

Jörg Adolf, Horst Fehrenbach, Uwe Fritsche, Dorothea Liebig

## Welche Rolle können Biokraftstoffe im Verkehrssektor spielen?

**Biokraftstoffe galten einst als grüner Hoffnungsträger für eine nachhaltigere Automobilität. Mit verstärktem Einsatz gerieten sie jedoch zunehmend in die Kritik. Dennoch bleiben Biokraftstoffe die wichtigste Alternative zu fossilen Kraftstoffen. Die Autoren diskutieren die Rolle der Biokraftstoffe im Verkehrssektor heute und in der Zukunft.**

Während die Energiewende bei Strom und Wärme voranschreitet, stützt sich der Verkehr noch weitgehend auf einen einzigen flüssigen Energieträger: Erdöl. Obgleich viel über automobilen Zukunftstechnologien berichtet wird, sind Biokraftstoffe hier bislang die einzige nennenswerte erneuerbare Energiequelle. Nachdem es zu Beginn der 2000er Jahre in Deutschland einen breiten Konsens über Biokraftstoffe gab, erfolgte hierzulande – aber auch andernorts – ein rascher Ausbau des Biokraftstoffeinsatzes. Biokraftstoffe sollten die Energieversorgung des Verkehrs auf eine breitere Basis stellen, der Landwirtschaft neue Einkommensmöglichkeiten bieten und zum Klimaschutz beitragen. Parallel zu Biokraftstoffen wurde Bioenergie vermehrt zur Strom- und Wärmeerzeugung eingesetzt. Da sich Erzeugung und Verbrauch regional immer weniger deckten, stieg der Welthandel mit Biomasse bzw. Bioenergie ebenfalls deutlich an.

Der steigende Biomassebedarf zeigte jedoch zunehmend negative Effekte, die vor allem den Biokraftstoffen zugerechnet wurden. Ihr einst grünes Image wurde mehr und mehr in Frage gestellt. Hinzu kamen mit der Einführung des Kraftstoffes Super E10 Zweifel an der technischen Verträglichkeit von Biokraftstoffen. Aufgrund steigender Agrarpreise richtete sich die Aufmerksamkeit im vergangenen Jahr, z.B. in der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung oder auch durch neue Biokraftstoffstudien, erneut auf die Rolle von Biokraftstoffen. Im Oktober 2012 veröffentlichte schließlich die EU-Kommission einen Entwurf für eine geänderte europäische Biokraftstoffstrategie.<sup>1</sup>

Die aktuellen Diskussionen um Antriebe und Kraftstoffe der Zukunft, insbesondere aber um Super E10, gaben Anlass, die Rolle von Biokraftstoffen im künftigen Kraftstoffmix zu untersuchen sowie die Kritik an Biokraftstoffen auf ihre Berechtigung hin zu überprüfen:<sup>2</sup> Wo stehen Biokraftstoffe heute? Welche Nutzungskonkurrenzen gibt es für sie? Können Biokraftstoffe überhaupt nachhaltig sein? Wo steht die nächste Generation fortgeschrittener Biokraftstoffe? Welche nachhaltigen Potenziale haben sie? Und inwieweit sind Biokraftstoffe technisch überhaupt mit Fahrzeug- bzw. Verkehrstechnik verträglich?

### Biokraftstoffe heute

Die wichtigste alternative Endenergie für den Straßenverkehr in Deutschland sind mit gut 120 Petajoule bzw. 3,7

<sup>1</sup> Vgl. European Commission: Proposal for a Directive 98/70/EC relating to the quality of petrol and diesel fuels and amending Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources, COM(2012)595 final, Brüssel, 17.10.2012.

<sup>2</sup> Vgl. Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien, Institut für Energie- und Umweltforschung: Nach Super E10: Welche Rolle für Biokraftstoffe? Fakten, Trends und Perspektiven, Shell Deutschland (Hrsg.), Darmstadt, Heidelberg, Hamburg 2012.

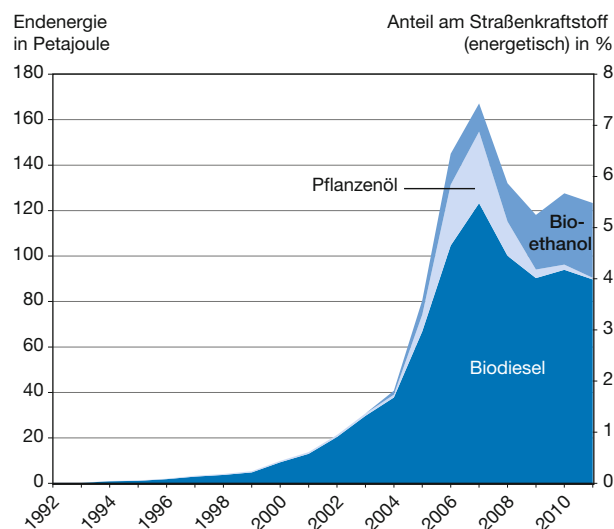
**Dr. Jörg Adolf** ist Chefvolkswirt bei Shell Deutschland in Hamburg.

**Horst Fehrenbach**, Dipl.-Biologe, ist Mitarbeiter am Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU) in Heidelberg.

**Uwe Fritsche** ist wissenschaftlicher Leiter am Internationalen Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien (IINAS) in Darmstadt.

**Dr. Dorothea Liebig** ist Kraftstoffexpertin bei Shell Deutschland in Hamburg.

Abbildung 1  
Biokraftstoffverbrauch in Deutschland



Quelle: eigene Darstellung nach Daten aus dem Bundesumweltministerium: Erneuerbare Energien in Zahlen, Berlin 2012.

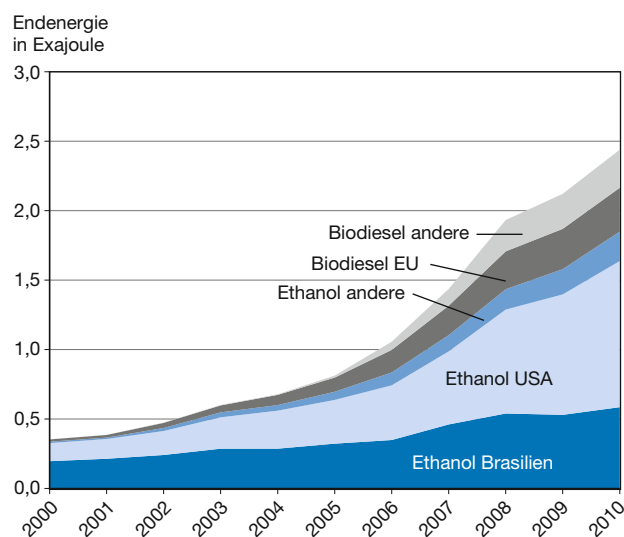
Mio. t und einem Marktanteil von ca. 5½% Biokraftstoffe.<sup>3</sup> Nachdem durch Steuerbefreiung ab 2004 ein Boom für reinen Biodiesel entfacht wurde, erreichten Biokraftstoffe 2007 einen Marktanteil von 7,4%. Zum 1.1.2007 wurde eine Beimischungsverpflichtung eingeführt und die steuerliche Förderung abgeschmolzen.<sup>4</sup> Das Biokraftstoffziel für Deutschland 2020 wurde 2008 auf 12 bis 15 Energieprozent festgesetzt. Seit Anfang 2010 sind Kraftstoffen in Deutschland 6,25 Energieprozent Bioanteile beizumischen. Parallel zur Quotengesetzgebung wurden die technischen Voraussetzungen für höhere Biobeimischungen geschaffen. Seit Anfang 2009 dürfen dem Diesel bis zu 7 Volumenprozent Biodiesel (B7), seit Beginn 2011 dem Benzin bis zu 10 Volumenprozent Bioethanol beigemischt werden (E10).

Aufgrund des höheren Dieserverbrauchs und der früheren Markteinführung von Biodiesel liegt dessen Einsatz höher als der von Bioethanol. Benzin mit Bioethanol gibt es erst seit 2006/2007 als E5-Kraftstoff sowie im Verlauf von 2011 als E10. Biogene Reinkraftstoffe wie Biodiesel (B100), reines Pflanzenöl oder auch (fast) reines Bioethanol (E85) spielen – auch aus fahrzeugtechnischen Gründen – kaum eine Rolle (vgl. Abbildung 1). Der in Deutschland eingesetzte Biodiesel stammt zu 80% aus Rapsöl und zu 14% aus Abfallöl. Für Bioethanol war Weizen der

3 Vgl. Bundesumweltministerium (BMU): Erneuerbare Energien in Zahlen, Berlin 2012, S. 14.

4 Vgl. J. Adolf: Boom in der Biokraftstoffbranche – eine nachhaltige Entwicklung, in: Wirtschaftsdienst, 86. Jg. (2006), H. 12, S. 778-785.

Abbildung 2  
Weltweite Biokraftstoffherstellung 2000 bis 2010



Quelle: eigene Darstellung nach Internationale Energieagentur: Technology Roadmap – Biofuels for Transport, Paris 2011.

wichtigste Rohstoff (32%), gefolgt von europäischem Mais (28%) und Zuckerrübe (25%). Der größte Teil der verwendeten Biomasse stammt aus Deutschland (70%); die größten Importeure sind die USA und Frankreich.<sup>5</sup>

Seit 2000 hat sich der Einsatz von Biokraftstoffen in der EU mehr als verzehnfacht. Bei nachlassender Marktdynamik erreichten Biokraftstoffe zuletzt (2011) ein Niveau von etwa 13 Mio. t, was rund 580 Petajoule oder einem Marktanteil von 4,5% entspricht. Für alle EU-Mitgliedstaaten gilt seit 2009 gemäß Erneuerbare-Energien-Richtlinie 2009/28/EG das Ziel, den Anteil erneuerbarer Energieträger, darunter hauptsächlich Biokraftstoffe, im Verkehr auf 10% anzuheben. Deutschland war 2011 die führende Erzeugung in der EU, gefolgt von Frankreich, Spanien, Italien, Großbritannien und Polen.

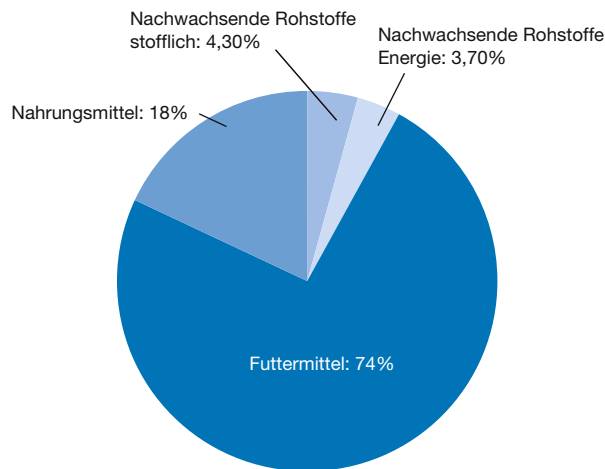
Auch weltweit ist der Einsatz von Biokraftstoffen stark angestiegen; sie stellen heute rund 2½% des Endenergiebedarfs im Verkehrssektor – das sind ca. 2,5 von 100 Exajoules. Dabei liegt – anders als in Europa – Bioethanol deutlich vor Biodiesel (vgl. Abbildung 2). Die führenden Biokraftstoffverwender sind Brasilien und die USA. Außer der EU, den USA und Brasilien haben 20 weitere Staaten verbindliche Quoten und weitere sechs Länder Beimischungsziele gesetzlich verabschiedet.<sup>6</sup>

5 Vgl. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE): Evaluations- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2011, Bonn 2012, S. 30-43.

6 Vgl. Internationale Energieagentur (IEA): Technology Roadmap – Biofuels for Transport, Paris 2011.

**Abbildung 3**  
**Verwendung weltweiter Agrarprodukte im Jahr 2008**

Gesamtbiomasse ca. 10 Mrd. t



Anmerkung: Zuordnung der Biomasse nach primärem Abbauziel (Hauptprodukt); die Mengenangaben beinhalten die jeweiligen Hauptrohstoffe sowie die Nebenprodukte, auch wenn deren Nutzung in eine andere Kategorie fallen kann.

Quelle: A. Raschka, M. Carus: Stoffliche Nutzung von Biomasse – Basisdaten für Deutschland, Europa und die Welt. Erster Teilbericht zum F+E-Projekt „Ökologische Innovationspolitik – mehr Ressourceneffizienz und Klimaschutz durch nachhaltige stoffliche Nutzung von Biomasse“, F+E Projekt aus dem Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Hürth 2012.

### Nutzungskonkurrenzen

Der wachsende Einsatz von Biomasse in praktisch allen Lebensbereichen führt dazu, dass der Druck auf Ressourcen wie Land und Wasser weiter steigt. Hieraus resultiert eine Reihe von Nutzungskonkurrenzen.

Die im öffentlichen Bewusstsein wohl präsenteste Nutzungskonkurrenz ist diejenige zwischen Nahrungsmitteln und Biokraftstoffen. Einen Höhepunkt erreichte die Debatte „Tank versus Teller“ 2008. Die Verknappung von Mais durch Trockenheitsperioden in den USA führte 2011 auf den Weltmärkten erneut zu stark ansteigenden Preisen. In der Folge wurde intensiv über den Einfluss von Biokraftstoffen auf die Preisbildung für Nahrungs- und Futtermittel und mögliche Konsequenzen für die Ernährungssicherung gestritten. Tatsächlich sind die Erzeugerpreise der Landwirtschaft seit 2005 weitgehend parallel zum Ölpreis angestiegen. Der Grund liegt einerseits auf der Inputseite: unter anderem der Einsatz energieintensiven Düngers und der Dieseleinsatz in der mechanisierten Landwirtschaft.<sup>7</sup> Weiterhin kann die durch Biokraftstoffe

7 Vgl. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): Impacts of Bioenergy on Food Security – Guidance for Assessment and Response at National and Project Levels, Rom 2012.

verursachte zusätzliche Rohstoffnachfrage zu Preissteigerungen bei Agrarprodukten beitragen.<sup>8</sup> Auf der anderen Seite bieten höhere Preise für Agrarprodukte finanzielle Anreize zur Steigerung der landwirtschaftlichen Produktion in Entwicklungsländern.<sup>9</sup> Am Ende greift die Betrachtung allein der Nutzungskonkurrenz von „Tank versus Teller“ zu kurz. Sie muss um den Aspekt der Futtermittel bzw. „Trog“ erweitert werden. Weltweit werden fast drei Viertel der landwirtschaftlichen Biomasse für Futtermittel eingesetzt, erst dann folgen Nahrungsmittel; die Energie- und Stoffnutzung machen demgegenüber nur jeweils etwa 4% aus (vgl. Abbildung 3).<sup>10</sup>

Eine weitere Nutzungskonkurrenz ergibt sich zwischen dem Flächenbedarf energetischer Biomasse und Artenvielfalt (Biodiversität). Der Flächenverzehr durch die Ausdehnung von Siedlungs- und Verkehrsflächen, Erosion und Überweidung sowie durch negative Folgen des Klimawandels auf die landwirtschaftliche Produktion führt zu steigendem Nutzungsdruck auf Böden und Artenvielfalt. Allein in Deutschland werden Energiepflanzen auf 2,1 Mio. von 17 Mio. ha landwirtschaftlicher Nutzfläche angebaut; bis 2050 könnte diese Fläche auf bis zu 4 Mio. ha ansteigen.<sup>11</sup>

Biomasse für die stoffliche Nutzung spielt heute noch eine untergeordnete Rolle. Von besonderem Interesse für die Stoffnutzung ist feste Biomasse (Holz). Doch gerade um feste Biomasse konkurrieren immer mehr Verwendungen: Holz für Strom und Wärme, Mitverbrennung in Kohlekraftwerken (Co-Firing), Biokunststoffe, neue Generationen von Biokraftstoffen. Weitere Nutzungskonkurrenzen bestehen unter anderem bei der Verwendung biogener Energieträger für Strom und Wärme – künftige Biokraftstoffe der zweiten Generation setzen verstärkt auf Lignozellulose und damit ebenfalls auf Holz. Zum anderen müssen Biokraftstoffe innerhalb des Verkehrssektors verteilt werden.

Nutzungskonkurrenzen sind nicht grundsätzlich schlecht. Sie können Anreize setzen, knappe Ressourcen effizienter zu bewirtschaften. Da der Preismechanismus bei

8 Vgl. Institute for European Environmental Policy: EU biofuel use and agricultural commodity prices: a review of the evidence base, London 2012.

9 Vgl. FAO, a.a.O.

10 Vgl. A. Raschka, M. Carus: Stoffliche Nutzung von Biomasse – Basisdaten für Deutschland, Europa und die Welt. Erster Teilbericht zum F+E-Projekt „Ökologische Innovationspolitik – mehr Ressourceneffizienz und Klimaschutz durch nachhaltige stoffliche Nutzung von Biomasse“, F+E Projekt aus dem Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Hürth 2012.

11 Vgl. J. Nitsch et al.: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der Erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, Ingenieurbüro für neue Energien, im Auftrag des BMU, Stuttgart 2012.

Biomasse und Agrarprodukten jedoch nicht reibungslos funktioniert, ergeben sich aus den Nutzungskonkurrenzen oftmals Verteilungsprobleme, die anders gelöst werden müssen. Nutzungskonkurrenzen können durch die Erschließung neuer Rohstoffe und Flächen – z.B. Reststoffe und degradierte Flächen – entspannt werden. Artenreiche Flächen wären aus der landwirtschaftlichen Produktion herauszunehmen, landwirtschaftliche Praktiken zu verbessern. Auf der Verwendungsseite spielen Ernährungsgewohnheiten, insbesondere der Fleischkonsum eine wichtige Rolle; denn die Fleisch- und Milchproduktion beansprucht heute weltweit rund 92% der landwirtschaftlichen Fläche.<sup>12</sup> Die Konkurrenz zwischen stofflicher und energetischer Nutzung kann durch das Konzept der Kaskadennutzung vermieden werden.<sup>13</sup> Feste Biomasse wird zuerst stofflich genutzt; anschließend erfolgt eine energetische „Nachnutzung“. Um die Nutzungskonkurrenz Tank versus Strom und Wärme zu entschärfen, müsste der Einsatz von Biokraftstoffen priorisiert werden. Im Verkehrsbereich könnten Biokraftstoffe dort eingesetzt werden, wo sie den höchsten strategischen Wert haben.<sup>14</sup>

### Nachhaltigkeit und Zertifizierung

In Folge der Diskussion um Nutzungskonkurrenzen, Nebeneffekte und Nachhaltigkeit von Biokraftstoffen wurden erstmals konkrete, teilweise verbindliche Nachhaltigkeitskriterien für einen ganzen Wirtschaftssektor und eine Produktgruppe festgelegt: Im deutschen Biokraftstoffquotengesetz (2006) wurden Anforderungen an die Nachhaltigkeit quotenfähiger Biokraftstoffe gestellt. In der EU definieren seit 2009 die Erneuerbare-Energien-Richtlinie 2009/28/EG und die Kraftstoffqualitäts-Richtlinie 2009/30/EG verbindliche Nachhaltigkeitsanforderungen für Biokraftstoffe und flüssige Biobrennstoffe. Außerdem hat sich die Global Bioenergy Partnership (GBEP) – eine Initiative der G20 – auf Nachhaltigkeitsindikatoren für Bioenergie verständigt.<sup>15</sup>

Die Nachhaltigkeit von Biokraftstoffen wird durch Zertifizierung nachgewiesen. Auf Nachhaltigkeit ausgerichtete Zertifizierungssysteme gibt es schon lange (z.B. für Agrarprodukte oder Holz). Die EU-Kommission hat für Biokraftstoffe inzwischen 13 Zertifizierungssysteme (Stand Janu-

ar 2013) anerkannt. Alle Nachhaltigkeitsstandards für Bioenergie beinhalten eine Mindesteinsparung an Treibhausgasen. Die Emissionsreduktionen sind gegenüber einem fossilen Referenzwert über den gesamten Lebensweg zu erbringen. In der EU müssen Biokraftstoffe heute schon Mindesteinsparungen von 35% erbringen; diese erhöhen sich ab 2017 bzw. 2018 auf 50% bzw. 60%. Die 2011 in Deutschland eingesetzten Biokraftstoffe lagen im Durchschnitt etwa 50% unter dem fossilen Referenzwert.<sup>16</sup>

Ein seit Jahren zentrales Thema der Biokraftstoff-Treibhausgasbilanz ist die indirekte Landnutzungsänderung (ILUC). ILUC-Effekte entstehen, wenn auf Flächen zum Biomasseanbau eine vorherige andere Nutzung (z.B. Nahrungs- oder Futtermittelanbau) verdrängt wird. Da diese Verdrängungseffekte über den globalen Handel auch außerhalb einer Region oder eines Landes auftreten können, ist eine Zuordnung zum Biomasseanbau auf bestimmten Flächen nur durch eine Modellbetrachtung möglich. Die Modelle streuen bei der Zuweisung von ILUC-Effekten beträchtlich.<sup>17</sup> In der Regel ergeben sich signifikante zusätzliche Emissionen. Die Optionen, ILUC-Effekte zu berücksichtigen reichen von strikteren Einsparkriterien für alle Biokraftstoffe, spezifische Aufschläge je nach Art und Herkunft der Biomasse oder Systemen zur Honorierung von ILUC-Vermeidung.<sup>18</sup> Weitgehende Einigkeit besteht jedoch darin, dass Bioenergeträger mit geringem ILUC-Risiko bevorzugt werden sollten. Die EU-Kommission hat jüngst vorgeschlagen, die ILUC-Problematik vorläufig weiter zu beobachten und erst 2017 eine Entscheidung zu fällen.<sup>19</sup>

Zum Schutz der Biodiversität dürften nachhaltig eingestufte Biokraftstoffe in der EU nicht aus Rohstoffen hergestellt werden, die auf Flächen mit hohem Wert („Hot Spots“) hinsichtlich der biologischen Vielfalt gewonnen werden. Weitere Schutzgüter sind der Boden- und Gewässerschutz sowie soziale Mindeststandards. Bislang bestehen hier hauptsächlich nur Berichtspflichten. Soziale Anforderungen gelten zudem als nicht mit den Regeln der Welthandelsorganisation (WTO) kompatibel.<sup>20</sup>

Die Nachweisführung von Nachhaltigkeitsstandards für Biokraftstoffe ist ein Fortschritt zur Eindämmung nicht nachhaltiger Erzeugnisse auf dem europäischen Markt. Die Risiken nicht-nachhaltiger Biokraftstoffe werden sich im globalen Maßstab jedoch erst eindämmen lassen,

12 Vgl. A. Raschka, M. Carus, a.a.O.

13 Vgl. U. Fritsche et al.: Nachhaltige Bioenergie: Zusammenfassender Endbericht zum Vorhaben „Entwicklung von Strategien und Nachhaltigkeitsstandards zur Zertifizierung von Biomasse für den internationalen Handel“, Öko-Institut in Kooperation mit IFEU, im Auftrag des Umweltbundesamtes, Darmstadt, Heidelberg 2010.

14 Vgl. B. Kampman et al.: Background Report to the Position Paper of IEA RETD and IEA Bioenergy, CE Delft, Oeko-Institut: Better Use of Biomass for Energy (BUBE), Delft, Darmstadt 2010.

15 Vgl. Global Bio-Energy Partnership: The GBEP Sustainability Indicators for Bioenergy, Rom 2011.

16 Vgl. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, a.a.O., S. 42.

17 Vgl. U. Fritsche: Proceedings of the European Parliament ILUC Workshop, 25.1.2012 in Brüssel, Darmstadt 2012.

18 Vgl. Ernst & Young: Biofuels and indirect land use change – The case for mitigation, London 2011.

19 Vgl. European Commission, Amending Directive 98/70/EC ..., a.a.O.

20 Vgl. U. Fritsche et al., Nachhaltige Bioenergie ..., a.a.O.

wenn global gleichwertige Standards – z.B. entlang von Global Bioenergy Partnership (GBEP)- oder ISO-Normen – umgesetzt werden. Längerfristig sind konsistente Nachhaltigkeitsregeln für alle Agrarprodukte bzw. sämtliche Biomasseverwendungen notwendig.<sup>21</sup>

### Biokraftstoffe der Zukunft

Mehr als 99% aller heute produzierten Biokraftstoffe fallen unter die verbreitete Bezeichnung erster Generation. Meist werden Biokraftstoffe zweiter Generation anhand von Rohstoffbasis und Verarbeitungstechnik, manchmal auch nach ihren Qualitätsmerkmalen von bisherigen Biokraftstoffen abgegrenzt. Unter Biokraftstoffen der ersten Generation versteht man Biokraftstoffe, die aus Stärke, Zucker oder Pflanzenölen von eigens dafür angebauten Feldfrüchten gewonnen werden. Der Rohstoff- und Flächenbedarf für Biokraftstoffe der ersten Generation steht damit in Konkurrenz zu anderen Nutzungsmöglichkeiten.<sup>22</sup>

Die zweite Generation von Biokraftstoffen zielt darauf ab, andere Rohstoffe einzusetzen, um zusätzliche Rohstoffpotenziale zu erschließen. Es handelt sich vorwiegend um Lignozellulose, einem Gemisch aus Zellulose, Hemicellulosen und Lignin. Ausgangsmaterial für Lignozellulose können agrarische Reststoffe (z.B. Stroh), Reststoffe aus der Forstwirtschaft, aber auch Anbaubiomasse wie Gräser (z.B. Chinaschilf) oder Holz aus Kurzumtriebsplantagen sein. Manche Biokraftstoffe können allerdings keiner Generation zugeordnet werden so z.B. Biomethan. Biomethan gilt als vielversprechender Biokraftstoff, da es sich durch vergleichsweise hohe Flächenerträge auszeichnet.<sup>23</sup> Daneben existieren weitere weniger ausgereifte Ansätze für neue Biokraftstoffe: Bio-Butanol, ein Alkohol, der dem Benzin näher ist als Ethanol; Dimethylether (DME), ein dem Flüssiggas (LPG) ähnlicher Kraftstoff; Bio-Methanol, als Benzin-Ersatz; sowie Bio-Wasserstoff aus biotechnischen Verfahren mit Bakterien.

Die wichtigsten Biokraftstoffoptionen zweiter Generation sind hydrierte Pflanzenöle, synthetischer Biodiesel aus Fischer-Tropsch-Verfahren und Zellulose-Ethanol. Erstere haben den Vorteil, dass sie weitgehend nahtlos als hochwertige Diesel- und Kerosinsubstitute eingesetzt werden können. In relevanten Mengen kommerziell verfügbar sind bislang jedoch nur hydrierte Pflanzenöle; obgleich die

verwendeten Rohstoffe (noch) der ersten Generation entsprechen.

Für eine breitere Markteinführung von Biokraftstoffen zweiter Generation ist noch viel Entwicklungsarbeit erforderlich. Ihre Kosten, die heute etwa doppelt so hoch sind wie die von Diesel und Benzin, müssen noch deutlich gesenkt werden, um eine nennenswerte Nachfrage zu erreichen.<sup>24</sup> Substanzielle Marktanteile sind daher erst nach 2020 zu erwarten.

Im Konzept der „Bioraffinerie“ soll – ähnlich wie in einer Erdölraffinerie – Biomasse in ein Spektrum stofflicher und energetischer Produkten verarbeitet werden. Bioraffinerien können eine längerfristige Option für nachhaltige Biokraftstoffe sein; allerdings besteht auch hier noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf.<sup>25</sup> Schließlich werden Algen als neue Rohstoffquelle gesehen, daraus erzeugte Biokraftstoffe teilweise als „3. Generation“ bezeichnet; denn für aquatische Biomasse wäre keine Anbaufläche mehr erforderlich. Die energetische Algennutzung befindet sich jedoch noch in einem frühen Stadium der Forschung und Entwicklung; es bedarf noch einer drastischen Verbesserung der Effizienz sowie der Energie- und Wasserbilanz.<sup>26</sup>

### Welche Potenziale haben Biokraftstoffe?

Der wachsende Einsatz von Bioenergie und Biokraftstoffen führt zur Frage, wie viel davon in Zukunft erzeugt und eingesetzt werden kann – in Deutschland, in der EU sowie weltweit:

Verschiedene Studien weisen für Deutschland bis 2030 ein nachhaltiges Potenzial von ca. 1300 Petajoule Bioenergie aus Energiepflanzen sowie ca. 700 Petajoule aus biogenen Abfall- und Reststoffen aus.<sup>27</sup> Dieses Potenzial wäre ohne Nutzungskonkurrenzen verfügbar, wenn zusätzliche Bioenergiepflanzen nur auf frei werdenden Ackerflächen angebaut werden, sich nicht negativ auf die Biodiversität auswirken, etwa 3% vormals intensiv genutzter Agrarflächen unter Naturschutz gestellt werden,

21 Vgl. U. Fritsche: Sustainable Bioenergy: Key Criteria and Indicators, D 4.1 Delivery of the Biomass Futures project funded by IEE, Darmstadt 2012.

22 Vgl. International Energy Agency: Technology Roadmap – Biofuels for Transport, a.a.O.

23 Vgl. Deutsches Biomasseforschungszentrum: Focus on Biomethane – Biomass for Energy; im Auftrag des Bundesumweltministeriums, Leipzig 2012.

24 Vgl. International Energy Agency: Energy Technology Perspectives 2012 – Pathways to a Clean Energy System, Paris 2012.

25 Vgl. K. Arnold et al.: BioCouple – Kopplung der stofflich/energetischen Nutzung von Biomasse – Analyse und Bewertung der Konzepte und der Einbindung in bestehende Bereitstellungs- und Nutzungsszenarien, gefördert vom Bundesumweltministerium, Wuppertal 2011; BMELV, BMBF, BMU, BMWi (Hrsg.): Roadmap Bioraffinerien im Rahmen der Aktionspläne der Bundesregierung zur stofflichen und energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe, Berlin 2012.

26 Vgl. International Energy Agency: Technology Roadmap – Biofuels for Transport, a.a.O.

27 Vgl. U. Fritsche et al.: Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse; gefördert vom Bundesumweltministerium, Darmstadt 2004; J. Nitsch et al., a.a.O.



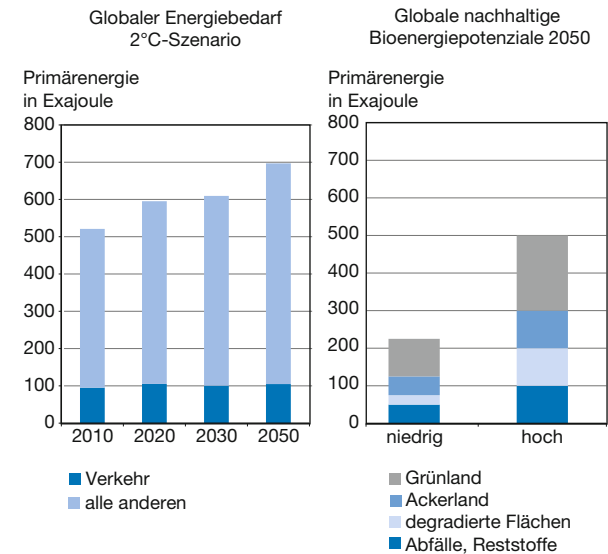
ein Drittel der Nahrungsmittelproduktion im Ökolandbau erfolgt und keine Umwandlung von Grünland stattfindet, sondern nur Grasschnitt genutzt wird. Weiter dürfte Biomasse aus rohstofflicher Nutzung nicht verlagert werden und Deutschland zu 100% Selbstversorger bei Nahrungsmitteln bleiben.

Diesem nachhaltigen Bioenergie-Potenzial von 2000 Petajoule steht ein gesamter Primärenergieverbrauch von heute rund 14 000 Petajoule gegenüber. Bis 2030 könnten Biokraftstoffe je nach Szenario 250 bis 500 Petajoule bzw. 15% bis 35% des Energiebedarfs im Verkehr decken. Und bis 2050 könnten gar gut 70% eines um 40% bis 50% reduzierten Endenergieverbrauchs aller Verkehrsträger in Deutschland durch heimische Biokraftstoffe gedeckt werden.<sup>28</sup>

Auch für die EU gibt es eine Reihe von Studien zu nachhaltigen Bioenergiepotenzialen.<sup>29</sup> Danach könnten aus den rund 15 Exajoule an biogener Primärenergie, die bis 2030 in der EU-27 nachhaltig zur Verfügung stehen, unter Einbeziehung der Bedarfe an Bioenergie für Strom und Wärme rund 2 Exajoule an Biokraftstoffen bereitgestellt werden – etwa viermal so viel wie heute. Dabei handelte es sich allerdings überwiegend um Kraftstoffe der zweiten Generation. Der Primärenergiebedarf der EU27 betrug 2010 rund 74 Exajoule und könnte bei ambitionierter Politik bis 2030 auf unter 60 Exajoule und bis 2050 auf weniger als 50 Exajoule reduziert werden. Entsprechend könnte bei voller Nutzung der Bioenergiepotenziale bis 2030 rund 25% und bis 2050 ca. 30% des Primärenergiebedarfs biogen gedeckt werden. Und Kraftstoffe der zweiten Generation könnten bei begrenzten Importen große Anteile des Kraftstoffbedarfs im Lkw-, Schiffs- und Flugverkehr übernehmen.<sup>30</sup>

Global existieren robuste nachhaltige Bioenergiepotenziale, die bis 2050 ohne Nutzung landwirtschaftlicher Flächen gewonnen werden können, in einer Bandbreite von

Abbildung 4  
Globaler Energiebedarf und Bioenergiepotenziale bis 2050



Quellen: eigene Darstellung nach International Energy Agency: Energy Technology Perspectives 2012 – Pathways to a Clean Energy System, Paris 2012; O. Edenhofer et al. (Hrsg.): Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, IPCC Working Group III, 2011; U. Fritsche et al.: Nachhaltige Bioenergie: Zusammenfassender Endbericht zum Vorhaben „Entwicklung von Strategien und Nachhaltigkeitsstandards zur Zertifizierung von Biomasse für den internationalen Handel“, Öko-Institut in Kooperation mit IFEU, im Auftrag des Umweltbundesamtes, Darmstadt, Heidelberg 2010.

100 bis 200 Exajoule.<sup>31</sup> Schon die Hälfte eines „niedrigen“ globalen Bioenergiepotenzials reichte aus, um 2050 den gesamten Kraftstoffbedarf zu ersetzen (vgl. Abbildung 4). In ihren ambitionierten Klimaschutz-Zielszenarien erwartet die International Energy Agency, dass sich der Biokraftstoffbedarf bis 2050 gegenüber 2010 verzehnfacht. Dabei würde die erste Generation (Biodiesel und Ethanol) ab 2030 zunehmend durch fortschrittliche Biokraftstoffe (zweiter Generation) abgelöst. Der von der IEA bis 2050 ermittelte globale Biokraftstoffbedarf von rund 30 Exajoule würde 25% bis 50% des global verfügbaren nachhaltigen Bioenergiepotenzials ausschöpfen. Damit wäre auch Bioenergie für die Strom- und Wärmenachfrage verfügbar (vgl. Abbildung 5).<sup>32</sup>

Bisher leisten Biokraftstoffe in Deutschland, in der EU und auch weltweit einen eher kleinen Beitrag zur Energie-

28 Vgl. Deutsches Biomasseforschungszentrum: Analyse zur Erreichung des Mindestziels von 10% Erneuerbare Energien im Verkehrssektor, Leipzig 2010; Deutsche Energieagentur: Ungeliebt, aber unentbehrlich. Bedarf und Produktion von Mineralöl im künftigen Energiemix, Berlin 2011; Prognos, Ökoinstitut: Modell Deutschland – Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken, Berlin 2009.

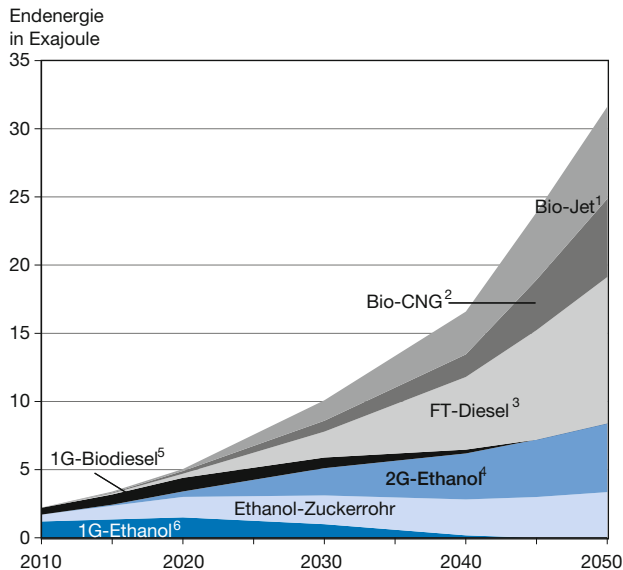
29 Vgl. B. Elbersen et al.: Review of the EU bioenergy potential from a resource efficiency perspective – An update of EEA report Nr. 7/2006, European Environment Agency, Copenhagen 2013; Imperial College et al.: Biomass Futures – Analysing Europe’s Future Bioenergy Needs, collaborative EEU-IEE project carried out by Alterra, CRES, ECN, IC, ICCS, IEEP, IIASA, and Oeko-Institut, London u.a.O., 2012.

30 Vgl. European Commission: White Paper – Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system, COM(2011) 144 final, Brüssel, 28.3.2011; sowie European Commission: A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050, COM(2011) 112/4, Brüssel, 8.3.2011.

31 Vgl. für einen Überblick O. Edenhofer et al. (Hrsg.): Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, IPCC Working Group III, 2011.

32 Vgl. International Energy Agency: Technology Roadmap – Biofuels for Transport, a.a.O.; dies.: Energy Technology Perspectives 2012, a.a.O.; dies.: Technology Roadmap: Bioenergy for Heat and Power, Paris 2012.

**Abbildung 5**  
**Weltweite Biokraftstoffnachfrage bis 2050**



<sup>1</sup> Bio-Jet: Bio-Flugzeugbenzin. <sup>2</sup> Bio-CNG: Bio-Erdgas. <sup>3</sup> FT-Diesel: Dieselherstellung nach der Fischer-Tropsch-Synthese. <sup>4</sup> 2G-Ethanol: Ethanol der zweiten Generation. <sup>5</sup> 1G-Biodiesel: Biodiesel der ersten Generation. <sup>6</sup> 1G-Ethanol: Ethanol der ersten Generation.

Quelle: Internationale Energieagentur: Technology Roadmap – Biofuels for Transport, Paris 2011.

versorgung des Verkehrs. Mittel- bis langfristig bestehen jedoch deutlich größere und robuste nachhaltige Biokraftstoffpotenziale.

### Technische Kompatibilität und Kraftstoffqualitäten

Damit Biokraftstoffe überhaupt einsetzbar sind, dürfen ihre Eigenschaften nicht wesentlich von denjenigen konventioneller Kraftstoffe abweichen. Je nach Kraftstofftyp können sie konventionelle Kraftstoffe vollständig ersetzen (sogenannte „Drop-in Fuels“), teilweise (durch Beimischungen) oder gar nicht ersetzen. Die technischen Einsatzmöglichkeiten von Biokraftstoffen unterscheiden sich je nach Verkehrsträger:

Unter allen Verkehrsträgern ist der Straßenverkehr der größte Anwender von Biokraftstoffen.<sup>33</sup> Benzinmotoren

<sup>33</sup> Die wichtigsten Qualitätsparameter für Kraftstoffe im europäischen Straßenverkehr legt die aktuelle EU-Kraftstoffqualitäten-Richtlinie fest; Richtwerte für Kraftstoffqualitäten in Abhängigkeit von den jeweiligen Marktanforderungen enthält die World Fuel Charta. Vgl. World Fuel Charta Committee: World Fuel Charta, Fourth Edition, 2006; sowie Richtlinie 98/70/EG im Hinblick auf die Spezifikationen für Otto-, Diesel- und Gasölkraftstoffe, in: Amtsblatt der Europäischen Union, L 140/88-113, Brüssel, 5.6.2009.

sind heute für Beimischungen von bis zu 5 Volumenprozent Bioethanol (E5) freigegeben; die meisten Benziner vertragen sogar bis zu 10% (E10). Für höhere Benzin-Alkohol-Gemische als E10 ist die bestehende Ottomotor-Fahrzeugtechnik nicht zugelassen; man spricht daher auch von einer „Blend Wall“. Benzin mit höherem Ethanolgehalt als 10% erfordert spezielle Fahrzeugausrüstungen, wie z.B. bei sogenannten Flexible Fuel Vehicles (FFVs).

Für Dieselmotoren kommen grundsätzlich reine Pflanzenöle, Biodiesel (erste Generation) sowie hydrierte Pflanzenöle und synthetischer Diesel in Frage. Während reines Pflanzenöl mit modernen Dieselantrieben kaum noch kompatibel ist, wird Biodiesel in Deutschland heute fast allen Dieselkraftstoffen beigemischt. Aufgrund seiner technischen Eigenschaften darf Biodiesel fossilem Diesel jedoch nur bis zu 7 Volumenprozent (B7) zugemischt werden. Da modernere Diesel-Pkw keinen reinen Biodiesel mehr vertragen, besteht auch hier eine Blend Wall. Nur synthetischer Biodiesel und hydrierte Pflanzenöle (HVO) können weitgehend nahtlos – als Drop-in Fuels – verwendet werden.

Flugkraftstoffe müssen strenge internationale Qualitätsstandards erfüllen – z.B. bestimmte Kälteeigenschaften haben. Da sich in der kommerziellen Luftfahrt zu Düsen- und Turbopropantrieb keine Alternativen abzeichnen, gilt das besondere Interesse der Luftfahrt biogenen Flugturbinenkraftstoffen. Als alternative Jet-Treibstoffe kommen qualitativ jedoch nur hydrierte Pflanzenöle oder synthetischer Biodiesel in Frage, nicht aber konventionelle Biokraftstoffe der ersten Generation.<sup>34</sup>

In der Seeschifffahrt dominieren Schiffsdieselmotoren, die vorwiegend Bunköle oder Marinediesel einsetzen. Alternative Antriebe und Treibstoffe – wie verflüssigtes Erdgas (LNG) – beschränken sich noch weitgehend auf Nischenanwendungen. Prinzipiell könnten biogene Schiffstreibstoffe helfen, Emissionen zu reduzieren. Doch bislang liegen für Biotreibstoffe in der Seeschifffahrt kaum praktische Erfahrungen vor. Vorläufig ist noch nicht vorgesehen, Biokomponenten beizumischen.<sup>35</sup> In Sachen Biotreibstoffe befindet sich die Seeschifffahrt aber in der Orientierungsphase.

Zwei kleinere Treibstoffmärkte sind die Binnenschifffahrt und der Schienenverkehr. In Binnenschiffen und Diesel-loks kommen handelsübliche Dieselkraftstoffe (gege-

<sup>34</sup> Vgl. Air Transport Action Group: Beginner’s Guide to Aviation Biofuels, Genf 2009; sowie International Air Transport Association: Report on Alternative Fuels 2011, Montreal, Genf 2011.

<sup>35</sup> Vgl. International Organization for Standardization: International Standard ISO 8217, Petroleum Products – Fuel (Class F) – Specifications for Marine fuels, Genf 2012.

benenfalls einschließlich Biobeimischung) zum Einsatz. Biogene Anteile von bis zu 5 Volumenprozent gelten als weitgehend unbedenklich.

Biokraftstoffe können als flüssiger Energieträger konventionelle Kraftstoffe ergänzen bzw. substituieren und haben folglich einen hohen strategischen Wert für den Verkehrssektor. Mittelfristig könnten nachhaltige Biokraftstoffe für Verkehrsträger ohne technische Alternativen ein Zielkraftstoff (Destination Fuel) sein, namentlich im schweren Straßengüterfernverkehr oder der Luftfahrt. Vielfach bestehen für Biokraftstoffe jedoch Beimischungsgrenzen oder gar -verbote. Benötigt werden nahtlos verwendbare Biokraftstoffe. Drop-in Fuels sind jedoch verfahrenstechnisch deutlich aufwändiger als konventionelle Biokraftstoffe. Sie finden sich bislang ausschließlich zu kleinen Teilen im Dieselmotorbereich, nicht aber bei den Ottokraftstoffen.

## Schlussfolgerungen

Biokraftstoffe können eine bedeutende Rolle bei der Energiewende im Verkehrssektor spielen. Aus heutiger Sicht gibt es ein robustes, nachhaltiges Potenzial an Biomasse für energetische bzw. für Verkehrszwecke. Dieses Potenzial muss durch Entspannung von Nutzungskonkurrenzen – z.B. über Nutzungskaskaden und die Entkoppelung der Rohstoffbasis von Nahrungs- und Futtermitteln – bestmöglich eingesetzt werden.

Die Nachhaltigkeit von Biokraftstoffen kann durch einen verbindlichen, kriterien-basierten Zertifizierungsansatz gewährleistet werden. Besondere Bedeutung kommt hierbei einer realen Netto-Treibhausgaseinsparung (einschließlich ILUC-Effekten) sowie dem Schutz der biologischen Vielfalt zu. Die Nachhaltigkeitsregeln müssen – zum einen bei Wasser und Boden, zum anderen bei sozialen Aspekten – weiter optimiert werden. Generell sollten die EU-Nachhaltigkeitskriterien erst auf feste und gasförmige Bioenergien und später auf alle Arten von Biomasse ausgeweitet werden.

Da die Klima- und Ressourceneffizienz von Biokraftstoffen der ersten Generation zu ungünstig ist und ihre Rohstoffbasis mit „wertvolleren“ Nutzungen konkurriert, müssen Biokraftstoffe der ersten Generation mittelfristig durch die der zweiten Generation ersetzt werden. Bis heute ist aber die zweite Generation nicht am Markt verfügbar; für fortgeschrittene Biokraftstoffe wären erhebliche Investitionen sowohl in eine nachhaltige Rohstoffbasis wie auch in moderne Umwandlungsprozesse nötig. Steuerliche Förderung und Anreize reichen bislang aber nicht aus, um etwa die Investitionen in Demonstrations- und erste Serienanlagen, die zur Markteinführung nötige Zwischenstufen wären, zu rechtfertigen. Daher sollte ein technikoffenes, über zehn Jahre laufendes europäisches Markteinführungsprogramm für Zweite-Generation-Biokraftstoffe aufgestellt werden.

Die Verwendung von Bioenergie ist heute auf alle Verbrauchssektoren verteilt. Um ausreichend Biomasse für die relevanten Verkehrsträger (Lkw, Flugzeuge, Schiff) zur Verfügung stellen zu können, müsste die Bioenergieverwendung im Zeitraum von 2020 bis 2030 auf den Verkehrssektor fokussiert und damit in den Bereichen Wärme- und Stromproduktion zurückgefahren werden. Mittelfristig könnte neue oder angepasste Fahrzeug- und Motortechnik, die auch höhere biogene Kraftstoffanteile zulässt, zu einer Integration höherer Biokraftstoffanteile beitragen – so wie zuvor schon bei E5, B5 und B7. Langfristig und mit Blick auf die in den Zielszenarien nach 2020 weiter ansteigenden Biokraftstoffmengen wären Drop-in Fuels wichtig.

Das 10%-Ziel für Erneuerbare Energien im Kraftstoffmarkt bis 2020 gilt gemäß der Erneuerbare Energien-Richtlinie der EU nur dann als angemessen, wenn Biokraftstoffe nachhaltig hergestellt würden und die zweite Generation kommerziell zur Verfügung stünde. Mit Blick auf die Weiterentwicklung der EU-Biokraftstoffstrategie müssen sowohl Ziele als auch Instrumente der europäischen und deutschen Biokraftstoffpolitik regelmäßig überprüft und gegebenenfalls Kurskorrekturen vorgenommen werden.

### Title: *What Role Could Biofuels Play in the Transportation Sector?*

**Abstract:** *Biofuels have been the only alternative fuel which has substantially contributed to supplying transport with energy. Biofuels enjoyed broad support, but now they have come under criticism. In order to obtain answers to the question of what role biofuels could play in the future fuel mix, the following aspects are analysed: competing uses of scarce biomass and biofuels; sustainability of biofuels, standards and certification schemes; types and availability of biofuels; potentials for bioenergy and biofuels; and the technical compatibility of biofuels with vehicles. Finally, preconditions and necessary policy measures for the increased deployment of sustainable biofuels are examined.*

**JEL Classification:** Q56, R49, Y1