenn die Stilllegungsprämie - die unabhängig davon gezahlt wird, ob Kraftstoff-Raps angebaut oder die Fläche begrünt wird - nicht als Einnahme berücksichtigt wird, sind die Kosten für die Bereitstellung von Rapsöl und Biodiesel mit rd. 1,30-1,80 DM/l sogar drei- bis viermal höher als die Kosten für Mineralöldiesel (Tab. 14).

Tab. 14: Bereitstellungskosten von Pflanzenölkraftstoffen (DM/l)

	<i>Rapsöl</i>	<i>DKR</i>	<i>Biodiesel</i>
• Rohstoffkosten	0,51-0,63	0,51-0,63	0,51-0,63
• Kosten der Ölgewinnung und -raffination	0,20-0,30	0,20-0,30	0,20-0,30
• Kosten der Konversion bzw. Umrüstung	0,15-0,20	0,30-0,35	0,15-0,20
• Erlös für Rapsschrot	-(0,35-0,45)	-(0,35-0,45)	-(0,35-0,45)
• Mehrverbrauch an Kraftstoff	0,05	0	0,10-0,15
• Kosten für Transport und Vertrieb	0,20	0	0,20
• Gesamtkosten ohne Stilllegungsprämie	1,29-1,67	1,19-1,57	1,34-1,77
• Gesamtkosten mit Stilllegungsprämie	0,76-0,93	0,66-0,83	0,81-1,03

Quelle: eigene Berechnungen

In Deutschland gibt es keine großtechnischen Anlagen zur Bioethanolproduktion für energetische Zwecke. Bioethanol wird (zumeist in Kleinanlagen) lediglich für eine Nutzung im Lebensmittelsektor oder im chemisch-pharmazeutischen bzw. medizinischen Bereich erzeugt. Im Vergleich zu kleinen Brennereien haben großtechnische Bioethanolproduktionsanlagen den Vorteil, daß sie technisch und wirtschaftlich in der Lage sind, eine energiesparende Mehrdruckdestillation durchzuführen. Bei der Darstellung von Kosten der Bioethanolproduktion in größeren Anlagen muß mangels neuer Daten für Großanlagen auf ältere Angaben zurückgegriffen werden, die während der 80er Jahre beim

1. Kosten der Bereitstellung von Biokraftstoffen

Betrieb von großen Demonstrationsanlagen zur Bioethanolproduktion gesammelt wurden. In der Demonstrationsanlage Ahausen-Eversen (1987-1991) kostete die Bioethanolproduktion beispielsweise zwischen 1,50 DM und 1,90 DM pro erzeugtem Liter Bioethanol. Faßt man verschiedene Angaben zu den Herstellungskosten von Bioethanol aus wirtschaftlich und technisch optimierten Großanlagen zusammen, so ergibt sich eine relativ weite Kostenspanne von 0,95 DM bis 1,72 DM pro produziertem Liter Bioethanol (BML 1995).

Um die Kosten zwischen einerseits Biokraftstoffen und fossilen Diesel- und Ottokraftstoffen und andererseits den Biokraftstoffen untereinander vergleichen zu können, müssen diese wegen der unterschiedlichen Heizwerte der einzelnen Kraftstoffe auf den Heizwert bezogen werden. Im Vergleich zu Ottokraftstoff (Superbenzin bleifrei) mit einem Energiegehalt (H_u) von 32,2 MJ/l besitzt Bioethanol (21,3 MJ/l) einen um ein Drittel geringeren Energiegehalt. Bezogen auf eine Energieeinheit (GJ) sind die Kosten für Bioethanol teurer als für Rapsöl und Biodiesel (Tab. 15).

Tab. 15: Perspektiven für die Kosten von Biodiesel und Bioethanol (DM/GJ)

	<i>Bereitstellungskosten</i>		<i>Substitutionswert*</i>		<i>Kostenunterdeckung</i>	
	<i>heute</i>	<i>zukünftig</i>	<i>heute</i>	<i>zukünftig</i>	<i>heute</i>	<i>zukünftig</i>
• Rapsöl	36-60	34-42	11	14	25-49	20-28
• DKR	33-57	32-40	11	14	22-46	18-26
• Biodiesel	41-65	39-45	11	14	30-54	25-31
• Zuckerrüben-Ethanol	53	54	16	20	37	34
• Weizen-Ethanol	76	65	16	20	60	45

* Soviel dürfte der alternative Kraftstoff gerade kosten, um preisgleich mit dem substituierten fossilen Kraftstoff zu sein.

Quelle: eigene Berechnungen nach Tabelle 14, Wintzer et al. 1993 und Hartmann/Strehler 1995

Aufgrund des höheren energetischen Substitutionswertes von Bioethanol³⁸ im Vergleich zu Biodiesel und Rapsöl³⁹ liegt der Wert für die energiespezifische

38 Die Beimischung von Bioethanol zu Benzin und die Bioethanolnutzung in Alkoholmotoren ist mit einer Erhöhung der Klopfestigkeit und des Gesamtwirkungsgrades verbunden. Bei der Substitution von Benzin wird deshalb ein Umrechnungsfaktor von 1,23 (Hartmann/Strehler 1995) unterstellt.

VI. Kostenbetrachtungen

Kostenunterdeckung von Bioethanol aus Zuckerrüben innerhalb der Spanne der Kostenunterdeckung für Rapsöl oder Biodiesel. Die Kosten und Substitutionswerte⁴⁰ sind vor Steuern berechnet. Unter Berücksichtigung der Mineralölsteuer für Dieselkraftstoff (17 DM/GJ) würde sich der Substitutionswert auf 28-31 DM/GJ erhöhen. Durch niedrigere Bereitstellungskosten und höhere Substitutionswerte könnte die Kostenunterdeckung mittel- bis langfristig auf 25-31 DM/GJ für Biodiesel aus Rapsöl und auf 34-45 DM/GJ für Bioethanol sinken.

2. Wettbewerbsfähigkeit durch Steuerbefreiung

Die Preise für Biokraftstoffe (nach Gutschrift der Flächenstillegungsprämie) liegen um den Faktor zwei bis drei höher als die Preise für Mineralölkraftstoffe vor Steuern (Tab. 16). Aufgrund der in Deutschland geltenden vollständigen, zeit- und mengenmäßig unbegrenzten Befreiung von der Mineralölsteuer sind die Tankstellenabgabepreise für Biodiesel, der ausschließlich aus Pflanzen erzeugt wurde, und für Mineralöldiesel annähernd preisgleich. Bioethanol ist, da er mangels Spezialfahrzeugen nur in Mischung mit fossilen Kraftstoffen eingesetzt werden kann und hierdurch nicht in den Genuß der Mineralölsteuerbefreiung kommt, um gut 40 % teurer als bleifreies Superbenzin.

Tab. 16: Preisvergleich Biokraftstoffe mit Mineralölkraftstoffen (DM/l)

	<i>Preis vor Steuern</i>	<i>Mineralöl- steuer</i>	<i>Mehrwert- steuer</i>	<i>Preis nach Steuern</i>
• Benzin (Super bleifrei)	0,38	0,98	0,21	1,57
• Bioethanol	0,85-0,98	0,98	0,27-0,29	2,10-2,25
• Dieselkraftstoff	0,41-0,45	0,62	0,16	1,19-1,23
• Rapsöl	0,76-0,93	0	0,11-0,14	0,87-1,07
• Biodiesel	0,81-1,03	0	0,12-0,16	0,93-1,19

39 Leichte Wirkungsgradsteigerungen sind allenfalls mit dem Einsatz von Rapsöl in Duotherm-Motoren und von Biodiesel in direkteinspritzenden Dieselmotoren verbunden.

40 Bei der Berechnung des Substitutionswertes müssen Unterschiede bei den Kapital- und Betriebskosten und bei den Wirkungsgraden berücksichtigt werden, die zu einer Verringerung oder auch Erhöhung des ansetzbaren Marktpreises für den jeweils substituierten fossilen Energieträger führen.

2. Wettbewerbsfähigkeit durch Steuerbefreiung

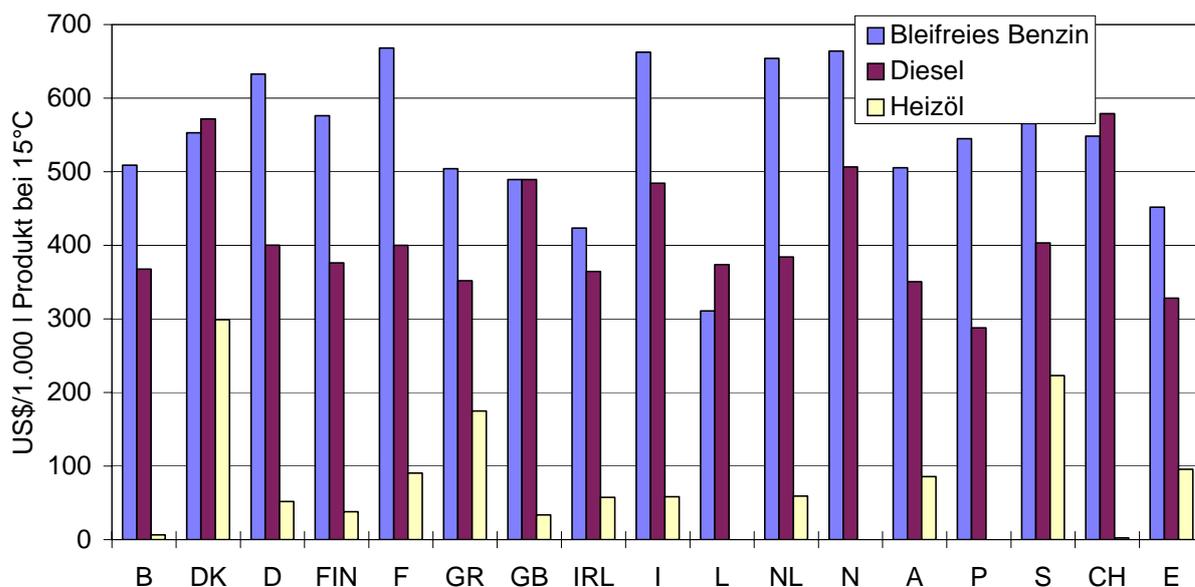
- DKR 0,66-0,83 0,62 0,19-0,22 1,47-1,67

Quelle: eigene Berechnungen nach Tabelle 14 und Wintzer et al. 1993

Auch in anderen Ländern innerhalb und außerhalb Europas wären die Biokraftstoffe ohne staatliche Unterstützung durch Steuervergünstigungen oder -befreiungen nicht wettbewerbsfähig gegenüber fossilen Kraftstoffen. Abbildung 3 zeigt die Unterschiede in der Höhe der gegenwärtig gültigen Mineralölsteuern auf Benzin, Diesel und Heizöl zwischen den verschiedenen Ländern Europas. Es wird außerdem erkennbar, daß in allen Ländern Europas der Einsatz von Rapsöl als Substitut für fossiles Heizöl aufgrund der niedrigeren Besteuerung nach Steuern nochmals deutlich unwirtschaftlicher wäre als der Einsatz von Biodiesel als Treibstoff anstelle von Mineralöldiesel.

In der EU gibt es bislang nur in Deutschland, Frankreich und Österreich spezielle steuerliche Vergünstigungen für die Anwendung von Biokraftstoffen. In einigen anderen Staaten sind in jüngster Zeit neue Regelungen bei der Kraftstoffbesteuerung erlassen worden zur Förderung des Einsatzes von umweltverträglicheren Kraftstoffen, die allerdings nicht nur für Biokraftstoffe gelten, sondern für alle Kraftstoffe, die in der Lage sind, die entsprechenden Umweltkriterien (z.B. niedriger Schwefelgehalt im Kraftstoff) zu erfüllen.

Abb. 3: Vergleich der Mineralölsteuern auf bleifreiem Benzin, Diesel und Heizöl in verschiedenen Ländern Europas



Quelle: OECD 1997b

VI. Kostenbetrachtungen

In den skandinavischen Staaten Norwegen, Finnland und Schweden werden die Kraftstoffe in ökologische Klassen eingeteilt und gemäß ihrer Emissionen besteuert. In Norwegen enthält die Benzinsteuer beispielsweise eine CO₂-Steuer (133 US\$/1.000 l), die beim Einsatz von Biokraftstoffen entfällt. Dieselmotorkraftstoff wird dagegen mit einer Basissteuer und einer Mineralölsteuer, die sich aus einer CO₂-Steuer (66,30 US\$/1.000 l) und einer SO₂-Steuer (10,92 US\$/1.000 l) zusammensetzt, beaufschlagt. Dieselmotorkraftstoffe mit weniger als 0,05 M.-% Schwefel sind von der SO₂-Steuer befreit.

VII. Nutzen von Biokraftstoffen

Wird in Deutschland Dieselkraftstoff durch Biodiesel ersetzt, so entgehen der Staatskasse Einnahmen in Höhe von 0,62 DM pro Liter verkauftem Biodiesel. Die jährlichen Steuermindereinnahmen durch den Verkauf steuerbefreiten Biodiesels (rd. 50.000 t im Jahr 1996) belaufen sich auf ca. 36 Mio. DM. Diesen Mindereinnahmen durch den vollständigen Verzicht auf die Erhebung der Mineralölsteuer sollten positive, mit dem Einsatz der Biokraftstoffe verbundene Wirkungen gegenüberstehen. In diesem Kapitel soll dargestellt werden, welche volkswirtschaftlichen und ökologischen Effekte mit dem Einsatz von Biokraftstoffen verbunden sind.

1. Volkswirtschaftliche Effekte

Der Verzicht des Staates auf die Mineralölsteuer beim Einsatz von Biokraftstoffen kommt gegenwärtig nahezu ausschließlich der Produktion und Anwendung von Biodiesel zugute. Neuere Abschätzungen zu den Auswirkungen eines verstärkten Einsatzes von Biokraftstoffen auf die Bruttowertschöpfung und Beschäftigungssituation beziehen sich deshalb meist auf Biodiesel.

Den Ergebnissen der Input-Output-Modellrechnungen des ifo Instituts für Wirtschaftsforschung zufolge würde eine inländische Ausdehnung der Rapsanbaufläche zur Biodieselproduktion von rd. 105.000 ha auf 300.000 ha zu einer Erhöhung der Bruttowertschöpfung um rd. 540 Mio. DM führen (Agra-Europe 1997j). Diese Steigerung fällt jedoch überwiegend außerhalb des landwirtschaftlichen Sektors an, weil die Erzeugung des pflanzlichen Rohstoffs bereits mit einer Produktionskostenunterdeckung und Subventionierung über Flächenstilllegungsprämien erfolgt.

Die ifo-Analysen kommen darüber hinaus zu dem Schluß, daß durch die gesteigerte Biodieselproduktion knapp 5.000 Stellen zusätzlich geschaffen werden könnten. Dies entspricht einem Plus von rd. 20 Arbeitsplätzen pro 1.000 t Biodiesel. Zwei Drittel dieser Stellen sind allerdings nicht direkt auf die Biodieselproduktion, sondern auf indirekte Effekte, d.h. auf höhere Vorleistungen und eine verstärkte Nachfrage aus zusätzlichem Einkommen, zurückzuführen. Diese indirekten Effekte bewirken auch, daß die zu erwartenden Mindereinnahmen des Staates bei einer Ausdehnung des mineralölsteuerbefreiten Biodie-

VII. Nutzen von Biokraftstoffen

seleinsatzes zu 70 % durch Mehreinnahmen aus anderen Steuern und Sozialversicherungsbeiträgen kompensiert würden (Schöpe 1996). Somit käme es zu einer Verringerung der Netto-Mindereinnahmen auf 75 Mio. DM.

Französischen Modellrechnungen zufolge können im ländlichen Raum und in der Prozeßindustrie durch die Produktion von 500.000 t Biodiesel rd. 6.300 Arbeitsplätzen erhalten bzw. neu geschaffen werden (Institut Wallon 1994). Das würde bedeuten, daß pro 1.000 Tonnen erzeugtem Biodiesel 13 Arbeitsplätze zusätzlich geschaffen würden, deren Existenz direkt mit der Biokraftstoffproduktion zusammenhängt. Mit der Bioethanolherstellung aus Zuckerrüben sind 12 Arbeitsplätze verbunden, mit der Herstellung von ETBE aus Zuckerrüben 10 Arbeitsplätze und mit der ETBE-Produktion aus Weizen 16 Arbeitsplätze (Gaoyer 1996, Dalamanges 1996).

Die Unterschiede zwischen den Abschätzungen zeigen, daß die Aussagen über den Erhalt bzw. die Schaffung von Arbeitsplätzen von den unterstellten Rahmenbedingungen, Annahmen und (wenig antizipierbaren) Entwicklungen abhängig sind. Dennoch kann festgehalten werden, daß durch eine Ausdehnung der inländischen Biodiesel-Raps-erzeugung auf rund 1 Million Hektar zwischen ca. 16.000 und 24.000 Arbeitsplätze geschaffen würden. Die dafür erforderlichen staatlichen Aufwendungen würden sich, ausgehend von 13-20 neuen Arbeitsplätzen pro 1.000 t Biodiesel und einem gleichbleibenden Mineralölsteuerverzicht von 0,62 DM/l, zwischen 31.000 DM und 47.000 DM pro Arbeitsplatz und Jahr belaufen. Unter Berücksichtigung der staatlichen Mehreinnahmen aus anderen Steuern und Sozialversicherungsbeiträgen als Folge der geschaffenen Arbeitsplätze würden die Nettokosten pro Arbeitsplatz geringer ausfallen.

Ein kurzer Blick auf die Gegebenheiten und Rahmenbedingungen in Brasilien, dem Land mit der weltweit bedeutendsten Bioethanolindustrie und derzeit ca.

5 Mio. Bioethanolbetriebenen Fahrzeugen (= 45 % des Fahrzeugbestandes), kann dazu beitragen, die mit einer signifikanten Ausdehnung der Biokraftstoffproduktion einhergehenden Veränderungen besser verstehen und einschätzen zu können. Das brasilianische Proalcool-Programm wurde Ende der 70er Jahre aufgrund steigender Ölpreise, hoher Zinssätze und sinkender Weltmarktpreise für Zucker aufgelegt. In der ersten Phase des Programms wurde der Bau von Bioethanolanlagen durch Zuschüsse von bis zu 75 % der Investitionskosten gefördert. Die Fahrzeugindustrie konnte durch die staatliche Garantie eines Bioethanolpreises, der unter 40 % des Benzinpreises liegt, zur Entwicklung und Produktion spezieller Bioethanolfahrzeuge motiviert werden.

2. *Ökologische Effekte*

Die Kosten der Bioethanolproduktion aus Zuckerrohr konnten im Laufe der Jahre durch prozeßtechnische Fortschritte und den Verkauf von aus Abfällen der Zuckerrohrvergärung gewonnenem Strom von 0,85 DM/l (1975) auf 0,45-0,50 DM/l (1994) gesenkt werden (Institut Wallon 1994). Auch konnte Brasilien seine Ölimporte von 1975-1990 um rd. 50 % verringern und die Außenhandelsbilanz entsprechend verbessern. Mehr als 700.000 Arbeitsplätze wurden erhalten bzw. neu geschaffen. Diese Arbeitsplätze sind jedoch stark abhängig von staatlichen Regelungen. Als Ende der 80er Jahre aufgrund der hohen Zuckerpriese, die am Weltmarkt erzielbar waren, der Bioethanolpreis auf 65 % des Benzinpreises erhöht und die Subventionen für die Destillieren gestrichen wurden, sank der Anteil an Bioethanolfahrzeugen am Neuwagenverkauf von fast 90 % im Jahr 1986 auf unter 20 % Anfang der 90er Jahre.

Wegen der nach wie vor benötigten staatlichen Hilfen zur Verringerung der Herstellungskosten von Bioethanol, aber auch wegen der anhaltend niedrigen Weltmarktpreise für fossiles Rohöl und wegen der erfolgreichen Exploration inländischer Ölvorkommen steht die Fortführung des Proalcohol-Programms trotz seiner Tradition und seiner Erfolge zur Diskussion.

2. **Ökologische Effekte**

Zur ökologischen Beurteilung der Substitution fossiler Kraftstoffe durch Biokraftstoffe müssen die Umwelteffekte der gesamten Prozeßkette von der Produktion bis zur Nutzung bilanziert und einer vergleichenden Bewertung unterzogen werden. Dies würde jedoch den Rahmen dieses Sachstandsberichtes sprengen. Deshalb werden die Umweltveränderungen im Bereich der Rohstoff-erzeugung und Biokraftstoffnutzung an dieser Stelle überwiegend auf einer vergleichenden qualitativen Ebene diskutiert.

Interessierte Leser finden umfangreiches Datenmaterial zum Thema Bilanzierung von Biokraftstoffen und anderen nachwachsenden Energieträgern unter verschiedenen ökologischen Aspekten im Vergleich zu den jeweils substituierten fossilen Energieträgern in der Studie von Kaltschmitt und Reinhardt (1997). In der Arbeit werden Aussagen zum flächenspezifischen Nettoenergiegewinn von Biokraftstoffen sowie zur Verringerung von klimarelevanten Gasemissionen (CO₂, CH₄ und N₂O) und öko- und humantoxischen Schadstoffen (z.B. NO_x, SO₂) durch die Substitution fossiler Kraftstoffe gemacht.

2.1 Biokraftstoffproduktion

Im Bereich des Rohstoffanbaus zur Biokraftstoffproduktion sind die wichtigsten Kenngrößen zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit die Auswirkungen des Einsatzes von Maschinen und Produktionsmittel (insbesondere Stickstoff- und Phosphatdünger sowie Pflanzenbehandlungsmittel) auf die Qualität des Grundwassers und der Oberflächengewässer sowie auf die bodenökologischen Funktionen und die Biodiversität (Flora und Fauna).

Das Ausmaß der Veränderungen durch den Anbau von öl-, zucker- oder stärkehaltigen Pflanzen zur Biokraftstoffproduktion wird, wie bei der Nahrungs- und Futtermittelerzeugung auch, von der Produktionsintensität und den Standort- und Witterungsbedingungen bestimmt. Der Anbau unterscheidet sich nicht grundsätzlich von der derzeit üblichen Nutzung der jeweiligen Kulturpflanzen zur Nahrungsproduktion. Tendenziell ist die Produktionsintensität wegen der niedrigeren Erzeugerpreise für Biodiesel-Raps im Vergleich zu NahrungsrapS etwas geringer. Dies kann sich bei einer steigenden Nachfrage und höheren Preisen für Biokraftstoffe jedoch ändern.

Die Ausdehnung des Raps- oder Zuckerrübenanbaus in einer bestehenden Fruchtfolge kann sowohl mit positiven als auch mit negativen Effekten verbunden sein⁴¹. Erst bei einem erheblich größeren Anbauumfang als gegenwärtig würde es ökologisch bedenklich werden, weil Raps und Zuckerrüben dann auch auf weniger geeigneten Standorten angebaut würden und es zu Fruchtfolgeverengungen käme. Bei Getreide ist aufgrund des bereits hohen Anteils an der Anbaufläche nicht mit positiven Wirkungen zu rechnen, während eine Zunahme des (rückläufigen) Kartoffelanbaus, sofern er nicht konzentriert in einer Region stattfindet, mit pflanzenbaulichen Vorteilen verbunden ist.

Verglichen mit einer begrüneten Flächenstilllegung sind die Auswirkungen des Anbaus von Rohstoffpflanzen auf die Qualität der Grund- und Oberflächengewässer und des Bodens dagegen bereits heute ungünstiger. Vor allem die Gefahr einer Grundwasserbelastung mit Nitrat und Pflanzenschutzmittelrück-

41 In von Getreide dominierten Fruchtfolgen kann der Rapsanbau zu höheren Getreideerträgen bei einem verringerten Dünge- und Pflanzenschutzmittelaufwand führen. Wenn der Rapsanteil an der Ackerfläche 20-25 % übersteigt, ist dagegen mit einem erhöhten Krankheitsdruck und sinkenden Raps-erträgen zu rechnen (Kleinhanß et al. 1992). Ähnliches trifft auch auf Fruchtfolgen zu, deren Raps- und Zuckerrübenanbaufläche mehr als 30 % umfaßt.

2. Ökologische Effekte

ständen ist wegen der zur Ertragssteigerung eingesetzten Dünge- und Pflanzenschutzmittel⁴² höher als bei einer begrünten Brache.

Von den Brachflächen gehen überwiegend positive Wirkungen auf Grundwasser, Gewässer, Boden sowie Fauna und Flora aus, wenn auch je nach Standort, Witterung und Pflegemaßnahme teilweise negative Umweltauswirkungen auftreten können. So besteht z.B. die Gefahr der Wind- und Wassererosion, des Nährstoffaustrags sowie der Vermehrung von Unkräutern und Schadorganismen. Diese Risiken, die darüber hinaus zu einer Beeinträchtigung der Ertragsfähigkeit des Standorts führen, können jedoch durch die Einsaat von Begrünungspflanzen oder durch eine kontrollierte Selbstbegrünung wirksam verringert werden. Die Flächenbegrünung führt zudem zu einer Verbesserung der Lebensbedingungen wildlebender Tiere. Die positiven Wirkungen sind bei einjährigen Stilllegungsflächen allerdings nur von kurzer Dauer. Die OECD (1997a) kommt nach Untersuchung der Stilllegungsprogramme in der EU, den USA, Kanada, Japan und in der Schweiz zu dem Schluß, daß sich ohne standortangepaßtes und zielorientiertes Vorgehen durch Flächenstilllegungen kaum nachhaltige Umweltverbesserungen erreichen lassen.

Über die bodenökologischen und faunistischen Auswirkungen eines Anbaus von Pflanzen zur Biokraftstoffproduktion auf stillgelegten Flächen gehen die Aussagen auseinander. Es wird sowohl von nicht signifikanten Unterschieden zwischen einer mit Raps bepflanzten und einer begrünten Stilllegungsfläche (Wolfensberger/Dinkel 1997) als auch von einer Verschlechterung der Funktionen im Vergleich zur begrünten Stilllegungsfläche (Kaltschmitt/Reinhardt 1997) berichtet. Das Risiko von Bodenverlusten und Nährstoffverlagerungen in Richtung Grund- und Oberflächengewässer ist beim Zuckerrüben- und Kartoffelanbau höher als beim Raps- oder Getreideanbau, da erstgenannte nach der Aussaat den Boden nur langsam bedecken und vor Erosion schützen. Auch können die zur Zuckerrüben- und Kartoffelernte herangezogenen schweren Maschinen, vor allem wenn sie nicht zum richtigen Zeitpunkt eingesetzt werden, die Bodenstruktur schädigen.

42 Zur Erzielung eines krankheitsfreien und hohen Massenertrags und zur Überwindung der langsamen, bis zum Reihenschluß konkurrenzschwachen Jugendentwicklung werden die Pflanzen mit Dünge-, Unkrautbekämpfungs- und Pflanzenschutzmitteln behandelt.

2.2 Biokraftstoffnutzung

In den letzten Jahren sind in Deutschland der Bestand an Kraftfahrzeugen, die Verkehrsleistung und der Kraftstoffverbrauch deutlich angestiegen. Der motorisierte Individualverkehr macht inzwischen 82 % der gesamten Verkehrsleistung aus⁴³. Bei den Güterverkehrsleistungen ist der Transport über motorisierte Straßenfahrzeuge mit einem Anteil von 60 % die wichtigste Transportweise. Bis zum Jahr 2010 wird (im Vergleich zu 1995) mit einem weiteren Anstieg des Individual- und Straßengüterverkehrs um 30 % gerechnet (UBA 1997). Diese weitere Zunahme des motorisierten Verkehr kann zu einem höheren Kraftstoffverbrauch und zu einem Anstieg der Abgasemissionen führen.

Die verkehrsbedingten Schadstoffemissionen haben bereits heute einen wesentlichen Anteil an der gesamten Schadstofffracht, die in Deutschland emittiert wird. Insbesondere bei den Emissionen an Kohlendioxid (20 %), Kohlenmonoxid (61 %), Stickstoffoxid (58 %) und NMVOC⁴⁴ (35 %) stellt der Verkehr eine ergebnisbestimmende Emissionsquelle dar. Nur bei den SO₂-Emissionen ist der Anteil des Straßenverkehrs aufgrund der kontinuierlichen Verringerung des Schwefelgehalts von Dieselkraftstoffen rückläufig.

Die Durchsetzung des geregelten Dreiwege-Katalysators im Bestand der Otto-Pkw hat dazu geführt, daß es von 1990-1994 trotz Zunahme der Pkw-Fahrleistungen zu einem Rückgang der CO- (um 41 %), NO_x- (um 31 %) und NMVOC-Emissionen (um 55 %) gekommen ist. Durch fahrzeugtechnische Fortschritte konnten beim Nutzfahrzeugverkehr die CO- und NMVOC-Emissionen im gleichen Zeitraum um jeweils 30 % reduziert werden.

Ein deutlich anderes Bild ergibt sich bei den verkehrsbedingten Stickoxid (NO_x)-Emissionen, die von 1990-1994 um 16 % zunahmten. Es wird davon ausgegangen, daß der Anteil des Verkehrssektors an den gesamten NO_x-Emissionen von 61 % im Jahr auf über 70 % (2020) ansteigen wird (Prognos 1996). Der Anstieg des Luft-, Binnenschiff- und Straßengüterverkehrs dürfte hieran einen entscheidenden Anteil haben. Der Beitrag der Pkw dürfte dagegen aufgrund der Katalysatorpflicht deutlich zurückgehen.

Nachfolgend soll dargestellt werden, welchen Beitrag die Biokraftstoffe zur Verringerung der luft- und klimarelevanten Emissionen aus dem Verkehrsbereich leisten können. Von Interesse sind insbesondere die Veränderungen bei

43 Der hohe Anteil des motorisierten Individualverkehrs ist im wesentlichen auf den Ausbau der Straßenverbindungen und den relativen Rückgang der Kraftstoffkosten zurückzuführen.

44 Nicht methanhaltige flüchtige Kohlenwasserstoffe

2. Ökologische Effekte

den Abgasemissionen aus dem Motor durch den Einsatz von Rapsöl, Biodiesel und Bioethanol anstelle fossiler Kraftstoffe und Aussagen zum Nettoenergiegewinn und zur Höhe der CO₂-Minderung beim Ersatz von fossilen Otto- und Dieselkraftstoffen.

2.2.1 Veränderungen bei den Abgasemissionen

Die verkehrsbedingten Schadstoffemissionen von Fahrzeugen, die mit Biokraftstoffen betrieben werden, sind vom Kfz- und Motortyp, der Last und Drehzahl beim Fahrzyklus und den Techniken zur Abgasminderung abhängig. Emissionsvergleiche zwischen Fahrzeugen, die mit Mineralölkraftstoffen bzw. Biokraftstoffen betrieben werden, sind möglich, wenn Standardmessungen aus Prüfständen mit gleichen Fahrzyklen vorliegen.

Für Pkw und Lkw existieren wegen der unterschiedlichen Nutzweise der Fahrzeuge differenzierte Testverfahren⁴⁵. Für Schlepper gibt es keine gesetzlichen Abgasgrenzwerte und deshalb auch kein einschlägiges Testverfahren. Zur Beurteilung des Emissionsverhaltens landwirtschaftlich genutzter Fahrzeuge wird in der Regel der stationäre 5-Punkte-Test nach Vellguth (1987) eingesetzt.

Ideale Vergleichsbedingungen sind dann gegeben, wenn sich die Kraftstoffarten so ähnlich sind, daß sie in denselben Prüfmotoren eingesetzt werden können. Bei den Emissionsmessungen mit Biokraftstoffen wurden mit Ausnahme der speziellen Tests mit Pflanzenölmotoren jedoch meist Prüfmotoren verwendet, die über lange Zeiträume hinweg an die Spezifikationen von Otto- und Dieselkraftstoffen angepaßt wurden, aber keine motortechnischen Anpassungen an die veränderten Eigenschaften der Biokraftstoffe erfahren haben. Biokraftstoffe, wie beispielsweise der Biodiesel, die den substituierten fossilen Kraftstoffen sehr ähnlich sind, haben dadurch emissionsseitige Vorteile.

Je weiter der Biokraftstoff von den Eigenschaften des zu ersetzenden fossilen Kraftstoffs abweicht, desto mehr kann es erforderlich sein, die Motorein-

45 Bei Pkw-Motoren wird der amerikanische FTP-75-Test (Federal Test Procedure), der eine typische Stadtfahrt in Los Angeles (city und highway) simuliert, und der europäische ECE-15-Test (Economic Commission for Europe), der auf die Verkehrsverhältnisse in Europa abgestimmt ist und einen Anteil mit höherer Geschwindigkeit enthält, durchgeführt. Der ECE-15-Test wurde nachträglich durch einen Außerort-Anteil (EUDC) zum sogenannten Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) erweitert. Da die Tests unterschiedliche Fahr- bzw. Verkehrssituationen simulieren, sind die jeweiligen Emissionsergebnisse nicht miteinander vergleichbar. Das Emissionsverhalten von Lkw-Motoren wird in der EU mit dem Prüfzyklus ECE R49 bestimmt, der die europäische Fahrweise und Auslegung der Fahrzeuge berücksichtigt.

VII. Nutzen von Biokraftstoffen

stellungen zu verändern. Solche Modifikationen können jedoch zu einem schlechteren Emissionsverhalten und zu einer suboptimalen Wirkungsweise des Katalysators⁴⁶ führen. Durch eine Anpassung der Motoren an die besonderen Eigenschaften der Biokraftstoffe könnte das Emissionsverhalten positiv verändert werden.

Ein unbestreitbarer Vorteil von Rapsöl und Biodiesel ist, daß diese nur 0,005 M.-% Schwefel enthalten und damit eine Größenordnung unter dem seit Oktober 1996 gültigen EU-Schwefel-Grenzwert für Dieselkraftstoff (0,05 M.-%) liegen. Bioethanol enthält verfahrenstechnisch bedingt sogar Null Schwefel. Eine weitere Verringerung der Schwefelanteile in fossilen Kraftstoffen bzw. im Rohöl ist technisch machbar, aber mit deutlichen Mehrkosten aufgrund der hierfür erforderlichen zusätzlichen Raffinationsschritte verbunden.

Bei den Kohlenwasserstoffen (HC), dem Kohlenmonoxid (CO), den Stickoxiden (NO_x), den Rußbestandteilen und den Partikel, deren zulässige Anteile im Abgas gesetzlich limitiert sind, ist keine eindeutige Aussage möglich, da hier weder klare Vorteile noch eindeutige Nachteile erkennbar sind. Je nach Biokraftstoff, Fahrzeugtyp und Motorart können verringerte oder erhöhte Schadstoffkomponenten in den Abgasen festgestellt werden.

Biokraftstoffe enthalten chemisch gebundenen Sauerstoff, der zu einer vollständigeren Verbrennung des Kraftstoffs im Verbrennungsmotor und zu einer Verringerung der Kohlendioxid- und Kohlenwasserstoffemissionen in den Abgasen führt. Beim Einsatz von Biodiesel wird deshalb bei fast allen Motorkonzepten von geringen bis deutlichen Verringerungen der CO-Emissionen (um 10-20 %) und der HC-Emissionen (um 20-30 %) beim Einsatz von Biodiesel anstelle von fossilem Dieselkraftstoff berichtet (Sam 1996). Beim Einsatz von Rapsöl in direkteinspritzenden Dieselmotoren kommt es dagegen zu einer leichten bis deutlichen Erhöhung der HC- und CO-Emissionen (Tab. 17).

Die CO- und HC-Emissionsvorteile von Biodiesel verringern sich jedoch, wenn als Vergleichsbasis Dieselmotoren mit Oxidationskatalysatoren (Oxkat) herangezogen werden. Wegen der eingeschränkten Wirksamkeit der Katalysatoren bei suboptimaler Betriebstemperatur (z.B. beim Starten des Motors und bei Kurzstreckenfahrten) bleiben jedoch leichte Vorteile beim Biodieseleinsatz bestehen.

46 Katalysatoren werden zur chemischen Verringerung umweltgefährdender und toxischer Abgasbestandteile eingesetzt. Die Wirkung von Katalysatoren ist stark temperaturabhängig und kann durch Schwermetalle, Schwefel und Partikel erheblich gemindert werden.

2. Ökologische Effekte

Tab. 17: Abgasemissionen beim Rapsöl- bzw. Biodieselbetrieb

<i>Schadstoffe</i>	<i>in Relation zu Dieselkraftstoff (= 100 %)</i>	
	<i>Biodiesel (in %)</i>	<i>Rapsöl (in %)</i>
• Kohlenwasserstoffe	70 ¹	210 ¹
	80 ²	110 ²
• Kohlenmonoxid	70-90 ¹	180 ¹
	100 ²	115 ²
• Stickoxide	110	100
• Partikel	100 ^{1,4}	320 ²
	60-80 ^{1,3}	90 ¹
• Rußzahl	60 ²	55

1 indirekte Einspritzung

2 direkte Einspritzung

3 stationärer Test

4 instationärer Test

Quelle: Krahl/Vellguth 1994

Der Ausstoß an Ruß ist bei Nutzung von Biodiesel niedriger als beim Einsatz von Mineralöldiesel; dies ist auch visuell anhand der geringeren Schwarzfärbung der Abgase erkennbar. Die Partikelemissionen⁴⁷ können sich einerseits um bis zu 20 % verringern, andererseits aber auch ansteigen. So wurde beispielsweise beobachtet, daß in Einzelfällen nach bereits 15.000 Fahrkilometern das

2-3fache an Partikelemissionen auftreten können (Schäfer 1996). Bei der Interpretation dieser Ergebnisse ist jedoch Vorsicht geboten, da sie stark abhängig sind von den verwendeten Motoren und Testzyklen, ohne daß diese Einflüsse gut verstanden werden.

Eine Bewertung der Unterschiede bei den Partikelemissionen ist im allgemeinen äußerst problematisch, da die Partikelzusammensetzung im Biodieselabgas von der im Mineralöldieselabgas differiert und die mutagenen bzw. kancerogenen Wirkungen von Partikulaten noch nicht hinreichend bekannt sind. Laborergebnissen zufolge scheint die gesundheitliche Gefährdung durch die

47 Partikel bestehen zu 70 % aus einem Kohlenstoffkern (Ruß), an den verschiedene organische (insbesondere PAK) und anorganische Verbindungen angelagert sind.

VII. Nutzen von Biokraftstoffen

Partikelemissionen beim Betrieb mit Biodiesel geringer zu sein als beim Einsatz von Mineralöldiesel (Stadler 1995). Dies gilt jedoch nicht gleichermaßen für den Einsatz von Rapsöl (Krahl et al. 1994). Durch den Einsatz eines Oxkat⁴⁸ dürfte der Partikelgehalt in Biodieselaabgasen wirksamer verringert werden können als in Diesekraftstoff-Abgasen, da die Biodieselpartikel einen leichteren Rußkern enthalten (Schäfer 1996).

Als Orientierungswerte zur Beurteilung der limitierten Schadstoffemissionen von Motorabgasen können die europäischen Grenzwertstufen (Tab. 18) herangezogen werden. Die Grenzwerte der EURO II-Stufe müssen von allen nach dem 01.01.1997 erstzugelassenen Fahrzeugen erfüllt werden. Ab 2000 sind für CO, HC und Partikel verschärfte EURO III-Grenzwerte geplant. Diese EURO III-Grenzwerte können beim Fahrzeugbetrieb mit Biodiesel vermutlich nur mit Hilfe eines Oxkat eingehalten werden.

Tab. 18: Europäische Grenzwertstufen für limitierte Abgasbestandteile

	EURO II (1996)			EURO III (ab 2000 geplant)		
	Otto-Pkw (g/km)	Diesel-Pkw (g/km)	Nutzfahrzeug (g/kWh)	Otto-Pkw (g/km)	Diesel-Pkw (g/km)	Nutzfahrzeug (g/kWh)
• CO	2,20	1,00	4,0	1,50	0,50	2,0
• HC	0,50	0,70	1,1	0,20	0,50	0,6
• NO _x	0,50	0,90	7,0	0,20	0,50	5,0
• Partikel	-	0,08	0,15	-	0,04	0,1

Quelle: Deutsche Shell AG 1996

Bei den NO_x-Emissionen sind zusätzliche motor- und abgasseitige Minderungsmaßnahmen zur Einhaltung der Grenzwerte erforderlich, da der Einsatz von Biodiesel im Vergleich zu Mineralöldiesel mit einem NO_x-Anstieg um etwa 10 % verbunden ist (Tab. 17). Bei den pflanzenöлтаuglichen Kammermotoren und bei den speziell für den Einsatz von Pflanzenöl entwickelten Direkteinspritzmotoren hängen die Abgasemissionswerte in entscheidendem Maße vom Motorenkonzept ab. Kammermotoren haben beispielsweise aufgrund ihrer

48 Der Einsatz eines Oxkat ist wegen des geringen Schwefelgehalts von Biodiesel (0,005 M.-%) technisch unproblematisch und führt außerdem zu einer wirksamen Eliminierung des teilweise als unangenehm empfundenen Pommes frites-Geruch bei der Verbrennung von Biodiesel.

2. Ökologische Effekte

Brennraumgeometrie im allgemeinen niedrigere NO_x -Emissionen als direkt einspritzende Dieselmotoren (aber auch einen höheren Kraftstoffverbrauch).

Beim Versauerungspotential⁴⁹ sind beim Einsatz von Rapsöl, nicht aber bei der Verwendung von Biodiesel Verbesserungen durch eine veränderte Abgaszusammensetzung zu verzeichnen. Dies liegt unter anderem daran, daß die Abgasemissionen beim Betrieb mit Mineralölbenzin bzw. -diesel aufgrund der verringerten Schwefelgehalte und der eingesetzten Abgaskatalysatoren inzwischen ein ähnlich niedriges Niveau erreichen wie beim Einsatz von Biokraftstoffen. Außerdem werden die Vorteile der Biokraftstoffe beim Schwefeldioxid durch Nachteile bei den Stickstoffoxidemissionen zum Teil wieder ausgeglichen.

Durch den Einsatz von Oxidationskatalysatoren und geregelter Dreiwege-Katalysatoren kann je nach Katalysatortyp die motorseitige Freisetzung an CO , VOC , NO_x und anderen Ozon⁵⁰-Vorläufer-Substanzen zum Teil wirksam reduziert werden. Der Einfluß des Einsatzes von Rapsöl und Biodiesel auf die Photochemiebildung wird gegenwärtig in FuE-Arbeiten untersucht. Es zeichnet sich ab, daß durch den Einsatz von Biodiesel gegenüber dem Einsatz von Oxidationskatalysatoren eine nochmalige, allerdings in den meisten Fällen nur geringe Absenkung des Ozonbildungspotentials erzielt werden kann (Decker et al. 1996).

Über den Ausstoß an gesetzlich nichtlimitierten Schadstoffen, wie den Aldehyden, den polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) mit der Leitsubstanz Benzo(a)pyren und den Aromaten BTX (Benzol, Toluol, Xylole) bei der motorischen Verbrennung von Rapsöl oder Biodiesel liegen nur wenige Messungen vor. Diese sind außerdem kaum miteinander vergleichbar, da es bislang keine gesetzlich geregelten und meßtechnisch gut etablierten Probenahme- und Analysenverfahren gibt. Die nachfolgenden Aussagen haben deshalb eher orientierenden Charakter.

Beim Einsatz von Rapsöl wurde eine deutliche Erhöhung des Ausstoßes an Aldehyden und aromatischen Kohlenwasserstoffen und eine Verringerung der

49 Zur Bilanzierung des Versauerungspotentials werden die säurebildenden Emissionen (Schwefeldioxid, Stickstoffoxide, Chlorwasserstoff und Ammoniak) zu einem Wirkungspotential ausgedrückt in SO_2 -Äquivalenten zusammengefaßt.

50 Der Ausstoß an reaktiven Kohlenwasserstoffen (VOC), CO und NO_x kann in den Sommermonaten unter hoher UV-Einstrahlung im bodennahen Bereich zur photochemischen Smogbildung führen (Sommersmog). Die Leitkomponente für Smog ist das Ozon, das in höheren Konzentrationen beim Menschen Augen und Schleimhäute reizt und die Atemwege beeinträchtigt. Das Ozongesetz (§ 40a des BImSchG) sieht deshalb Verkehrsverbote vor bei Sommersmogalarm ($240 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

VII. Nutzen von Biokraftstoffen

PAK-Emissionen im Vergleich zu Dieselkraftstoff beobachtet. Beim Einsatz von Biodiesel wird dagegen überwiegend von einer Abnahme bei den PAK-Emissionen berichtet, während bei den Aldehyden und monozyklischen BTX-Aromaten sowohl ein Anstieg als auch ein Rückgang gemessen wurde. Beim Einsatz von Biodiesel mit hohen Glycerin- und Glyceridanteilen treten höhere Mengen an Benzol und Acrolein auf (Schäfer 1996). Acrolein ist ein Abbauprodukt von Glycerin, das für den typischen Biodieselgeruch verantwortlich ist.

Das Abgasverhalten bei der motorischen Verbrennung von Bioethanol ist entscheidend davon abhängig, ob Bioethanol in unvermischter Form oder in Mischung mit fossilen Kraftstoffen zum Einsatz kommt. Beim Einsatz von reinem Bioethanol in Alkoholmotoren wird aufgrund der technisch bedingten Schwefelfreiheit von Bioethanolbetrieb kein Schwefeldioxid erzeugt. Bei der Verwendung von hochprozentigem Bioethanol in Spezialmotoren treten darüber hinaus deutliche Verbesserungen bei den CO-, HC- und Partikel-Emissionen auf (Thier 1988). Bei den NO_x-Emissionen wird sowohl von einer Abnahme als auch einer Zunahme berichtet (Fabri et al. 1990). Bei den PAK soll eine Neubildung verhindert und bei den BTX-Aromaten die Freisetzung stark verringert werden. Eindeutige Nachteile ergeben sich bei den Aldehydemissionen, die um 300-400 % zunehmen können.

Die Beimischung von 5 % Bioethanol zum Ottokraftstoff (E5-Mischkraftstoff genannt) führt zu keiner eindeutigen Verbesserung des Abgasverhaltens der Motoren. Von Vorteil ist der durch den Bioethanolzusatz erhöhte Sauerstoffgehalt im Treibstoff, der einen erhöhten Ausbrand und damit einen Rückgang an unvollständigen Reaktionsprodukten zur Folge hat. Umfangreichen Untersuchungen des TÜV Bayern (1988) zufolge verringern sich beim Einsatz von E5-Mischkraftstoffen in Fahrzeugen ohne Katalysator die CO-Emissionen um 20-30 % und die HC-Emissionen um 7 %. Fahrzeuge, die mit einer 10 %igen Bioethanol-/Benzin-Mischung fahren, emittieren 25-30 % weniger CO und etwas weniger HC (Batchelor et al. 1996). Die positiven Effekte der Beimischung von Bioethanol zu Benzin auf die CO- und HC-Emissionen werden jedoch durch die steigende Zahl an Fahrzeugen mit Abgasreinigungstechnik zunehmend geringer. Bei den NO_x-Emissionen kann es je nach Motortyp und Fahrbetrieb zu einer leichten Erhöhung kommen. Die Aldehydemissionen steigen beim Einsatz von E5-Mischkraftstoffen allerdings deutlich um 22 % an.

Der Anteil aromatischer Kohlenstoffverbindungen in den Abgasen verringert sich beim Einsatz von E5- bzw. E10-Mischkraftstoffen. Wegen den schlechteren Kaltstart- und Warmlaufeigenschaften des Motors steigen die Emissionen an Formaldehyd, Acetaldehyd und unverbranntem Bioethanol (das in der Luft

2. Ökologische Effekte

zu Aldehyden oxydiert wird) an, wenn der Anteil an Bioethanol im Mischkraftstoff über 15 % liegt. Aldehyde neigen zur Bildung von Hydroxyl-Radikalen, die zu den wichtigsten Bausteinen der Sommersmogbildung gehören. Wegen dieses Ozonbildungspotentials wird in den USA in den Sommermonaten Bioethanol durch ETBE oder MTBE als Benzinadditiv ersetzt. MTBE ist kostengünstiger als ETBE, welches mehr Vorteile auf der Emissionsseite besitzt.

Durch die Zumischung von 2-3,5 Gew.-% ETBE verringern sich die Emissionen an CO um 20-50 % und an unverbrannten HC um bis zu 30 % (Baur et al. 1990). Die NO_x-Emissionen steigen dagegen mit zunehmendem Sauerstoffgehalt der vermischten Kraftstoffe an. Das ETBE hat weitere Umweltvorteile⁵¹ hinsichtlich der Energiebilanz, der Freisetzung klimarelevanter Gase und des Versauerungspotentials (Tab. 19).

Tab. 19: Vergleich umweltrelevanter Kenngrößen von MTBE und ETBE

	<i>MTBE</i>	<i>ETBE</i>
• Heizwert (H _u in MJ/kg)	35,0	36,1
• Energiebilanz (Energieinhalt zu Verbrauch an fossiler Energie)	0,73	0,93
• CO ₂ -Äquivalente inklusive CH ₄ , N ₂ O (g CO ₂ /kg)	3520	2860
• Versauerungspotential aus SO _x , NO _x , NH ₃ (g H ⁺ /kg)	1,26	1,1

Quelle: Bignon 1996

Durch eine Beimischung von 10-15 % ETBE kann die Konzentration von Benzol und polyzyklischen Aromaten verringert werden (Die Branntweinwirtschaft 1997). Außerdem sollen der CO-Ausstoß um 23 % und die Emissionen an umweltschädlichen Verbrennungsrückständen sowie an NO_x um jeweils 11 % zurückgehen. Zu den wesentlichen Nachteilen eines Einsatzes von ETBE gehören die höheren Aldehydemissionen im Vergleich zu MTBE, bei einem allerdings verringerten Anteil des toxischen Formaldehyds.

51 Diese Vorteile gehen zum größten Teil auf den geringeren Anteil an Isobutylen in ETBE zurück. Um 1 t ETBE herzustellen, werden 0,47 t Ethanol und 0,53 t Isobutylen benötigt. Um 1 t MTBE zu erzeugen, werden dagegen 0,64 t Isobutylen und 0,36 t Methanol (aus Erdgas) verbraucht.

2.2.2 Energiebilanzen

Das energetische Input-Output-Verhältnis von Biokraftstoffen hängt von der Pflanzenart, dem Standort- und witterungsabhängigen Ertragsniveau, der Produktionsweise (insbesondere von der Art und Höhe der eingesetzten Düngemittel) und von der Konversionstechnologie ab. Die möglichen Nettoenergiegewinne (Bruttoenergiegewinn abzüglich des Prozeßenergieverbrauchs) liegen bei der Bioethanolgewinnung aus Zuckerrüben mit 31-86 GJ/(ha·a) am höchsten (Tab. 20). Für Bioethanol aus Kartoffeln und Weizen sind die Nettoenergieerträge aufgrund des geringeren flächenspezifischen Massenertrags, der geringeren Ethanolausbeuten und des höheren Prozeßenergiebedarfs mit 5-37 GJ/(ha·a) deutlich geringer. Die Nettoenergieerträge bei Rapsöl und Biodiesel liegen zwischen 23 und 53 GJ/(ha·a).

Tab. 20: Netto-Energieerträge von Biokraftstoffen (GJ/ha·a)

<i>Quelle</i>	<i>Rapsöl</i>	<i>Biodiesel</i>	<i>Ethanol aus Zuckerrüben</i>	<i>Ethanol aus Weizen</i>
• Wintzer et al. 1993	27-44	23-39	35-86	5-35
• BML 1995	42	23	34-49	6-22
• Hartmann/Strehler 1995	53	53	31-68	-*
• Kaltschmitt/Reinhardt 1997	36	30	31-54	35-37

* keine Angabe

Vereinzelt finden sich in der Literatur auch Angaben zur Nettoenergiebilanz von Bioethanol aus Zuckerrüben, Weizen und Kartoffeln, die gegen Null gehen oder leicht negativ sind. Hierbei wurden jedoch meist hohe Energieverbräuche bei der Konversion angesetzt und die Energiegehalte der Nebenprodukte nicht berücksichtigt. Durch Schlemperzyklisierung und Biogasgewinnung und -nutzung können bei der Bioethanolproduktion aus Wintertriticale mit modernen Verfahren, wie dem Hohenheimer Dispergier-Maisch-Verfahren⁵², energie-

52 Das Hohenheimer Dispergier-Maischverfahren mit Schlemperrecycling (DMV) ermöglicht eine energiesparende, umweltverträgliche und kostengünstige Alkoholproduktion in druckloser Arbeitsweise aus stärkehaltigen Rohstoffen. Die Schlempermengen werden um 50 % bei Getreide bzw. um 15 % bei Kartoffeln reduziert.

2. Ökologische Effekte

tische Input/ Output-Verhältnisse mit deutlich positivem Charakter von 1:1,3 bis 1:1,5 erzielt werden (Schäfer 1995).

Im Vergleich mit den festen Bioenergieträgern wie Holz oder Miscanthus, die Nettoenergieerträge von 100-150 GJ/(ha·a) erbringen, ist die flächenspezifische Energieproduktion mit Biokraftstoffpflanzen deutlich ungünstiger (Kaltschmitt et al. 1996, Wintzer et al. 1993). Die geringen Nettoenergieerträge der flüssigen Energieträger im Vergleich zu den festen Biomasseenergieträgern sind in erster Linie darauf zurückzuführen, daß bei den Biokraftstoffen nur Teile der Biomasse energetisch genutzt werden und der Konversionsprozeß energetisch aufwendig ist. Durch die Nutzung der auf dem Feld verbleibenden Ernterückstände, wie dem Raps- oder Weizenstroh, könnten die Nettoenergiegewinne⁵³ deutlich verbessert werden.

Bei gleicher Pflanzenart und ähnlichem Energieinput werden je nach Standort- und Witterungsbedingungen signifikant unterschiedliche Nettoenergieerträge pro Hektar erzielt. Je geringer die Intensität der Bodenbearbeitung und der Produktionsmittelaufwand ist und je effizienter die Biokraftstoffproduktion durchgeführt wird, desto günstiger fällt die Energiebilanz aus. Im Bereich der Rohstoffproduktion kann durch eine niedrigere mineralische Stickstoffdüngung, auf die 35 % (bei extensivem Anbau) bzw. 49 % (bei intensivem Anbau) des Energiebedarfs bei der Rohstoffproduktion entfallen, eine Verbesserung der Energiebilanz erzielt werden (Schäfer et al. 1997).

Anbauverfahren mit einem hohen Mineraldünger- und Pflanzenschutzmittelaufwand können aufgrund des höheren Ertragsniveaus aber auch vorteilhaftere Energiebilanzen aufweisen als Verfahren mit einer eher niedrigen Anbauintensität (Kaltschmitt/Reinhardt 1997). Im Vergleich zum Durchschnitt sind an Standorten mit besonders günstigen Produktionsbedingungen bis zu 20 % geringere Energieaufwendungen bzw. an ungünstigen natürlichen Standorten 20 % höhere Energieaufwendungen erforderlich zur Erzielung eines bestimmten Ertrages. Dies führt ebenfalls zu starken Unterschieden in den Energiebilanzen.

53 Beim Biodiesel-Rapsanbau (Brutto-Energieertrag 42,5 GJ Rapssaar/(ha·a)) kann nach Abzug des Prozeßenergiebedarfs (18 GJ/ha) ein Nettoenergiegewinn von 24,5 GJ/(ha·a) erzielt werden. Dies entspricht einem Input-/Output-Verhältnis von 1:2,4. Durch die energetische Nutzung des Rapsstrohs könnte der Energiegewinn (brutto) auf 74 GJ/(ha·a) erhöht und das Input-/Output-Verhältnis auf über 1:4 verbessert werden.

2.2.3 Klimarelevante Emissionsminderungen

Entgegen des allgemeinen Trends haben die klimarelevanten Kohlendioxidemissionen von 1990-1994 im Bereich des Pkw-Verkehrs um 4 % und im Bereich des Straßengüterverkehrs um 26 % zugenommen (UBA 1997). Trotz verbrauchsmindernder Maßnahmen ist der durchschnittliche Pkw-Kraftstoffverbrauch aller Bestandsfahrzeuge von 1978 (10,9 l/100 km) bis 1995 (8,9 l/100 km) nur mäßig zurückgegangen. Der fahrzeugtechnisch geringere Kraftstoffverbrauch (z.B. durch reduzierte Fahrzeuggewichte und Fahrwiderstände) bei neuen Pkw wurde durch den Trend zu leistungsstärkeren und komfortableren Fahrzeugen teilweise wieder aufgehoben.

Es wird davon ausgegangen, daß die verkehrsbedingten CO₂-Emissionen durch einen weiteren Anstieg im Fahrleistungsaufkommen bis 2005 um 28 % (Vergleich zu 1990) anwachsen, sofern keine effektiven gegensteuernden Maßnahmen ergriffen werden (BMU 1997). Zur Verringerung des CO₂-Ausstoßes im Bereich Verkehr gibt es verschiedene Optionen. Eine deutliche CO₂-Verringerung könnte beispielsweise durch die breite Markteinführung von Serienfahrzeugen, die nur 3 bis 4 l pro 100 km verbrauchen, erzielt werden.

Eine andere rasch umsetzbare Möglichkeit zur CO₂-Einsparung im Verkehrssektor stellt der Einsatz von Biokraftstoffen anstelle fossiler Kraftstoffe dar. Die Höhe der hierbei erzielbaren CO₂-Minderung leitet sich vom energetischen Input-Output-Verhältnis (das heißt von der Menge und Art an fossilen Energieträgern, die zur Biokraftstoffproduktion eingesetzt wurden in Relation zum Energieertrag) und von der Quantität und Qualität des substituierten fossilen Kraftstoffs ab. Wegen der unterschiedlichen CO₂-Emissionen pro verbrauchter Energieeinheit ist es maßgeblich, welche Art von Energieträger (Kohle, Öl, Erdgas oder Strom) eingesetzt wird⁵⁴. So werden beispielsweise in Brasilien beim Einsatz von Bioethanol anstelle von Ottokraftstoff 50-70 % der fossilen CO₂-Emissionen eingespart, wenn die Energieversorgung der Bioethanolanlage mit Bagasse erfolgt, im Vergleich zu 10-20 %-Minderungspotential wenn Kohle als Energiequelle benutzt wird (Goldemberg/Macedo 1994).

Die Höhe des Beitrags von Biodiesel zur Verringerung der verkehrsbedingten CO₂-Emissionen hängt neben der Nettoenergiebilanz und dem Substitu-

54 Die Energiebereitstellung war bereits häufiger Gegenstand intensiver Untersuchungen und der Beschreibung durch rechnergestützte Modelle. In Deutschland wird meist das seit 1990 mehrfach aktualisierte und erweiterte "Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme" (Fritsche et al. 1995) verwendet.

2. Ökologische Effekte

tionsverhältnis auch davon ab, welche Abstriche bei der CO₂-Bilanz als Folge der Freisetzung klimarelevanter Spurengase wie Distickstoffoxid (N₂O, auch Lachgas genannt) oder Methan (CH₄) gemacht werden müssen. Die Überführung von gedüngten oder bereits im Boden vorhandenen Stickstoffverbindungen in N₂O und dessen Freisetzung in die Atmosphäre ist großen zeitlichen und standortabhängigen Schwankungen unterworfen. Der Anteil an über Nitrifikations- und Denitrifikationsprozesse umgewandeltem Stickstoff liegt je nach Bodenverhältnissen, Stickstoffdünger und Pflanzenart zwischen 0,4-3,2 % (Wintzer et al. 1993) bzw. 0,8-1,5 % (Kaiser/Heinemeyer 1996) bezogen auf die zugeführte Menge an Stickstoffdünger.

Die N₂O-Emissionen (und auch die Methanemissionen), die beim Anbau der Rohstoffpflanzen entstehen, können gemäß ihrer Klimawirksamkeit in sogenannte CO₂-Äquivalente umgerechnet und mit den CO₂-Emissionen der Prozeßkette (z.B. durch den Verbrauch an Prozeßenergie) zusammengefaßt werden. Der Anteil der N₂O-Emissionen kann bis zu 25-30 % der im Bereich der Rohstoffbereitstellung freigesetzten CO₂-Äquivalente ausmachen. Die Klimagasbilanz pro Energieeinheit ist bei einem extensiven Anbau von Biokraftstoffen mit einem eher niedrigen Betriebsmittelaufwand günstiger als bei einem (betriebsmittel)intensiven Anbau, bei dem relativ viel N₂O aus mineralischem Stickstoffdünger freigesetzt wird. Die aus mineralischen und organischen Stickstoffdüngern mikrobiell freigesetzten Mengen an N₂O können den möglichen Beitrag der Biokraftstoffe verringern. Bezogen auf das Treibhauspotential der gesamten Prozeßkette liegt jedoch der N₂O-Anteil auch im Falle einer höheren N₂O-Freisetzungsrates unter 10 % und ist damit nicht ergebnisbestimmend. Die Klimabilanz der Biokraftstoffe wird demzufolge weniger von den freigesetzten CO₂-Äquivalenten als vielmehr von der Menge und Art des substituierten fossilen Energieträgers bestimmt.

Bioethanol aus Zuckerrüben und Winterweizen sowie Biodiesel aus Raps führen zu einer Minderung von 37-64 kg an CO₂-Äquivalenten pro GJ substituierter fossiler Energieeinheit (Tab. 21). Der Beitrag zur Verringerung der Freisetzung klimarelevanter Spurengase durch den Ersatz fossiler Energieträger ist allerdings geringer als bei der Substitution von Kohle durch feste Bioenergieträger wie Stroh oder Holz (Rösch et al. 1996).

Tab. 21: CO₂-Minderungspotentiale (netto) von Biokraftstoffen

	<i>kg CO₂/GJ</i>	<i>t CO₂/ha</i>
• Rapsöl (für Duothermmotor)	55-63	2,4-4,5
• rapsölstämmiger Diesel	44-60	1,9-4,5
• Biodiesel (RME)	43-60	1,9-4,5
• Bioethanol aus Zuckerrüben	10-36	1,1-4,2
• Bioethanol aus Weizen	28	1,5

Quelle: nach Hartmann/Strehler 1995 und Wintzer et al. 1993

2.2.4 Kosten der CO₂-Minderung im Verkehrssektor

Zur Reduktion anthropogener CO₂-Emissionen stehen neben dem Einsatz von Biokraftstoffen verschiedene andere Optionen, wie z.B. Maßnahmen zur rationellen Energienutzung, zur Verfügung. Nach ökonomischen Rationalitätskriterien sind diejenigen Reduktionsmaßnahmen zu wählen, die den größten Beitrag zur CO₂-Entlastung bringen und dies möglichst effizient tun. Wie effizient eine Maßnahme ist, läßt sich anhand eines Vergleichs der Vermeidungskosten verschiedener Alternativen zur CO₂-Verringerung ableiten.

Die Rentabilität einzelner CO₂-Vermeidungsmaßnahmen und die insgesamt anfallenden Kosten der CO₂-Vermeidung sind ganz entscheidend davon abhängig, welches Reduktionsziel in welchem Zeitraum angestrebt wird. Deutschland hat sich im Rahmen der Klimakonvention verpflichtet, die CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2000 auf das Niveau des Jahres 1990 zurückzuführen. Die Bundesregierung hat noch weitergehende Beschlüsse zur CO₂-Reduzierung gefaßt, denen zufolge die CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2005 um 25 % gegenüber 1990 (1.014 Mio. t CO₂) gesenkt werden sollen. Dieses Ziel konnte bis heute fast zur Hälfte erreicht werden. Die CO₂-Emissionen lagen 1995 bei rd. 900 Mio. t/a und damit um 11,8 % niedriger verglichen mit den CO₂-Emissionen von 1990 (UBA 1997).

Der potentielle Beitrag von Biodiesel zur CO₂-Verringerung bewegt sich, ausgehend von 1 Million Hektar Biodiesel-Raps, zwischen netto 0,2 % und 0,5 % der gegenwärtigen CO₂-Emissionen (Stand: 1995). Die Substitution von fossilen Kraftstoffen durch Biodiesel führt also zu einer Verringerung der CO₂-Emissionen, wenn auch in bescheidenem Maße. Im Vergleich dazu könnten die

2. Ökologische Effekte

CO₂-Emissionen durch die energetische Nutzung von rd. 1 Million Hektar Stroh um ca. 1,2 % und damit um einen deutlich größeren Betrag reduziert werden.

Beim Vergleich von Kosten unterschiedlicher Maßnahmen zur Reduzierung klimarelevanter Gase ist zu beachten, daß diese sensibel sind gegenüber den unterstellten Annahmen über die Modellstruktur, das demographische und ökonomische Wachstum und über die Kosten und die Verfügbarkeit von energetischen Optionen bei der Energiebereitstellung und beim Energieverbrauch. Einen entscheidenden Einfluß auf die Höhe der Verringerungskosten haben wie bereits erwähnt das Niveau und der zeitliche Rahmen der CO₂-Verringerung und die Wahl der politischen Instrumente zur Realisierung des CO₂-Minderungspotentials.

Aufgrund unterschiedlich gewählter Rahmenbedingungen bei der Modellierung trifft man in der umfangreichen Literatur zu diesem Thema auf eine weite Spanne was die Kosten der CO₂-Verringerung anbelangt. Konsens gibt es jedoch darüber, daß Maßnahmen der rationellen Energieanwendung besonders rentabel sind, da diese mit negativen oder nur geringen Mehrkosten verbunden sind (IPCC 1995).

Nach Berechnungen mit Hilfe des IKARUS-Modells⁵⁵ liegen in Deutschland die CO₂-Verringerungskosten technischer Maßnahmen im Straßenverkehr zwischen rd. 280 DM/t CO₂ und rd. 330 DM/t CO₂⁵⁶ (Gerster 1996). Fahl et al. (1995) kommen ebenfalls auf der Basis des IKARUS-Datensatzes zu CO₂-Minderungskosten zwischen 470 DM/t CO₂ für einen effizienteren Benzin-Pkw und 690 DM/t CO₂ für ein effizienteres Dieselfahrzeug (Abb. 4). Bei dieser Abschätzung sind Mineralöl- und Mehrwertsteuern mit berücksichtigt worden.

Die Kosten der CO₂-Verringerung durch einen Einsatz von Biodiesel, dessen Rohstoff (Raps) auf Stilllegungsflächen angebaut wurde, liegen ohne Gutschrift der Flächenstilllegungsprämie bei 730-770 DM/t CO₂. Diese Kosten verringern sich auf 330-370 DM/t CO₂, wenn die Flächenstilllegungsprämie als produk-

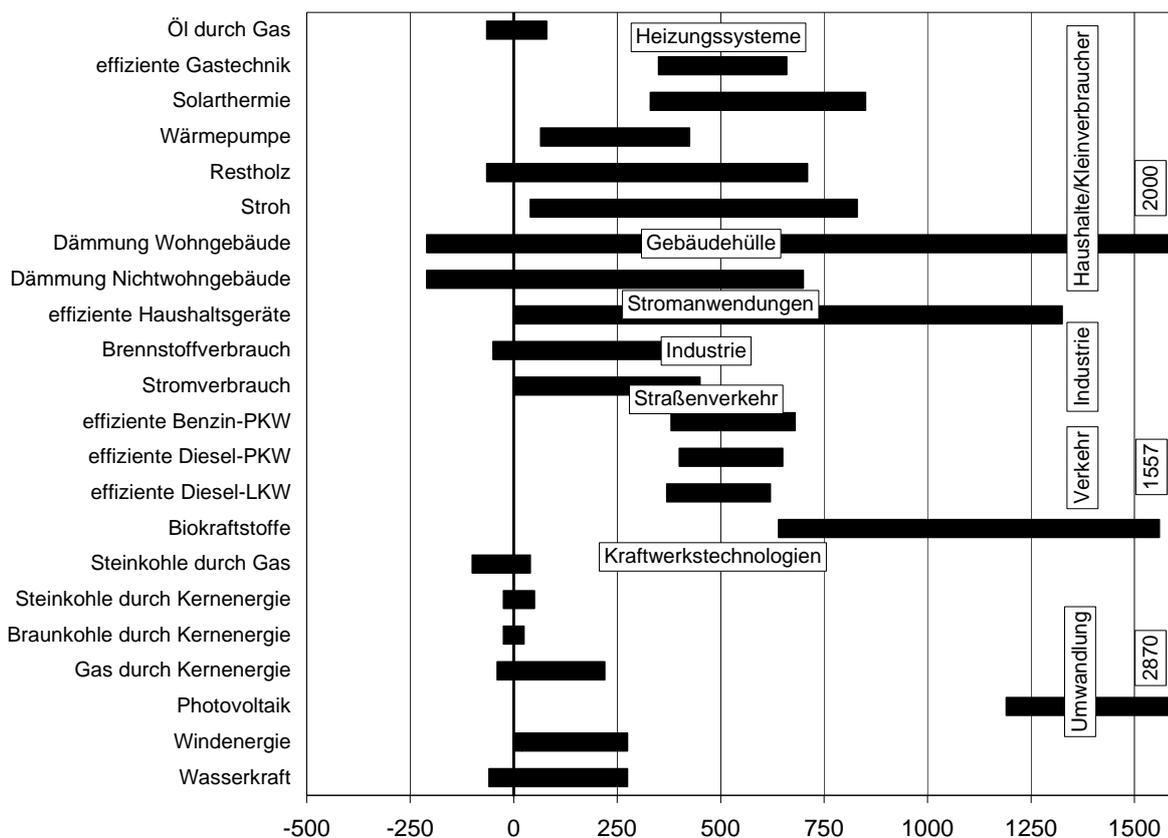
55 Das IKARUS-Modell wurde von 1990-1995 entwickelt, um seriöse und belastbare Aussagen zu kosteneffizienten CO₂-Minderungsoptionen zu erstellen. Das Modell besteht aus einer Technikdatenbank, sektoralen Teilmodellen für Strom/Fernwärme, Verkehr, Raumwärme und Industrie, einem volkswirtschaftlichen Input/Output-Modell und einem linearen Optimierungsmodell. Analysiert wurde eine Strategie zur Umsetzung des 25 %igen CO₂-Reduktionszieles (von 1990 bis 2005) der Bundesregierung

56 Hierbei ist ein Wechsel bei 56 % der Benzin-Pkw von Normal- auf Sparversion mit 30 % geringerem spezifischen Verbrauch bzw. ein Wechsel bei rd. 50 % der Diesel-Lkw von Normal- auf Sparversion mit 20 % geringerem spezifischen Verbrauch unterstellt worden.

VII. Nutzen von Biokraftstoffen

tionsneutral betrachtet und als Gutschrift angesetzt wird. Die CO₂-Minderungskosten, die mit einem Einsatz von Bioethanol verbunden sind, liegen ohne Verrechnung der Flächenstilllegungsprämie zwischen 1.000 DM/t CO₂ und 2.100 DM/t CO₂ und damit deutlich höher als für Biodiesel (Wintzer et al. 1993). Fahl et al. (1995) rechnen im Falle eines Einsatzes biogener Kraftstoffe mit Minderungskosten zwischen rd. 650 DM/t CO₂ und 1.550 DM/t CO₂.

Abb. 4: CO₂-Minderungskosten in DM/t CO₂



Quelle: Fahl et al. 1995

Der Einsatz von Biokraftstoffen gehört also zu den gegenwärtig teuersten Maßnahmen der CO₂-Verringerung. Andere Optionen der CO₂-Reduzierung, wie z.B. die Ausnutzung von Energieeinsparpotentialen und Wirkungsgradverbesserungen oder die Substitution kohlenstoffreicher (z.B. Steinkohle) durch kohlenstoffarme (z.B. Erdgas) bzw. kohlenstofffreie Energieträger (z.B. erneuerbare Energien) sind mit weit günstigeren CO₂-Minderungskosten verbunden. Es darf allerdings nicht vergessen werden, daß die Bewertung der CO₂-Vermeidungskosten maßgeblich von der Höhe des angestrebten Reduktionszie-

2. Ökologische Effekte

les abhängt. Wenn das CO₂-Reduktionsziel bescheiden bleibt, reicht es aus, wenn die kostengünstigen Maßnahmen zur CO₂-Verringerung (z.B. Maßnahmen zur Wärmedämmung) ergriffen werden. Wenn jedoch innerhalb einer relativ kurzen Zeitspanne eine signifikante Reduzierung der CO₂-Emissionen erreicht werden soll, müssen auch weniger kostengünstige Minderungswege beschritten werden. Prinzipiell gilt: Je mehr CO₂ reduziert werden soll, desto teurer wird es. Die in Abbildung 4 dargestellten Relationen bleiben allerdings unabhängig von der Höhe des Reduktionszieles in unveränderter Form erhalten.

2.2.4 Abbaubarkeit und Gewässerverträglichkeit

Unfälle beim Transport oder beim Umgang mit Kraftstoffen aus Mineralöl können zu Bodenverunreinigungen und zu einer Störung der bodenökologischen Funktionen führen. Um Gefahren für die Umwelt, insbesondere für das Grundwasser zu vermeiden, muß ölverunreinigter Boden i.d.R. ausgebaggert oder an Ort und Stelle gereinigt werden.

Biokraftstoffe können zu einer Verringerung solcher Risiken führen, da sie deutlich besser biologisch abbaubar sind als fossile Kraftstoffe. Der Grad der Abbaubarkeit hängt allerdings stark mit der Kraftstoffformulierung, respektive mit der Art und Menge an zugesetzten Additiven zur Verbesserung der Kraftstoffeigenschaften, zusammen. Standardtests haben gezeigt, daß Rapsöl im Boden innerhalb von drei Wochen zu über 95 % abgebaut wird, verglichen mit Mineralöldiesel, der im selben Zeitraum nur zu 72 % abgebaut wird (Ribarov 1993).

Die Verunreinigung von Seen und Wasserwegen mit Mineralöldiesel kann zu starken Beeinträchtigungen der Wasserflora und -fauna führen. Die Wassergefährdung von Biokraftstoffen im Vergleich zu den fossilen Kraftstoffen kann anhand der Zuordnung zu den durch das Wasserhaushaltsgesetz definierten Wassergefährdungsklassen (WGK) beurteilt werden. Zur Bewertung des Wassergefährdungspotentials werden verschiedene Stoffeigenschaften und Umweltauswirkungen, wie z.B. die Toxizität gegenüber Fischen, das Abbauverhalten und die Langzeitwirkungen, herangezogen. Je nach zugeteilter WGK werden unterschiedlich scharfe Sicherheitsanforderungen an die Lagerung, Abfüllung und Beförderung der Kraftstoffe gestellt.

Dieselmotorkraftstoff gehört der WGK 2 und Ottomotorkraftstoff je nach Benzolanteil der WGK 2 oder der WGK 3 an. Rapsöl und Bioethanol ohne Additive werden dagegen als nicht wassergefährdend in die WGK 0 eingestuft. Biodiesel ohne

VII. Nutzen von Biokraftstoffen

Zusätze ist schwach wassergefährdend (WGK 1). Durch den Zusatz von Oxidationsinhibitoren und Bioziden, die eine längere Gebrauchs- und Lagerzeit bei Rapsöl und Biodiesel gewährleisten, das ungünstige Viskositäts- und Fließverhalten bei tiefen Temperaturen verbessern und Korrosion verhindern sollen, verschlechtert sich deren biologische Abbaubarkeit. Rapsöl mit Zusätzen ist der WGK >0 zuzuordnen. Biodiesel mit Zusätzen von bis zu 1 Gew.-% gehört zur WGK 1, sofern die Zusätze die WGK <2 haben. Rapsöl und Biodiesel mit Zusätzen sind demnach stärker wassergefährdend als reine Biokraftstoffe, aber immer noch deutlich weniger wassergefährdend als Kraftstoffe auf Mineralölbasis.

Biokraftstoffe zeichnen sich darüber hinaus durch eine geringere allgemeine Toxizität verglichen mit Mineralölprodukten aus. Vor allem Pflanzenöle haben nur eine geringe Toxizität, wie Versuche gemäß der OECD Richtlinie 401 und 402 zur akuten oralen und dermatologischen Toxizität bei Ratten gezeigt haben (Korbitz/Walker 1996). Beide Tests haben eine LD 50 (Dosis, die bei 50 % der Organismen letal wirkt) über 2000 mg/kg Körpergewicht ergeben. Auch Versuche mit Regenbogenforellen (**Oncorhynchus mykiss**), Daphnien (**Daphnia magna**), Kresse (**Lepidium sativum**), Algen (**Selenastrum capricornutum**) und Bakterien (**Pseudomonas putida**) haben signifikante Unterschiede in der Toxizität gezeigt (Tab. 22).

Tab. 22: Vergleich der Toxizität von Mineralöl- und Biodiesel auf wassergebundene Leitorganismen

	<i>effektive Konzentration ohne Auswirkungen (g/l)</i>				
	<i>Forelle</i>	<i>Daphnie</i>	<i>Kresse</i>	<i>Algen</i>	<i>Bakterien</i>
• Biodiesel	>174	122	>174	>174	>435
• Mineralöldiesel	>1,74	1,9	17,4	0,0174	14

Quelle: Rodinger 1997

Die geringe Toxizität und die gute biologische Abbaubarkeit von Rapsöl, Biodiesel und Bioethanol favorisieren deren Nutzung in ökologisch sensiblen Bereichen. Vor allem die deutlich geringere Gewässergefährdung durch Rapsöl und Biodiesel verglichen mit Mineralöldiesel legen ihre bevorzugte Anwendung in Arbeitsbooten und Fahrgastschiffen, bei Revierfahrten hochseegängig-

2. *Ökologische Effekte*

ger Schiffe (z.B. Fähren) in Hafengebieten und bei Fahrzeugen, die in Trinkwassereinzugsgebieten eingesetzt werden, nahe.

Aus ökologischer Sicht wäre auch eine Substitution von Mineralöldiesel durch Biodiesel beim Massengütertransport mit Binnenschiffen vorteilhaft. Die ökonomischen Hürden sind in diesem Bereich jedoch besonders hoch, da die Transportkosten in entscheidendem Maße von den Kraftstoffkosten abhängen und die Betriebsstoffe für in der gewerblichen Schifffahrt eingesetzte Schiffe, die auf dem Rheinstromgebiet und auf bestimmten anderen Wasserstraßen verkehren, aufgrund internationaler Abkommen von Abgaben befreit sind. Die Binnenschifffahrt auf anderen Wasserstraßen ist gleichgestellt.

Angesichts der steuerrechtlichen Ungleichbehandlung der Transportkraftstoffe aufgrund der Mineralölsteuerbefreiung des Schweröls für die gewerbliche Binnenschifffahrt auf der einen Seite und der Mineralölsteuerbelastung des Straßenverkehrs und des Schienenverkehrs mit Diesellokomotiven auf der anderen Seite sowie angesichts der jährlichen Steuerausfälle (rd. 350 Mio. DM pro Jahr (BMF 1995)), gibt es jedoch Bestrebungen, diese Situation zu ändern.

VIII. Stand und Perspektiven der Biokraftstoffe

Wie die vorangegangenen Ausführungen gezeigt haben, ist der Einsatz von Biokraftstoffen derzeit nicht wettbewerbsfähig mit den kostengünstigeren Otto- und Dieselmotorkraftstoffen auf Mineralölbasis. Mit Hilfe staatlicher Fördermaßnahmen, insbesondere durch die Gewährung der Stilllegungsprämie beim Anbau nachwachsender Rohstoffe auf stillgelegten Flächen und die Mineralölsteuerbefreiung für Pflanzenkraftstoffe, ist es jedoch gelungen, zumindest Biodiesel aus Raps in den Markt einzuführen. Auch in anderen europäischen und außereuropäischen Ländern werden Biokraftstoffe eingesetzt, wenn auch meist in begrenztem Umfang.

Nachfolgend wird der Stand der Biokraftstoffproduktion und -nutzung in Deutschland und anderen relevanten Ländern innerhalb und außerhalb der EU dargestellt. Daran anschließend werden Perspektiven eines zukünftigen Einsatzes von Biokraftstoffen anhand der Potentiale zur Senkung der Produktionskosten bei Biokraftstoffen und der Entwicklung der Preise und der Besteuerung fossiler Energieträger aufgezeigt.

1. Stand der Biokraftstoffproduktion

In Europa sind die Kapazitäten zur Produktion von Biodiesel innerhalb weniger Jahre auf 752.000 t/a angestiegen (Tab. 23). Maßgeblichen Anteil hieran haben die Länder Frankreich, Italien und Deutschland. In Frankreich, dem einzigen EU-Land, das Bioethanol als Ottokraftstoffzusatz einsetzt, sind darüber hinaus auch die Kapazitäten zur Erzeugung von Bioethanol ausgebaut worden. Der Ausbau der Biokraftstoffproduktion ist möglich geworden durch die Gewährung der Stilllegungsprämie beim Anbau nachwachsender Rohstoffe auf zwangsweise stillgelegten Flächen, durch die teilweise steuerliche Begünstigung pflanzlicher Kraftstoffe und durch die Bereitstellung von Fördermitteln zum Bau (und Betrieb) von Veresterungsanlagen.

In Deutschland sind die Kapazitäten zur Biodieselproduktion durch den Bau der ersten industriellen europäischen Demonstrationsanlage für Biodiesel in Leer (80.000 t/a) inzwischen auf 90.000 t/a (1997) angewachsen. Die Pläne zum Bau weiterer Großanlagen in Gemünden (100.000 t/a), Kiel (10.000 t/a) und Barby (80.000 t/a), Riesa (30.000-60.000 t/a), Wittenberge (60.000 t/a),

VIII. Stand und Perspektiven der Biokraftstoffe

Niederpöllnitz (20.000 t/a) und Henningsleben (4.000 t/a) sind angesichts der unsicheren Rahmenbedingungen jedoch verworfen bzw. verschoben worden.

Im vergangenen Jahr (1996) wurden in Deutschland rd. 50.000 t Biodiesel verkauft (Rupalla 1996). Hersteller und Vermarkter von Biodiesel gehen von einer weiteren Zunahme des Biodieselabsatzes auf 80.000-100.000 t/a aus (Ag-ra-Europe 1997c). Zwei Drittel der 1995 erzeugten Biodieselmenge wurden inländisch eingesetzt, ein Drittel wurde in EU-Nachbarländer exportiert. Ein Teil des auf stillgelegten Flächen erzeugten Biodiesels befindet sich als buchhalterischer Überhang noch in den Ölmühlen, da diese Kraftstoff-Rapsöl als hochpreisiges Speiseöl verkauft haben⁵⁷.

Tab. 23: Biodiesel-Produktionskapazitäten in Europa

	<i>Anzahl der Anlagen</i>	<i>Produktionskapazität (t/a)</i>	<i>Biodieselproduktion (t/a)</i>	<i>Auslastung in %</i>
• Belgien	1	80.000	30.000	38
• Dänemark	1	30.000	10.000	33
• Deutschland	2	60.000	50.000	83
• Frankreich	5	300.000	238.000	79
• Italien	5	200.000	125.000	63
• Österreich	5	20.000	12.000	60
• Tschechien	4	47.000	27.000	57
• Schweden	2	15.000	10.000	66
Summe	25	752.000	502.000	67

Quelle: in Anlehnung an Gaouyer 1996

Außerhalb Europas sind Brasilien und die USA die Länder mit der bedeutendsten Biokraftstoffproduktion und -anwendung. Sowohl in Brasilien als auch in den USA konzentriert sich der Markt für Biokraftstoffe im Gegensatz zu Europa nahezu vollständig auf Bioethanol. Die Produktion von Bioethanol ist um ein Vielfaches höher als in Europa (Tab. 24). In den USA haben die Bioethanol-

⁵⁷ Bei der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung in Frankfurt sind Kauttionen in Höhe von rd. 480 Mio. DM hinterlegt für Nichtnahrungsölsaaten, bei denen der Nachweis der Endverwendung noch aussteht (Zachäus 1997). Dies entspricht rd. 50.000-80.000 t Rapsöl.

1. Stand der Biokraftstoffproduktion

Mischbenzine (Gasohol) einen Marktanteil von ca. 10 % am verkauften Vergaserkraftstoff. Um die benötigte Bioethanolmenge zur Produktion von Gasohol zur Verfügung stellen zu können, werden pro Jahr zwischen 5 und 6 % der Maisernte zur Erzeugung von 3,4-4 Mio. m³/a Bioethanol verwendet. Fast 60 % dieser Bioethanolmenge werden in fünf Großanlagen erzeugt. Bemerkenswert ist, daß die Bioethanolproduktion aus Mais in den USA über die Jahre hinweg relativ stabil geblieben ist bzw. steigende Tendenzen aufweist. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, daß durch den Verkauf der Nebenprodukte (ca. 2,5 Mio. t Maiskleber) als Eiweißfutter an die EU im Schnitt die Hälfte der Rohstoffkosten gedeckt werden können.

Tab. 24: Produktion von Biokraftstoffen in 1.000 t/a

	<i>Bioethanol</i>				<i>Biodiesel</i>			
	<i>1992</i>	<i>1993</i>	<i>1994</i>	<i>1995</i>	<i>1992</i>	<i>1993</i>	<i>1994</i>	<i>1995</i>
• Deutschland	-	-	-	-	65	61	68	50
• Frankreich	3,4	28	38	38	0,7	7,8	64	153
• Italien	-	-	-	-	30	65	128	90
• USA	3.002	3.239	4.187	4.590	-	-	-	-
• Brasilien	9.108	9.504	9.866	7.740	-	-	-	-

Quelle: LAB 1996

In Deutschland konnte der Biodieselabsatz vor allem durch

- den Aufbau der Interessensgemeinschaft UFOP (Union zur Förderung der Öl- und Proteinpflanzen),
- den Ausbau des Distributionsnetzes für Biodiesel über freiwerdende Zapfsäulen und eigene Tankstellen (Der inländische Biodieselabsatz erfolgt zu 40 % über rd. 700 öffentliche Biodiesel-Tankstellen und zu 60 % über Großverbraucher),
- die Erteilung einer DIN-Norm für Biodiesel und durch
- die Freigabeerteilungen von namhaften Fahrzeugherstellern

gesteigert werden. Absatzfördernd wirkte sich auch die Annäherung beim Tankstellenabgabepreis von Biodiesel und Mineralöldiesel aus.

Zu den wichtigsten Großkunden gehören öffentliche und genossenschaftliche Einrichtungen, Busunternehmen, Taxiunternehmen (von 35.000 Taxiunter-

VIII. Stand und Perspektiven der Biokraftstoffe

nehmen setzen 4,3 % Biodiesel ein), Molkereien, Fährschiffer und Betreiber von Industrieanlagen. Verschiedene Landkreise und Kommunen haben weitreichende Beschlüsse gefaßt mit dem Ziel, vorrangig biodieseltaugliche Fahrzeuge anzuschaffen und Biodiesel einzusetzen sowie öffentliche Bauaufträge nur noch an Firmen zu vergeben, die Biokraftstoffe verwenden. Auch im gewerblichen Bereich nimmt die Zahl der an Biodiesel interessierten Unternehmen zu. Das Taxen- und Mietwagengewerbe hat sich beispielsweise vorgenommen, bis zur Jahrtausendwende alle Taxis in deutschen Innenstädten mit Biodiesel zu betreiben (Göllner 1996). In der Landwirtschaft kommt Biodiesel dagegen kaum zum Einsatz, weil die Substitution von Diesel aufgrund der Gasölbeihilfe⁵⁸ mit deutlichen Mehrkosten verbunden ist.

In den anderen europäischen und außereuropäischen Ländern, wo Biokraftstoffe eingesetzt werden, ist dies wie in Deutschland auch nur aufgrund nationaler Regelungen zur teilweisen oder vollständigen Befreiung der Biokraftstoffe von der Mineralölsteuer möglich. Beispiele hierfür finden sich in Österreich, Italien, Frankreich und in den USA. In Österreich wird Biodiesel nur mit 5 % der auf Diesel erhobenen Mineralölsteuer beaufschlagt. In Italien wird für den Anbau von Raps und Sonnenblumen zur Biodieselproduktion auf Stilllegungsflächen ein Zuschuß von 150 DM/ha gewährt. Seit 1993 gibt es in Italien außerdem eine Verbrauchssteuerbefreiung für ein Kontingent von 125.000 t/a Biodiesel aus Raps- und Sonnenblumenöl (Agra-Europe 1997d). Da sich diese Beihilfen ohne technische Notwendigkeit auf Raps- und Sonnenblumenöl beschränken und damit alle anderen pflanzlichen Öle diskriminieren, ist mit einer Neuregelung zu rechnen.

In Frankreich ist seit 1988 die Mineralölsteuer für den Bioethanol-Anteil im Benzin vom Benzinsteuersatz (0,97 DM/l) auf den Steuersatz für Dieselkraftstoff (0,62 DM/l) ermäßigt, sofern der Beimischungsanteil von 5 % nicht überschritten wird. Daneben sind Raps- oder Sonnenblumenölester, Bioethanol und Bioethanolderivate seit 1992 vollständig von der Mineralölsteuer TIPP (Taxe Intérieure sur les Produits Pétroliers) befreit, wenn diese von Pilotanlagen stammen und Teil eines Versuchsprogramms sind. Die Steuerbefreiung belief sich 1995 auf 0,71 DM/l Biodiesel und auf 1,10 DM/l Bioethanol. Die Steuerbefreiung gilt auch für den pflanzenbürtigen Anteil eines Treibstoffgemisches mit fossilen Komponenten. Sie ist allerdings beschränkt auf Kraftstoffe, deren

58 Die Landwirtschaft bekommt pro 100 l Diesel eine Mineralölsteuer-Rückerstattung von gegenwärtig rd. 41 DM (Gasölbeihilfe).

2. Perspektiven der Biokraftstoffe

Ausgangsmaterial von Stilllegungsflächen stammt, und sie muß vom Verarbeitungsunternehmen jedes Jahr neu beantragt werden.

In den USA wird der Einsatz von Biokraftstoffen durch den "Alternative Motor Fuels Act" von 1988 und durch eine Mischung aus nationalen und einzelstaatlichen Subventionen, Zinsvergünstigungen und Steueranreizen gefördert. Die Mineralölsteuer auf Gasohol (90 % Benzin plus 10 % Bioethanol) ist um zwei Drittel (3 cents statt 9 cents) ermäßigt. Bezogen auf Bioethanol bedeutet dies eine Subvention von 54-60 cents/gallon (0,28 DM/l). In knapp 30 Staaten werden außerdem Steuerbefreiungen oder Subventionen von 20-30 cents/gallon (0,10-0,15 DM/l) gewährt. Der Einsatz von Biokraftstoffen wird in den USA nicht nur durch finanzielle Maßnahmen gefördert. Durch eine Erhöhung des Anteils an Bundesfahrzeugen, die mit alternativen Kraftstoffen betrieben werden können, auf 75 % der Neuerwerbungen ab dem Jahr 1999 sollen zusätzliche Zeichen gesetzt werden (OECD 1997).

2. Perspektiven der Biokraftstoffe

Die Zukunft der Biokraftstoffe hängt unter anderem davon ab, inwieweit die Kosten der Biokraftstoffproduktion gesenkt werden können, ihre Umweltleistungen auch finanziell honoriert und nicht-technische⁵⁹ Hemmnisse abgebaut werden. Von maßgeblicher Bedeutung ist darüber hinaus, wie sich einerseits die Energiepreise auf dem Weltmarkt und andererseits die nationale Besteuerung fossiler Kraftstoffe in den nächsten Jahren entwickeln werden.

2.1 Agrarpolitische Rahmenbedingungen

Die Entwicklung der Produktion und Anwendung von Biokraftstoffen wäre ohne die Problematik der landwirtschaftlichen Überschußproduktion in den 80er Jahren und ohne die damit verbundene Einführung der zwangsweisen Flächenstilllegung kaum möglich gewesen. Auch die weitere Entwicklung der Biokraftstoffproduktion hängt entscheidend von den agrarpolitischen Rahmenbedin-

59 Zur Ernte 1998 wurde die Kautions für Stilllegungsflächen, die zur Produktion nachwachsender Rohstoffe genutzt werden, von 120 % der Stilllegungsprämie auf 250 ECU/ha (rd. 500 DM/ha) gesenkt. Der Abschluß eines Vertrages zum Verwertungsnachweis im Nichtnahrungsbereich ist auch nach der Aussaat möglich und ein Wechsel des Enderzeugnisses erlaubt.

VIII. Stand und Perspektiven der Biokraftstoffe

gungen ab. Von besonderer Bedeutung ist die Fortführung der Flächenstilllegung, die wiederum korreliert ist mit der weltweiten Produktion und Nachfrage nach Nahrungs- und Futtermittel.

Die EU-15 gehört mit einer Produktion von 7,5 Mio. t/a Rapsöl (Ø 1991-1997) neben Kanada (5,4 Mio. t/a) zu den weltweit größten Rapsproduzenten (Agra-Europe 1997f). Die VR China (8,8 Mio. t/a) und Indien (6 Mio. t/a) haben ebenfalls eine große Rapsproduktion, die jedoch überwiegend der Deckung des Eigenbedarfs dient.

Gegenwärtig sind die Absatz- und Preisaussichten für Öle und Fette im Nahrungsmittelbereich weltweit gesehen günstig. Bei den pflanzlichen Ölen, Fetten und Ölschrotten ist eine steigende Nachfrage zu beobachten (Uhlmann 1997). Diese wurden ausgelöst durch höhere Importe der VR China, die Anfang der 90er Jahre noch zu den Nettoexporteuren gehörte. Auch im südostasiatischen Raum ist aufgrund der positiven Bevölkerungsentwicklung, des gestiegenen Pro-Kopf-Einkommens und der wachsenden Kaufkraft ein weiterer Anstieg des Pro-Kopf-Verbrauchs und der Nachfrage nach pflanzlichen Ölen und Fetten zu beobachten. Da eine steigende Nachfrage i.d.R. mit steigenden Preisen verbunden ist, die wiederum Produktions- und Züchtungsanreize darstellen, kann mittel- bis langfristig mit einer steigenden Produktion pflanzlicher Öle und Fette gerechnet werden.

Auf der anderen Seite ist es möglich, daß die geplante Osterweiterung der EU zu einer Verschärfung der Überschußproblematik beitragen und zu einem Wiederanstieg der Flächenstilllegungsquote führen wird (FAZ 1997a). Auch erwartet die EU-Kommission aufgrund höherer Hektarerträge bis zum Jahr 2005 in der EU einen Getreideüberschuß von 80 Mio. t/a. Dies hätte zur Folge, daß der Stilllegungssatz auf 17,5 % angehoben werden müßte und das Flächenpotential für nachwachsende Rohstoffe spürbar größer wäre als gegenwärtig (Agra-Europe 1997g). Die große Spannweite der Aussagen über die zukünftig für einen Anbau von Biokraftstoffen verfügbare Stilllegungsfläche (von 0-17,5 % der Ackerfläche) und über die Höhe der flächengebundenen Anbaubehilfen stellen gewichtige Planungsunsicherheiten und Investitionshemmnisse dar. Von verschiedenen Seiten wird deshalb gefordert, die zum Aufbau einer Biokraftstoffindustrie benötigten agrarpolitischen und finanziellen Rahmenbedingungen zu schaffen.

Von wirtschaftlicher Bedeutung für eine expandierende Rapsöl- und Biodieselproduktion ist das Blair-House-Abkommen und die darin festgelegte eingeschränkte Verwertbarkeit von Rapschrot als Mischfuttermittelkomponente. Der Regelung zufolge dürfen nur 1 Million Tonnen Sojamehläquivalente an Öl-

2. Perspektiven der Biokraftstoffe

schroten von Non-food Flächen zur Tierernährung eingesetzt werden. Dem steht entgegen, daß in der EU jährlich rd. 38 Mio. t (1996/97) eiweißhaltige Futtermittel verbraucht, aber nur rd. 1,2 Mio. t/a Soja (Ø 1990-97) in der EU produziert werden. Trotz Zunahme der Getreideverfütterung und Rückgang der Tierhaltung (insbesondere bei der Rindermast und Milchproduktion) dürfte der Bedarf an pflanzlichen Eiweißfuttermitteln in der EU in den nächsten Jahren um 3 % jährlich weiter zunehmen.

Um den Bedarf an hochwertigem Pflanzeneiweiß zu decken, importiert die EU größere Mengen an Sojaschroten. Die Importe stammen aus Argentinien, Brasilien und den USA, die mit einer jährlichen Produktion von rd. 96 Mio. t (Ø 1990-97) fast 75 % der Weltproduktion stellen (Agra-Europe 1997h). Der geringe Selbstversorgungsgrad (30 %) der EU bei der Versorgung mit pflanzlichem Eiweiß und die starke Importabhängigkeit von einigen wenigen Ländern könnte unter anderem durch einen verstärkten Einsatz von Ölschroten verringert werden, die von Ölpflanzen stammen, die auf stillgelegten Flächen für energetisch oder chemisch-technische Zwecke angebaut wurden.

2.2 Kostensenkungspotentiale bei Biokraftstoffen

Die Möglichkeiten zur Senkung der Kosten bei der Erzeugung nachwachsender Rohstoffe und bei der Biokraftstoffproduktion in technischen Anlagen durch züchterische, anbau- und verfahrenstechnische Maßnahmen sind begrenzt. Wege zur Verringerung der Rohstoffkosten durch den Einsatz von preiswerten organischen Rest- und Abfallstoffen, wie z.B. energiereiche Altfette und -öle, zur Biodiesel oder Bioethanolproduktion erlangen deshalb zunehmend Aufmerksamkeit.

In Deutschland werden jährlich zwischen 100.000 und 200.000 Altfette und -öle⁶⁰ gesammelt (Kersting/von der Pütten 1996). Das sammelbare Potential an Altfetten aus Gewerbebetrieben soll sogar bis zu 300.000 t/a umfassen (Krause 1997). Zusammen mit einem erfaßbaren Aufkommen von 2,8 kg Altfett pro Einwohner und Jahr aus privaten Haushalten entspricht dies dem Ertrag einer Biodiesel-Rapsanbaufläche von mehr als 500.000 ha. Durch die Erfassung und Verwertung von biologisch abbaubaren Hydraulikölen, die gegenwärtig als Sondermüll behandelt und kostenwirksam entsorgt werden müssen, würde sich

60 Altfette sind gebrauchte bzw. verbrauchte, z.T. auch verunreinigte oder überlagerte und verdorbene Fritier-, Brat- und Backfette sowie Grill- und Speisefette.

dieses Rohstoffpotential weiter erhöhen. Bei den genannten Potentialen muß berücksichtigt werden, daß das Haushaltsfett im Gegensatz zum Altfett aus der Industrie und Gastronomie gegenwärtig kaum gesammelt wird, da effiziente Altfettsammelsysteme fehlen. Bei der Ausnutzung des Sammelpotentials von Altfetten fällt den privaten Haushalten mit einem jährlichen Verbrauch von etwa 160.000 t Speiseöl deshalb eine wesentliche Rolle zu.

Die Preise für Altfette, die an der Fettbörse in Rotterdam ermittelt werden, richten sich nach den Weltmarktpreisen für tierische und pflanzliche Öle und Fette. Die Kosten der Bereitstellung (ca. 0,25 DM/kg Altfett) werden vom Aufwand zur Sammlung und Zwischenlagerung der Altfette bestimmt. Betriebe, die Altfett aufarbeiten, bezahlen ca. 0,30 DM/kg und verkaufen das gereinigte Altfett⁶¹ für 0,50-0,60 DM/kg (Kersting/van der Pütten 1996). Damit bewegen sich die Preise für gereinigtes Altöl unter gegenwärtigen Rahmenbedingungen auf einem ähnlichen Niveau wie die Preise für billiges Pflanzenöl.

Fettabfälle und Pflanzenöle dürfen gemäß der technischen Anleitung Siedlungsabfall (TASI) aufgrund ihres hohen Organikgehalts nach 2005 nicht mehr deponiert werden. Eine Beseitigung in Müllverbrennungsanlagen (MVA) ist nur mit einer Ausnahmegenehmigung möglich, da die MVA meist nur auf die Entsorgung fester hausmüllähnlicher Abfälle ausgelegt sind, und die tropffähigen Altfette bzw. Pflanzenöle zu verbrennungstechnischen Schwierigkeiten führen können. Die energetische Nutzung von gebrauchten Ölen und Fetten als Substrat für Co-Fermentationsanlagen⁶² ist dagegen aufgrund des dadurch erzielbaren zusätzlichen landwirtschaftlichen Einkommens (Abnahmeentgelte von bis zu 250-300 DM/t Fettabfall sind möglich) von zunehmendem Interesse.

Die gesammelten Altfette gehen derzeit zu 80 % in die Futtermittelindustrie und zu 18 % in die chemische Industrie, wo sie stofflich aufgearbeitet und wiederverwertet werden. Der wichtigste Abnehmer für Altfette und Technische Fette ist die Futtermittelindustrie in den Niederlanden, die daraus Futterfett für die Schweine- und Geflügelmast produziert. Durch den Fetteinsatz in der Fütterung kann die Energiedichte des Futters erhöht und die Versorgung der Tiere mit essentieller Linolsäure und fettlöslichen Vitaminen verbessert werden. In Deutschland ist die Verwendung von gebrauchten pflanzlichen Brat- und Fri-

61 Bei der Grobreinigung, Entwässerung und Feinreinigung des Altfettes wird die Fettmenge um ca. 5-10 % Festbestandteile reduziert. Das als Technisches Fett bezeichnete, aufbereitete Altfett enthält ca. 5 % freie Fettsäuren.

62 In Co-Fermentationsanlagen werden organische Stoffe (z.B. Fette) unter Luftabschluß (anaerob) zusammen mit Gülle durch mikrobielle Umsetzung in brennbare Gase (Methan, Kohlenmonoxid) und einen festen Fermentationsrückstand umgewandelt.

2. Perspektiven der Biokraftstoffe

tierfetten für die Herstellung von Mischfetten nach dem deutschen Futtermittelgesetz bzw. nach der Futtermittelherstellungs-Verordnung (1993) umstritten, da wissenschaftlich noch nicht eindeutig geklärt ist, ob die darin enthaltenen, teilweise hohen Gehalte an Peroxiden, Di-, Tri- und Polymeren sowie an Spaltprodukten auf Tiere toxisch wirken.

Gereinigtes Altfett kann zu Altfett-Biodiesel mit ähnlichen technischen Eigenschaften wie Rapsöl-Biodiesel umgeestert werden. In Pichelsdorf (Niederösterreich) existiert seit einiger Zeit eine staatlich geförderte Großanlage zur Herstellung von 30.000 t/a Biodiesel aus Altfett (Jurisch/Meyer-Pittroff 1995). Das dort verarbeitete Altfett stammt unter anderem von Privathaushalten, wo es in speziellen Behältern gesammelt wurde. Die Anlage arbeitet nach einem von der Firma Vogel&Noot Industrieanlagenbau GmbH (Österreich) entwickelten Verfahren, bei dem die Umesterung von Altfetten zu Altfettsäuremethylester (AME) bei Niederdruck und Raumtemperatur abläuft. Mit dem hergestellten AME-Biodiesel werden in Graz Busse betrieben.

In Deutschland wird derzeit in Grevesmühlen eine Anlage zur Aufarbeitung von Fettabfällen aus Fettabscheidern (20 % Fett, 80 % Wasser) in Betrieb genommen. In der Anlage soll das sogenannte Kanalfett vom Wasser getrennt und angeblich mit Vorfluterqualität in die Kanalisation eingeleitet werden. Aus den minderwertigen, inhaltlich stark divergierenden Fettresten soll Biodiesel hergestellt werden. In der Endausbaustufe mit einer Verarbeitungskapazität von 300 m³ pro Tag sollen bis zu 30.000 l Biodiesel täglich erzeugt werden (FAZ 1997b).

Voraussetzung für die erfolgreiche Veresterung von Altfetten und -ölen ist eine schnelle und gute Analytik zur Qualitätskontrolle der Altfette, da diese von unterschiedlicher Herkunft und Zusammensetzung sein können. Vor allem die Bestimmung des Gehalts an freien Fettsäuren ist wichtig, um das Veresterungsverfahren optimieren zu können. Ein hoher Gehalt an freien Fettsäuren, wie er beispielsweise in Rindertalg anzutreffen ist, führt zu geringen Esterausbeute und zu einem Biodiesel mit einem hohen Gefrierpunkt.

Erste Versuche, AME-Diesel in (Telekom)Fahrzeugen als Dieselsubstitut einzusetzen, verliefen bisher erfolgreich (Anggraini et al. 1997). Es zeigte sich jedoch, daß der AME-Diesel ohne entsprechende Additivierung nicht wintertauglich ist. Biodiesel aus Rindertalg kann bereits bei einem Anteil von >10 % in Mischung mit rapsölstämmigem Biodiesel zu Problemen beim Normalbetrieb führen. Bei einem Anteil von über 50 % Rindertalg-AME ist der Misch-Biokraftstoff nicht mehr nutzbar, da AME-Kraftstoff aus Rindertalg bereits bei Raumtemperatur eine feste Konsistenz annimmt (Walker 1996).

2.3 Entwicklung der Energiepreise und -steuern

In den letzten 25 Jahren hat sich der Weltenergiebedarf auf nahezu 13 Mrd. t Steinkohleeinheiten (SKE) mehr als verdoppelt. Davon entfallen auf die fossilen Energieträger Öl, Erdgas und Kohle nahezu 84 %. Der Weltenergieerat (WEC) erwartet bis 2020 eine weitere Verdoppelung des Energiebedarfs aufgrund einer wachsenden Weltbevölkerung und des in aufstrebenden Wirtschaftsregionen steigenden Anteils an Menschen mit höherem Einkommen, die nach demselben Lebensstandard trachten, wie ihn die industrialisierte Welt genießt - im Hinblick auf das Wohnen, auf Konsumgüter und die persönliche Mobilität. In China wird eine Verdreifachung des Ölverbrauchs bis 2020 erwartet, weil der geplante Ausbau der Straßen zur Erschließung des Landesinneren hohe Wachstumsraten im Individual- und Straßengüterverkehr nach sich ziehen wird (Herkströter 1996).

Am weltweiten Energieverbrauch hat Deutschland einen Anteil von 4,2 %. Dieser Anteil dürfte sich in Zukunft nicht signifikant vergrößern, da trotz eines wachsenden Bruttoinlandsprodukts und steigender Motorisierung der Bevölkerung der Energiemarkt hierzulande kein bedeutender Wachstumsmarkt mehr darstellt. Bei den Ottokraftstoffen wird bis 2001 aufgrund des zunehmenden Anteils an kleinen und sparsameren Neuwagen mit einem bei 30 Mio. t stagnierenden Verbrauch gerechnet. Der Dieselkraftstoff-Konsum wird dagegen bis 2001 um weitere 8 % auf 28 Mio. t anwachsen, da der Straßengüterverkehr um 20 % zunehmen und auch der Diesel-Pkw-Anteil weiter ansteigen wird (Deutsche Shell AG 1996, Prognos 1996). Insgesamt dürfte der Kraftstoffbedarf des Verkehrssektors bis 2005 gegenüber 1992 um ca. 18 % anwachsen.

Der technologische Fortschritt hat nicht nur dazu geführt, daß der Energiebedarf und der Verbrauch an fossilen Kraftstoffen stark angestiegen ist; er hat auch bewirkt, daß der Vorrat an wirtschaftlich förderbaren fossilen Energieträgern nennenswert zugenommen hat. Wie Tabelle 25 zeigt ist das Potential an zusätzlichen fossilen Energievorräten um ein Vielfaches größer als die Menge an derzeit als sicher geltenden fossilen Energiereserven. Je nach Verbrauchsentwicklung und Annahmen zum Gewinnungsgrad wird die Reichweite der gesamten fossilen Energiereserven auf der Basis des gegenwärtigen Kenntnisstandes mit 800 bis 2000 Jahren veranschlagt. Beim konventionellen Erdölvorkommen ist die Reichweite, ausgehend von einem steigenden Weltverbrauch und vermuteten zusätzlichen Ressourcen, mit ca. 43 bis 53 Jahren deutlich kürzer (Forum für Zukunftsenergien 1997). Allerdings gibt es ein darüber hinaus

2. Perspektiven der Biokraftstoffe

noch beachtliche Reserven an sogenannten unkonventionellen Erdölvorkommen in Gestalt von Ölschiefer und Ölsanden.

Tab. 25: Fossile Energiereserven (Mrd. t SKE)

	<i>sichere Reserven</i>	<i>zusätzliche Vorräte</i>
• Erdöl	204	113
• unkonventionelles Erdöl (Ölschiefer, Ölsand, Schweröl)	120	360
• Erdgas	173	262
• unkonventionelles Erdgas (Gashydrate, Flözgas)	2	2130
• Kohle	566	7044

Quelle: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 1995

Durch neue Explorations- und Fördertechniken ist es gelungen, die Reserven zu deutlich günstigeren Kosten zu mobilisieren wie vor 10 Jahren. Der Erdölpreis, Leitindikator für die Energiepreise, spiegelt die finanziell entspannte Versorgungslage wider. Die Weltenergiemärkte sind derzeit weltweit durch eine Überangebotskonstellation gekennzeichnet. Die Energiewirtschaft verfügt über hohe Überkapazitäten in der Erdöl-, Erdgas- und Kohleförderung, bei den Transportmitteln für fossile Energieträger und in der Erdölverarbeitung. Kurzfristig ist deshalb nicht mit einem raschen Anstieg der Energiepreise durch höhere Rohstoffpreise zu rechnen, wenn man einmal von unvorhersehbaren politischen Ereignissen absieht.

Einige Experten gehen ferner davon aus, daß auch in den nächsten 10-15 Jahren nicht mit einem ausgeprägten realen Anstieg der Energiepreise zu rechnen ist (Deutsche Shell AG 1996, Prognos 1996, EIA 1997). Ihren Abschätzungen zufolge dürfte das gegenwärtige Preisband von 15-20 US\$/Barrel Rohöl (0,17-0,23 DM/l) voraussichtlich nicht deutlich und langanhaltend überschritten werden. Nach 2010 könnte es jedoch wegen der zunehmenden Konzentration der Förderung auf den Mittleren Osten zu starken realen Preisanstiegen kommen. Allerdings wird damit gerechnet, daß aufgrund technischer Fortschritte bei der Energieeinsparung und der Nutzung regenerativer Energieträgern die Energie-

VIII. Stand und Perspektiven der Biokraftstoffe

kosten auf Öl-Äquivalent-Basis auch bis 2015-2020 in Realpreisen gerechnet nicht weit über 21-26 US\$/Barrel (0,24-0,29 DM/l)⁶³ steigen werden.

Andere Experten bezweifeln dagegen, daß der weiter steigende Bedarf an Rohöl durch die zusätzliche Ölproduktion von sogenannten unkonventionellen Öllagern (z. B. Ölsanden) gedeckt werden kann. Sie gehen deshalb davon aus, daß die absehbaren Defizite in den Produktionskapazitäten innerhalb der nächsten 10–15 Jahre zu einem beachtlichen Anstieg der Rohölpreise vermutlich über 30 \$/Barrel führen können (Hiller 1997).

Gegenwärtig bestimmen die Kosten für Rohöl deutlich weniger stark die Preise für Otto- und Dieselkraftstoffe auf Mineralölbasis als die Höhe der Besteuerung. In Deutschland machen die Mineralöl- und Mehrwertsteuer zusammen fast zwei Drittel der Preise für Otto- und Dieselkraftstoffe aus. Auch in den anderen EU Mitgliedsstaaten werden die Preise für fossile Kraftstoffe derzeit maßgeblich von der Höhe der Steuerlast bestimmt. Den Vorschlägen der EU zufolge soll die Mineralölsteuer auf fossile Kraftstoffe von 1998 bis 2002 stufenweise erhöht bzw. EU-weit angeglichen werden (Agra-Europe 1997e). Würden diese Vorschläge in nationales Recht umgesetzt, so wären im Jahr 2000 die Steuersätze für bleifreies Benzin unterhalb des gegenwärtigen Steuer-niveaus (Tab. 26). Der Steuersatz für Mineralöldiesel würde dagegen deutlich höher liegen als gegenwärtig. Ausgehend von dem höheren Steuersatz auf Mineralöldiesel im Jahr 2002 und einem Rohstoffpreis von 0,40 DM/l Diesel würde der Tankstellenabgabepreis für Diesel in fünf Jahren 1,33 DM/l inklusive Mehrwertsteuer betragen. Damit würde sich die Wettbewerbsfähigkeit nicht entscheidend zugunsten des steuerbefreiten Biodiesels verbessern.

Tab. 26: Entwicklung der Mineralölsteuersätze in Deutschland (DM/l)

	<i>bis 30.06.91</i>	<i>bis 31.12.93</i>	<i>ab 01.04.94</i>	1998*	2000*	2002*
• bleifreies Benzin	0,60	0,82	0,98	0,81	0,87	0,97
• Diesel	0,44	0,55	0,62	0,60	0,67	0,76
• leichtes Heizöl	0,057	0,08	0,08	0,041	0,045	0,051

* EU-Vorschlag

63 Bei einer Einschätzung der inländischen Preisentwicklung bei fossilen Kraftstoffen müssen noch die als wahrscheinlich anzusehenden zukünftigen Entwicklungen bei der Inflationsrate und der DM-Euro-Dollar-Relation berücksichtigt werden.

2. Perspektiven der Biokraftstoffe

Quelle: Zusammenstellung nach Deutsche Shell AG 1996 und Holzmann 1997

Verglichen mit anderen europäischen Ländern werden die Vorteile von reinen Pflanzenkraftstoffen in Deutschland durch die vollständige, mengen- und zeitmäßig unbefristete Mineralölsteuerbefreiung finanziell besonders stark honoriert. In Frankreich, Italien und Österreich gibt es ebenfalls Steuervergünstigungen für Biokraftstoffe; diese sind jedoch sowohl in ihrer Höhe als auch zeit- bzw. mengenmäßig begrenzt.

In den skandinavischen Ländern können die Biokraftstoffe eine Unterstützung im Rahmen der Förderung umweltverträglicher Kraftstoffqualitäten erhalten; eine besondere Förderung für Biokraftstoffe gibt es jedoch nicht. Dies hat dazu geführt, daß beispielsweise in Finnland der Marktanteil reformulierter Ottokraftstoffe bei 90 % und der von reformuliertem Diesel bei 70 % liegt, daß aber als Sauerstoffträger nicht ETBE aus nachwachsenden Rohstoffen, sondern aus Erdgas gewonnenes MTBE eingesetzt wird (Nylund/Sipilä 1996). Die Mehrkosten für sauerstoffangereicherte Kraftstoffe werden durch eine Steuerermäßigung (0,01 US\$/l) ausgeglichen.

Ein anderes Beispiel dafür, daß Regelungen zum Einsatz umweltverträglicher Kraftstoffe nicht ausreichen, um Biokraftstoffe in den Markt zu bringen findet sich in den USA. Dort sehen die Bestimmungen des Gesetzes zur Luftreinhaltung (Clean Air Act Amendments) von 1990 in 39 Stadtregionen einen Einsatz von "clean fuels" zur Verringerung der CO- und HC-Emissionen vor. Regionen mit zu hoher CO-Belastung müssen sauerstoffangereicherte (mind. 2,7 Gew.-% Sauerstoff) und Regionen mit zu hoher bodennaher Ozonanreicherung reformulierte Kraftstoffe (RFG) verkaufen. Die RFG⁶⁴ müssen mind. 2 Gew.-% Sauerstoff aufweisen, frei von Schwermetallen sein und dürfen nicht mehr als 1 Vol.-% Benzol und 25 Vol.-% Aromate enthalten. Außerdem dürfen sie nicht mehr NO_x emittieren als konventionelle Kraftstoffe, was für die Biokraftstoffe möglicherweise ein Problem darstellen könnte.

Die genannten Kriterien werden durch die Zumischung von MTBE aus Erdgas zu günstigeren Kosten erfüllt als von pflanzlichen Zumischkomponenten, wenn man die besonderen steuerlichen Vergünstigungen für Biokraftstoffe einmal nicht berücksichtigt. Der Vorschlag der amerikanischen Umweltbehörde

64 Der Verkauf sauerstoffhaltiger Kraftstoffe ist seit dem 1.1.1995 während der Winterzeit obligatorisch für die neun am meisten von der Luftverschmutzung betroffenen, smoggefährdeten Großstadtregionen, wie Los Angeles, New York und Chicago (Bull 1994). Im Sommer ist der Einsatz von ETBE oder MTBE günstiger, da Bioethanol- und Aldehydemissionen zur Verstärkung des Ozonbildungspotentials beitragen.

VIII. Stand und Perspektiven der Biokraftstoffe

EPA (Environmental Protection Agency), daß mindestens 15-30 % der sauerstoff erhöhenden Zusätze in RFG aus erneuerbaren Energien (Renewable Oxygenate Standard = ROS) stammen sollen, wurde nicht zuletzt aus diesem Grund abgelehnt.

In den industrialisierten Ländern zeichnet sich gegenwärtig ein Trend hin zu einer stärkeren Orientierung der Kraftstoffbesteuerung an der Kraftstoffqualität und der Umweltverträglichkeit der daraus hervorgehenden Abgasemissionen ab. Auf nationaler Ebene ist das Kraftfahrzeugsteueränderungsgesetz (Kraft-StÄndG) sowie der Gesetzentwurf UmKraftG zur Förderung und beschleunigten Einführung verbesserter umweltfreundlicher Kraftstoffqualitäten zur Verringerung der verkehrsbedingten Emissionen an Benzol, Aromaten und Schwefel (Bundesrat 1996).

Als Beispiel auf europäischer Ebene sei das "Auto-Oil-Programme" der EU-Kommission genannt, welches einen Rahmen für entsprechende nationale Richtlinien vorgibt. Die Vorschläge der Europäischen Kommission zur Verbesserung der Abgasemissionen über eine höhere Kraftstoffqualität bleiben jedoch hinter den finnischen und amerikanischen Werten für reformulierte Kraftstoffe zurück (Tab. 27).

Tab. 27: Anforderungen an die Kraftstoffqualitäten

	<i>Finnland</i>	<i>USA</i>	<i>Europäisches Mittel</i>	<i>Vorschlag der EC</i>
		<i>(RFG)</i>	<i>(Non-RFG)</i>	
• Aromaten (Vol.-%)	30	25	32	<45
• Benzol (Vol.-%)	<1,0	<1,0	1,6	<2,0
• Dampfdruck (kPa)	50	50	60	60
• Sauerstoff (Gew.-%)	>2,0	>2,0	-*	<2,3

* keine Angabe

Quelle: Hery 1996

In Frankreich ist im Rahmen eines neuen Gesetzes zur Reinhaltung der Luft eine Zwangsbeimischung von Sauerstoffträgern in Benzin, Diesel und Heizöl ab der Jahrtausendwende geplant. Das Absatzpotential an Bioethanol wird auf

2. Perspektiven der Biokraftstoffe

1,2 Mio. t/a geschätzt⁶⁵, vorausgesetzt, daß dem bleifreien Benzin 15 % ETBE zugesetzt werden. Der französische Kraftstoffmarkt kann wesentlich mehr ETBE⁶⁶ aufnehmen als das in Deutschland möglich wäre, da die französischen Automodelle für den Einsatz von hochoktanigem Superkraftstoff ausgelegt sind und in Frankreich nahezu ausschließlich hochoktaniger Superkraftstoff verwendet wird. Der Bedarf an Oktanzahlverstärkern könnte bei erfolgreichen Bemühungen der französischen Automobilindustrie, ihre Motoren für Superkraftstoffe mit einer Oktanzahl von 98 auszulegen, weiter ansteigen.

2.4 Maßnahmen zur Förderung der Biokraftstoffe

Die EU-Umweltminister haben sich darauf verständigt, den CO₂-Ausstoß bis zum Jahr 2010 um 15 % zu reduzieren. Zur Erreichung dieses Ziels soll der Anteil erneuerbarer Energien am gesamten Energieverbrauch von bisher 6 % auf 12 % im Jahr 2010 erhöht werden. Von der 1995 in der EU gewonnenen Biomasseenergie (rd. 41 Millionen Tonnen Öläquivalente (Mtoe)) entfielen nur 0,5 Mtoe bzw. 1 % auf Biokraftstoffe (Agra-Europe 1997i). Bis zum Jahr 2010 soll der Anteil an Biokraftstoffen auf 11 Mtoe, das wären 4-5 % des europäischen Kraftstoffbedarfs, ausgeweitet werden. Die hierfür beanspruchte Fläche würde rd. 7 Mio. ha umfassen.

Dieses Ziel soll unter anderem durch die Einführung einer Kohlendioxid- und Energiesteuer erreicht werden. Ein entsprechender Entwurf zur Förderung des Einsatzes regenerativer Energieträger ist 1995 nach mehrjährigen ergebnislosen Beratungen im EU-Ministerrat endgültig zurückgezogen worden. Auch der von der Europäischen Kommission seit 1994 diskutierte sogenannte Scriver-Vorschlag, demzufolge die Mineralölsteuer für Biokraftstoffe auf höchstens 10 % des üblichen Steuersatzes abgesenkt werden sollte, blieb ohne gesetzgeberische Folgen. Gegenwärtig werden neue Vorschläge diskutiert, denen zufolge die Mindeststeuersätze bei Kraftstoffen und Heizöl stufenweise erhöht

65 Hierfür wären 300.000-400.000 ha erforderlich.

66 Die ETBE-Produktion findet in Anlagen der französischen Mineralölkonzerne Elf-Aquitaine und Total (in Dünkirchen, Gonfreville und Le Havre) statt (Agra-Europe 1997e). Für das Werk in Dünkirchen wurde die Nord-ETBE gegründet, eine Kooperation von Total mit den Rohstoffherzeugern. Dort werden jährlich 350.000 hl Ethanol zur Produktion von 59.000 t ETBE benötigt. In zwei Anlagen (Proins, Origny) wird zur besseren Kapazitätsauslastung Ethanol aus Zuckerrüben und Weizen hergestellt. Durch neue Anlagen in Carling an der Mosel und in Donges (Loire-Atlantique) und eine Erweiterung in Feysin werden die Produktionskapazitäten auf 1,82 Mio. hl/a ETBE ansteigen (Anonymus 1997b).

VIII. Stand und Perspektiven der Biokraftstoffe

(Tab. 26) und alle anderen nicht erneuerbaren fossilen Energieträger, wie z.B. Kohle, ebenfalls besteuert werden sollen. Auf Beschluß der einzelnen Mitgliedsstaaten sollen die erneuerbaren Energieträger größtenteils von der Besteuerung ausgenommen werden können.

In der EU wurde bislang noch kein Konsens über eine einheitliche Regelung zur Steuerbefreiung von Biokraftstoffen gefunden. Dies wäre aber eine wichtige Voraussetzung zum Aufbau eines funktionierenden Binnenmarktes für Biokraftstoffe. Haupthindernis für eine Einigung sind Befürchtungen durch eine Steuervergünstigung eine mengenmäßig unbegrenzte Subvention zu schaffen, die zu erheblichen Mindereinnahmen des Staates führt. Diese Befürchtung wird durch Szenarien, in denen die Biokraftstoffe bzw. die zur Biokraftstoffproduktion eingesetzten Pflanzenöle nicht von inländischen oder europäischen Anbauregionen sondern vom Weltmarkt stammen, gestärkt. Tatsächlich besteht aufgrund des Diskriminierungsverbotes eine gewisse Gefahr, daß es zur außer-europäischen Konkurrenz bei der Bereitstellung von Pflanzenölen kommt und nicht in Deutschland oder in benachbarten EU-Ländern erzeugte pflanzliche Öle in den Genuß der Steuervergünstigung gelangen.

IX. Fazit und Ausblick

Die Nutzung von Rapsöl und Biodiesel (Rapsölmethylester) als Dieselsubstitut und der Zusatz von Bioethanol bzw. daraus hergestelltem Ethyl-Tertiärbutyl-Ether (ETBE) zu bleifreien Ottokraftstoffen ist umfangreich erforscht worden und motortechnisch weitgehend optimiert. Die Eignung des Elsbett-Motors zum Betrieb mit Pflanzenöl ist demonstriert und seine Vorteile hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs und Wirkungsgrades sind bekannt. Daß die Biokraftstoffe dennoch nur einen geringen Anteil am Kraftstoffmarkt haben, ist in erster Linie auf ihre mangelnde ökonomische Wettbewerbsfähigkeit zurückzuführen.

Rapsöl, Biodiesel und Bioethanol sind, nach Gutschrift der produktionsunabhängigen Flächenstilllegungsprämie und vor Steuern, je Energieeinheit zwei- bis dreimal teurer als fossile Kraftstoffe. Der Kostenunterschied ist für den Endverbraucher jedoch nicht mehr erkennbar, da reine Pflanzenkraftstoffe in Deutschland zeit- und mengenmäßig unbegrenzt von der Mineralölsteuer befreit sind und deshalb gegenwärtig einen annähernde Preisgleichheit zwischen dem Tankstellenabgabepreis für Mineralöldiesel und Biodiesel besteht. Dies gilt allerdings nicht für Bioethanol und ETBE, die in bestehenden Fahrzeugmotoren nur als Mischkomponente oder Additiv zusammen mit Ottokraftstoffen auf Mineralölbasis eingesetzt werden können und folglich nicht von der Mineralölsteuer befreit sind. In Frankreich und in den USA, wo der biogene Anteil von Mischkraftstoffen ebenfalls steuerbegünstigt ist, wird dagegen neben biodieselhaltigem (5-30 %) Mineralöldiesel auch Benzin mit 5-15 % Bioethanol bzw. ETBE eingesetzt.

Die steuerrechtliche Ungleichbehandlung von reinen und mit fossilen Kraftstoffen vermischten Biokraftstoffen hat neben technischen und wirtschaftlichen Faktoren dazu geführt, daß in Deutschland überwiegend Biodiesel in Dieselmotoren mit modifizierten Kraftstoffleitungen und Tanks eingesetzt wird. Die inländischen Kapazitäten zur Biodieselproduktion sind inzwischen auf 90.000 t/a ausgebaut und das Distributionsnetz auf über 700 Biodiesel-Zapfsäulen ausgedehnt worden. Seit kurzem gibt es auch eine DIN-Norm für Biodiesel, die eine gleichbleibende Kraftstoffqualität garantiert. Zudem erteilen zunehmend mehr Fahrzeughersteller Biodiesel-Freigaben für neue Fahrzeugmodelle.

Die Markteinführung von Biodiesel kommt dennoch nur langsam voran: Biodiesel-Raps wird trotz Gewährung der vollständigen Flächenstilllegungsprämie nur auf ca. 13 % der Stilllegungsfläche angebaut. Aufgrund der von 10 % auf

IX. Fazit und Ausblick

5 % verringerten Flächenstilllegungsquote bedeutet daß, das 1997 in Deutschland nur noch ca. 70.000 ha Biodiesel-Raps und damit nicht einmal halb soviel wie 1996 angebaut wurden. Ein weiterer Engpaß stellt der Biodieselabsatz dar. Die Biodieselproduktion lag 1996 mit 50.000 t um das drei- bis vierfache höher als der inländische Biodieselabsatz.

Eine raschere Markteinführung wäre durch die Erzeugung von Dieselkraftstoff aus fossilem Rohöl vermischt mit Rapsöl oder durch die Vermischung fossiler und biogener Kraftstoffe in Mineralö Raffinerien möglich. Die gemeinsame Vermarktung von Mischkraftstoffen über bestehende Verteilungssysteme würde logistische, wirtschaftliche und sogar einige technische Vorteile mit sich bringen. So würde beispielsweise schwefelarmer Mineralöldiesel durch die Beimischung von Biodiesel seine Schmierfähigkeit zurückerlangen. Die Oktanzahl bleifreier Ottokraftstoffe könnte durch den Zusatz von Bioethanol oder ETBE erhöht werden. Diesen Vorteilen stehen die relativ schlechte biologische Abbaubarkeit von Mischkraftstoffen und der Verlust der Steuerbefreiung für die zugemischten Pflanzenkraftstoffe als wesentliche Nachteile gegenüber.

Die Einsatzbedingungen für Biokraftstoffe können durch produktionstechnische Fortschritte nur bedingt verbessert werden, da die Erzeugung von pflanzlichen Rohstoffen sowie die Produktion und die Verwendung von Biokraftstoffen bereits technisch gut erforscht, entwickelt und demonstriert ist. Es besteht deshalb wenig Hoffnung, daß in absehbarer Zeit nennenswerte Kostensenkungen durch züchterische, pflanzenbauliche und produktionstechnische Fortschritte realisiert werden könnten.

Auch ein Einsatz von Altfetten bzw. -ölen und anderen pflanzlichen Rest- und Abfallstoffen kann nur bedingt dazu beitragen, die Kosten der Biokraftstoffbereitstellung zu senken. Gereinigtes pflanzenbürtiges Altöl ist zwar etwas preiswerter als Rapsöl, jedoch herrscht noch Unklarheit darüber, welche Anforderungen an die Qualität der Altfette, die Verfahrenstechnik und an die Additive zu stellen sind, um einen wintertauglichen Altfettsäuremethylester herzustellen. Auch dürfte es zu einem preissteigernden Wettbewerb um pflanzliche Altfette und -öle, deren inländisches Aufkommen einer Biodieselmenge von mehr als 500.000 ha Raps entspricht, kommen, da diese bislang als Futtermittelkomponente oder als gewinnbringendes Substrat in landwirtschaftlichen Co-Fermentationsanlagen eingesetzt werden.

Mit einer signifikanten und anhaltenden Verringerung der Kostendifferenz durch einen Anstieg der Preise für fossile Energieträger ist in den nächsten 10-15 Jahren kaum zu rechnen. Es gibt gegenwärtig wenig Anzeichen dafür, daß das gegenwärtige Preisband von 0,17-0,23 DM/l Rohöl mittelfristig deut-

IX. Fazit und Ausblick

lich und dauerhaft überschritten werden könnte. Biokraftstoffe werden deshalb auch in den nächsten Jahren staatliche Finanzhilfen, beispielsweise in Form von Steuernachlässen, benötigen. Die Bandbreite der Steuervergünstigungen reicht gegenwärtig von 0,25 DM/l Bioethanol in den USA über 0,62 DM/l Biodiesel in Deutschland bis hin zu 0,76 DM/l Biodiesel bzw. 1,10 DM/l Bioethanol für ein allerdings begrenztes Kontingent an Biokraftstoffen in Frankreich.

Die inländischen Steuermindereinnahmen als Folge des Einsatzes von steuerbefreitem Biodiesel lagen 1996 bei rd. 36 Mio. DM. Hinzu kommen noch die entgangenen Einnahmen durch das verringerte Mehrwertsteueraufkommen beim Verkauf von Biodiesel ohne Mineralölsteuer. Steuermindereinnahmen als Folge des Mineralölsteuerverzichts bei Biokraftstoffen können gesellschaftspolitisch erwünscht und vertretbar sein, wenn sie mit positiven volkswirtschaftlichen und ökologischen Effekten verbunden sind, die nicht über Marktmechanismen bewirkt werden.

Zu den positiven Wirkungen gehört, daß die Biokraftstoffproduktion zu einem, wenn auch nur wenig ins Gewicht fallenden Anstieg der Agrarproduktion führt. Der Biodiesel-Rapsanbau ist gegenwärtig die mit Abstand bedeutendste Produktionsalternative zur Flächenstillegung. Die Auswirkungen des Biodieselsatzes auf das Einkommen der Landwirte und die Beschäftigungslage im ländlichen Raum sind jedoch bescheiden. Mangels ökonomischer Vorteile wird derzeit der überwiegende Teil der Stilllegungsfläche nicht produktiv genutzt. Dies gilt jedoch nicht für flächenarme Veredlungsbetriebe, da hier die mit dem Rapsanbau verbundenen Möglichkeiten zur Gülleverwertung betriebswirtschaftliche Vorteile bringen.

Was die Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt im ländlichen Raum anbelangt, so würden bei einer Ausdehnung der inländischen Biokraftstoffproduktion entsprechend einem Anbauumfang von 1 Million ha Raps zwischen 16.000 und 24.000 Arbeitsplätze erhalten bzw. neu geschaffen werden. Bei dieser Abschätzung ist jedoch zu berücksichtigen, daß bei einer Steigerung der Biodieselnachfrage durch weitergehende finanzielle Anreize nicht zwangsweise mit einer spürbaren Verbesserung der Beschäftigungssituation zu rechnen ist. Denn auch Biodiesel, der auf der Basis importierter Pflanzenöle erzeugt wird, kommt in den Genuß der Steuerbefreiung. Es besteht deshalb die Gefahr, daß die entgangenen Steuereinnahmen nicht der inländischen Landwirtschaft und Biokraftstoffproduktion zugute kommen, sondern ins Ausland abfließen.

Unter den gegenwärtigen agrarpolitischen Rahmenbedingungen sind die Vorteile von Biodiesel weniger auf betriebs- und volkswirtschaftlicher Ebene, sondern vielmehr im Bereich der Umwelt zu suchen. Hier zeigt sich, daß die

IX. Fazit und Ausblick

Biodiesel-Rapserzeugung sowohl mit einigen deutlichen ökologischen Vorteilen, aber auch einigen Nachteilen verbunden ist. Die Rapserzeugung unterscheidet sich nicht grundsätzlich vom Rapsanbau zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion. Der Einsatz an Dünge- und Pflanzenschutzmitteln ist beim Anbau von Biodiesel-Raps sogar tendenziell etwa geringer. Dies ist darauf zurückzuführen, daß es einerseits eine ertragsunabhängige Flächenprämie gibt und andererseits der Erzeugerpreis für Biodiesel-Raps geringer ist als für Nahrungsrap. Erst bei einer deutlich höheren Nachfrage nach Biodiesel und einem erheblich größeren Anbauumfang als gegenwärtig würde es ökologisch bedenklich werden, weil Raps dann auch auf weniger geeigneten Standorten angebaut würde und es zu Fruchtfolgeverengungen käme. Verglichen mit einer begrüneten Flächenstillegung sind die Auswirkungen auf die Qualität der Grund- und Oberflächengewässer und des Bodens dagegen bereits heute ungünstiger.

Mit der Nutzung biogener Kraftstoffe ist die Hoffnung verbunden, das Ausmaß verkehrsbedingter Umweltbelastungen insbesondere in Ballungsgebieten und in Bereichen, die besonders sensibel gegenüber anthropogenen Beeinträchtigungen sind, zu verringern. Auch bei der Substitution von Mineralöldiesel ergeben sich, wenn man die Abgaszusammensetzung von Biodiesel und Mineralöldiesel vergleicht, Vor- und Nachteile. Die Vorteile von Biodiesel liegen im höheren Sauerstoffanteil und bei den niedrigen Schwefel-, Kohlenmonoxid-, Kohlenwasserstoff- und Partikelemissionen. Durch den Einsatz von Oxidationskatalysatoren verringern sich die Unterschiede bei den CO-, HC- und Partikelemissionen in Diesel- und Biodieselabgasen. Aufgrund der temperaturabhängigen und störungsanfälligen Reduktionsleistung von Katalysatoren bleiben jedoch leichte Vorteile erhalten.

Den genannten Vorteilen stehen Nachteile insbesondere bei den Stickoxidemissionen gegenüber. Die NO_x-Emissionen von Biokraftstoffen und Maßnahmen zu ihrer Verringerung werden zukünftig größere Bedeutung erlangen, da erwartet wird, daß der Anteil verkehrsbedingter NO_x-Emissionen bis zum Jahr 2020 auf über 70 % bezogen auf die gesamten NO_x-Emissionen in Deutschland ansteigt.

Unbestrittene Pluspunkte von Biodiesel sind sein Beitrag zur Verringerung des Verbrauchs an fossilen Rohstoffen und der Freisetzung an zusätzlichem Kohlendioxid, dem wichtigsten Treibhausgas. Durch den Anbau von 1 Million ha Raps könnten jährlich rd. 5 % des inländischen Dieserverbrauchs substituiert und die CO₂-Emissionen um 0,2-0,5 % (bezogen auf die 1995 in Deutschland freigesetzten CO₂-Emissionen) verringert werden. Hierbei ist jedoch zu bedenken, daß die Reduzierung der CO₂-Emissionen pro substituierter fossiler Ener-

IX. Fazit und Ausblick

gieeinheit deutlich weniger positiv ist als bei der energetischen Nutzung von Festbrennstoffen aus Pflanzen. Auch könnte durch den Anbau von holzigen oder grasartigen Energiepflanzen pro Flächeneinheit deutlich mehr CO₂ gebunden und mehr fossile Energie ersetzt werden.

Nach ökonomischen Rationalitätskriterien sollten vorrangig diejenigen Reduktionsmaßnahmen ergriffen werden, die den größten Beitrag zur CO₂-Entlastung bringen und dies möglichst kosteneffizient tun. Technische Maßnahmen zur CO₂-Minderung im Verkehrsbereich kosten etwa 190 bis 330 DM/t CO₂. Die Kosten der CO₂-Minderung durch den Einsatz von Biodiesel liegen unter Berücksichtigung der produktionsneutralen Flächenstilllegungsprämie zwischen 330 und 380 DM/t CO₂. Ohne diese Gutschrift würden die CO₂-Minderungskosten von Biodiesel bei 730 bis 770 DM/t CO₂ und die von Bioethanol über 1.000 DM/t CO₂ liegen. Die Ausdehnung des Einsatzes von Biokraftstoffen anstelle fossiler Kraftstoffe ist folglich ein vergleichsweise teurer Weg, um einen rasch realisierbaren Beitrag zur Verringerung der CO₂-Emissionen des Straßenverkehrs zu leisten.

Es darf allerdings nicht vergessen werden, daß die Bewertung der CO₂-Vermeidungskosten maßgeblich von der Höhe des angestrebten Reduktionszieles und vom zeitlichen Rahmen der CO₂-Verringerung abhängt. Wenn das CO₂-Reduktionsziel bescheiden bleibt, reicht es aus, wenn die kostengünstigen Maßnahmen zur CO₂-Verringerung (z.B. Maßnahmen zur Wärmedämmung) ergriffen werden. Wenn jedoch innerhalb einer relativ kurzen Zeitspanne eine signifikante Reduzierung der CO₂-Emissionen erreicht werden soll, müssen auch weniger kostengünstige Minderungswege beschritten werden.

Angesichts der begrenzten inländischen Produktionsmöglichkeiten und der hohen Produktionskosten sollte Biodiesel bevorzugt in den Bereichen zum Einsatz kommen, in denen er den größten ökologischen Nutzen bringt. Ein verstärkter Einsatz auf Wasserwegen und Binnengewässern sollte in Erwägung gezogen werden. Vorteilhaft wäre hierbei insbesondere die geringere Wassergefährdung und die bessere biologische Abbaubarkeit von Biodiesel im Vergleich zum Schiffsdiesel auf Mineralölbasis. Der Einsatz von Biodiesel in der gewerblichen Binnenschifffahrt ist derzeit jedoch besonders unwirtschaftlich, da die dort eingesetzten Mineralölkraftstoffe aufgrund bestehender Regelungen von der Mineralölsteuer befreit sind und der Transport billiger Massengüter besonders sensibel reagiert gegenüber steigenden Kraftstoffpreisen. Ähnlich ungünstig ist die Situation beim Einsatz von Biokraftstoffen in der Landwirtschaft, die über die Gasölbeihilfe einen Teil der Mineralölsteuer auf Dieselkraftstoff erstattet bekommt.

IX. Fazit und Ausblick

Der gegenwärtige Engpaß bei der Nutzung von Biodiesel als Dieselmotorkraftstoffersatz liegt wie die Ausführungen gezeigt haben in erster Linie in der Anwendung. Die Begrenzung der Steuerbefreiung auf reine Pflanzenkraftstoffe wirkt wie ein Flaschenhals, der nur langsam durch die Ausdehnung des Distributionsnetzes oder durch höhere Preise für fossile Kraftstoffe, beispielsweise durch Erhöhung der Mineralölsteuern, geweitet werden kann. Die gemeinsame Nutzung biogener und fossiler Kraftstoffe wäre mit logistischen, technischen und wirtschaftlichen Vorteilen verknüpft, die eine raschere Markterschließung ermöglichen würden, als dies mit reinem Biodiesel möglich ist.

Eine Erweiterung der Steuerbefreiung für Pflanzenkraftstoffe auch auf den biogenen Anteil in Mischkraftstoffen kann jedoch zu rasch anwachsenden Steuermindereinnahmen führen, sofern die Steuerbefreiung nicht auf ein festgelegtes Kontingent begrenzt wird. Auch kann aufgrund des Diskriminierungsverbotes nicht garantiert werden, daß die entgangenen Steuereinnahmen auch mit einer entsprechenden inländischen Biokraftstoffproduktion verbunden wären.

Mit einem stärkeren Anstieg der Steuermindereinnahmen aufgrund einer weitergehenden Steuerbefreiung muß insbesondere dann gerechnet werden, wenn außerdem bestehende agrarpolitische Markthemmnisse abgebaut werden. Zu diesen gehört zum einen die Kopplung des Anbaus nachwachsender Rohstoffe an die Flächenstilllegung, die wiederum vom Angebots- und Nachfrageverhältnis für Nahrungs- und Futtermittel auf dem Weltmarkt abhängt. Die jährliche Neufestlegung des Umfangs an stillgelegter Fläche führt zu stark schwankenden Mengen bei der Bereitstellung von Raps zur Biodieselproduktion. Zum anderen ist nach den Regelungen des Blair-House-Abkommens die Verwertung der bei der Ölpflanzenerzeugung auf Stilllegungsflächen anfallenden Ölschrote als Futtermittel in der EU auf 1 Million Tonnen Sojamehläquivalente pro Jahr begrenzt. Eine Verwertung des Rapsschrots außerhalb des Futtermittelbereichs, zum Beispiel als Brennstoff oder Dünger, wäre mit deutlich geringeren Erlösen und höheren Biodieselpreisen verbunden und würde die Wirtschaftlichkeit der Biodieselproduktion weiter verschlechtern.

Abschließend kann festgehalten werden, daß den steigenden Steuermindereinnahmen eines zunehmenden Biodieseleinsatzes auf der Basis einer weitergehenden Förderung eher bescheidene Beiträge zur Umweltentlastung, Arbeitsplatzschaffung und Einkommenssicherung in der Landwirtschaft gegenüberstehen würden. Es ist ein vergleichsweise teurer Weg, die CO₂-Emissionen des Straßenverkehrs durch eine Ausdehnung des Einsatzes von Biokraftstoffen anstelle fossiler Kraftstoffe verringern zu wollen. Es wird deshalb zur Zurückhaltung bei der möglichen Ausweitung von Fördermaßnahmen im Bereich Bio-

IX. Fazit und Ausblick

diesel und anderer Kraftstoffe aus Pflanzen geraten. Bemühungen zur Lockerung oder Aufhebung des Blair-House-Abkommens erscheinen unabhängig von der Verwendung des auf stillgelegten Flächen angebauten Rapses empfehlenswert. Die Ölsaatenproduktion für Nichtnahrungszwecke könnte dazu beitragen, den geringen Selbstversorgungsgrad an pflanzlichen Eiweißfuttermitteln in der EU zu erhöhen und deren starke Abhängigkeit von einigen wenigen Sojaproduzenten zu verringern.

Literatur

- ABSATZFÖRDERUNGSFONDS (Hg.) (1994): Die Produktion von Biokraftstoffen in Frankreich. Materialien zu Wettbewerbsfragen der deutschen Landwirtschaft Nr. 450-94-101, 27.04.1994, Absatzförderungsfonds der deutschen Land- und Ernährungswirtschaft, Bonn
- AGRA-EUROPE (1997a): Rapszüchter "verhalten optimistisch". In: Heft 8, 24.02.97, Länderberichte S. 14-15
- AGRA-EUROPE (1997b): Wettbewerbsfähigkeit von Öl- und Proteinpflanzen in der EU stärken. In: Heft 24, 16.06.97, Europa-Nachrichten S. 7-12
- AGRA-EUROPE (1997c): Hersteller und Vermarkter von Biodiesel erwarten Absatzsteigerung. In: Heft 5, 03.02.97, Länderberichte S. 39
- AGRA-EUROPE (1997d): Italien muß Biodiesel-Förderung ändern. In: Heft 10, 10.03.97, Europa-Nachrichten S. 8-9
- AGRA-EUROPE (1997e): Brüsseler Initiativen zur Energiepolitik. In: Heft 11, 17.03.97, Europa-Nachrichten S. 1-2
- AGRA-EUROPE (1997f): Washington erwartet sinkende Sojapreise. In: Heft 26, 30.06.97, Markt+Meinung S. 1-3
- AGRA-EUROPE (1997g): Anhebung der Stilllegungsrate vorhergesagt. In: Heft 3, 20.01.97, Länderberichte S. 40-41
- AGRA-EUROPE (1997h): Sojabohnenpreise kräftig unter Druck. In: Heft 27, 07.07.97, Markt+Meinung S. 9
- AGRA-EUROPE (1997i): Biomasse als erneuerbare Energiequelle verstärkt nutzen. In: Heft 13, 01.04.97, Sonderbeilage S. 1-12
- ANONYMUS (1997j): Volkswirtschaftliche Effekte der Biodiesel-Produktion. In: Heft 10, 10.03.1997, Kurzmeldungen S. 25
- ANGGRAINI, A., KRAUSE, R., LÖHRLEIN, H.-P. (1997): Altöle und -fette verbrennen. Wiederverwertung von nativen Ölen und Fetten im energetisch-technischen Bereich. In: Landtechnik 3, S. 140-141
- BALDAUF, W., BALFANZ, U. (1994): Verarbeitung von Pflanzenöl zu Kraftstoffen in Mineralöl-Raffinerieprozessen. In: VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hg.): Pflanzenöle als Kraftstoffe für Fahrzeugmotoren und Blockheizkraftwerke. VDI-Berichte 1126, S. 153-169
- BATCHELOR, S., NIELSEN, K.V., PEDERSEN, J.B. (1996): Bioethanol as fuel. In: Murphy, D.P.L., Bramm A., Walker, K.C. (eds.): Energy from crops. Semundo Limited, Great Abington, Cambridge, S. 141-174

- BAUR, C., KIM, B., JENKINS, P.E., CHO, Y.-S. (1990): Performance analysis of Si engine with ethyl tertiary butyl ether (ETBE) as a blending component in motor gasoline and comparison with other blending components. In: Nelson, P.A., Schertz, W.W., Till, R.H. (ed.): Proceedings of the 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Vol. 4. American Institute of Chemical Engineers, New York, S. 337-342
- BERTRAM, H.-J. (1993): Rapsanbau auf Stilllegungsflächen. In: Raps, Heft 1, S. 152-155
- BIGNON, J. (1996): The life cycle of ETBE. In: Joanneum Research 1996, S. 115-128
- BLE (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung) (Hg.) (1997): Auswertung der Antragsunterlagen (Anbauverträge) für Nachwachsende Rohstoffe aus verschiedenen Jahren (1993-1997). Frankfurt
- BMF (Bundesministerium der Finanzen) (Hg.) (1995): Bericht der Bundesregierung über die Entwicklung der Finanzhilfen des Bundes und der Steuervergünstigungen für die Jahre 1993 bis 1996 (Fünfzehnter Subventionsbericht). Bonn
- BML (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten) (Hg.) (1995): Bericht des Bundes und der Länder über Nachwachsende Rohstoffe 1995. Schriftenreihe des BML, Reihe A: Angewandte Wissenschaften, Sonderheft, Münster-Hiltrup
- BML (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten) (Hg.) (1997a): Die europäische Agrarreform. Pflanzlicher Bereich. Flankierende Maßnahmen. Bonn
- BML (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten) (Hg.) (1997b): Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland. Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup
- BMU (Bundesministerium für Umwelt) (Hg.) (1997): Zweiter Bericht der Regierung der Bundesrepublik Deutschland nach dem Rahmenübereinkommen der vereinten Nationen über Klimaveränderungen (2. Nationalbericht). In: Umwelt Nr. 5, Sonderteil, Bonn
- BULL, S.R. (1994): Renewable alternative fuels: Alcohol production from lignocellulosic biomass. In: Renewable Energy 5, S. 799-806
- BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN (Hg.) (1995): Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 1995. Stuttgart
- BUNDESRAT (1996): Entwurf eines Gesetzes zur Kennzeichnung und steuerlichen Förderung von umweltfreundlichen Kraftstoffen (UmKraftG). Gesetzentwurf des Bundesrates. Drucksache 491/96, Bonn
- CONNEMANN, J. (1996): Rapsöl oder Biodiesel? Manuskript zum gleichnamigen Vortrag bei der DBV-Veranstaltung "Energie aus Biomasse", 27.-29.11.1996, Bonn-Röttgen
- DALAMAGES, E. (1996): The European Union's policy on liquid biofuels. In: Joanneum Research 1996, S. 11-17

Literatur

- DECKER, G., BEYERSDORF, J., SCHULZE, J., WEGENER, R., WEIDMANN, K. (1996): Das Ozonbildungspotential unterschiedlicher Fahrzeug- und Kraftstoffkonzepte. In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 98, S. 280-289
- DEUTSCHE SHELL AG (1996): Fakten und Argumente. Aktuelle Themen aus der Mineralölwirtschaft. Ausgabe August 1996, Hamburg
- DIE BRANNTWEINWIRTSCHAFT (1997): Frankreich: Mineralölkonzern Total verstärkt die ETBE-Herstellung. In: 1. Juliheft, S. 214-215
- EIA (Energy Information Administration) (Hg.) (1997): International energy outlook
- EUROPEAN COMMISSION (1994): Biofuels. Application of biologically derived products as fuels or additives in combustion engines. European Commission, Directorate-General XII, Science, Research, Development, Nr. EUR 15647 EN, Brüssel
- FAHL, U., LÄGE, E., RÜFFLER, W., SCHAUMANN, P., BÖHRINGER, C., KRÜGER, R., VOSS, A. (1995): Emissionsminderung von energiebedingten klimarelevanten Spurengasen in der Bundesrepublik Deutschland und in Baden-Württemberg. Forschungsbericht des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Band 21, Universität Stuttgart
- FAZ (Frankfurter Allgemeine Zeitung) (1997a): In Europa häufen sich die Agrarüberschüsse an. Prognosen der EU-Kommission. In: Ausgabe Nr. 94, 23.04.1997, S. 17
- FAZ (Frankfurter Allgemeine Zeitung) (1997b): Wie aus Altfetten Biodiesel entstehen kann. In: Ausgabe Nr. 215, 16.07.1997, S. 27
- FNR (Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe) (1997): Persönliche Mitteilungen von Herrn Mann über den Anbau nachwachsender Rohstoffe auf stillgelegten Flächen. Gülzow
- FORUM FÜR ZUKUNFTSENERGIEN (1997): Langfristige Aspekte der Energieversorgung. Folgerungen und Kriterien für die Energiepolitik heute. Bonn
- FRIEDT, W., LÜHS, W. (1996): Die Zukunft der transgenen Pflanzen für europäische Entwicklungen. In: Eierdanz, H. (Hg.): Perspektiven nachwachsender Rohstoffe in der Chemie. Weinheim, S. 11-21
- FRITSCH, U.R., LEUCHTNER, J., MATTHES, F.C., RAUSCH, L., SIMON, K.H. (1995): Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) - Version 2.1. Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten. Darmstadt
- FUTTERMITTELHERSTELLUNGS-VERORDNUNG (1993): Verordnung über Betriebe, die Tierkörper, Tierkörperenteile und Erzeugnisse tierischer Herkunft zu Futtermitteln oder zu pharmazeutischen oder technischen Erzeugnissen verarbeiten. BGBl. I, S. 737
- GAOUYER, J.-P. (1996): What has happened in Europe in the biofuel domain over the last two years? In: Joanneum Research, S. 37-43

- GERSTER, H.J. (1996): IKARUS: Erste Ergebnisse einer CO₂-Reduktionsstrategie für das Jahr 2005. Potentiale und gesamtwirtschaftliche Mehrkosten für die alten Bundesländer. In: *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 46 (4), S. 200-207
- GET (Gesellschaft für Entwicklungstechnologie mbH) (1996): Biodiesel. Herstellung von Methylester aus Pflanzenölen in Europa als Alternative zur Verwendung von fossilem Dieselkraftstoff. Umweltauswirkungen, Wirtschaftlichkeit, Energiebilanz. Union zur Förderung der Öl- und Proteinpflanzen (UFOP) e.V., Bonn
- GÖLLNER, D. (1996): Salatölduft statt Dieselruß. In: *Umwelt - Kommunale Ökologische Briefe* Nr. 8-9, S. 24-25
- GREGG, D.J., SADDLER, J.N. (1996): The IEA network "Biotechnology for the conversion of lignocellulosis" biomass-to-ethanol process development. In: *Joanneum Research* 1996, S. 55-61
- HARIS, J., LEININGER, M., LENDLE, M. (1996): Landwirte fordern bessere und stabile Rahmenbedingungen für den Anbau nachwachsender Rohstoffe. Ergebnisse von Untersuchungen in Baden-Württemberg. *Berichte über Landwirtschaft* 74, S. 514-526
- HARTMANN, H., STREHLER, A. (1995): Die Stellung der Biomasse. Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrup
- HEINEKING, W. (1994): Biodiesel im Speditionsbetrieb. In: C.A.R.M.E.N. (Hg.): *Biodiesel und Pflanzenöle im praktischen Einsatz*. Tagungsband, S. 2-6
- HEINISCH, R., BARZ, M. (1997): Technologie- und Verfahrensentwicklung zur thermischen Nutzung von Rapsextraktionsschrot (RES). 1. Zwischenbericht, Nr. FZK: 95NR104-F, Institut für Energietechnik, TU Berlin
- HERKSTRÖTER, C. (1996): Perspektiven für Erdöl und Erdgas im 21. Jahrhundert. Vortrag des Präsidenten der Royal Dutch/Shell Gruppe. In: *Aktuelle Wirtschaftsanalysen*, Heft 27, Hamburg
- HERY, B. (1996): Optimum utilisation of reformulated oxygenated fuels. In: *Joanneum Research* 1996, S. 105-107
- HILLER, K. (1997): Future world oil supplies – possibilities and constraints. In: *Erdöl Erdgas Kohle* 113/9, S. 349-352
- HOLMANN, C., FERGUSSON, M., MITCHEL, C. (1991): Road transport and air pollution. Rees Jeffreys Road Fund. *Transport and Society*. Discussion Paper 25
- HOLZMANN, U. (1997): Politisches Signal aus Brüssel. In: *Umwelt - Kommunale Ökologische Briefe* Nr. 8, S. 15
- HOUGHTON-ALICO, D. (1982): Alcohol fuels. Policies, production and potential. Boulder, Colorado
- IEA (International Energy Agency) (1994): *Biofuels*. Organisation for economic co-operation and development (Hg.), Paris
- INSTITUT WALLON (ed.) (1994): *Directory of experiments using biofuels in Europe*. Namur

Literatur

- JOANNEUM RESEARCH (1996): Proceedings of the 2nd European Motor Biofuels Forum, 22.-25.09.1996, Graz
- JÖRDENS, R. (1994): Handels- und agrarpolitische Rahmenbedingungen für den Einsatz von Pflanzenöl im Energiebereich. In: VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hg.): Pflanzenöle als Kraftstoffe für Fahrzeugmotoren und Blockheizkraftwerke. VDI-Berichte 1126, S. 23-31
- JURISCH, C., MEYER-PITTROFF, R. (1995): Verwertung von pflanzlichem Altfett als biogener Kraftstoff. In: C.A.R.M.E.N. (Hg): 3. Symposium im Kreislauf der Natur. Tagungsband, Würzburg
- KAISER, E.-A., HEINEMEYER, O. (1996): Temporal changes in N₂O-losses from two arable soils. In: Plant and Soil 181, S. 57-63
- KALTSCHMITT, M., WIESE, A. (Hg.) (1993): Erneuerbare Energieträger in Deutschland - Potentiale und Kosten. Heidelberg
- KALTSCHMITT, M. (1996): Stand und Perspektiven regenerativer Energien in Deutschland - Potentiale, Nutzung, Kosten, Umweltaspekte. In: VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hg.): Regenerative Energieanlagen erfolgreich planen und betreiben. VDI-Berichte 1236, S. 7-45
- KALTSCHMITT, M., REINHARDT, G.A. (Hg.) (1997): Nachwachsende Energieträger. Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung. Wiesbaden
- KERSTIN, R., VON DER PÜTTEN, N. (1996): Entsorgung von Altfetten in Hessen. Hessische Landesanstalt für Umwelt, Heft 22, Wiesbaden
- KLEINHANSS, W., KERCKOW, B., SCHRADER, H. (1992): Kosten-Nutzenanalyse: Rapsöl im Nichtnahrungsbereich. Schriftenreihe des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Reihe A: Angewandte Wissenschaft, Heft 410, Münster-Hiltrup
- KNOFLACHER, M.H., TUSCHL, P., SCHNEEBERGER, W. (1991): Ökonomische und ökologische Bewertung von alternativen Treibstoffen. Österreichisches Forschungszentrum Seibersdorf, Bericht OEFZS-A-2095, Seibersdorf
- KÖNIG, W. (1994): Bisherige Erfahrungen mit Naturdiesel. In: C.A.R.M.E.N. (Hg.): Biodiesel und Pflanzenöle im praktischen Einsatz. Tagungsband, S. 14-16
- KÖRBITZ, W. (1996): Produktion biogener Kraftstoffe in der EU. Vortrag bei der Konferenz der Deutschen Landjugend-Akademie "Energie aus Biomasse", 27.-29.11.96, Bonn
- KÖRBITZ, W., WALKER, K.C. (1996): Biodiesel - Production and exploitation. In: Murphy, D.P.L., Bramm A., Walker, K.C.: Energy from crops. Semundo Limited, Great Abington, Cambridge, S. 111-141
- KOSSMEHL, S.-O. (1996): Biodiesel als Kraftstoff für Volkswagen-Dieselmotoren. In: Joanneum Research 1996, S. 217-225

- KRAHL, J., MUNACK, A., BAHADIR, M. (1994): Emissionen bei der Verwendung von Rapsöl, RME oder Dieselkraftstoff sowie vergleichende Abschätzung ihrer Umweltwirkungen - eine Übersicht. In: *Landbauforschung Völkenrode* 44 (2), S. 182-196
- KRAHL, J., VELLGUTH, G. (1994): Übersicht von Arbeiten zum Einsatz von Rapsöl und Rapsölmethylester als Kraftstoffe unter Berücksichtigung umweltrelevanter Auswirkungen. Bericht aus dem Institut für Biosystemtechnik, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig-Völkenrode
- KRAUSE, R. (1997): Persönliche Informationen von Prof. Dr. Krause, FG Agrartechnik, Fachbereich Landwirtschaft, Universität Gesamthochschule Kassel
- KROLL, N., JÄGER, T. (1994): Anbau von Industrieraps - Eine Alternative zur Flächenstilllegung. In: *Hessenbauer*, Heft 28
- LAB (Landwirtschaftliche Arbeitsgruppe Biokraftstoffe) (1996): Jahresbericht 1995. Bonn
- MAACK, H.-H., PAETSCH, U., STRENZIOK, R. (1997): Nutzung von Biodiesel auf Booten. Unveröffentlichtes Manuskript, Institut für Allgemeinen Maschinenbau, Universität Rostock
- MAURER, K. (1993): Tessol-Rapsölgemisch als Motorenkraftstoff. In: C.A.R.M.E.N. (Hg.): 2. Symposium "Im Kreislauf der Natur-Naturstoffe für die moderne Gesellschaft". Tagungsband, S. 123-147
- MAY, H., DIETRICH, W., HATTINGEN, U., BIRKNER, C. (1994): Emissionsverhalten pflanzenölbetriebener Dieselmotoren. In: VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hg.): *Pflanzenöle als Kraftstoffe für Fahrzeugmotoren und Blockheizkraftwerke*. VDI-Berichte 1126, S. 183-204
- MITTELBACH, M. (1996): The high flexibility of small scale biodiesel plants production of methyl esters in high quality using various feedstocks. In: *Joanneum Research 1996*, S. 183-188
- MUNACK, A., KRAHL, J., VELLGUTH, G. (1993): RME-Einsatz in Traktoren - eine Bewertung. In: *Landtechnik*, Heft 8/9, S. 196
- NEUHAUS, A.-K., DIERSCHKE, G. (1995): Bericht zur Biodieseleinführung durch die Hessische Erzeugergemeinschaft für die Produktion von Ölpflanzen zur industriellen Verwertung. Gießen
- NYLUND, N.-O., SIPILÄ, K. (1996): The Finnish experience with oxygenated gasoline. In: *Joanneum Research 1996*, S. 107-115
- OECD (Organisation for economic co-operation and development) (1997a): *The Environmental Effects of Agricultural Land Diversion Schemes*. Paris
- OECD (Organisation for economic co-operation and development) (1997b): *Consumption, Tax, Trends*. Paris

Literatur

- OECD (Organisation for economic co-operation and development) (1997c): Enhancing the market deployment of energy technology - A survey of eight technologies. Paris
- PIEPER, H.J., SENN, T. (1991): Die Produktion von Alkohol aus Kartoffeln nach dem Hohenheimer Dispergier-Maischverfahren mit Schlempe-Recycling. Handbuch für die Brennerei- und Alkoholwirtschaft 38, S. 285-324
- PIEPER, H.J., SENN, T. (1992): Energiebedarf beim Hohenheimer Dispergier-Maischverfahren mit Schlemperecycling im Vergleich zum Hochdruck-Dämpfverfahren - Übersicht über praktische Betriebsergebnisse bei der Verarbeitung von Kartoffeln, Mais und Weizen. Unveröffentlichtes Manuskript
- POITRAT, E. (1996): Bioethanol: State of the art in Europe with classical crops. In: Joanneum Research 1996, S. 61-69
- PROGNOS AG (Hg.) (1996): Energiereport II. Die Energiemärkte Deutschlands im zusammenwachsenden Europa-Perspektiven bis zum Jahr 2020. Stuttgart
- RIBAROV, D. (1993): Handbuch für RME-Anwender. RME-GmbH, Bruck-Leitha
- RODINGER, W. (1997): Persönliche Informationen zur Umweltverträglichkeit von RME im Vergleich zu Dieselkraftstoff. Institut für Wassergüte, Wien
- RÜHL, G., BRAMM, A. (1996): Alternativen der chemischen Erzeugung von Zuckern. In: Eierdanz, H. (Hg.) (1996): Perspektiven nachwachsender Rohstoffe in der Chemie. Weinheim, S. 218-223
- RUPALLA, R. (1996): Abschied von Träumen. In: DLG-Mitteilungen, Heft 8, S. 60-61
- SAM, T. (1996): Use of biofuels under real world engine operation. In: Joanneum Research 1996, S. 225-232
- SCHÄFER, A. (1996): Biodiesel as an alternative fuel for commercial vehicle engines. In: Joanneum Research 1996, S. 233-245
- SCHÄFER, V. (1995): Effekte von Aufwuchsbedingungen und Anbauverfahren auf die Eignung von Korngut verschiedener Getreidebestände als Rohstoff für die Bioethanolproduktion. Dissertation, Institut für Pflanzenbau und Grünland und Institut für Lebensmitteltechnologie, Universität Hohenheim
- SCHEFSKI, A., KLEINHANSS, W. (1995): Betriebswirtschaftliche Perspektiven der Food- und Non-food-Rapsrerzeugung in Deutschland. Arbeitsbericht 4. Institut für Betriebswirtschaft, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig-Völkenrode
- SCHEFSKI, A., KRATZSCH, G. (1994): Wettbewerbsfähigkeit des Rapsanbaues nach Umsetzung der EG-Agrarreform. Eine Untersuchung unterschiedlicher Standorte des Bundeslandes Sachsen-Anhalt. In: Landbauforschung Völkenrode 44 (1), S. 105-118

- SCHIAMANN, D. (1995): Freisetzungsversuche mit gentechnisch veränderten Pflanzen. In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hg.): Workshop "Biotechnologie und Gentechnik in der Industriepflanzenzüchtung". Gülzower Fachgespräche, 30.11.1995, S. 54-58
- SCHITTENHEIM, S. (1993): Ertragspotential, Qualitätsaspekte und Verwendungsmöglichkeiten heimischer Pflanzenarten für die Stärkeproduktion. In: Landbauforschung Völkenrode 43 (1), S. 1-4
- SCHLIEPHAKE, D., HACKER, C.-M. (1994): Verbundprojekt zur Ermittlung der landwirtschaftlichen, pozeßtechnischen und verfahrenstechnischen Rahmenbedingungen für die Verwendung von Rapsöl und seiner Umwandlungsprodukte als Kraftstoff. Schlußbericht zum BML-Forschungsvorhaben "Verbundprojekt Kraftstoff aus Raps" 0310026A, Velbert
- SCHÖNE-WARNEFELD, A. (1997): Die Struktur der deutschen Ölmühlenindustrie. In: DLG-Mitteilungen 3/97, Sonderdruck
- STADLER, K. (1995): Wie kanzerogen sind RME-Emissionen? In: Landtechnik, Heft 5, S. 266
- TAB (Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag) (Hg.) (1996): Verbrennung von Biomasse zur Wärme- und Stromgewinnung. Arbeitsbericht Nr. 41 (Autoren: Rösch, Ch., Wintzer, D., Leible, L., Nieke, E.), Bonn
- TU MÜNCHEN (1992): Verwendung von Rapsöl zu Motorenkraftstoff und als Heizölersatz in technischer und umweltbezogener Hinsicht. Kurzfassung. Landtechnische Berichte aus Praxis und Forschung, Gelbes Heft 40, Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, München
- TÜV Bayern (1988): E5 - Ottokraftstoff. Auswirkungen von unverbleitem Ottokraftstoff mit 5 Vol.-% Ethanol auf das Abgasverhalten, den Kraftstoffverbrauch, die Motorleistung, das Betriebsverhalten und die Verträglichkeit auf Bauteile des Kraftstoffversorgungssystem in Fahrzeugen mit Ottokraftstoffen. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Gelbes Heft 29, München
- UBA (Umweltbundesamt) (1997): Daten zur Umwelt. Der Zustand der Umwelt in Deutschland Ausgabe 1997. Berlin
- UFOP (Union zur Förderung von Öl- und Proteinpflanzen e.V.) (1997): Ufop-Jahresbericht 1996. Bonn
- UHLMANN, F. (1997): Die Märkte für Getreide, Ölsaaten und Kartoffeln. In: Agrarwirtschaft 46/1, S. 15-32
- VELLGUTH, G. (1987): Emissionen bei Verwendung alternativer Kraftstoffe in Schlepper-Dieselmotoren. In: Grundlagen Landtechnik 37, S. 207-213
- WALKER, K.C. (1996): Developments in feedstocks available for biodiesel production. In: Joanneum Research, S. 165-171

Literatur

WIDMANN, B.A. (1994): Gewinnung und Reinigung von Pflanzenölen in dezentralen Anlagen - Einflußfaktoren auf die Produktqualität und den Produktionsprozeß. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Gelbes Heft 51, München

WINTZER, D., FÜRNISS, B., KLEIN-VIELHAUER, S., LEIBLE, L., NIEKE, E., RÖSCH, CH., TANGEN, H. (1993): Technikfolgenabschätzung zum Thema Nachwachsende Rohstoffe. Schriftenreihe des BML, Reihe A: Angewandte Wissenschaften, Sonderheft, Münster-Hiltrup

WOLFENSBERGER, U., DINKEL, F. (1997): Beurteilung nachwachsender Rohstoffe in der Schweiz in den Jahren 1993-1996. Vergleichende Betrachtung von Produkten aus ausgewählten NWR und entsprechenden konventionellen Produkten bezüglich Umweltwirkungen und Wirtschaftlichkeit. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, Tänikon, Schweiz

WÖRGETTER, M. (1996): Standardisation of biodiesel and approval of diesel engines. In: Joanneum Research 1996, S. 263-269

ZACHÄUS (1997): Persönliche Mitteilung von Herrn Zachäus, Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, Frankfurt

ZMP-Bilanz (1997): Getreide, Ölsaaten, Futtermittel 1997. Bonn, S. 132-135

Anhang

1. Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Ölsaaterzeugung auf inländischen Stilllegungsflächen	13
Tab. 2: Anbau nachwachsender Rohstoffe in Deutschland	14
Tab. 3: Gründe gegen eine Ausdehnung des Rapsanbaus	16
Tab. 4: Anbau von Pflanzen zur Ethanolerzeugung in Frankreich	17
Tab. 5: Ernteerträge beim Anbau von Winterraps in Deutschland	19
Tab. 6: Flächenstilllegungsprämien in EU-Mitgliedsländern.....	21
Tab. 7: Kosten des Rapsanbaus auf Stilllegungsflächen.....	23
Tab. 8: Technische Kennwerte für Dieselkraftstoff, Rapsöl und Biodiesel	30
Tab. 9: Technische Werte von Diesel- und Rapsöl-Dieselmotoren.....	31
Tab. 10: Bioethanolerträge verschiedener Rohstoffpflanzen	35
Tab. 11: Vergleich von Rapsextraktionsschrot mit anderen Brennstoffen.....	41
Tab. 12: Zusammensetzung und Futterwert verschiedener Schlempen	43
Tab. 13: Eigenschaften von Benzin, Methanol, Bioethanol, ETBE und MTBE	52
Tab. 14: Bereitstellungskosten von Pflanzenölkraftstoffen	54
Tab. 15: Perspektiven für die Kosten von Biodiesel und Bioethanol	55
Tab. 16: Preisvergleich Biokraftstoffe mit Mineralölkraftstoffen.....	56
Tab. 17: Abgasemissionen beim Rapsöl- bzw. Biodieselbetrieb.....	65
Tab. 18: Europäische Grenzwertstufen für limitierte Abgasbestandteile	65
Tab. 19: Vergleich umweltrelevanter Kenngrößen von MTBE und ETBE	65
Tab. 20: Netto-Energieerträge von Biokraftstoffen.....	65
Tab. 21: CO ₂ -Minderungspotentiale (netto) von Biokraftstoffen	65
Tab. 22: Vergleich der Toxizität von Mineralöl- und Biodiesel auf wasserge- bundene Leitorganismen	65
Tab. 23: Biodiesel-Produktionskapazitäten in Europa	65
Tab. 24: Produktion von Biokraftstoffen.....	65
Tab. 25: Fossile Energiereserven	65
Tab. 26: Entwicklung der Mineralölsteuersätze in Deutschland.....	65
Tab. 27: Anforderungen an die Kraftstoffqualitäten	65

2. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Welterzeugung an pflanzlichen Ölen	11
Abb. 2: Anteil von Ölschrotten und anderen Komponenten im Mischfutter.....	40
Abb. 3: Vergleich der Mineralölsteuern auf bleifreiem Benzin, Diesel und Heizöl in verschiedenen Ländern Europas	57
Abb. 4: CO ₂ -Minderungskosten	65

3. Abkürzungen

BaP	Benzo(a)pyren
BTX	Benzol, Toluol, Xylol
CO	Kohlenmonoxid
DK	Dieselmotorkraftstoff
DKR	Rapsölstämmige Dieselmotorkraftstoffkomponenten
EU	Europäische Union
ETBE	Durch Veresterung von Bioethanol mit Isobutylen hergestellter Ethyl-Tertiärbutyl-Ether
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe in Gülzow
GMO	Genetisch veränderte Mikroorganismen
HC	Kohlenwasserstoffe
NO_x	Stickoxide
NR	Nachwachsende Rohstoffe
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
RES	Rapsextraktionsschrot
RFG	Reformulated gasolines (reformulierte oder verbesserte Kraftstoffe)
RME	Rapsölfettsäuremethylester



Büro für Technikfolgen-Abschätzung
beim Deutschen Bundestag

Rheinweg 121 53129 Bonn
Telefon: 02 28 / 23 35 83
Telefax: 02 28 / 23 37 55
e-mail: buero@tab.fzk.de
Internet: www.tab.fzk.de
ISSN-Print 2364-2599
ISSN-Internet 2364-2602