

Bericht

des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung (18. Ausschuss) gemäß § 56a der Geschäftsordnung

Technikfolgenabschätzung (TA)

Industrielle stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe

Sachstandsbericht zum Monitoring „Nachwachsende Rohstoffe“

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort	4
Zusammenfassung	5
I. Einleitung	14
II. Begriffe und Untersuchungsrahmen	16
1. Biomasse als nachwachsender Rohstoff	16
2. Untersuchungsrahmen	16
III. Aktuelle stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen . . .	18
1. Stoffliche Nutzung – ein Überblick	18
1.1 Ausgangssituation in Deutschland	19
1.2 Produkte	28
2. Ökologische Aspekte ausgewählter Biomassepfade	32
2.1 Biohydraulik- und Bioschmieröle	33
2.2 Biokunststoffe	36
2.3 Fasermaterialien und -produkte	39
2.4 Zusammenfassende Bewertung	43
IV. Zukünftige stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen	44
1. Herstellung chemischer Grundstoffe – Plattformgedanke	44
2. Bioraffinerien – Grundidee und Aufbau	46
2.1 System der grünen Bioraffinerie (GBR)	47
2.2 System der LCF-Bioraffinerie	48
2.3 System der Getreide-Ganzpflanzen-Bioraffinerie	49

	Seite	
2.4	Das Zwei-Plattformen-Konzept	51
2.5	Unterschiede zu Erdölraffinerien	53
3.	Ökologische Aspekte ausgewählter Bioraffineriesysteme	55
3.1	Übersichtsökobilanz zur grünen Bioraffinerie	56
3.2	Übersichtsökobilanz zur Lignocellulose- und Getreide- (Ganzpflanzen-)Bioraffinerie	60
3.3	Zusammenführung der Ergebnisse der Übersichtsökobilanzen	64
V.	Energetische Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen	66
1.	Bioenergieträger – aktueller Stand der Nutzung	66
2.	Nutzungspotenziale in Deutschland	69
3.	Szenarien für Deutschland	72
4.	Bewertung von Bioenergieträgern	74
5.	FuE-Bedarf	79
VI.	Flächen- und Nutzungskonkurrenzen bei nachwachsenden Rohstoffen	81
1.	Nachfrage	81
2.	Angebot	84
3.	Nutzungs- und Flächenkonkurrenzen	87
4.	Wechselwirkungen im europäischen Kontext	92
VII.	Marktliche Aspekte von Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen	94
1.	Marktsituation für ausgewählte Produkte	94
1.1	Bioschmierstoffe	94
1.2	Biokunststoffe	96
1.3	Weitere Produkte	99
1.4	Energetische Nutzung	101
2.	Interessen und Erwartungen von Akteuren	104
3.	Verbrauchererwartungen	106
4.	Makroökonomische Aspekte	108
4.1	Volkswirtschaftliche Effekte der Nutzung erneuerbarer Energieträger	108
4.2	Überlegungen zu einer Analyse der volkswirtschaftlichen Effekte der stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe	111
VIII.	Handlungsfelder und FuE-Bedarf	113
1.	Aspekte der aktuellen Forschungsförderung der stofflichen Nutzung	113
2.	Handlungsfelder und FuE-Bedarf	115
Literatur	119
1.	In Auftrag gegebene Gutachten	119
2.	Weitere Literatur	119

	Seite
Anhang	127
1. Details zur Übersichtsökobilanz zum Konzept der grünen Bioraffinerie	127
2. Alternative Nutzungsmöglichkeiten des Grüngutes	129
3. Details zur Übersichtsökobilanz zum Konzept der Lignocellulose-Feedstock-Bioraffinerie	131
4. Details zur Übersichtsökobilanz zum Konzept der Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerie	134
5. Berücksichtigung alternativer Nutzungsmöglichkeiten des Stroh s ..	136
6. Biotechnisch-chemischer „Zucker“-Produktstammbaum (Auswahl)	137
7. Ethanol als Plattformchemikalie	138
8. Vergleich der Ergebnisse dreier Potenzialstudien zur energetischen Nutzung von Biomasse	138
9. Auswahl einiger Förderprogramme zur Bioenergienutzung	141
10. Details zur Ökobilanz von Rapsmethylester (RME)	143
11. Potenzialbegriff	145
12. Forschungsförderung stoffliche Nutzung seitens der Bundesministerien (Auswahl)	145
13. Tabellenverzeichnis	147
14. Abbildungsverzeichnis	148

Vorwort des Ausschusses

Der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung beauftragte das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) mit einem Monitoring zum Thema „Industrielle stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe“.

Dabei ließ er sich davon leiten, dass die derzeitigen industriellen Nutzungen nachwachsender Rohstoffe auf Produkte ausgerichtet sind, die bei entsprechender technischer Eignung eine hohe Wertschöpfung zulassen. Allerdings werden die Möglichkeiten der stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe bei Weitem noch nicht ausgeschöpft. So befinden sich Gesamtnutzungskonzepte – wie sie etwa mit Bioraffinerien angestrebt werden – noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium. Trotzdem gibt es bereits ernst zu nehmende Hinweise, dass es bei einer umfassenderen stofflichen und energetischen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen zu Produktions- und Angebotsengpässen kommen kann, wenn regulierende Einflussnahmen des Gesetzgebers unterbleiben. Um diesen wirtschaftlichen, technischen und politischen Herausforderungen angemessen und vorausschauend begegnen zu können, ist es nötig, eine umfassende wissenschaftliche Betrachtung des Themas vorzunehmen. Auf deren Grundlage wird es den Akteuren ermöglicht, Strategien zu entwickeln und zu verfolgen.

Der jetzt vorgelegte TA-Bericht betrachtet die sehr komplexen Zusammenhänge zwischen heutigen und künftigen Nutzungspotenzialen, technischer Machbarkeit sowie ökologischen und ökonomische Vorteilen nachwachsender Rohstoffe.

Darüber hinaus definiert er Handlungsfelder der Forschungsförderung und weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Es ist dabei solchen Fragen nachzugehen, ob eine verstärkte industriell stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe die Rohstoffmärkte von fossilen Rohstoffen und Energieträgern zu entlasten vermag sowie die Importabhängigkeiten reduziert und ob nachwachsende Rohstoffe künftig eine nachhaltig schadstoffarme und ressourcenschonende Versorgung mit Grundchemikalien, Werkstoffen und Endprodukten ermöglichen können – auch wenn einer stofflichen Nutzung eine energetische folgt.

Das Monitoring soll die Folgen der Ausweitung einer stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe für die Erschließung von Innovationspotenzialen – einerseits in der Weiterentwicklung von Herstellungstechnologien (z. B. für zukünftige Bioraffinerien) und andererseits aufgrund ihrer Eigenschaften (z. B. Bioabbaubarkeit) aufzeigen.

Von Interesse bei der stofflichen Nutzung sind – im Gegensatz zur energetischen Nutzung – die hohe Komplexität möglicher Erzeugungs- und Herstellungspfade und die Suche nach neuen Forschungs- und Anwendungsfeldern.

Diese im Überblick darzustellen – und damit die ganze Bandbreite an Möglichkeiten aufzuzeigen – ist ein Schwerpunkt des vorliegenden TA-Berichts. Die Einbeziehung der energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe als Vergleichsebene soll hierbei eine Einordnung der stofflichen in die gesamte Nutzung vorhandener Biomasseressourcen ermöglichen. Hierdurch sollen auch wesentliche Facetten möglicher Flächen- und Nutzungskonkurrenzen verdeutlicht werden.

Das vorliegende TA-Monitoring „Industrielle stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe“ schafft der parlamentarischen Debatte, sowohl auf wirtschafts- und technologiepolitischem als auch auf forschungspolitischem Gebiet, eine gute Wissensbasis.

Berlin, den 10. Oktober 2007

Der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung

Ulla Burchardt, MdB

Ausschussvorsitzende

Axel E. Fischer, MdB

Berichterstatter

Sven Schulz, MdB

Berichterstatter

Uwe Barth, MdB

Berichterstatter

Dr. Petra Sitte, MdB

Berichterstatterin

Hans-Josef Fell, MdB

Berichterstatter

Zusammenfassung

Seitens der chemischen Industrie zeigt sich ein beachtliches Engagement, verstärkt auf nachwachsende Rohstoffe zurückzugreifen. Obwohl in den letzten Jahren bereits eine Reihe von Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen (NaWaRo) auf den Markt gekommen ist (z. B. biologisch abbaubare Verpackungen), steht man in dieser Entwicklung noch am Anfang. Aufgrund der großen Vielfalt in der stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe werden komplexe Fragen bezüglich der technischen Machbarkeit sowie der ökologischen und ökonomischen Vor- und Nachteile möglicher Pfade zur Bereitstellung von auf nachwachsenden Rohstoffen basierenden Produkten aufgeworfen.

Eine zukünftig verstärkte stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe könnte eine Reihe von Vorteilen bringen. Dazu gehören u. a. der Ersatz endlicher, nicht-erneuerbarer Rohstoffe sowie eine Reduzierung von Importabhängigkeiten. Der Anbau nachwachsender Rohstoffe könnte zudem zur Erhaltung der biologischen Vielfalt beitragen. Beim Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen ist in Bezug auf CO₂-Emissionen ein Ausgleich in der Bilanz möglich, sofern das bei einer (energetischen) Nutzung freiwerdende CO₂ mengenmäßig dem in der Wachstumsphase aus der Atmosphäre „entnommenen“ entspricht. Zudem lässt sich an eine stoffliche Nutzung meist eine energetische anschließen (Kaskadennutzung). Weiterhin besitzen Produktentwicklungen aus nachwachsenden Rohstoffen ein beachtliches Innovationspotenzial – einerseits in der Weiterentwicklung von Herstellungstechnologien (z. B. für zukünftige sog. Bioraffinerien) und andererseits aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften (z. B. biologische Abbaubarkeit).

Diskutiert wird die Option einer verstärkten (stofflichen) Nutzung nachwachsender Rohstoffe aber nicht nur vor dem Hintergrund der zunehmenden Verknappung fossiler Rohstoffe und einer bisher vorwiegend energetischen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen. Vielmehr rückt die Vision einer nachhaltig schadstoffarmen und ressourcenschonenden Versorgung mit Grundchemikalien und daraus hergestellten Produkten verstärkt ins Blickfeld.

Der TAB-Bericht gibt einen Überblick über die verschiedenen Forschungs- und Anwendungsfelder im Bereich der industriellen stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Damit sollen der erreichte Stand und die zukünftigen Perspektiven dokumentiert werden. Analyse und Bewertung der technischen Machbarkeit einer verstärkten stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe sind – im Vergleich zur energetischen – noch deutlich weniger untersucht. Diese Diskrepanz kann mit vorliegender Studie nicht überbrückt, sondern nur als solche dargestellt werden.

Die aktuelle stoffliche Nutzung steht im Mittelpunkt des Berichts. In vergleichender Perspektive wird die energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe einbezogen. Zum einen soll damit eine Einordnung der stofflichen in die gesamte Nutzung vorhandener Biomasseressourcen

ermöglicht und zum anderen sollen Flächen- und Nutzungskonkurrenzen zwischen den verschiedenen Einsatzmöglichkeiten aufgezeigt werden, da heute bereits eingesetzte und zukünftig angedachte Mengen an nachwachsenden Rohstoffen für eine energetische Nutzung sich potenzialbegrenzend auswirken können.

Neben der Übersicht heute bereits praktizierter und zukünftig angedachter Verarbeitungspfade wesentlicher Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen (auf der Basis einer Literaturlauswertung) wird für ausgewählte Fälle eine ökologische Bewertung zur Diskussion gestellt. Darüber hinaus werden zukünftige Bioraffinerieansätze analysiert. Des Weiteren wird diskutiert, inwieweit Engpässe bei der verfügbaren Biomasse im Falle eines deutlichen Ausbaus der stofflichen wie auch der energetischen Nutzung auftreten könnten. Abschließend wird auf marktrelevante Aspekte von Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen sowie auf offene Fragen eingegangen. Der Hauptfokus der Betrachtungen liegt auf Deutschland.

Zum aktuellen Stand stofflicher Nutzung

Die Einsatzmöglichkeiten von nachwachsenden Rohstoffen sind bereits heute relativ breit gestreut. Das Spektrum reicht von etablierten Verfahren (z. B. Papierherstellung aus Zellstoff) über Nischen- (z. B. Hochleistungsbioschmierstoffe, Biokunststoffe) bis hin zu in der Entwicklung befindlichen Anwendungen (z. B. Verbundwerkstoffe aus thermoplastischen Kunststoffen und Holzfasern oder Holzspänen, sog. Wood-Plastic-Composites). Gerade der Bereich der „neuen Werkstoffe“ wird als einer der attraktivsten Zukunftsmärkte eingeschätzt.

Der Marktanteil chemischer Grundstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen liegt in Deutschland derzeit bei ca. 10 Prozent (bezogen auf die eingesetzte Rohstoffbasis). Die wichtigsten Vertreter sind Oleochemikalien (Tenside, Bioschmierstoffe etc.) und Chemikalien (z. B. Zitronen-, Milch-, Lävulinsäure, Sorbit, Glycerin und Cellulosederivate). Jährlich werden in Deutschland im industriellen, chemisch-technischen Bereich (chemisch-pharmazeutische Industrie, Papierindustrie, naturfaserverarbeitende Industrie) ca. 2,7 Mio. t nachwachsende Rohstoffe stofflich genutzt. Dabei machten 2005 pflanzliche Öle (0,8 Mio. t) und Stärke (0,64 Mio. t) den Hauptteil der stofflich genutzten Rohstoffe für technische Anwendungen aus.

Als landwirtschaftlich genutzte Fläche stehen in Deutschland ca. 17 Mio. ha zur Verfügung, die sich aus ca. 12 Mio. ha Ackerfläche und ca. 5 Mio. ha Grünland zusammensetzen. Der Anbau nachwachsender Rohstoffe erfolgte 2005 auf etwa 1,4 Mio. ha. Die Anbaufläche zur stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe liegt bei etwa 0,28 Mio. ha. Dabei macht in Deutschland Stärke den größten Anteil aus (ca. 0,13 Mio. ha), gefolgt von Rapsöl (0,1 Mio. ha). Neben Anbaubiomasse gehört zur stofflich nutzbaren Biomasse auch Holz, welches ob seiner zumeist bereits etablierten Nutzung keinen Schwerpunkt in der Darstellung bildet – mit Ausnahme seines Bestandteils Lignocellulose.

Ausgangsstoffe und wesentliche Einsatzbereiche

Gewonnen werden pflanzliche Öle und Fette unter deutschen Klimabedingungen hauptsächlich aus (Winter-) Raps, Öllein, Sonnenblumen und Senf. Weltweit machen allerdings nicht heimische Ölsorten wie Palmöl und „Laurinöl“ (Kokos- und Palmkernöl) mit 27 Prozent den Hauptteil an der Ölproduktion aus; bei Hinzunahme von Sojaöl liegt der Anteil sogar bei 52 Prozent. Die Bedeutung von Raps- und Sonnenblumenöl ist mit 17 Prozent deutlich geringer (für 2003). Dies spiegelt sich auch in der Verfügbarkeit pflanzlicher Öle in Deutschland wider: Die größte Bedeutung besitzt Rapsöl mit 44 Prozent (1,4 Mio. t), gefolgt von Palmöl (16 Prozent, 0,5 Mio. t), welches ausschließlich importiert wird, und von Sojaöl (14 Prozent, 0,45 Mio. t), welches in Deutschland zwar produziert wird, allerdings aus importierten Rohstoffen (2003). Der Verbrauch pflanzlicher Öle für die Herstellung oleochemischer Produkte wurde für 2003 auf 330.000 t geschätzt, wovon ca. 38 Prozent aus heimischem Anbau stammten. Lein- und Sonnenblumenöl sowie andere Ölsaaten werden hauptsächlich zu Seifen, Farben und Lacken verarbeitet oder finden in anderen chemisch-technischen Bereichen Verwendung. Für Bioschmierstoffe und -öle haben sich hauptsächlich Raps- und mit geringen Anteilen Sonnenblumenöl als Rohstoffquelle etabliert. Insbesondere bei der Verwendung von Rapsöl hat sich der Anteil technischer Öle (inklusive Kraftstoffe) im Verhältnis zu Speise- und Nahrungsölen deutlich erhöht.

Stärke wird in Deutschland v. a. aus Kartoffeln (3 Mio. t verarbeitet), gefolgt von Weizen (0,9 Mio. t) und Mais (0,6 Mio. t) gewonnen. Im Jahr 2004 wurden ca. 640 000 t an Stärke für technische Anwendungen genutzt. Der Einsatz von Stärke erfolgt zum Teil chemisch unverändert, zum Teil aber auch modifiziert oder abgebaut. Überwiegend werden ihre spezifischen Eigenschaften als Zusatzstoff genutzt (z. B. Quellvermögen). Stärke wird eingesetzt u. a. als Zusatzstoff in der Papierindustrie und für Wasch- und Reinigungsmittel, zur Herstellung chemischer Grundstoffe (z. B. Tenside, Stabilisatoren, organische Säuren), als Bindemittel, in Klebstoffen, zur Herstellung von Biokunststoffen (Polymilchsäure, PLA), als Füllstoff und für Schäume (z. B. Verpackungsindustrie) sowie in Pharmazeutika.

Die Zuckergewinnung erfolgt in Deutschland (und in der EU) aus der Zuckerrübe; weltweit eher aus Zuckerrohr. Als Industrierohstoffe werden Einfachzucker wie Glucose und Fructose, aber auch polymerisierte Zucker sowie Zuckerderivate genutzt. Als Polymerkomponenten und als Derivate kommen Zucker in Kunststoffen (z. B. Polyurethane) sowie in Tensiden, in Kosmetika, in Waschmitteln und in Farbstoffen zum Einsatz. Sie werden zudem verwendet als Abbindeverzögerer (für Zement/Beton, Gießereien), in Klebstoffen/Anstrichmitteln, als Textilhilfsmittel sowie im pharmazeutischen Bereich. Durch Fermentation wird Zucker z. B. in Polyhydroxybuttersäure, Biopolymere, Zitronensäure oder Enzyme umgewandelt. Weiterhin können aus Zucker auch chemische Grundstoffe hergestellt werden, wie technische Lösungs-

mittel (z. B. Polyalkylenglykoläther) oder Milchsäure bzw. ihre Salze und Ester. Darüber hinaus wird Zucker zur Bioethanolherstellung verwendet.

Als Rohstoffe für pflanzliche Naturfasern haben vor allem weltweit Baumwolle, Jute, Flachs und Sisal Bedeutung. In Deutschland werden aufgrund klimatischer Gegebenheiten hauptsächlich Flachs und Hanf angebaut. Die heutige deutsche Hanfproduktion wird hauptsächlich zu Dämmstoffen und in geringeren Anteilen zu Vliesen für die Automobilindustrie verarbeitet. In der deutschen Textilindustrie spielen Naturfasern – außer Baumwolle und Wolle – in der Verarbeitung praktisch keine Rolle. Industriell verwendet werden Verstärkungsfasern aus Hanf, Flachs für die Textilindustrie (technische Textilien), Taue, Seile sowie für Dachbedeckungen und als Dämmmaterial. Eine wesentliche Rolle spielen naturfaserverstärkte Kunststoffe.

Färberpflanzen spielen in Deutschland eine untergeordnete Rolle. Auch die Nutzung von Proteinen macht derzeit nur einen vergleichsweise kleinen Anteil an der gesamten stofflichen Nutzung aus. Proteine sind zur Herstellung von chemischen Grundstoffen (Klebstoffe, Additive zur Papierherstellung, Bindemittel für Sperrholz etc.), von Biokunststoffen sowie zur Einkapselung von Pharmazeutika nutzbar.

Holz ist ein traditionell verwendeter nachwachsender Rohstoff, welcher in der Holzverarbeitenden sowie in der Papier- und Zellstoffindustrie verwendet wird. Neue Nutzungen von Holz(bestandteilen) beziehen sich z. B. auf den Einsatz von Lignocellulose, einem Gemenge aus Cellulose und Lignin. Neben Holz gibt es noch weitere Rohstoffquellen für Lignocellulose: Miscanthus sinensis, Getreidestroh, Schilf, Gras, aber auch Reststoffe (Papierabfälle etc.). Lignocellulose kann eingesetzt werden als Faser im Baustoffbereich sowie zukünftig in sog. Lignocellulose-Bioraffinerien. Darüber hinaus können aus Lignocellulose auch Kraftstoffe gewonnen werden.

Produkte

Die wichtigsten Vertreter chemischer Grundstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen sind Oleochemikalien (Tenside, Bioschmierstoffe etc.), aber auch Chemikalien wie Zitronen-, Milch- und Lävulinsäure, Sorbit, Glycerin und Cellulosederivate. Die Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen in der chemischen Industrie erfolgt sowohl durch chemische als auch fermentative Konversion. Charakteristisch für die Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen im chemisch-technischen Bereich sind vergleichsweise geringe Produktionsmengen.

Tenside stellen die mengenmäßig bedeutendste Stoffgruppe dar, die heute bereits in der chemischen Industrie in relevanten Anteilen auf nachwachsenden Rohstoffen basiert. Sie werden sowohl aus petrochemischen (Erdöl-basis) als auch aus oleochemischen (NaWaRo-Basis) Grundstoffen gewonnen (derzeit anteilig zu jeweils 50 Prozent). Rohstoffe für umweltverträgliche Tenside sind pflanzliche Fette und Öle sowie niedermolekulare Kohlenhydrate. Zu den Vorteilen von Tensiden (und da-

raus hergestellten Wasch- und Reinigungsmitteln) auf Basis nachwachsender Rohstoffe im Vergleich zu synthetischen Tensiden gehören, dass diese in Abwässern relativ schnell biologisch vollständig abbaubar und zudem hautverträglicher als Erdölprodukte sind.

Bioschmierstoffe werden auf Basis von Fetten und Ölen hergestellt, wobei hier aufgrund ihrer besseren Schmiereigenschaften vorrangig langkettige Fettsäuren eingesetzt werden. Die aktuell vom Markt nachgefragten Rohstoffe Rapsöl und in begrenztem Umfang Sonnenblumenöl sind in Deutschland vorhanden. Der „Flaschenhals“ der Rohstoffbereitstellung liegt eher auf der ersten Verarbeitungsstufe bei den Ölmühlen: Die Kapazität der derzeit bestehenden Großanlagen ist mit der sich stark ausweitenden Herstellung von Biodiesel weitgehend ausgelastet. Der Einsatz biogener Schmierstoffe und Hydrauliköle bietet sich – aufgrund ihrer Bioabbaubarkeit – in umweltsensiblen Bereichen an (z. B. in der Forstwirtschaft).

Biokunststoffe sind ausschließlich oder anteilig aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellte Polymere, die in relativ kurzer Zeit biologisch abbaubar sind. Stärke ist der wichtigste nachwachsende Rohstoff für die Herstellung von Biokunststoffen. Eingesetzt werden zumeist Stärkeblends (Kunststoffmischungen). Ein weiteres wichtiges synthetisches Polymer mit thermoplastischen Eigenschaften und ein „transparenter Kunststoff“ ist Polymilchsäure (PLA). Eingesetzt werden können diese Polymere zur Herstellung von Folien, Fasern, Beschichtungen, Klebstoffdispersionen, Einwegverpackungen für Lebensmittel sowie als Additive für andere Kunststoffe. Kunststoffähnliche Werkstoffe sind die sog. biologisch abbaubaren Werkstoffe (BAW). Herstellung und Verarbeitung von verschiedensten Biopolymeren bzw. -produkten sind heute technisch möglich, jedoch erst ansatzweise etabliert. Bei den Biokunststoffen zielt ein wesentlicher Teil der Entwicklungen, die inzwischen auch zur Marktreife gelangt sind, darauf ab, Massenkunststoffe wie Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) und Polystyrol (PS) in kurzlebigen Anwendungen wie z. B. Verpackungen zu substituieren.

Naturfasern werden derzeit hauptsächlich als thermo- und duroplastische Formpressteile, teilweise auch beim Naturfaser-Polypropylen-Spritzguss eingesetzt. Neben Flachs und Hanf werden auch exotische Fasern (wie Kenaf, Sisal, Jute, Kokosfasern) sowie Holzfasern verarbeitet. Haupteinsatzgebiet ist der Innenausbau in Fahrzeugen. Zu den naturfaserverstärkten Werkstoffen lassen sich auch die naturfaserverstärkten Kunststoffe (NFK) zählen. Dazu wiederum gehören die sog. Wood-Plastic-Composites (WPC), die zumeist aus thermoplastischen Kunststoffen und Holzfasern (sowie Additiven) bestehen. In Deutschland hat diese Produktgruppe noch keine hohe Relevanz. Haupteinsatzgebiete werden im Bausektor, bei Inneneinrichtung (Möbel, Fußboden) und im Automobilbereich gesehen.

Bei Naturdämmstoffen dominieren in Deutschland Holz- und Cellulosedämmstoffe. Während im Werkstoffbereich eher die sog. Kurzfasern Verwendung finden, sind es in der Textilindustrie die Langfasern. Beispielsweise werden aus Cellulose Chemiefasern hergestellt (z. B. Vis-

kose, Modal, Lyocell). Diese werden mit synthetischen Fasern oder untereinander zu Mischfasern verarbeitet, wodurch verbesserte Textileigenschaften erzielt werden (z. B. Beeinflussung der Formstabilität, Trockenzeit, Knitteranfälligkeit).

Lacke auf Pflanzenölbasis machen nur einen geringen Anteil der aus Fetten und Ölen hergestellten Produkte (ca. 8 Prozent dieser Ausgangsstoffe werden dafür eingesetzt) in Deutschland aus. Rohstoffbasis ist größtenteils Leinöl. Sonnenblumen- oder Rapsöl spielen nur eine untergeordnete Rolle. Zur Herstellung von Druckfarben werden Pflanzenöle, Cellulose und Baumharze verwendet.

Ökologische Aspekte

Bei Aussagen zu den ökologischen Vor- und Nachteilen der betrachteten Produkte und Verfahren steht als Grundannahme zumeist im Raum, dass auf Basis von nachwachsenden Rohstoffen hergestellte Produkte tendenziell „ökologisch besser abschneiden“ als solche aus fossilen Rohstoffen. Um eine solche Aussage fundiert und belastbar treffen zu können, eignet sich die Methode der Ökobilanzierung. Es zeigt sich jedoch, dass eine umfassende Bilanzierung extrem aufwendig ist. Sie stellt dennoch einen notwendigen ersten Schritt in Richtung einer Gesamtbewertung dar, die als solche noch durchzuführen wäre und in welche nachfolgend auch ökonomische Kriterien einbezogen werden sollten. Im vorliegenden Bericht wurden Aussagen verfügbarer Studien für drei heute bereits genutzte Bioproduktgruppen – Bioschmierstoffe, Biokunststoffe und Faserprodukte – zu den gängigen Kategorien einer Ökobilanz zusammengestellt:

Bei den Bioschmierstoffen ergibt sich aus dem Vergleich der Lebenswege von Raps- und fossilem Hydrauliköl (auf Erdölbasis), dass Rapsöl deutliche Vorteile beim Aufwand an nichterneuerbaren Energieträgern und beim Treibhauseffekt aufweist. Für die Kategorien Eutrophierung, Ozonabbau und Versauerung ergeben sich Nachteile für Rapsöl, die jedoch bei der Versauerung am wenigsten ausgeprägt sind. Für die Emissionen von toxischen Luftschadstoffen entsteht ein uneinheitliches Bild: Für den biogenen Schmierstoff ergeben sich bei den Schwefeldioxid- und Dieselpartikelemissionen Vorteile, bei den Ammoniakemissionen Nachteile. Bei Stickoxiden resultiert ein leicht vorteilhaftes Ergebnis.

Bei den verschiedenen Biokunststoffen ergibt ein exemplarischer Vergleich der Lebenswege von Polymilchsäure (PLA) aus Maisstärke und von Polyethylen (PE) aus Erdöl bezüglich ihrer Umweltfolgen große Bandbreiten. Damit lässt sich auf Basis verfügbarer Studien keine allgemeine Tendenz hinsichtlich der Vor- oder Nachteile von nachwachsenden Rohstoffen gegenüber ihren konventionellen Pendanten feststellen.

Bei den Fasermaterialien und -produkten war der Ausgangspunkt der exemplarische Vergleich der Lebenswege von Autoinnenverkleidungsteilen aus Hanffaserverbundwerkstoff und aus Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS). Unter Berücksichtigung unterschiedlicher Systemgrenzen (z. B. mit oder ohne Verwertung/Entsorgung) ergeben sich

nur wenige eindeutige, verallgemeinerbare Ergebnisse: Vorteile zeigen sich für die Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen beim Aufwand an nichterneuerbaren Energieträgern und beim Treibhauseffekt. Bei allen übrigen Kategorien ist keine verallgemeinerbare Aussage möglich.

Einordnung der Ergebnisse

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die im Bericht aufgeführten ökobilanzierenden Aussagen einen nachvollziehbaren Einblick in die Bewertungsproblematik geben. Differenzen zwischen den Ergebnissen der ausgewerteten Studien resultieren im Wesentlichen aus verschiedenen Systemgrenzen. Als eine Hauptaussage zeigen sich bei den untersuchten Produktgruppen Biohydraulik- und Bioschmieröle sowie Fasermaterialien und -produkte tendenziell Vorteile für nachwachsende Rohstoffe beim Aufwand an nichterneuerbaren Energien und beim Treibhauseffekt. Weiterführende verallgemeinerte Aussagen zu Vor- und Nachteilen von „Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen an sich“ im Bereich der stofflichen Nutzung sind mit dem vorliegenden Datenmaterial nicht möglich. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Für einen Vergleich von verschiedenen Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen untereinander lässt sich die Flächeneffizienz heranziehen. Durch den Bezug der Differenzen „biogen – fossil“ (Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen – konventionelle Produkte) der einzelnen Umweltwirkungen auf die Anbaufläche (z. B. in Einwohnerwerten pro 100 ha Anbaufläche) lassen sich Aussagen zur Effizienz der Flächennutzung ableiten. Beispielsweise zeigen sich hier beim Aufwand an nichterneuerbaren Energien zumeist klare Vorteile für die untersuchten Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen. Ein über die drei oben genannten Produktkategorien mit Bezug zur Flächeneffizienz hinaus verallgemeinerbares Ergebnis lässt sich aus der vorhandenen Datenlage jedoch nicht ableiten. Angesichts absehbar zunehmender Flächenknappheit und unterschiedlichen Flächeneffizienzen der verschiedenen nachwachsenden Rohstoffe bleibt die Flächeneffizienz aber ein wesentliches Bewertungskriterium.

Zur weiteren Verbesserung der Ökobilanz von Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen (Nutzung der ermittelten Vorteile) ist es vermutlich notwendig, sämtliche Einzelprozesse des Gesamtlebensweges zu optimieren. Beispielsweise würde eine Reduzierung der NH_3 - und N_2O -Emissionen aus der landwirtschaftlichen Produktion (etwa durch Verringerung des Stickstoffdüngerbedarfs über Pflanzenzüchtung und Anbauformen) auch zu Verbesserungen bei den problematischen Kategorien Versauerung, Eutrophierung und Ozonabbau führen. Nach Ende der Nutzung sollte eine thermische Verwertung vorgesehen werden, da diese für die Bilanz des Gesamtlebensweges von Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen häufig vorteilhaft ist (Substitution von fossilen Energieträgern). Die Kompostierung ist dagegen mit geringeren Gutschriften und fallweise mit erheblichen Methanemissionen verbunden. Bioabbaubarkeit bedeutet damit nicht zwangsläufig Umweltfreundlichkeit und muss auch nicht unbedingt ein Hauptziel der Produktentwicklung sein; vielmehr kann im

Einzelfall eine längere Haltbarkeit des Produkts mit einer thermischen Verwertung sinnvoller sein.

Zukünftige stoffliche Nutzung – Bioraffinerien

Nachwachsende Rohstoffe könnten zukünftig in sog. „Bioraffinerien“ verarbeitet werden. Das Konzept der Bioraffinerien steht für die Gesamtheit von Technologien zur Verarbeitung nachwachsender Rohstoffe bis hin zu industriellen Zwischen- und Endprodukten. Nachwachsende Rohstoffe sollen dabei in einer integrierten Produktion zu einer umfangreichen Produktpalette – z. B. in Futtermittel, biogene Werkstoffe, Kraftstoffe, Chemikalien – umgewandelt werden. Ziel ist die Fraktionierung und Weiterverarbeitung von nachwachsenden Rohstoffen zu Produkten, die konkurrenzfähig solche ersetzen können, die derzeit petrochemisch hergestellt werden. Der visionäre Gedanke besteht nun darin, die heute bekannten komplex vernetzten und historisch gewachsenen Strukturen der Kohle- und Erdölchemie (sog. Stammbaumsysteme) auf nachwachsende Rohstoffe zu übertragen. Solche vernetzten Strukturen existieren für nachwachsende Rohstoffe in vergleichbarer Weise derzeit noch nicht, erscheinen jedoch prinzipiell technisch umsetzbar.

Bei der Verarbeitung bzw. der rohstofflichen Verwertbarkeit sowohl fossiler als auch nachwachsender Rohstoffe wird zunächst prinzipiell von einer technisch analogen Verarbeitbarkeit bei den chemisch gleichen Grundbausteinen ausgegangen. Ein wesentlicher Unterschied besteht aber darin, dass Erdöl in der Qualität verwendet wird, wie es extraktiv aus der Natur gewonnen wird, während nachwachsende Rohstoffe – zumeist als Produkt eines landwirtschaftlichen Stoffwandlungsprozesses – die Synthese (vor)leistung der Natur integrieren. Nachwachsende Rohstoffe können deshalb bereits im Verlauf ihrer Generierung so modifiziert werden, dass sie – dem Zweck der nachfolgenden Verarbeitung angepasst – bestimmte gewünschte Hauptprodukte vorgebildet (sog. Präkursoren) haben (z. B. durch Pflanzenauswahl, Züchtung, Gentechnik, Anbauverfahren).

Im ersten Schritt einer Bioraffinerie werden präkursorhaltige Biomassen einer physikalischen Stofftrennung unterworfen. Die Haupt- und Nebenprodukte werden nachfolgend mikrobiologischen und/oder chemischen stoffwandelnden Reaktionen ausgesetzt. Die Folgeprodukte können weiterkonvertiert oder in einer konventionellen Raffinerie weiterverarbeitet werden. Im vorliegenden Bericht werden das grüne Bioraffineriesystem, die Lignocellulose-Feedstock- und die Getreide-Ganzpflanzen-Bioraffinerie sowie Zwei-Plattformen-Systeme vorgestellt. Diese Systeme befinden sich in einem sehr frühen Entwicklungsstadium.

Grüne Bioraffinerie (GBR)

In der grünen Bioraffinerie können aus grünen „naturfeuchten“ Rohstoffen wie Gras, Luzerne, Klee und unreifem Getreide eine Vielzahl von Produkten wie Futtermittel, Proteine, Brennstoffe, Chemikalien und über mikrobiologische Fermentation auch Produkte wie organi-

sche Säuren, Aminosäuren, Ethanol oder Biogas erzeugt werden. Dazu wird die grüne Biomasse in Presskuchen (enthält u. a. Cellulose, Stärke sowie weitere organische Substanzen) und in Presssaft (enthält u. a. Kohlenhydrate, Proteine, organische Säuren) getrennt. Beim grünen Presssaft liegt der Fokus auf Produkten wie Milchsäure und Derivaten, Aminosäuren, Ethanol und Proteinen. Aus dem Presskuchen können Futtermittelpellets hergestellt werden. Diese können auch als Ausgangsmaterial zur Herstellung von Chemikalien, wie Lävulinsäure, oder auch zur Konversion in Synthesegas und Kohlenwasserstoffe (synthetische Kraftstoffe) dienen. Ein Schwachpunkt dieses Konzepts liegt darin, dass eine schnelle Primärverarbeitung des Grüngutes oder eine zu kontrollierende (da rohstoffverändernde Lagerung) Silage notwendig ist. Pilotanlagen zu grünen Bioraffinerien gibt es noch nicht. Die ersten Verarbeitungsstufen einer GBR werden derzeit z. B. am Standort der Futtermittelfabrik Selbelang (Havelland, Land Brandenburg) vorbereitet.

Lignocellulose-Feedstock-Bioraffinerie (LCF-Bioraffinerie)

In einer LCF-Bioraffinerie werden aus Stroh, Gräsern, Waldrestholz und cellulosehaltigen Abfällen (z. B. Papier) Produkte in drei verschiedenen Linien erzeugt: In der Lignin-Linie können Klebstoffe, Bindemittel, Brennstoffe oder Chemieprodukte hergestellt werden; in der Hemicellulose-Linie können zum einen Verdickungsmittel, zum anderen Folgeprodukte der Xylose (z. B. Furfural und Nylon) produziert und in der Cellulose-Linie aus der Glucose Fermentationsprodukte wie Ethanol oder Milchsäure gewonnen werden (u. a. auch Lävulinsäure). Unter den potenziellen Bioraffineriekonzepten könnte sich die LCF-Bioraffinerie vermutlich am ehesten durchsetzen, u. a. aufgrund der verfügbaren Rohstoffbasis sowie einer guten Marktperspektive potenzieller Konversionsprodukte. Auch hier gibt es noch keine Pilotanlage. Ein Schwachpunkt im LCF-Konzept ist momentan noch die Ligninverwertung: Diese würde derzeit entweder als Brenn-, Kleb- oder Füllstoff erfolgen. Das Lignin Grundgerüst enthält aber auch erhebliche Mengen an Monoaromaten, die zusätzlich genutzt werden könnten. Lignin ist bis heute nicht weiter aufspaltbar, an seiner chemisch-enzymatischen Aufspaltung wird gearbeitet.

Getreide-Ganzpflanzen-Bioraffinerie

In einer Getreide-Ganzpflanzen-Bioraffinerie können aus Getreidestroh – analog zu der LCF-Bioraffinerie – Produkte der drei Lignin-, Hemicellulose- und Cellulose-Linien erzeugt werden. Rohmaterialien sind Roggen, Weizen, Triticale und auch Mais. Wird das Stroh vergast, können aus dem Synthesegas Produkte wie Methanol oder Polyhydroxybutyrat (PHB) gewonnen werden. Aus dem Korn lässt sich Stärke gewinnen und in entsprechende Folgeprodukte weiterverarbeiten (Glucose, Acetatstärke, Glucosamine, Kunststoffe).

Das Zwei-Plattformen-Konzept

Ein weiterer Ansatz besteht in der Kombination zweier Konzepte – der Erzeugung und Verarbeitung von Zucker

einerseits und der von Synthesegas (Syngas) andererseits. Die nachwachsenden Rohstoffe werden auf zwei technische Stränge (sog. Plattformen) aufgeteilt. Die „Zucker-Plattform“ basiert wesentlich auf biochemischen Konversionen, deren Nutzung vom Wassergehalt der Biomasse abhängig ist. Die „Syngas-Plattform“ besteht aus thermochemischen Konversionen (u. a. Fischer-Tropsch-Verfahren) und fokussiert auf eine Vergasung von Biomasse und deren Nebenprodukten. Daneben laufen weitere Prozesse (wie Hydrothermolysen, Pyrolyse, Thermolyse) ab, die miteinander vernetzt werden können. Nachteilig bei der Synthesegasherstellung sind die Notwendigkeit der Entfernung von Heteroatomen (Sauerstoff, Stickstoff, Schwefel) sowie von Mineralien aus den nachwachsenden Rohstoffen und der hohe Energiebedarf der Prozesse.

Ökologische Aspekte – Übersichtsökobilanzen

In Bioraffinerien werden einerseits hohe Erwartungen gesetzt. Andererseits können mit der Produktion und dem Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen in Bioraffinerien nicht nur Vorteile, sondern auch spezifische Nachteile verbunden sein (z. B. Nutzung fossiler Energieträger). Die augenblickliche Informationsbasis für eine ökologische Bewertung von Bioraffineriesystemen ist sehr lückenhaft. Im Rahmen des TAB-Projekts wurden dennoch erstmalig für eine erste Einordnung dreier Bioraffineriesysteme auf Basis heute verfügbarer Informationen Übersichtsökobilanzen erstellt.

Übersichtsökobilanz: Grüne Bioraffinerie

Ausgangspunkt dieser Bilanz ist Grünschnitt, welcher gepresst wird, wobei aus dem Saft primär Milchsäure bzw. Lysin und aus dem Kuchen Grüngutpellets gewonnen werden. Daneben fallen Proteine und ein Gärrest an. Milchsäure bzw. Lysin ersetzen das gleiche, auf mikrobiologischem Wege hergestellte Produkt. Die Grüngutpellets und ein Teil der Proteine können als eiweißreiches Futtermittel eingesetzt werden und würden das (importierte) Eiweißfuttermittel Sojaschrot ersetzen. Proteine können weiterhin fossil produzierte Acrylate und Tenside substituieren. Der Gärrest kann als Düngemittel auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht werden (ersetzt Mineraldünger).

Insgesamt zeigen sich bei der Betrachtung des gewählten Konzepts der grünen Bioraffinerie gegenüber konventioneller Produktion signifikante Nachteile für das Konzept der grünen Bioraffinerie nur für den Einsatz fossiler Energien. Bei den übrigen Umweltwirkungen sind die Unterschiede weniger relevant, obwohl sich – abhängig von den erzeugten bzw. den durch sie ersetzten Produkten – in Einzelfällen auch größere Unterschiede in den Bilanzen ergeben können. Für das betrachtete grüne Bioraffineriekonzept resultiert der relativ hohe Energiebedarf primär aus der Trocknung des Grünguts (für die Pelletherstellung), was der weniger aufwendigen Herstellung von Sojaschrot gegenübersteht. Eine Rolle spielt ferner, dass die Produkte der grünen Bioraffinerie überwiegend andere nachwachsende Rohstoffe ersetzen, die ihrerseits oft ei-

nen relativ geringen Einsatz fossiler Energie erfordern und geringe Treibhausgasemissionen aufweisen.

In einem weiteren Schritt wird berücksichtigt, dass das Grüngut alternativ zur Variante „grüne Bioraffinerie“ auch komplett zu Futtermittel (Variante „Trockenwerk“) oder zu Biogas (Variante „Biogasanlage“) verarbeitet werden könnte. Dann wird ökobilanziell der Futtermittelherstellung im „Trockenwerk“ auch die Sojaschrotbereitstellung (Sojaanbaufläche) gegenübergestellt. Die Variante „Biogasanlage“ ersetzt die Strom- und Wärmeerzeugung auf fossiler Basis und der Gärrest kann wiederum als Düngemittel ausgebracht werden (ersetzt Mineraldünger). Angenommen wird dabei zudem, dass das Grüngut jeweils in gleichen Mengen in den drei Varianten eingesetzt wird. Im Ergebnis könnte seine Nutzung in der „grünen Bioraffinerie“ und im „Trockenwerk“ landwirtschaftliche Fläche „einsparen“, nämlich die Anbaufläche des sonst nötigen Sojaschrots sowie (in geringerem Maße) die für die Milchsäure- bzw. Lysinproduktion benötigte Fläche für den Zuckerrübenanbau.

Die nichtbenötigte Fläche kann nun wiederum „brachliegen“ oder „anderweitig genutzt“ werden. Im Fall „brachliegender Flächen“ ergeben sich beim „Trockenwerk“ stärker ausgeprägte Nachteile als bei der „grünen Bioraffinerie“ – gegenüber der Verwendung des ersetzten Sojaschrots – beim Aufwand an fossilen Energien, beim Treibhauseffekt und bei der Versauerung (Ausnahme: Lysin bei GBR). Vorteile zeichnen sich dagegen beim Ozonabbau ab. Die alternative Nutzung von Grüngut in der „Biogasanlage“ weist Vorteile beim Einsatz fossiler Energien, beim Treibhauseffekt und beim Ozonabbau auf; Nachteile zeigen sich bei der Versauerung und beim Nährstoffeintrag. In der Relation betrachtet hat die „Biogasanlage“ stärker ausgeprägte Nachteile bei der Versauerung und beim Nährstoffeintrag; beim Ozonabbau zeigt sich keine klare Tendenz.

Im Fall einer „anderweitigen Nutzung“ wird davon ausgegangen, dass freiwerdende Fläche – trotz zunehmender Nutzungskonkurrenzen – nicht für die Nahrungs- und Futtermittelproduktion oder den Naturschutz benötigt wird, sondern für den Energiepflanzenanbau genutzt werden könnte (erweitertes Szenario). Die Berechnungen ergeben dann für alle betrachteten Varianten Vorteile für die biogene Option beim Einsatz fossiler Energien und beim Treibhauseffekt sowie Nachteile bei der Versauerung, beim Nährstoffeintrag und beim Ozonabbau (Ausnahme: Biogasanlage beim Ozonabbau). Bei „Bioraffinerie“ und „Trockenwerk“ machen sich die typischen umweltspezifischen Implikationen von Anbau und Nutzung von Energiepflanzen bemerkbar.

Zusammenfassend ergibt die Einbeziehung der alternativen Flächennutzung für den Energiepflanzenanbau für die grüne Bioraffinerie gegenüber den anderen Nutzungsarten von Grüngut beim Einsatz fossiler Energien und beim Treibhauseffekt deutliche Vorteile. Bei der Bewertung des Systems „grüne Bioraffinerie“ wäre eine zentrale Bewertungsfrage somit eher die nach der Flächennutzung im Gesamtnutzungskonzept; eine Gegen-

überstellung einzelner Produkte (ob Milchsäure oder Bioenergie sinnvoller ist) wäre somit eher nachgeordnet.

Übersichtsökobilanz: LCF- und Getreide-Ganzpflanzen-Bioraffinerie

Hauptprodukte der betrachteten LCF-Bioraffinerie sind Tetrahydrofuran (ein chemischer Grundstoff), Ethanol und Gips, die auf konventionelle Art produzierte Waren in jeweils gleicher Menge ersetzen. Lignin (als Strohbestandteil) würde zur Substitution von Kunststoffen wie Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)-Copolymerisat eingesetzt werden. Proteinhaltige Futtermittel ersetzen Sojaschrot; der Gärrest wird als Düngemittel ausgebracht (ersetzt Mineraldünger). Bei der ökobilanziellen Erfassung der Verarbeitung von Stroh ergeben sich Vorteile für die Verarbeitung in einer LCF-Bioraffinerie bei fast allen untersuchten Umweltwirkungen (Ausnahme: Ozonabbau). Hervorzuheben ist die Einsparung von ABS-Kunststoff, die – bedingt durch die relativ großen Mengen anfallenden Lignins, die stofflich weiterverarbeitet werden würden – ergebnisrelevant ist. Die Ergebnisse bleiben bei anderen ersetzten Kunststoffen in ihren Grundaussagen bestehen, jedoch kann sich die Höhe der Vorteile verändern.

Für die Getreide-Ganzpflanzen-Bioraffinerie wurde davon ausgegangen, dass zunächst nur der Strohhanteil verarbeitet wird (Spezialform der LCF-Bioraffinerie), wobei die zusätzliche Verwendung des Getreides theoretisch ohne größeren Aufwand möglich wäre. Die Strohnutzung in der Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerie für die Produkte Ethylen, Gips, Proteine und Gärrest stellt sich insgesamt günstiger dar, als die Produktion und Nutzung der ersetzten konventionellen Produkte (Ethylen, ABS, Gips, Düngemittel, Sojaschrot). Vorteile für die Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerie ergeben sich beim Einsatz fossiler Energie, beim Treibhauseffekt und bei der Versauerung. Beim Nährstoffeintrag und beim Ozonabbau zeigt sich dagegen keine klare Tendenz. Auch hier hat der ersetzte ABS-Kunststoff auf Ligninbasis den größten Einfluss auf das Ergebnis.

In einem weiteren Schritt wird auch hier berücksichtigt, dass das Stroh alternativ auch komplett anderweitig verwendet werden könnte: Alternativ wurden die Varianten „Verbleib des Strohs auf dem Feld“, „Nutzung zur Produktion von Biomass-to-Liquid (BTL)-Kraftstoff“ und „Einsatz im Heizkraftwerk“ gegenübergestellt. Beide Bioraffineriekonzepte weisen in allen untersuchten Umweltwirkungen beim Stroeinsatz gegenüber den alternativen drei Nutzungsmöglichkeiten überwiegend Vorteile auf. Wesentlich ist dabei die Nutzung des Lignins: Die getroffenen Aussagen gelten nur unter der Annahme, dass damit hochwertige Kunststoffe und -harze ersetzt werden. Bei Substitution weniger aufwendiger Kunststoffe kann die energetische Strohnutzung ähnlich gut abschneiden wie die in den Bioraffinerien. Für den Fall einer energetischen Nutzung von Lignin wäre die direkte energetische Strohnutzung derjenigen in einer Bioraffinerie vorzuziehen. LCF- und Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerien weisen somit interessante ökologische Potenziale auf. Die

größte Herausforderung für die zukünftige Erschließung dieser Potenziale liegt in der stofflichen Nutzung von Lignin.

Energetische Nutzung

Der heutige Anteil der energetischen Biomassenutzung am Gesamtprimärenergieverbrauch ist noch relativ gering. 2004 betrug er 333 PJ bei einem Primärenergieverbrauch von 14 438 PJ. Bioenergie macht jedoch bei den erneuerbaren Energieträgern den größten Anteil aus. Der Großteil entfällt auf feste Bioenergieträger – im Wesentlichen Holz. Auch Biodiesel hat einen hohen Stellenwert bei der Primärenergiebereitstellung. Weniger bedeutend sind andere feste Bioenergieträger wie Stroh sowie der Kraftstoff Bioethanol und gasförmige Bioenergieträger (Bio-, Klär- und Deponiegas). In Deutschland werden als Energiepflanzen hauptsächlich Raps, Weizen und – zu kleineren Anteilen – auch Zuckerrüben angebaut.

Studien zu Biomassepotenzialen für die energetische Nutzung zeigen jeweils Bandbreiten für Biomassepotenziale zur Energiebereitstellung heute, für 2010 und 2030 (teilweise auch danach) auf. Für die Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen wird in den Szenarien der ausgewerteten Studien von zunehmenden Anteilen der Energiebereitstellung aus Biomasse bis 2030 ausgegangen. Im Ergebnis wird ausgewiesen, dass Bioenergie bis 2030 einen Anteil von 8 bis 14 Prozent am Primärenergiebedarf in Deutschland decken kann, wenn Bestrebungen zur Effizienzsteigerung forciert werden. Dies würde nahezu dem Anteil entsprechen, den Stein- und Braunkohle dann am gesamten deutschen Energiemix voraussichtlich haben. Aus den Studien geht als Empfehlung hervor, dass biogene Reststoffe vorrangig stationär genutzt werden sollten und dass es die erwartete Flächenknappheit erfordert, zum Erreichen der Ziele (z. B. beim Primärenergiebedarf) auf zur Verfügung stehenden Flächen Energiepflanzen mit hohen Erträgen anzubauen.

Zu den Umweltwirkungen von Bioenergieträgern im Vergleich zu ihren fossilen Pendanten liegt – im Gegensatz zur stofflichen Nutzung – eine Vielzahl von Untersuchungen vor. Eine Auswertung ausgewählter Studien ergibt für alle betrachteten Bioenergieträger aus Anbaubiomasse – im Vergleich zu fossilen Energieträgern – sowohl ökologische Vor- als auch Nachteile: Vorteile zeigen Bioenergieträger beim Verbrauch nichterneuerbarer Energieträger und beim Treibhauseffekt; Nachteile zeigen sich zumeist beim Ozonabbau, bei der Versauerung und bei der Eutrophierung. Auch hier lässt sich eine Entscheidung zugunsten eines Energieträgers daraus nicht zwingend ableiten. Sofern man aber – aufgrund einer normativen Setzung bzw. einer bestimmten Zielsetzung – z. B. der Minderung des Treibhauseffektes höchste ökologische Priorität einräumen würde, schnitten alle untersuchten Bioenergieträger besser ab als die fossilen Alternativen.

Ein limitierender Produktionsfaktor der zunehmenden Nutzung von Bioenergieträgern ist die verfügbare Anbaufläche. Daher wurden Bioenergieträger mit ihren fossilen Pendanten verglichen, und darüber hinaus wurde ein flächenbezogener Vergleich von Bioenergieträgern (aus Anbaubio-

masse) untereinander durchgeführt. Im Ergebnis kann festgehalten werden, dass Bioenergieträger Vorteile beim Verbrauch nichterneuerbarer Energieträger und beim Treibhauseffekt aufweisen. Für die übrigen Wirkungskategorien ist zwischen Anbaubiomasse und Reststoffen zu unterscheiden (Anbaubiomasse: Nachteile beim Ozonabbau, bei Versauerung und Eutrophierung; Reststoffe: häufiger Vor- oder eher geringere Nachteile). Ein Vergleich der Bioenergieträger untereinander ergibt, dass feste Bioenergieträger tendenziell günstiger abschneiden als Biokraftstoffe und gasförmige Bioenergieträger dazwischen liegen. Zudem ist ein erstes Ranking der Bioenergieträger möglich: Danach bieten Bioenergieträger, die verschiedene fossile Energieträger ersetzen können, die größten Vor- bzw. geringsten Nachteile, wenn sie Kohle ersetzen. Am wenigsten vorteilhaft ist die Substitution von Erdgas; Heizöl nimmt eine Mittelstellung ein.

Verfügbarkeit von Biomasse

Sowohl für die Bereitstellung von Biokraftstoffen als auch für den Ausbau der Strom- und Wärmeerzeugung aus Biomasse sind in Deutschland und Europa ehrgeizige Ziele gesteckt worden. Geht man davon aus, dass mittelfristig auch die Bereitstellung von nachwachsenden Rohstoffen für die stoffliche Nutzung größere Bedeutung erlangen wird als bisher, wird der Flächenbedarf dann weiter zunehmen, wenn die benötigten Flächen möglichst nicht in Konkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion stehen oder zu einem Import von Nahrungsmitteln führen sollen.

Für die energetische Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen ist bereits eine Reihe von Potenzialabschätzungen verfügbar. Die stoffliche Nutzung fällt unter derzeitigen Voraussetzungen weniger ins Gewicht. Die Nachfrage an nachwachsenden Rohstoffen und Energieträgern wird sich demnach künftig – v. a. im Bereich der energetischen Nutzung und hier durch politische Maßnahmen gefördert – dynamisch entwickeln. Die stoffliche Nutzung entwickelt sich dazu im Vergleich voraussichtlich verhaltener und eher in Nischenbereichen, wobei auch eine künftige Nutzung in Bioraffinerien – die vermutlich erst in 2030 signifikant ins Gewicht fällt – eine Rolle spielen könnte. Die Angebotsseite insgesamt (technisches Biomassepotenzial) wird durch den zunehmenden Anbau von Energiepflanzen auf freiwerdenden landwirtschaftlichen Flächen gekennzeichnet sein. Allerdings ist der Einfluss von agrar- und umweltpolitischen Rahmenbedingungen (u. a. ökologischer Landbau) auf das Biomassepotenzial hoch, wie auch der von zusätzlichen Maßnahmen im Umwelt- und Naturschutz (z. B. Etablierung von Naturschutz- und Kompensationsflächen, die nicht mehr für den Ackerbau genutzt werden können). Jedoch wird auch bei weitgehenden Naturschutzmaßnahmen prinzipiell von einer Zunahme des technischen Biomassepotenzials ausgegangen (z. B. durch Nutzungsextensivierungen).

Aus den in der Literatur dargestellten möglichen Entwicklungspfaden von Angebot und Nachfrage ergeben sich unterschiedliche Flächen- und Nutzungskonkurrenzen: Bei Fortschreibung der gegenwärtigen politischen

Rahmenbedingungen wäre sowohl 2015 als auch 2030 ein ausreichendes Biomasseangebot vorhanden. Allerdings sind verstärkte Konkurrenzen um die (kostengünstigeren) Lignocellulosereststoffe zu erwarten, da bis 2030 eine Vielzahl neuer Technologien etabliert sein dürfte, etwa zur Umwandlung in Strom und Wärme, in Kraftstoffe sowie in chemische Rohstoffe. Da die Nachfrage allein mit Reststoffen voraussichtlich nicht gedeckt werden kann, ist eine zunehmende Bedeutung des Anbaus von Lignocellulosepflanzen zu erwarten.

Im Jahr 2015 wird die Verwendung nachwachsender Rohstoffe voraussichtlich nach wie vor energetisch dominiert sein. Bei Reststoffen könnte sich eine Nutzungskonkurrenz ergeben durch eine erhebliche Nachfrage zum einen zur Strom- und Wärmeerzeugung und zum anderen zur Deckung des Rohstoffbedarfs von (bis dahin möglicherweise entstandenen) LCF-Bioraffinerie(teil)systemen. Bei der Etablierung weiter gehender politischer Rahmenbedingungen in der Energiewirtschaft einerseits und in der Landwirtschaft andererseits dürfte bereits im Jahr 2015 die Nachfrage das Angebot an nachwachsenden Rohstoffen überschreiten. Dabei hängt das Ausmaß des Nachfrageüberhangs entscheidend von den politischen Rahmenbedingungen (z. B. EU-Kraftstoffdirektive) ab. Bei weiterer Förderung müsste eine zusätzliche Nachfrage an nachwachsenden Rohstoffen durch Importe gedeckt werden. Auch in dieser Betrachtung werden Reststoffe bzw. Energiepflanzen aus Lignocellulose voraussichtlich einen höheren Stellenwert einnehmen als heute.

Für 2030 kann qualitativ in erster Näherung davon ausgegangen werden, dass die Effekte hinsichtlich der Flächen- und Nutzungskonkurrenz vergleichbar sind mit 2015. Dies gilt dann, wenn man beispielsweise annimmt, dass bei Kraftstoffen die Nachfrage sich in erster Linie auf Reststoffe (z. B. lignocellulosehaltige) richtet, da entsprechende Verfahren etwa zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen (BTL) und von Bioethanol aus diesen Marktreife erlangt haben könnten. Weiterhin könnten aber auch biogene Kraftstoffe wie Biogas, Biodiesel und Bioethanol aus Anbaubiomasse an Bedeutung gewinnen. Aufgrund der dann voraussichtlich verfügbaren „technischen Vielfalt“ bei der Konversion von Reststoffen werden es wohl eher wirtschaftliche Restriktionen sein, die ein Ausweichen auf Anbaubiomasse notwendig machen. Für 2030 wird daher – auch bereits bei Fortschreibung der gegenwärtigen politischen Rahmenbedingungen – angenommen, dass Reststoffe nicht in ausreichender Menge zur Deckung der Nachfrage zur Verfügung stehen. Tendenziell wird erwartet, dass die Diskrepanz zwischen der Nachfrage nach nachwachsenden Rohstoffen und der verfügbaren Biomasse größer wird. In diesem Fall müsste die Nachfrage nach stofflich und energetisch genutzten nachwachsenden Rohstoffen zusätzlich durch den Anbau von Energiepflanzen gedeckt werden.

Mit Blick auf ggf. notwendige Importe weist die Versorgungssituation mit nachwachsenden Rohstoffen in der EU-25 mittelfristig ein ausreichendes Angebot bei Beibehaltung der gegenwärtigen Rahmenbedingungen und ein

Angebotsdefizit bei Etablierung weiter gehender Rahmenbedingungen aus. Dabei stellt Deutschland im europäischen Kontext nicht nur einen wesentlichen Biomasseabsatzmarkt, sondern auch einen vergleichsweise wichtigen Rohstofflieferanten dar. Grundsätzlich ist zu beachten, dass eine gemeinsame europäische Politik zum Umgang mit der nachwachsenden Rohstoffbasis gegenwärtig nicht verbindlich existiert; ein nichtabgestimmtes Vorgehen der Mitgliedstaaten könnte künftig zu einer Verschiebung erheblicher Biomasseströme durch Europa führen.

Die Sicht der Akteure und Marktaspekte

Die Durchdringung des Marktes mit Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen bleibt in den meisten Fällen noch weit hinter den heutigen technischen Einsatzmöglichkeiten zurück. Zu differenzieren ist zwischen Produkten, deren heutige Marktstellung auch durch gezielte Fördermaßnahmen bewirkt wurde (z. B. Bioschmierstoffe), und solchen, die bisher ausschließlich mit den z. B. ökologischen Vorteilen (und zumeist kostenseitigen Nachteilen) am Markt bestehen mussten (z. B. Biokunststoffe). Ein Haupthemmnis für die breitere Markteinführung von Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen ist ihr deutlich höherer Preis gegenüber herkömmlichen (auf fossiler Basis hergestellten) Produkten. Ein weiteres Hindernis stellen fehlende Informationen bei industriellen und privaten Verbrauchern über die Vorteile aktueller Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen dar.

Der Einsatz von Bioschmierstoffen war bisher durch eine geringe Verbraucherakzeptanz bzw. höhere Preise als herkömmliche Schmierstoffe deutlich eingeschränkt. Der Anteil an Bioschmierstoffen am Gesamtmarkt liegt derzeit etwa bei 4 Prozent. Ein Pusheffekt vor allem im Hydrauliksektor konnte mit dem Markteinführungsprogramm (MEP) des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) erzielt werden.

Biokunststoffe haben in der EU derzeit einen Marktanteil von ca. 0,3 Prozent der gesamten Kunststoffproduktion. Bezogen auf den Umsatz wird derzeit von einem Biokunststoffanteil von knapp 1 Prozent ausgegangen. Stärke und Stärkeblends machen derzeit etwa 85 Prozent bezogen auf den gesamten Biokunststoffmarkt aus. Das Haupthemmnis für die breitere Markteinführung von Biokunststoffen ist ihr deutlich höherer Werkstoffpreis gegenüber Massenkunststoffen auf fossiler Basis. Eine fast ebenso große Rolle spielen Informationsdefizite bei allen Anwenderschichten. Nicht zuletzt sind es auch gesetzliche Rahmenbedingungen (widersprüchliche Regelungen bei Verpackungs- und Bioabfallverordnung für Biokunststoffverpackungen), die eine signifikante Marktverbreitung von Biokunststoffprodukten in der Praxis behindern.

Bei weiteren Produkten ist als ein vergleichsweise größerer Markt der der Naturdämmstoffe zu benennen. Davon werden gegenwärtig jährlich ca. 1,3 Mio. m³ in Deutschland verwendet, was einem Marktanteil von ca. 5 Prozent entspricht. In weiteren Einsatzfeldern – etwa bei naturfaserverstärkten Werkstoffen, Tensiden und sonstigen Che-

mikalien bis hin zu Lacken und Farben – konnten zwar Aussagen zu zukünftigen Entwicklungen gemacht, jedoch keine Marktanteile ermittelt werden.

Im Gegensatz dazu ist der Markt für die energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe zwar auch in weiten Teilen ein junger Markt, der jedoch insbesondere durch die Schaffung günstiger wirtschaftlicher Rahmenbedingungen – z. B. durch garantierte Einspeisevergütungen nach dem Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG) bei der Produktion von Strom aus regenerativen Energien oder der Mineralölsteuerbefreiung – in den letzten fünf Jahren eine zunehmende Dynamik entwickelt hat. Bei der energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe ist Holz immer noch der wichtigste Rohstoff, insbesondere zur Wärmeerzeugung. Zukünftige marktliche Entwicklungen insbesondere in der Kraftstoffbranche sind noch wenig greifbar. Insbesondere BTL-Kraftstoffen und Ethanol aus Lignocellulose wird ein hohes Zukunftspotenzial zugeschrieben.

Im Kraftstoffbereich ist Biodiesel (Pflanzenölmethylester) derzeit in Deutschland als weitaus bedeutender als Bioethanol einzustufen, wobei zu beachten ist, dass die Bioethanolbranche voraussichtlich in den nächsten Jahren deutlich an Marktvolumen zunehmen wird. Die Nutzung von Biodiesel wird heute – soweit Fahrzeuge eine entsprechende Freigabe des Herstellers haben – im Regelfall als wirtschaftlich angesehen. Dagegen rentiert sich die Nutzung von nativem Pflanzenöl als Kraftstoff – aufgrund der notwendigen Umrüstung eines konventionellen Motors – in der Regel nur bei Kraftfahrzeugen mit relativ hoher Auslastung.

Biogas wird derzeit vornehmlich zur Erzeugung elektrischer Energie genutzt, welche ins Netz eingespeist werden kann. Eine Verwendung als Kraftstoff wäre nach entsprechender Reinigung zukünftig möglich, wobei die Marktstrukturen hierfür in Deutschland noch fehlen. Eine Einspeisung des Biogases ins Erdgasnetz wäre nach einer Reinigung auf Erdgasqualität zukünftig möglich.

Aus Herstellersicht werden klare Rahmenbedingungen für die Produktion und Vermarktung von Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen gefordert. Aus einer dokumentierten Fragebogenaktion bei Akteuren im Produktbereich nachwachsender Rohstoffe ergibt sich, dass eine positive Einstellung für die Zukunft überwiegt. Auch wenn dies nicht für alle Bereiche gilt, haben die meisten Unternehmen und Einrichtungen mehrere wirtschaftliche Standbeine, sodass eine kurzfristige Verschlechterung der wirtschaftlichen Lage in einem Einsatzfeld oftmals durch gegenläufige Entwicklungen in anderen Feldern ausgeglichen werden kann.

Verbraucher

Die verstärkte Nutzung von Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen stellt trotz einer Reihe ökologischer Vorteile keine Selbstverständlichkeit dar. Die Verbrauchersicht hierzu ist differenziert, wie regional begrenzte Modellversuche beispielsweise zu Bioverpackungen deutlich machen. Danach erwarten Verbraucher, dass Ver-

packungen aus nachwachsenden Rohstoffen vergleichbare funktionale und qualitative Eigenschaften wie herkömmliche Verpackungen aufweisen. Höhere Preise werden bei besserer Qualität oder einem Zusatznutzen am ehesten akzeptiert (z. B. Biotragetaschen, die auch als Biomüllbeutel verwendbar sind).

Insgesamt betrachtet wird eine ausreichende Produktvielfalt (Wählbarkeit zwischen verschiedenen Produktausführungen) erwartet, was ein entsprechend großes Sortiment an Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen voraussetzt. Umweltaspekte spielen zwar auch eine wichtige Rolle, jedoch vermögen diese nur in wenigen Fällen eine Kaufentscheidung bei einem erhöhten Preis auszulösen. Auch Gesundheitsaspekte werden i. d. R. positiv assoziiert. Erwartet wird weiterhin, dass die Information über das Produkt leicht verständlich und vollständig ist (z. B. Labeling) und dass die Produkte in Verbrauchernähe verfügbar sind. Auch spielen emotionale Aspekte und ästhetische Werte eine Rolle. Auffallend sind in vielen Fällen Informationsdefizite auf der Verbraucherseite in allen genannten Segmenten – angefangen von der technischen Eignung (z. B. bei Bioschmierstoffen) über die ökologischen Vorteile bis hin zu Bezugsquellen. Konsequentes Marketing beim Vertrieb seitens der Unternehmen ist deshalb unabdingbar.

Makroökonomische Aspekte

Sowohl für die stoffliche als auch für die energetische Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen ist es auf Basis der vorliegenden wissenschaftlichen Ergebnisse bislang nicht möglich, die volkswirtschaftlichen Effekte in Deutschland umfassend zu bewerten. Zu Beschäftigungswirkungen und Fiskaleffekten der energetischen Nutzung liegen zwar Studien vor, deren Ergebnisse jedoch teilweise deutlich divergieren. Ähnlich kontrovers wie Beschäftigungswirkungen werden Fiskaleffekte der energetischen Nutzung dargestellt, bei der v. a. die Auswirkungen der Mineralölsteuerbefreiung für Biokraftstoffe auf öffentliche Finanzen unterschiedlich beurteilt werden. Ähnliches gilt zudem für den Einfluss des EEG auf die Höhe der Strompreise für private Haushalte, im Gewerbe und in der Industrie sowie die daraus resultierende Nettobelastung (z. B. privater Stromkunden). Auch in anderen Analysedimensionen (z. B. der Effekt auf Agrarstrukturwandel und Einkommen in der Landwirtschaft, Kosteneffizienz im Hinblick auf ökologische Ziele, Exportchancen) ergibt sich ein wenig klares Bild. Bei der Untersuchung der makroökonomischen Effekte der Nutzung nachwachsender Rohstoffe besteht deshalb Forschungsbedarf.

Handlungsfelder, FUE-Bedarf, Umwelt- und Folgenanalysen

Die technischen Möglichkeiten, nachwachsende Rohstoffe stofflich zu nutzen, sind derzeit noch nicht ausgeschöpft. Mögliche Handlungsfelder zur Erschließung ihrer ökonomischen und ökologischen Potenziale sind u. a.:

- Festlegung konkreter Zielsetzungen für die stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe: So wäre etwa eine „Roadmap für die stoffliche Nutzung“ hilfreich, um Ziele klarer zu definieren und entsprechende Schwerpunkte, z. B. in Form von Forschungs- und Förderstrategien, zu setzen.
- Verbesserung der technischen Möglichkeiten zur stofflichen Verarbeitung nachwachsender Rohstoffe: Hierzu müssten Forschung, Entwicklung und Demonstration angesichts der spezifischen Unreife der Entwicklung in ausgewählten Bereichen gezielt voran getrieben werden.
- Weiterentwicklung und gezielte Förderung des Schlüsselbausteins einer zukünftigen stofflichen industriellen Nutzung nachwachsender Rohstoffen der Bioraffineriekonzepte: Dort besteht noch enormer Entwicklungsbedarf hinsichtlich der Auslegung der Basiskonzepte, technischer Umsetzungsmöglichkeiten sowie entsprechender Demonstrationsanlagen.
- Weiterentwicklung spezifischer Verfahren der energetischen Nutzung, da diese etwa über die Synthesegas-erzeugung oder die Ethanolherstellung (als potenzielle Plattformchemikalie) eine „technische Verbindung“ zur stofflichen Nutzung eröffnen.
- Anbau- und züchterische Anpassungen von Pflanzen: Entsprechende Versuche und Forschungsanstrengungen wären für die stoffliche (Inhaltsstoffe) als auch energetische Nutzung (Energiepflanzen) auszubauen.
- Etablierung einer Begleitforschung wie etwa die Durchführung von entsprechend ausgelegten Öko- und Folgenanalysen: Diese könnte helfen, den Stellenwert der industriell stofflichen Nutzung präziser zu bestimmen und Prioritätensetzung bei FuE sowie der Förderung vorbereiten.
- Etablierung einer Markt- und Akzeptanzforschung für Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen: Sie könnte dazu beitragen, bei Herstellern, Anwendern und Verbrauchern Vorbehalte und damit derzeitige Markthemmnisse abzubauen;
- Absehbare Flächen- und Nutzungskonkurrenzen der stofflichen und energetischen Verwendung nachwachsender Rohstoffe vorausschauend analysieren und in eine strategische Ausrichtung integrieren.
- Verbesserung der Datenbasis zur statistischen Erfassung von Produktionsmengen und Produkten: Eine industriennahe Informations- und Datenerfassung würde mehr Transparenz schaffen und zum anderen die notwendige Basis für die Ermittlung makroökonomischer Effekte liefern.
- Erfassung zusätzlicher Indikatoren: Für eine umfassende Bewertung wäre es sinnvoll, als Bilanzgröße CO₂-Vermeidungskosten für ausgewählte Produkt-pfade zu integrieren.
- Berücksichtigung der konkreten Bereitstellungs- und Anbaubedingungen importierter nachwachsender Rohstoffe (Umwelt- und Sozialstandards) bei weiterführenden Bewertungskonzepten.

I. Einleitung

Eine zukünftig verstärkte stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe wird mit einer Reihe von Vorteilen in Verbindung gebracht, zu denen u. a. folgende gehören:

- Durch einen verstärkten Einsatz nachwachsender Rohstoffe können endliche, nichterneuerbare Rohstoffe bereits heute teilweise ersetzt werden. Damit ließen sich bei entsprechendem Ausbau Importabhängigkeiten (z. B. vom Erdöl) verringern sowie die Ausbeutungsgeschwindigkeit nichterneuerbarer Ressourcen vermindern.
- Nachwachsende Rohstoffe können partiell im Inland angebaut werden, sodass auch hier Importe verringert werden könnten. Der Anbau nachwachsender Rohstoffe kann zudem zur Erhaltung der biologischen Vielfalt beitragen.
- Der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen gestaltet sich in Bezug auf CO₂-Emissionen neutral, da das in der Nutzungsphase freiwerdende CO₂ in der Wachstumsphase aus der Atmosphäre „entnommen“ wurde. Dies trifft auch auf die Option der sog. Kaskadennutzung (erst stofflich dann energetisch) zu.
- Produktentwicklungen aus nachwachsenden Rohstoffen besitzen ein teils beachtliches Innovationspotenzial – einerseits in der Weiterentwicklung von Herstellungstechnologien (z. B. für zukünftige Bioraffinerien) und andererseits aufgrund ihrer Eigenschaften (z. B. Bioabbaubarkeit).

Diskutiert wird die Option einer verstärkten (stofflichen) Nutzung nachwachsender Rohstoffe aber nicht nur vor dem Hintergrund der zunehmenden Verknappung fossiler Rohstoffe und einer bisher vorwiegend energetischen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen. Vielmehr wird auch eine mögliche längerfristige Umstellung der bisherigen petrochemischen Rohstoffbasis der chemischen Industrie auf nachwachsende Rohstoffe – vergleichbar der Idee einer längerfristigen Umstellung der Energiewirtschaft auf erneuerbare Energieträger – verstärkt diskutiert. Dahinter steht die Vision einer schadstoffarmen und ressourcenschonenden Versorgung mit Grundchemikalien wie auch mit daraus hergestellten Produkten für die verschiedensten Einsatzbereiche. Damit könnten Herstellung und Verarbeitung chemischer Produkte umweltfreundlicher und nachhaltiger gestaltet werden.

Die derzeitige industrielle Nutzung nachwachsender Rohstoffe fokussiert auf Produkte, die bei technischer Eignung eine hohe Wertschöpfung ermöglichen, die in einer relativ konstanten Qualität verfügbar sind und mit denen Produkte evtl. preiswerter als auf Erdölbasis hergestellt werden können. Da aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellte Produkte allerdings gegen in über viele Jahrzehnte gewachsene Produktstammbäume antreten und zudem neben ihrer praktischen Gleichwertigkeit auch wettbewerbsfähig sein sollen, ist die „Latte“ relativ hochgelegt. Nachwachsende Rohstoffe werden vermutlich dann eine Option darstellen, wenn petrochemische Roh-

stoffe noch deutlich teurer werden, als es heute der Fall ist.

Gegenstand und Aufbau des Berichts

Vor diesem Hintergrund wurde auf Vorschlag des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung im Frühjahr 2005 die Bearbeitung dieses Themenfeldes als Monitoring begonnen. Zentrales Ziel der Untersuchung ist ein möglichst umfassender Überblick über die verschiedenen Forschungs- und Einsatzfelder im Bereich der industriellen stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe, um den erreichten Stand sowie die zukünftigen Perspektiven zu dokumentieren. In der Bearbeitungstiefe deutlich zurückgenommen soll in diese Übersichtsdarstellung – quasi als Vergleichsebene – auch die energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe einfließen. Damit soll zum einen eine Einordnung der stofflichen in die gesamte Nutzung vorhandener Biomasseressourcen ermöglicht werden und zum anderen – quasi als Nebenziel – sollen Flächen- und Nutzungskonkurrenzen zwischen den verschiedenen Einsatzmöglichkeiten aufgezeigt werden.

Eine vollständige Abbildung aller Einsatzmöglichkeiten von nachwachsenden Rohstoffen wurde für diesen Bericht nicht angestrebt. Vielmehr sollen anhand ausgewählter Bereiche, die von den Herstellungsmengen bereits heute relevant sind, ein erster Einblick in die aktuelle Nutzung sowie eine näherungsweise ökologische Einordnung gegeben werden – soweit auf Basis der verfügbaren Daten- und Informationslage möglich.

Der Aufbau des Berichts stellt sich folgendermaßen dar: Zunächst erfolgen in Kapitel II eine Klärung des Begriffs Biomasse und eine Darstellung des Betrachtungsrahmens. In Kapitel III und IV wird die aktuelle und zukünftige stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen thematisiert. Die Kapitel V (energetische Nutzung), VI (Flächen- und Nutzungskonkurrenzen) und VII (marktliche Aspekte) stellen eine Bestandsaufnahme dreier Themenfelder dar, die die Grundlage für eine integrierte Betrachtung der Biomassegesamtnutzung eröffnet. In Kapitel VIII werden Handlungsfelder aufgezeigt und FuE-Bedarf thematisiert.

Im Einzelnen wird in Kapitel III die aktuelle Nutzung, z. T. mit Blick auf eine mittelfristig zukünftige stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe beleuchtet. Diese zeichnet sich durch eine hohe Komplexität hinsichtlich möglicher Erzeugungs- und Herstellungspfade aus. Daher wird zunächst auf die Gewinnung der Ausgangsstoffe mit Blick auf relevante Einsatzbereiche eingegangen, wobei für eine ausgewählte Produktpalette auch Aspekte der Weiterverarbeitung (chemische Umsetzungen, Veredlungen etc.) thematisiert werden. Mit dem Ziel einer ersten ökologischen Bewertung werden drei Bereiche (Schmierstoffe, Biokunststoffe und Fasern) auf der Basis einer Literaturoswertung näher betrachtet.

In Kapitel IV steht die (längerfristige) zukünftige stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe im Blickpunkt. Damit geht der Bezug weg von einer punktuellen Verar-

beitung hin zu einer breiter aufgestellten Herstellung chemischer Grundstoffe. Ziel ist es, derzeit diskutierte chemisch-technische Optionen aufzuzeigen – z. B. die der teilweisen Umstellung der heutigen Petrochemie auf nachwachsende Rohstoffe. Hierzu wurden auf der Basis heutiger Erkenntnisse exemplarisch drei Übersichtsökobilanzen erstellt – und zwar für die grüne, die Lignocellulose-Feedstock- sowie die Getreide-Ganzpflanzen-Bioraffinerie.

Im Gegensatz zur stofflichen ist die energetische Nutzung deutlich besser untersucht. In Kapitel V werden verfügbare Metastudien hinsichtlich einzelner Kraftstoffpfade sowie der Strom- und Wärmeerzeugung aus Biomasse synoptisch aufgearbeitet. Das Augenmerk liegt sowohl auf alternativen Kraftstoffen der ersten Generation (z. B. Ethanol) als auch auf synthetischen Kraftstoffen der zweiten Generation (z. B. BTL).

In Kapitel VI geht es um Flächen- und Nutzungskonkurrenzen nachwachsender Rohstoffe als eine Art „Massenrohstoff aus der Landwirtschaft“. Dabei werden die Nachfrage- und die Angebotsseite unter Berücksichtigung verschiedener Rahmenbedingungen gegenübergestellt. Abschließend werden die Anbau- und Mengenrelevanz unter Einbeziehung der europäischen Ebene einer ersten Einschätzung unterzogen.

In Kapitel VII werden ausgewählte (makro)ökonomische Aspekte der derzeitigen Nutzung nachwachsender Rohstoffe sowie Erwartungen von Akteuren aus Wirtschaft und Verbänden sowie Verbrauchern thematisiert.

In Auftrag gegebene Gutachten

Folgende Gutachten wurden im Rahmen dieses Projekts vergeben und sind in diesen Bericht eingeflossen:

- Stoffliche Nutzung Nachwachsender Rohstoffe. Themenfeld 1: Die stoffliche industrielle Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Themenfeld 5: Stand der stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe in anderen Ländern (Autoren: Michael Kamm, Petra Schönicke [biorefinery.de GmbH, Potsdam], Birgit Kamm [biopos, Teltow])
- Ökologische Bewertung von nachwachsenden Rohstoffen: Bewertungsrahmen und Ergebnisse. (Autoren: Guido Reinhardt, Sven Gärtner, Andreas Patyk; ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH)
- Industrielle stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe – Energetische Nutzung. (Autoren: Guido Reinhardt, Sven Gärtner, Andreas Patyk; ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH)
- Industrielle Stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Themenfeld 3: Flächen- und Nutzungskonkurrenz in der nachwachsenden Rohstoffbasis. (Autoren: Daniela Thrän, Jaqueline Daniel, Michael Weber, Nicole Fröhlich; Institut für Energetik, Leipzig)
- Industrielle stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Themenfeld 4: Produkte aus nachwachsenden

Rohstoffen – Markt, makroökonomische Effekte und Verbraucherakzeptanz. (Autoren: Klaus Menrad, Thomas Decker, Andreas Gabriel, Sebastian Kilburg, Edmund Langer, Bettina Schmidt, Martin Zerhoch; Fachhochschule Weihenstephan, C.A.R.M.E.N. e.V., Straubing)

Den Gutachterinnen und Gutachtern sei an dieser Stelle ganz herzlich für ihre Arbeit gedankt. Sie bildet das Fundament für viele der in diesem Bericht getroffenen Einschätzungen. Im Text wird jeweils darauf verwiesen, welche Passagen auf welche Gutachten Bezug nehmen.

Ein besonderer Dank geht an Herrn Dr. Thomas Petermann für die kritische Durchsicht und konstruktive Kommentierung des Berichts sowie für zahlreiche Verbesserungsvorschläge, und nicht zuletzt an Ulrike Goelsdorf und Gaby Rastätter für die Unterstützung bei der Erstellung des Endlayouts.

II. Begriffe und Untersuchungsrahmen

1. Biomasse als nachwachsender Rohstoff

Die Begriffe „Biomasse“ und „nachwachsende Rohstoffe“ werden in unterschiedlichen Kontexten, teilweise auch synonym, verwendet. Zur Einordnung der Begrifflichkeiten im vorliegenden Bericht sei auf gängige Definitionen Bezug genommen.

Unter dem Begriff „nachwachsende Rohstoffe“ (NaWaRo) werden alle biogenen organischen Stoffe pflanzlicher oder tierischer Herkunft eingeordnet, die nicht als Nahrungs- und Futtermittel, sondern als chemisch/technische Rohstoffe bzw. zur Energiegewinnung genutzt werden (Leible et al. 2001). Im engeren Sinne wird damit oft Biomasse pflanzlicher Herkunft bezeichnet. Biomasse umfasst jedoch im weitesten Sinne die gesamten, durch Pflanzen, Tiere oder den Menschen anfallenden bzw. erzeugten Stoffe organischer Herkunft – unterteilt in Primär- und Sekundärprodukte. Erstere entstehen durch die direkte Speicherung von Sonnenenergie (Phytomasse). Sekundärprodukte sind solche, die durch die Aufnahme und den Umbau von Primärprodukten entstehen (u. a. Zoomasse) (Hemme-Seifert 2003). Mit Bezug zur zeitlichen Entstehung wird pflanzliche Biomasse wiederum in rezente (heutige, gegenwärtige) und fossile Biomasse (aus der erdgeschichtlichen Vergangenheit stammend) unterteilt. Biomasse beinhaltet somit:

- lebende Phyto- und Zoomasse (Pflanzen, Tiere),
- abgestorbene (aber noch nicht fossile) Phyto- und Zoomasse (Stroh etc.) sowie
- organische Reststoffe.

Biomasse kann als nachwachsender Rohstoff sowohl stofflich als auch energetisch genutzt werden. Beim Einsatz von Biomasse wird zwischen nachwachsenden Rohstoffen zur stofflichen Nutzung, Energiepflanzen sowie organischen Reststoffen unterschieden.

Nachwachsende Rohstoffe sind somit land- und forstwirtschaftlich erzeugte Produkte, die einer Verwendung im Nichtnahrungsmittelbereich zugeführt werden. Die Be-

zeichnung „nachwachsende Rohstoffe“ ist zunächst ein Sammelbegriff für land- und forstwirtschaftlich erzeugte Rohstoffe wie Holz, Flachs, Raps, Zuckerstoffe und Stärke aus Rüben, Kartoffeln oder Mais, die nach der Aufbereitung einer weiteren technischen oder energetischen Nutzung zugeführt werden können, wobei auch tierische Rohstoffe wie Wolle und Leder im weitesten Sinne zu dieser Kategorie zählen (Kap. III u. IV). Die Vorteile von nachwachsenden Rohstoffen liegen – verglichen mit fossilen Rohstoffen – in einer prinzipiell unbegrenzten Verfügbarkeit und in einer CO₂-Neutralität bei anthropogener Nutzung, da bei einer Verbrennung freiwerdendes CO₂ vorher von der Pflanze gebunden wurde. Weiterhin steht die „Synthesevorleistung der Natur“ im Fokus einer stofflichen Nutzung. Und nicht zuletzt bieten Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen eine hohe Bioabbaubarkeit, die z. B. einen Einsatz in umweltsensiblen Bereichen ermöglicht.

Als Energiepflanzen werden nachwachsende Rohstoffe bezeichnet, die primär für eine energetische Nutzung angebaut werden (Kap. V). Darunter fallen u. a. schnell wachsende Baumarten (z. B. auf Kurzumtriebsplantagen) und spezielle einjährige Energiepflanzen mit hohem Trockenmasseertrag als Brennstoff, zucker- und stärkehaltige Ackerfrüchte zur Umwandlung in Ethanol sowie Ölfrüchte für die Gewinnung von Bioölen bzw. Biodiesel (Rapsölmethylester) und deren Einsatz als Schmierstoff bzw. als Kraftstoff. Als Energiepflanzen bezeichnete Pflanzen bzw. Pflanzenbestandteile sind jedoch – bedingt durch ihre Inhaltsstoffe – prinzipiell auch zur stofflichen Nutzung einsetzbar (z. B. Getreide, Stroh). Dies wird u. a. in Kapitel VI (Nutzungskonkurrenzen) thematisiert.

Zu den organischen Reststoffen gehören solche aus der Verwertung bzw. Entsorgung industrieller oder (haus)wirtschaftlicher Prozesse (z. B. Exkrememente, organischer Hausmüll, Schlachthofabfälle, Klärschlamm, Kompost), aus der Land- bzw. Forstwirtschaft (z. B. Stroh, Gülle, Waldrestholz, Restholz aus der Landschaftspflege) sowie aus der technischen Umwandlung bzw. Verwertung (Papier, Zellstoff etc.). Organische Reststoffe sind heterogen in ihrer Zusammensetzung. Sie sind für eine energetische Verwendung (z. B. Erzeugung von Biogas) wie prinzipiell auch für eine stoffliche Nutzung einsetzbar.

2. Untersuchungsrahmen

In der vorliegenden Studie wird rezente Biomasse¹ betrachtet. Im Fokus stehen nachwachsende Rohstoffe (NaWaRo), die sich für eine stoffliche Nutzung² eignen. Betrachtet werden auch Energiepflanzen (nachgeordnet), da es hier zukünftig zu Überschneidungen in den Nutzungsoptionen kommen kann. Übergreifend soll der Kontext

¹ Der Bezug liegt auf terrestrischer Biomasse. Eine Nutzung aquatischer Biomasse (Mikro-, Makroalgen etc.) wird hier zunächst nicht berücksichtigt; eine erste Überblicksdarstellung hierzu findet sich z. B. in Richter et al. (2006).

² Wobei stofflich hier meint, dass primär eine Nutzung von Biomasseinhaltsstoffen zur nichtenergetischen Verwendung erfolgt, was eine Kaskadennutzung nicht ausschließt.

einer möglichen intensivierten stofflichen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen aufgezeigt werden (Nutzungskonkurrenzen etc.). Die Verwendung organischer Reststoffe für eine stoffliche Nutzung wird nur am Rande thematisiert.

Die integrierte Betrachtung der energetischen Nutzung soll dem Sachverhalt Rechnung tragen, dass heute bereits eine nicht unerhebliche Menge an nachwachsenden Rohstoffen für eine energetische Nutzung verwendet wird und bei einem zukünftig erwarteten weiteren Ausbau des Einsatzes von Bioenergieträgern noch zunehmen wird. Damit kann es bei diversen Nutzungspfaden rohstoffseitig zu Überschneidungen kommen, die sich bei einer weiter zunehmenden stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe begrenzend auswirken könnten.

Analyse und Bewertung der technischen Machbarkeit einer verstärkten stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe sind heute im Vergleich zur energetischen noch deutlich weniger untersucht. Diese Diskrepanz kann mit der vorliegenden Studie nicht überbrückt, sondern nur als solche dargestellt werden. Dennoch soll neben einer Übersichts-darstellung heute bereits praktizierter und zukünftig ange-dachter Verarbeitungspfade wesentlicher Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen (i. W. als Literaturob- wertung) punktuell eine quantitative ökologische Bewer- tungsdimension – als Diskussionsbasis – aufgezeigt werden. Dazu werden für ausgewählte Produktpfade Über- sichtsökobilanzen – teils aus der Literatur synoptisch zu- sammengestellt (Kap. III), teils neu erarbeitet (Kap. IV).

Im Folgenden werden die als „gedankliches Grundgerüst“ für die in Kapitel III bis VII verwendeten räumlichen und zeitlichen Systemgrenzen sowie möglichen Stoffströme an nachwachsenden Rohstoffen (Import/Export etc.) er- läutert:

Räumlicher Bezug, Export/Import

Im vorliegenden Sachstandsbericht wird zunächst auf den Standort Deutschland – mit einer europäischen Perspek- tive – fokussiert, um den Betrachtungsrahmen bearbeitbar zu halten. Besonderheiten mit Blick auf die weltweite Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen werden ausge- wählte Bezüge mit aufgeführt, sofern sie für das Ver- ständnis der Zusammenhänge wesentlich erschienen. Hintergrund dieser Vorgehensweise ist die Tatsache, dass bei einer ausschließlich auf Deutschland ausgerichteten Bezugsebene sämtliche nachwachsenden Rohstoffe auch hier produziert und verarbeitet werden müssten. Da dies ei- nerseits unrealistisch ist und andererseits eine bevorzugte Nutzung heimischer Rohstoffe und eine entsprechende Verarbeitung angenommen werden, rechtfertigt sich die perspektivische Öffnung des o. g. Fokus.

Für eine weiter führende – hier nicht vorgenommene – detaillierte Betrachtung mit stärkerem Bezug zum Anbau- gebiet der verwendeten Pflanzen (in Europa, Afrika, Süd- amerika etc.) sollten die zumeist kostengünstigeren An- bau- und Produktionsmöglichkeiten eine stärkere Rolle spielen, da diese wiederum den erzielbaren Marktpreis des NaWaRo-Produkts signifikant beeinflussen. Als Bei-

spiel sei hier die Ethanolproduktion aus in Brasilien ange- bautem Zuckerrohr benannt: Die dortigen Herstellungs- kapazitäten übersteigen weltweit alle anderen und erscheinen auch wirtschaftlich attraktiv. Da die Erzeu- gung von Bioethanol in Europa/Deutschland deutlich teu- rer ist, haben entsprechend große und preiswert auf dem Weltmarkt angebotene Mengen einen signifikanten Ein- fluss auf den europäischen Markt. Andererseits greift je- doch eine rein ökonomische Betrachtung zu kurz, da zum einen in eine Gesamtbetrachtung auch andere Kriterien, wie Produktionsbedingungen, einfließen sollten (z. B. so- ziale Komponenten des Zuckerrohranbaus). Diese Art „externer Effekte“ bleibt im Bericht zunächst unberück- sichtigt (bzw. wird nur am Rande im Sinne einer Einord- nung erwähnt). Zum anderen würden auch alle anderen Erzeugungspfade für Bioethanol in der weiteren Betrach- tung vernachlässigt werden, was jedoch ein verzerrtes Bild der prinzipiellen technischen Möglichkeiten – die zum Teil auch noch weiter vom Markt entfernt sind – er- geben würde. Ein weiterer Aspekt dieser Vorgehens- weise: für Kapitel IV ist es sinnvoll, beim ökologischen Vergleich Soja (als ersetztes Tierfutter) heranzuziehen, welches importiert wird, da kein Anbau in Deutschland erfolgt, sondern in Italien, Frankreich, Österreich etc.

Zum Themenfeld Import/Export gehört auch die Tatsa- che, dass ein wesentlicher Anteil der bisher in Deutsch- land verwendeten nachwachsenden Rohstoffe, wie Zell- stoff, Papier, Baumwolle etc., importiert wird. Dies trifft auch auf in Deutschland verfügbare Rohstoffe wie etwa Holz zu. Bei einer Reihe von Pflanzen ist deren entspre- chende Erzeugung in Europa entweder aus klimatischen Gründen nicht möglich oder sie ist deutlich teurer (z. B. Palmöl). Vor dem Hintergrund aktueller Diskussionen um die zukünftigen Potenziale einer Nutzung von nachwach- senden Rohstoffen, insbesondere heimisch produzierter Biomasse und Produkte, wird der Schwerpunkt der Be- trachtung zunächst auf „Deutschland in Europa“ gelegt.

Zeitlicher Rahmen

Der zeitliche Rahmen ergibt sich aus der aus heutiger Sicht wahrscheinlichsten Verfügbarkeit von technischen Verfahren und den damit herstellbaren Produkten in ent- sprechenden Mengen. Da für verschiedene Produkte un- terschiedliche zeitliche Bezüge infrage kommen, wird un- terschieden in:

- „Heute“: Darunter fallen Produkte aus dem Bereich der nachwachsenden Rohstoffe, die bereits heute in bedeutenden Mengen auf dem Markt sind, wie Papier, Zellstoff, Baumwolle etc.
- „Morgen“: Dazu zählen Produkte aus nachwachsen- den Rohstoffen, die innerhalb der nächsten zehn bis 15 Jahre in großem Umfang eingesetzt werden kön- nen, weil bereits heute Technologien und Potenziale zu ihrer Einführung existieren bzw. auch schon ge- ringe Mengen auf dem Markt sind.
- „Übermorgen“: Darunter fallen Produkte, die etwa ab 2025 oder später signifikante Potenziale eröffnen, wie

beispielsweise BTL-Kraftstoffe oder Bioraffinerieprodukte.

Eine solche Unterteilung trägt dem Umstand Rechnung, dass aus politischer Sicht unterschiedliche Rahmenbedingungen und Maßnahmen im Falle einer verstärkten Umsetzung einzelner Produktpfade nötig sind: In den ersten beiden Zeiträumen wären dies insbesondere Maßnahmen zur verstärkten Fortführung der bisher eingeschlagenen Wege hinsichtlich Markteinführung oder Realisierung, während im letztgenannten Zeitraum – neben Fragen der ökologischen und ökonomischen Tragfähigkeit – vor allem noch grundlegender Forschungsbedarf und die technische Machbarkeit im Vordergrund stehen.

III. Aktuelle stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen

Die stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen zeichnet sich durch eine enorme Vielfalt aus und verbindet sich mit einer hohen Komplexität aufseiten möglicher Bereit- und Herstellungspfade. In diesem Kapitel werden wesentliche Bereitstellungs- und Nutzungspfade im Überblick zusammengestellt. Im Vordergrund von Kapitel III.1 stehen folgende Fragen: Welche Produkte lassen sich momentan bereits aus nachwachsenden Rohstoffen herstellen? Welche Nutzungseigenschaften weisen diese auf? Wo liegen Schwerpunkte in der heutigen stofflichen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen? Der Fokus in der Darstellung liegt auf bisher weniger am Markt etablierte Rohstoffe und Einsatzfelder, wobei stärker etablierte – wie etwa Holz oder die Zellstoffverarbeitung – im Sinne eines Gesamtbilds ansatzweise erwähnt werden.

Neben den hier in Kapitel III aufgeführten, zumeist eher punktuellen stofflichen Nutzungsmöglichkeiten von nachwachsenden Rohstoffen in der Industrie gibt es auch weiterführende Ideen, wie etwa die heutige Petrochemie auf eine nachwachsende Rohstoffbasis umzustellen (Bioraffinerien); diese Ansätze werden in Kapitel IV diskutiert.

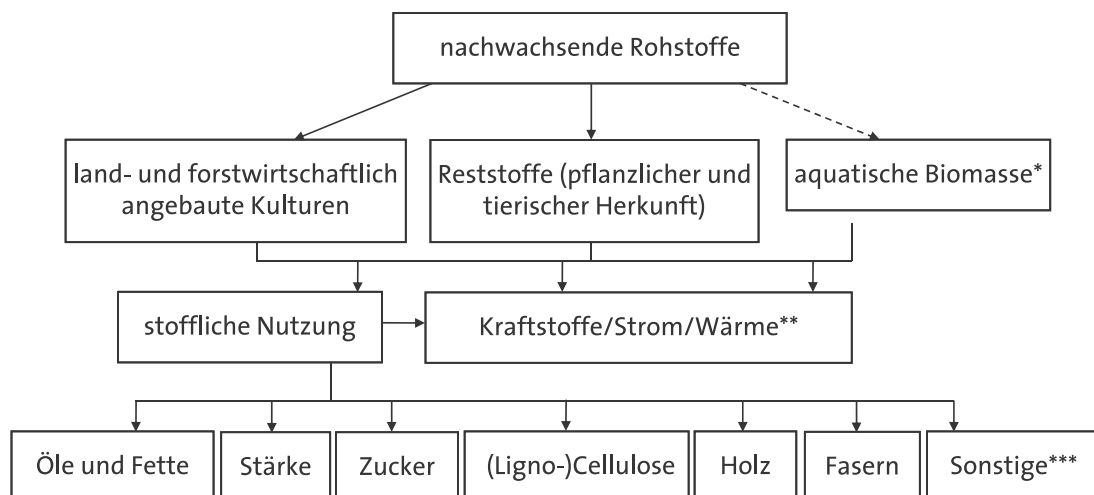
Seitens der chemischen Industrie zeigt sich ein beachtliches Engagement, (partiell) auf nachwachsende Rohstoffe zurückzugreifen. In den letzten Jahren ist eine Reihe neuer Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen auf den Markt gekommen (z. B. biologisch abbaubare Folien, Verpackungen). Dabei stehen neuere Anwendungen oft erst am Anfang einer breiteren Nutzung, und es sind sicher Einzelfallprüfungen notwendig, inwieweit der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen unter den aktuellen Randbedingungen ökologisch (wie auch ökonomisch) sinnvoll ist. Ökologischen Aspekten wird in Kapitel III.2 Rechnung getragen, in dem für drei ausgewählte Bereiche (Schmierstoffe, Biokunststoffe und Fasern) Produktökobilanzen zusammenfassend dargestellt werden.

1. Stoffliche Nutzung – ein Überblick

Die folgenden Ausführungen sind hier zunächst als Überblick angelegt, der keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt. Zusammengestellt sind wesentliche stoffliche Anwendungen nachwachsender Rohstoffe, die heute bereits genutzt werden und zudem Potenziale für die Zukunft aufweisen. Einen groben Überblick über relevante Stoff- bzw. Nutzungsgruppen gibt Abbildung 1.

Abbildung 1

Übersicht zu wesentlichen Nutzungs- bzw. Stoffgruppen von nachwachsenden Rohstoffen im Nichtnahrungsmittelbereich



* Ist in der momentanen Diskussion nicht etabliert, wäre aber im Grunde genommen dazu zu rechnen.

** Überschneidungen zwischen stofflicher und energetischer Nutzung (z. B. Holz, Kap. V).

*** u. a. pharmazeutische Wirkstoffe, Proteine, Farbstoffe

Quelle: eigene Darstellung

1.1 Ausgangssituation in Deutschland

Die folgenden Ausführungen basieren wesentlich auf FHW/C.A.R.M.E.N. (2006) und Peters (2006).

1.1.1 Anbau pflanzlicher Rohstoffe in Deutschland

Von der Gesamtfläche Deutschlands (35,7 Mio. ha = 357 050 km²) wurden 2004 als Landwirtschaftsfläche ca. 17 Mio. ha und als Waldfläche ca. 11 Mio. ha ausgewiesen, wobei von der gesamten Landwirtschaftsfläche knapp 12 Mio. ha als Ackerland und ca. 5 Mio. ha als Grünland genutzt werden (Deggau 2006; StaBu 2006). Laut FNR (Peters 2006)

- wird zunächst von einer Eignung aller Acker- und Grünlandflächen in Deutschland zur Erzeugung nachwachsender Rohstoffe ausgegangen, wobei zusätzlich auch Stilllegungsflächen genutzt werden können;
- macht der Anbau von nachwachsenden Rohstoffen in Deutschland für die stoffliche und energetische Nutzung derzeit etwa 12 Prozent der Ackerfläche Deutschlands aus;
- erfolgt auf Grünlandflächen bisher kein Anbau nachwachsender Rohstoffe zur stofflichen Nutzung;

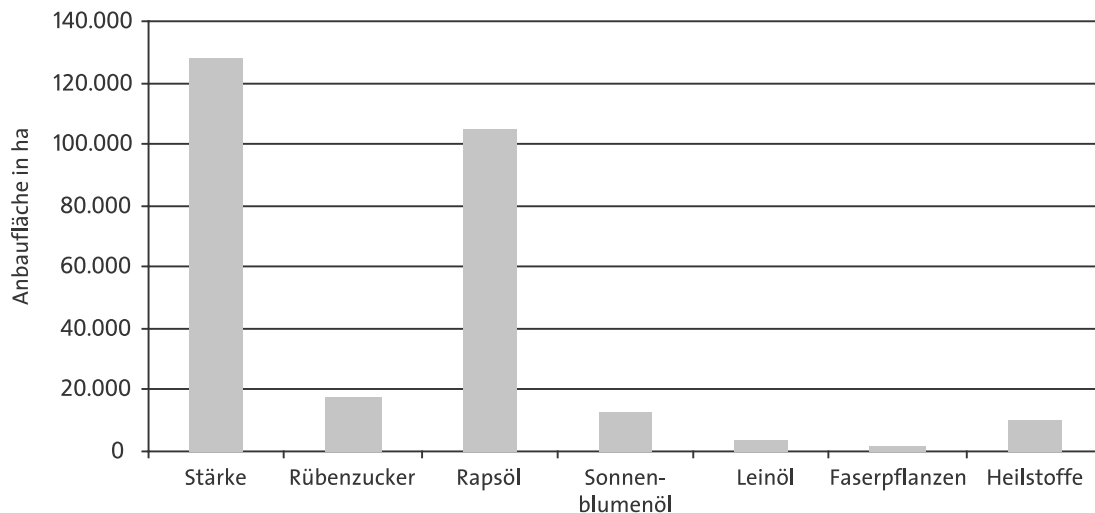
- werden ca. 30 bis 40 Prozent der in Deutschland insgesamt stofflich im Nichtnahrungsmittelbereich eingesetzten agrarischen Rohstoffe durch die heimische Landwirtschaft bereitgestellt. Der Mehrbedarf wird über Importe (Europa, Übersee) abgedeckt. Dabei handelt es sich überwiegend um pflanzliche Rohstoffe, die aus klimatischen Gründen nicht bei uns angebaut werden können.

Abbildung 2 zeigt die Aufteilung der stofflich genutzten Anbaufläche in Deutschland. Danach macht Stärke den größten Anteil aus, gefolgt von Rapsöl. Rübenzucker, Sonnenblumenöl und Heilstoffe weisen eine deutlich geringere Relevanz auf. Leinöl und Faserpflanzen fallen kaum ins Gewicht.

Neben dem Anbau von nachwachsenden Rohstoffen gehört zur stofflich nutzbaren Biomasse auch Holz, welches hier – ob seiner prinzipiellen und in den meisten Fällen bereits etablierten Nutzung – mit aufgeführt ist, im Folgenden jedoch keinen Schwerpunkt in der Darstellung bildet. In Deutschland betragen die Holzvorräte ca. 3,4 Mrd. m³ (320 m³/ha), wobei Zuwachsschätzungen für die nächsten Jahre von ca. 10 Vorratsmeter/ha je Jahr ausgehen unter der Annahme, dass das potenzielle Holzaufkommen für die nächsten 20 Jahre auf ca. 79 Mio. Erntefestmeter/Jahr liegt (Peters 2006).

Abbildung 2

Aufteilung der Anbaufläche zur stofflichen Nutzung in Deutschland



Die dargestellte Gesamtfläche beträgt 278 800 ha. Dies entspricht ca. 2 Prozent der Ackerfläche.
 Quelle: eigene Darstellung mit Daten aus Peters (2006); auf Basis einer vorläufigen Schätzung des BMELV für 2005

1.1.2 Nachwachsende Rohstoffe in der Industrie

Im industriellen chemisch-technischen Bereich (chemisch-pharmazeutische, naturfaserverarbeitende, Papierindustrie) werden in Deutschland jährlich ca. 2,7 Mio. t nachwachsende Rohstoffe stofflich genutzt (chemische Industrie 2 Mio. t, chemienahe Industrien³ 0,7 Mio. t) (Rothermel 2006, nach Biorefinery 2006a). Ein Schwerpunkt der Nutzung (pflanzlicher und tierischer) nachwachsender Rohstoffe im industriellen Bereich ist somit in der chemischen Industrie zu finden⁴, wobei die 2 Mio. t einem Anteil von etwa 10 Prozent der gesamten Rohstoffbasis der chemischen Industrie entsprechen (VCI 2005). Eine Auf-

teilung der stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe für 2005 ist in Abbildung 3 aufgeführt.

Den größten Anteil nehmen demnach mengenmäßig Öle und Fette ein, wobei hier nichtheimische Öle wie Rizinusöl, Palmöl und Sojaöl sowie Palmkernöl und Kokosöl den größeren Anteil ausmachen (Tabelle 1). Fasst man darüber hinaus kohlenhydrathaltige Verbindungen bzw. Stoffgruppen (Stärke, Cellulose und Zucker) zusammen, so ergibt sich eine ähnliche Größenordnung (im Vergleich zu Ölen und Fetten), die für eine weiter gehende stoffliche Verarbeitung bereits heute zur Verfügung steht.

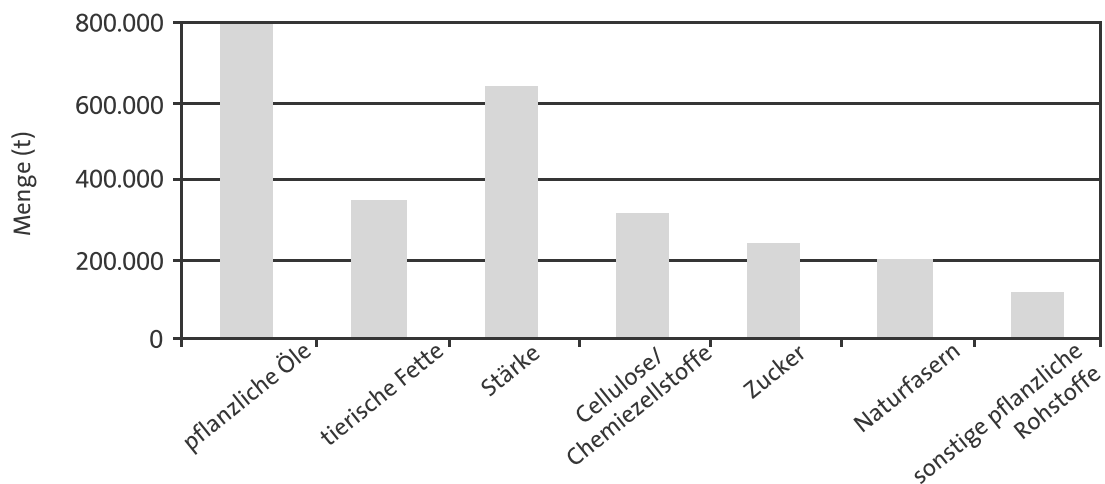
Die Bandbreite der heute bereits genutzten Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen ist beachtlich (Tabelle 2). Sie reicht von etablierten Holzverwendungen (Möbelindustrie, Zellstoff- und Papierindustrie etc.) über den Einsatz von Dämmstoffen und natürlichen Fasern bis hin zu Tensiden (Wasch- und Reinigungsmittel etc.), Bioschmierstoffen und Biokunststoffen sowie der Nutzung besonderer Inhaltsstoffe (pharmazeutischer Bereich).

³ Im Wesentlichen naturfaserverarbeitende und Papierindustrie.

⁴ Zur Einordnung: Im Jahre 2005 wurden in Deutschland ca. 111 Mio. t an Rohöl im Inland abgesetzt, davon ca. 18 Mio. t in Form von Rohbenzin (MWV 2005a). Dieses ging als Naphtha im Wesentlichen in die stoffliche Weiterverarbeitung der Petrochemie (Kap. IV). Derzeit werden ca. 7 Prozent des Erdöls und ca. 4 Prozent der gesamten fossilen Rohstoffe (Kohle, Öl, Gas) in Deutschland stofflich genutzt (Rest: Energiegewinnung und Kraftstoffbereitstellung).

Abbildung 3

Stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen in Deutschland (2005)



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus Peters (2006) basierend auf VCI, meó, Mantau/Universität Hamburg, BFH. Berücksichtigt sind land- und forstwirtschaftliche Rohstoffe.

Tabelle 1

**Einsatz nachwachsender Rohstoffe in Deutschland unter besonderer Berücksichtigung
der chemischen Industrie**

nachwachsender Rohstoff*	Menge/Jahr (t)	Bemerkungen
Öle und Fette	1 150 000	für technische Zwecke, ohne Kraftstoffe
pflanzliche Öle	805 000	
– heimische Öle	230 000	Rapsöl (erucareich**), Sonnenblumenöl, Leinöl, Rüböl
– nichtheimische Öle	575 000	Rizinusöl, Palmöl, Sojaöl, Palmkernöl, Kokosöl
tierische Fette	345 000	Rindertalk, Schweineschmalz, Fischöle
Kohlenhydrate	1 200 000	für die Chemieindustrie
Chemiestärke	492 000	
Papierstärke	144 000	
Chemiezucker	240 000	
– davon	144 000	Saccharose/Isoglucose mit Produktionserstattung lt. ZMO (EC 1260/2001)
	96 000	Saccharose und Melasse ohne Produktionserstattung
Chemiecellulose	324 000	
– davon	ca. 133 000	Cellulosederivate (Celluloseester, Celluloseether)
	ca. 191 000	Celluloseregenerate (Fasern, Filamente, Stapelfasern, Filme)

* Über die hier aufgeführten Verwendungen hinaus werden geringere Mengen diverser nachwachsender Rohstoffe (Proteine, Polysaccharide, Lignin, Pflanzeninhaltsstoffe etc.) eingesetzt.

** Beim Rapsamenöl werden grundsätzlich zwei Qualitätstypen unterschieden: (a) erucasäurefreies Rapsöl als wertvolles Speiseöl und zur Herstellung von Margarine (mit ernährungsphysiologisch günstiger Fettsäurezusammensetzung), was in jüngster Zeit auch für technische Zwecke (Hydraulik- und Schmieröl, Biodiesel) Verwendung findet und (b) erucasäurehaltiges Rapsöl (früher als „Rüböl“ bezeichnet) für Hilfsstoffe bei der Herstellung von Folien (Erucamid) sowie als Additiv für Schmiermittel, Bohrer, Kunststoffe, Tenside etc. (HeRo 2006).

Quelle: nach Rothermel 2006

Tabelle 2

Bandbreite stofflicher Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen

Rohstoffquellen						
Flachs, Hanf, Sisal, Ramie, Jute, Agave, Baumwolle, Kokosfasern, Brennnessel, Schilf, Stroh, Holzfasern, Kork, Altpapier/ -textilien	Hölzer verschiedener Baumarten	Zuckerrübe Zuckerrohr Zuckerhirse Topinambur Zichorie Laktose	Kartoffeln, Weizen, Roggen, Reis, Mais, Maniok, Sagopalme, Pfeilwurz, Erbsen	Sojabohnen, Erbsen, Raps, Kartoffeln, Milch, Horn, Federn, Wolle, Leder	Raps, Lein, Sonnenblumen, Soja, Rizinus, Mohn, Koriander, Oliven, Baumwolle, Ringelblume, Färberdistel	Arznei- und Gewürzpflanzen, Färbepflanzen, Gerbstoffe, Wachse, Gummi, Harze, Kautschuk

noch Tabelle 2

primär genutzte Inhaltsstoffe						
Fasern	Holz/Cellulose/Lignocell.	Zucker	Stärke	Proteine	Öle/Fette	besondere Inhaltsstoffe
wesentliche Einsatzbereiche/Produkte						
Baustoffe/ Dämmstoffe, Papier/Pappe/ Verpackung, Gärtnerei- und Landschafts- bau, Textilien/ Bekleidung, technische Textilien, Fa- serverbund- werkstoffe, Formpressteile Vliese/Filter- materialien	Bauholz, Span-/ Holzwolle-/ Holzfaser- platten Zell- stoff, Cellu- lose und Cellulose- derivate, Kunststoffe, chemische Grundstoffe, Gerbstoffe, Farbstoffe, Harze, Fette, Wachse	chemische Grundstoffe, Kosmetika, Pharmaka, Waschmittel/ Seifen/ Tenside, Kunststoffe/ Polymere, Farbstoffe, Anstrichmittel/ Lösungsmittel, Hilfsmittel für Gießereien/ Betonindustrie	Papier und Pappe, Bau- stoffe, Kleb- stoffe, Kunst- stoffe/Geschirr und Ver- packung, Waschmittel, Chemikalien, Pharmaka, Kosmetika	Tenside, technische Polymere, Grundstoffe für Chemika- lien, Dünger, Leime, Kasein- Anstrich- stoffe, Kosmetika, Pharmaka, Hilfsmittel für Papier-/Textil-/ Lederindustrie	Schmierstoffe, Hydrauliköle, Wasch- und Reinigungs- mittel, Kosmetika, Pharmaka, chemische Grundstoffe, Baustoffe, Farben/Lacke	Pharmaka, Kosmetika, Gewürze, Aromastoffe, Farbstoffe, Gerbstoffe, chemische Grundstoffe, Gummi, Kautschuk, Wachse, Harze Balsame

Quelle: nach AGENS Arbeitsgemeinschaft NaturStoffe (www.leb1.de/leonardo/seiten/nut_zung.html)

1.1.3 Gewinnung der Ausgangsstoffe und relevante Einsatzbereiche

Die wichtigsten Ausgangsstoffe und Einsatzfelder für stofflich genutzte nachwachsende Rohstoffe sind im Folgenden zusammengestellt – zunächst nach verwendeten Inhaltsstoffen (Kap. III.1.1.3) und anschließend nach wesentlichen Produkten (Kap. III.1.2) aufgelistet.

Öle und Fette

Pflanzliche Öle und Fette (pflanzliche Reservestoffe) sind chemisch gesehen ein Gemisch aus Glycerin-Fettsäureestern⁵, wobei ein höherer Anteil gesättigter Fettsäuren (z. B. Palmitin-, Stearinsäure) zur Bildung fester Fette führt und ungesättigte Fettsäuren (z. B. Öl-, Linol-, Linsäure) ein Absinken des Schmelzpunktes bewirken. Ölpflanzen aus den tropischen Regionen enthalten zu meist Fette (Kokosfett, Kakaobutter) mit einem hohen Schmelzpunkt. Unter den klimatischen Bedingungen der gemäßigten Breiten werden überwiegend Öle mit einem niedrigen Schmelzpunkt gebildet. Etablierte Pflanzenarten sind durch züchterische Maßnahmen in ihrer Ölqualität beeinflussbar und an spezielle Anforderungen der verarbeitenden Industrie anpassbar⁶ (FNR 2006a). Die Fettsäurezusammensetzung wirkt sich nicht nur auf die chemischen Eigenschaften, sondern auch auf die Synthesemöglichkeiten aus. Eine Übersicht über die Bezeichnung und Vorkommen gängiger Öle und Fette findet sich in Tabelle 3.

⁵ Ester sind organische Verbindungen aus Säuren (hier Fettsäuren) und Alkoholen (hier Glycerin).

⁶ Gezüchtet wurden z. B. Sonnenblumen, deren Ölanteil auf über 90 Prozent Ölsäure (C 18:1) ausgelegt ist. Rapsöl konnte erst nach dem „Wegzüchten“ des Erucasäureanteils (C 22:1) im Nahrungsmittelbereich genutzt werden (http://uni-giessen.de/nawaro/rohst_1.html).

Für die Produktion pflanzlicher Öle kommt eine Vielzahl von Ölsaaten in Betracht: Unter deutschen Klimabedingungen sind dies hauptsächlich (Winter-)Raps, Öllein, Sonnenblumen und Senf. Während Lein- und Sonnenblumenöl sowie andere Ölsaaten als nachwachsende Rohstoffe hauptsächlich zu Seifen, Farben und Lacken verarbeitet werden oder in anderen chemisch-technischen Bereichen Verwendung finden, hat sich im Sektor der Bioschmierstoffe und -öle hauptsächlich der Raps- und – mit geringen Anteilen – der Sonnenblumenanbau als Rohstoffquelle etabliert (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

Gründe hierfür liegen u. a. in Weiterentwicklungen in der Saatzucht (Entwicklung von 00-Raps⁷ und HO-Sonnenblumensorten⁸ mit weniger unerwünschten Inhaltsstoffen und höherem Flächenertrag), attraktiven Nebenprodukten für die Futterindustrie (Ölpresskuchen), der Markteinführung von Energieträgern aus Rapsöl (Biodiesel, RME) sowie (seit Mitte der 1990er Jahre) in Ausgleichszahlungen der EU für Stilllegungsflächen, die einen Anreiz zum Anbau von Raps als nachwachsendem Rohstoff für die Kraftstoffbereitstellung und zur stofflichen Nutzung geben (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

⁷ 00-Raps enthält – anstelle der einfach ungesättigten Erucasäure – Ölsäure, die für den menschlichen Organismus besser verträglich ist, und weist zudem einen deutlich verminderten Gehalt an Glucosinolaten auf.

⁸ HO(High-Oleic)-Sonnenblumensaat; Öle mit Ölsäuregehalten bis zu 90 Prozent; HO-Sonnenblumen liefern ein hochwertiges, dem Olivenöl ähnliches Lebensmittel, das zugleich ein idealer Rohstoff für die chemische Industrie darstellt: HO-Öle sind stabiler, haltbarer und gegen hohe Temperaturen wesentlich unempfindlicher als Öle, die reich an mehrfach ungesättigten Fettsäuren sind. Deshalb eignen sie sich als Grundlage von Hydraulikölen ebenso wie als Brat- und Fritierfett oder als Zutat von Baby- und Gesundheitsnahrung.

Tabelle 3

Bezeichnung und Vorkommen von Ölen und Fetten

Name	Vorkommen	Kurzbezeichnung
Laurinsäure	Palmöl, tierische Fette	C 12:0
Myristinsäure	Kokosöl, Palmöl, tierische Fette	C 14:0
Palmitinsäure	Palmöl, Bienenwachs	C 16:0
Stearinsäure	div. tierische und pflanzliche Fette	C 18:0
Ölsäure	Maisöl, Olivenöl, Sonnenblumenöl, Rapsöl	C 18:1
Linolsäure	Maisöl, Leinöl	C 18:2
Linolensäure	Leinöl, Sonnenblumenöl	C 18:3
Archidonsäure	Sardinienöl, Maisöl, tierische Fette	C 20:4
Erucaensäure	Rapsöl	C 22:1

Lesebeispiel: C 18:1 bedeutet, dass die Fettsäure aus 18 Kohlenstoffatomen besteht und eine Doppelbindung aufweist, also einfach ungesättigt ist.
Quelle: nach HeRo 2006

Die gestiegene Bedeutung von Raps- und Sonnenblumenöl als nachwachsende Rohstoffe spiegelt sich in den Anbauflächen und Erntemengen wider. Aufgrund des wieder auf 10 Prozent gestiegenen Stilllegungssatzes und wachsender Nachfrage nach Biodiesel stiegen die Anbauflächen von Non-Food-Raps im Jahr 2005 erstmals über die 1-Mio.-ha-Grenze⁹. Zur Ernte 2006 schätzte UFOP (2005) die Winterrapsanbaufläche auf ca. 1,43 Mio. ha, d. h. in Deutschland wird demnach soviel Winterraps angebaut wie nie zuvor¹⁰ (Rösch 2006). Der Anteil des Rapsanbaus zur technischen, chemischen und energetischen Verwendung im Verhältnis zum gesamten Rapsanbau liegt bei knapp 65 Prozent. 7,1 Prozent der gesam-

ten Ackerfläche in Deutschland wird mit NaWaRo-Raps bepflanzt (eigene Berechnung von FHW/C.A.R.M.E.N. 2006). Der Hauptteil geht in die Herstellung von Biodiesel, dessen erfolgreiche Markteinführung die Ursache für die Zunahme der Winterrapsanbauflächen ist. Laut UFOP (2005) wurde im Jahr 2005 etwa 9 Prozent der Rapsanbaufläche¹¹ zur Herstellung von Schmierstoffen und chemischen Produkten genutzt (Rösch 2006).

Einen Überblick über die Anteile der wichtigsten Öle und Fette an der Gesamtproduktion (weltweit) gibt Tabelle 4. Ersichtlich ist, dass nichtheimische Ölsorten wie Palmöl und „Laurinöle“ (Kokos- und Palmkernöl) einen Anteil von 27 Prozent an der weltweiten Ölproduktion ausmachen; bei Hinzunahme von Sojaöl liegt der Anteil bei 52 Prozent. Die Bedeutung von Raps- und Sonnenblumenöl ist mit 17 Prozent deutlich geringer.

⁹ 2005 wurden nach vorläufigen Schätzungen des BMELV (2005b) in Deutschland ca. 1,1 Mio. ha Raps (davon 0,3 Mio. ha auf Stilllegungsflächen) als nachwachsender Rohstoff angebaut. Der Anbau von Sonnenblumen als NaWaRo lag danach in 2005 bei 12 800 ha (davon 1 900 ha auf Stilllegungsflächen) (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

¹⁰ Für die Ernte 2007 rechnet der Deutsche Bauernverband mit einer Steigerung bis auf 1,5 Mio. ha Rapsanbau (DBV 2006).

¹¹ Die Steigerungen des Rapsanteils finden hauptsächlich auf „normalen“ Flächen statt, weniger stark auf Stilllegungsflächen.

Tabelle 4

Weltproduktion von Ölen und Fetten (2003)

Öl/Fett	Produktion (Mio. t/Jahr)	Anteil an der Gesamtmengenproduktion (in %)
Sojaöl	31,3	25
Palmöl	27,8	22
Rapsöl	12,5	10
Sonnenblumenöl	8,9	7
Palmkern- und Kokosöl	6,6	5
sonstige	16,0	13
tierische Fette	21,4	18
gesamt	124,6	100

Quelle: Hof 2005, S. 146

Die prozentualen Anteile in Deutschland verfügbarer pflanzlicher Öle sind in Abbildung 4 aufgeführt (verfügbare Gesamtmenge: 3,3 Mio. t/Jahr¹²). Rapsöl besitzt mit 44 Prozent (1,4 Mio. t) die größte Bedeutung, gefolgt von Palmöl (16 Prozent, 507 000 t), das ausschließlich importiert wird, und von Sojaöl (14 Prozent, 455 000 t), das in Deutschland zwar produziert, dessen Ölsaaten jedoch nicht angebaut werden (können).

Geht man davon aus, dass der Anteil der Oleochemie in Deutschland bei ca. 10 Prozent liegt, werden in Deutschland jährlich ca. 330 000 t pflanzliche Öle für die Herstellung oleochemischer Produkte verbraucht. Davon stammen 125 000 t (ca. 38 Prozent) aus heimischem Anbau (FNR 2003).

Bei der Verarbeitung von Ölsaaten wird zwischen größeren und kleineren Anlagen unterschieden. Industrielle Großanlagen produzieren Öle und Fette aus Ölsaaten wie Soja, Raps, Sonnenblumen, andere Öle aus nichtheimischen Ölfrüchten, verarbeiten aber auch Produkte tierischen Ursprungs. Die Ölsaatenverarbeitung in kleineren Anlagen (Standortschwerpunkt ist der süddeutsche Raum¹³) spielt aufgrund geringer Produktionskapazitäten bei der Weiterverarbeitung zu Bioschmierstoffen eine untergeordnete Rolle (TFZ 2005, nach FHW/C.A.R.M.E.N. 2006). Nach Pressung und Extraktion entstehen aus den Ölsaaten in den Ölmühlen Rohöle, die anschließend weiter raffiniert werden. Die erzeugten Produkte werden sowohl für den Speise- und Ernährungssektor als auch zur chemischen, technischen oder energetischen Nutzung bereitgestellt.

¹² Ohne Fisch- und Erdnussöl.

¹³ Die Anzahl der Anlagen hat sich stark erhöht (1999: noch 79, heute 250 Anlagen). Mehr als die Hälfte aller bundesdeutschen Anlagen liegt in Bayern und Baden-Württemberg. Im Vergleich zu den industriellen Großanlagen sind die einzelnen Verarbeitungspotenziale gering: lediglich 8 Prozent der Betriebe können mehr als 1 t Ölsaat pro Stunde verarbeiten (TFZ 2005).

Kuppelprodukte wie Ölschrote oder pflanzliche Eiweiße machen die zentrale Ölsaatenverarbeitung zum Hauptversorger der Landwirtschaft mit pflanzlichem Eiweißfutter.

Die Raps- und Sonnenblumenverarbeitung erfolgt anbauunabhängig im gesamten Bundesgebiet, während die Sojaölverarbeitung hauptsächlich an den Küsten und Binnenhäfen angesiedelt ist. Der größte Teil der Ölsaaten, die in Deutschland verarbeitet werden, kommt aus den großen Agrarstaaten Nord- und Südamerikas und den Ländern der Europäischen Union, aber auch das Öl der Ölpalme und Kokosöl aus Asien und Afrika wird für die Herstellung von Spezialfetten verwendet (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006). Bei Raps ist in den letzten Jahren für industrielle Großanlagen eine Verlagerung der Ölproduktion von der Speiseölherstellung hin zur Erzeugung von Ölen und Fetten für den technisch-chemischen Sektor (insbesondere für den Kraftstoffsektor) erkennbar (Abbildung 5).

Vor allem mit der Ausdehnung des Absatzes von Biodiesel überstieg dieser Sektor den Anteil des Speiseöls in den letzten drei Jahren deutlich (Abbildung 6). Hier wird auch der enorme Anstieg des Rohstoffverbrauchs im Non-Food-Sektor deutlich. Ab 1997 waren die Rohstoffkapazitäten durch die Verarbeitungsmenge ausgeglichen. Aufgrund finanzieller Anreize (Mineralölsteuerbefreiung für Biokraftstoffe, Zumischung) wurde auf „Stilllegungsflächen“ zunehmend Raps als nachwachsender Rohstoff für die Treibstoffherzeugung angebaut. Die Anbauflächen steigen seitdem analog zur zunehmenden Nachfrage nach Raps für die Biodieselherstellung an, wobei laut Vogelsang (2005) die inländischen Ölmühlen bereits im Jahr 2005 an ihre Kapazitätsgrenzen gestoßen sind (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006). Die Verarbeitungskapazitäten für Raps sind in den letzten Jahren von den deutschen Ölmühlen ständig erweitert worden. Aufgrund der sprunghaft gestiegenen Nachfrage nach Rapsöl und bereits begonnener oder in Auftrag gegebener Neubauten bzw.

Abbildung 4

Aufteilung der in Deutschland verfügbaren pflanzlichen Öle 2003

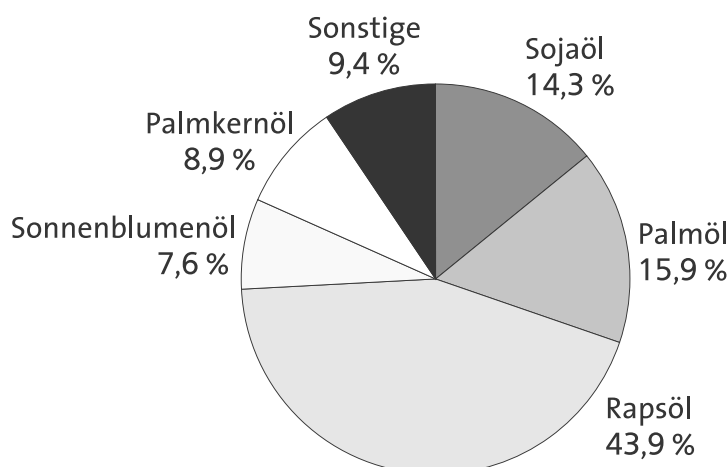
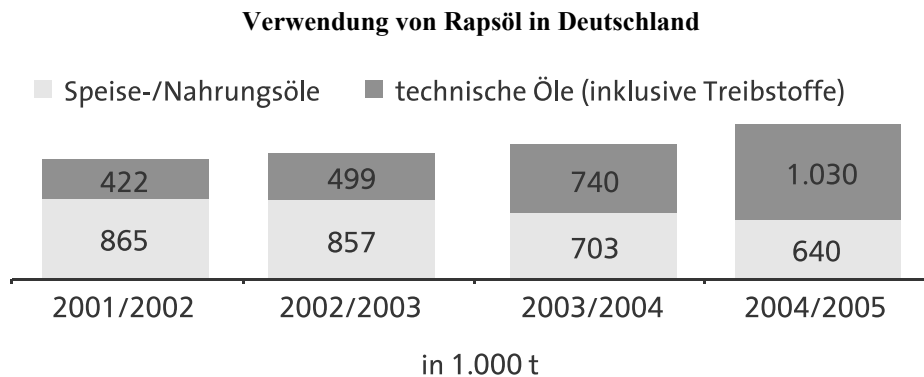
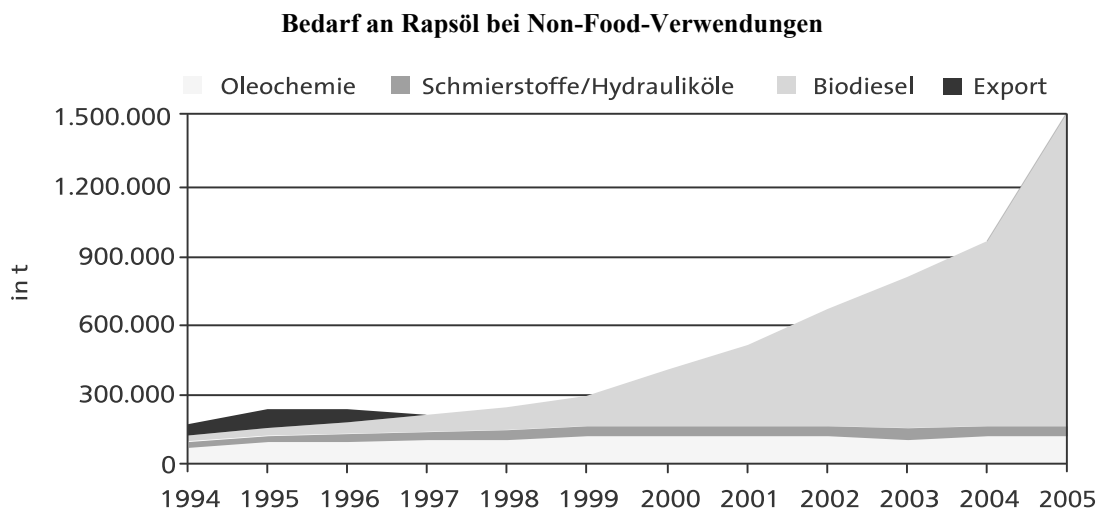


Abbildung 5



Quelle: ZMP 2005

Abbildung 6



Quelle: UFOP 2005

Erweiterungen ist mit einer deutlichen Ausweitung der Verarbeitungskapazitäten in Deutschland zu rechnen. Damit wird die Rapsverarbeitungskapazität bis zum Jahr 2007 auf schätzungsweise 7,9 Mio. t/Jahr ansteigen (ohne dezentrale Pressenbetreiber) (UFOP 2005).

Mit der Neuregelung der Besteuerung von Energieerzeugnissen (Bundesregierung 2006b) wurde ein Stufenplan für die Besteuerung von Biodiesel eingeführt. Danach steigen die Abgaben auf Biodiesel stufenweise, bis 2012 das Abgabenniveau von fossilem Diesel in Höhe von 0,45 Euro/l erreicht ist. Für beigemischten Biokraftstoff gilt bereits seit August 2006 ein Steuersatz von 0,15 Euro/l und ab 2007 von 0,45 Euro/l. Um den Einsatz von Biokraftstoffen ohne Mindereinnahmen für den Bundeshaushalt zu gewährleisten, trat im Gegenzug eine Beimischungspflicht für Biokraftstoffe¹⁴ zum 1. Januar 2007 in Kraft (Bundesregierung 2006c), sodass davon ausgegan-

gen werden kann, dass der Anbau von Raps zur Herstellung von Biodiesel auch zukünftig eine bedeutsame Rolle spielen wird.

Öle (und Fette) werden auch weiterverarbeitet zu chemischen Grundstoffen (in der Oleochemie z. B. zu Kosmetika und Hautpflegemitteln, Naturfarben und Lacke, Textilhilfs- und Reinigungsmitteln), zu Bioschmierstoffen und -hydraulikölen (als Betriebsstoffe für Maschinen und die Metallindustrie z. B. auch zu Schmieröladditiven und Sägekettenöl), zu Biokunststoffen (Verpackungen, Cateringbedarf, Geo- und Agrartextilien), zu technischen Ölen (Kühl- und Trennmittel in diversen Industrien), zu Lederfettungsmitteln und zu technischen Bindemitteln (diverse Industrien); Nebenprodukte können zur Proteinproduktion eingesetzt werden (Karus 2005).

Stärke

Stärke ist in Feldfrüchten (z. B. Kartoffeln) in Form kleiner Körnchen eingelagert, die für die Verarbeitung herausgelöst werden. Auf molekularer Ebene besteht Stärke

¹⁴ Seit Januar 2007 Beimischungspflicht für Biokraftstoff in Benzin (2 Prozent) und in Dieselmotorkraftstoff (4,4 Prozent).

aus Glucose-Einzelbausteinen. Um beispielsweise 1 t Stärke zu gewinnen, müssen gewichtsmäßig dreimal so viel Kartoffeln¹⁵ transportiert und verarbeitet werden verglichen mit Mais (2,5-mal im Vergleich zu Weizen) (HeRo 2006).

In Deutschland und in der EU wird Stärke v. a. aus Mais, Weizen und Kartoffeln gewonnen (Tabelle 5). 2004 wurden ca. 640 000 t (41 Prozent) der Stärke in Deutschland für technische Anwendungen genutzt und dafür auf 128 000 ha Ackerfläche Stärkepflanzen angebaut (FNR 2005b). In der EU-15 gelangen derzeit ca. 3,8 Mio. t (45 Prozent) der Stärke in den Non-Food-Bereich. Während die deutsche Stärkeproduktion seit 1998 auf konstantem Niveau bleibt, ist sie in der EU-15 im selben Zeitraum um 18 Prozent angestiegen. Im Jahr 2004 verarbeitete die deutsche Stärkeindustrie insgesamt 4,5 Mio. t stärkehaltige Rohstoffe (EU-15: 20,6 Mio. t) und gewann daraus 1,5 Mio. t Stärke (EU-15, 2003: 9,1 Mio. t). Dabei erzielten acht Firmen mit insgesamt 16 Werken und rund 2 400 Beschäftigten einen Umsatz von 1,2 Mrd. Euro (EP 2003: 23 Firmen, 65 Werke, ca. 16 000 Beschäftigte, 7,0 Mrd. Euro) (Fachverband der Stärke-Industrie 2005, nach FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

Tabelle 5

Verarbeitung von Stärkepflanzen in Deutschland (2004) und in der EU-15 (2003)

Rohstoff	Deutschland (Mio. t)	EU-15 (Mio. t)
Kartoffeln	3,0	7,4
Mais	0,6	6,7
Weizen	0,9	6,5
Summe	4,5	20,6

Quelle: Fachverband der Stärke-Industrie 2005

Während Mais, Weizen und Kartoffeln in Europa, Amerika und Südafrika die wichtigsten Stärkelieferanten sind, werden in Asien vorwiegend Tapioka und Reis verwendet (Peters 2006).

Der Einsatz von Stärke erfolgt zum Teil chemisch unverändert, zum Teil aber auch modifiziert oder abgebaut. Überwiegend werden ihre spezifischen Eigenschaften als Zusatzstoff (in geringen Mengenanteilen) genutzt (z. B. Nutzung der Hydrophilie, des Quellvermögens, der Viskosität und des Filmbildevmögens). Stärke wird eingesetzt als Zusatzstoff in der Papierindustrie, als Zusatzstoff für Wasch- und Reinigungsmittel (u. a. Wäschesteife,

Waschhilfsmittel, Zahnpasta), zur Herstellung chemischer Grundstoffe (Tenside, Stabilisatoren, Flockungsmittel, Ent härter, Aktivatoren, organische Säuren (z. B. Aminosäuren), Enzyme, Weichmacher etc.), als Bindemittel (z. B. in Gipskartonplatten), in Klebstoffen und Kleistern, zur Herstellung von Biokunststoffen (Polymilchsäure, PLA), als Füllstoff und für Schäume (in der Verpackungsindustrie, im Cateringbedarf etc.), in Kosmetika (Trocken shampo etc.), in Pharmazeutika und zur Herstellung von Zucker; Nebenprodukte können zur Proteinherstellung verwendet werden (Karus 2005; Schnabel/Anton 2001).

Zucker

Die Zuckerrübe ist die einzige zuckerliefernde Pflanze von wirtschaftlicher Bedeutung in Deutschland und der EU. Weltweit größte Bedeutung hat Zuckerrohr. Daneben gibt es noch Anbauversuche mit Zuckerhirse (in Europa). Genutzt als Industrierohstoffe werden Einfachzucker wie Glucose und Fructose, aber auch polymerisierte Zucker¹⁶, Zucker als Polymerkomponenten und Zuckerderivate. Die Zuckergewinnung erfolgt aus Zuckerrohssaft, dessen Bestandteile chemisch (durch Ausfällen und Abfiltrern etc.) getrennt werden. Die bei der Zuckerraffination als Rückstand anfallende Melasse ist ein gutes Nährsubstrat für biotechnologische Prozesse (Gewinnung von Alkohol, Zitronensäure, Hefe) (HeRo 2006).

Der Industrierohstoff Zucker wird direkt verwendet im technischen Bereich als Abbindeverzögerer und Entschalungsmittel für Zement/Beton, als Kernbindemittel in Gießereien, in Klebstoffen/Leimen, in Anstrichmitteln sowie als Textilhilfsmittel, ferner im pharmazeutischen Bereich (Geschmacksstoff in Medikamenten, Konservierungsmittel etc.) sowie für Kosmetika (auch Zuckerderivate). Durch Fermentation werden Anwendungen von Zucker erschlossen wie Polyhydroxybuttersäure, Biopolymere, Zitronensäure und Enzyme.

Naturfasern

Die Nutzung von pflanzlichen und tierischen Fasern (z. B. Flachs, Hanf, Schilf, Schafwolle) ist ein unter heimischen Bedingungen relativ gut untersuchter und auf dem Markt etablierter Anwendungsbereich. Als Rohstoffe für pflanzliche Naturfasern kommen grundsätzlich Bast-, Blatt-, Samen- und Fruchtfasern infrage (Tabelle 6). Weltweite Bedeutung haben vor allem Baumwolle, Jute, Flachs und Sisal. In Deutschland werden aufgrund klimatischer Gegebenheiten hauptsächlich Flachs und Hanf angebaut¹⁷, beides sind Bastfasern (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

¹⁵ Hinzu kommt, dass Kartoffeln schlecht lagerfähig sind; sie werden daher in einer Kampagne (ca. 100 bis 120 Tage) verarbeitet, wobei die Verarbeitungsanlagen zudem hohe Kapitalkosten aufweisen, da diese nur eine begrenzte Zeit im Jahr genutzt werden.

¹⁶ Einfachzucker – sog. Monosaccharide wie Glucose oder Fructose – stellen die Grundbausteine für Mehrfachzucker dar: zwei bis sechs verknüpfte Monosaccharide ergeben z. B. Saccharose oder Lactose; vielfach vernetzte (polymerisierte) Monosaccharide sind z. B. Stärke oder Cellulose.

¹⁷ Für z. B. Kenaf gibt es Anbauversuche (KATALYSE 2006; Rösch 2006).

Tabelle 6

Übersicht Pflanzenfasern

Bastfasern	Blattfasern	Samenfasern	Fruchtfasern
Flachs	Sisal	Baumwolle	Kokos
Jute	Abaca	Kapok	
Hanf	Banane		
Kenaf	Raffia		
Nessel	Passava		
Ramie			

Quelle: FHW/C.A.R.M.E.N. 2006

Grundsätzlich ist die Naturfaserproduktion über die letzten Jahre relativ konstant geblieben bzw. nur leicht gewachsen. Dies gilt auch für die Wollproduktion – als tierische Faser –, die in der Statistik nicht erfasst wurde und zwischen Jute und Flachs einzuordnen ist (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006). Der Markt für chemische Fasern hingegen wächst deutlich schneller und nimmt heute weltweit bereits 60 Prozent des Fasermarktes ein, in Deutschland sogar 85 Prozent. Beachtlich ist auch die Weltproduktion cellulosischer Chemiefasern mit 3,1 Mio. t/Jahr (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

Für technische Einsatzzwecke eignen sich praktisch alle Bastfasern. Diese werden hauptsächlich in Asien angebaut (günstige klimatische Verhältnisse und Anbaukosten), was einen wirtschaftlichen Anbau in Westeuropa erschwert. Qualität und Ertrag des deutschen Flachsbaus sind durchaus auf mitteleuropäischem Niveau möglich, allerdings fehlen die gewachsenen Strukturen, wie in Frankreich und Belgien, um Flachs wirtschaftlich anzubauen. Die Langfasern für die Textilindustrie sind in Deutschland nicht in den notwendigen Mengen absetzbar, aber allein die Produktion von Kurzfasern ist nicht kostendeckend (Wegfall der EU-Verarbeitungsbeihilfen ab 2007 für Kurzfasern) (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

Die heutige deutsche Hanfproduktion wird hauptsächlich zu Dämmstoffen und in geringeren Anteilen zu Vliesen für die Automobilindustrie verarbeitet. Heute wird Flachs europaweit auf über 100 000 ha angebaut, was auch auf die Verwendung in technischen Bereichen zurückzuführen ist (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006). Der größte Teil des Flachsbaus in Europa dient jedoch nach wie vor der Gewinnung von Langfasern für die Textilindustrie. In der deutschen Textilindustrie spielen Naturfasern, neben Baumwolle und Wolle, in der Verarbeitung praktisch keine Rolle und werden statistisch nicht erfasst. Industriell verwendet werden zudem Verstärkungsfasern aus Hanf als auch aus Flachs für die Textilindustrie (technische und Bekleidungstextilien, Haushaltswäsche), für Taue, für Seile (Bindfäden, Zwirne) sowie für Dachbedeckungen und als Dämmmaterial. Eine wesentliche Rolle spielen naturfaserverstärkte Kunststoffe.

Pflanzenfarben

Von mehr als 100 in Europa beschriebenen Färberpflanzen (Breitschuh 2001) sind für Deutschland 19 Pflanzenarten für den großflächigen Anbau und für die Bereitstellung von Naturfarben geeignet. Von diesen 19 Arten haben Krapp, Färberwau, Kanadische Goldrute und die Färberhundskamille die größte praktische Bedeutung in Deutschland (Biertümpfel et al. 2004). Die Anbaufläche von Färberpflanzen in Deutschland betrug im Jahr 2001 rund 100 ha (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006). Die Gewinnung der Farbstoffe erfolgt zumeist durch Extraktion. Die Fläche für den Anbau von Färberpflanzen in Deutschland ist verschwindend gering und eine Ausweitung ist derzeit fraglich.

Proteine

Proteine – aus Aminosäuren aufgebaut – können genutzt werden zur Herstellung von chemischen Grundstoffen (Klebstoffe, Bindemittel, Additive zur Papierherstellung, Bindemittel für Sperrholz etc.), von Biokunststoffen sowie zur Einkapselung von Pharmazeutika (Karus 2005). Ihre aktuelle Nutzung macht derzeit nur einen vergleichsweise geringen Anteil aus.

Holz/Lignocellulose

Die stoffliche Holznutzung ist weithin etabliert, sodass hier darauf nicht vertiefend eingegangen wird, was insbesondere die Nutzung in der Holzwirtschaft, Papierindustrie und im Bauhandwerk angeht. Der Gesamtholzverbrauch, einschließlich Altpapier und Altholz, in Deutschland betrug ca. 105 Mio. m³ (2003), wobei jeweils die eine Hälfte in der Holzverarbeitenden Industrie (Säge-, Furnier-, Holzwerkstoff- und Möbelindustrie, Holzhandwerk) und die andere Hälfte in der Papier- und Zellstoffindustrie genutzt werden (Peters 2006). In Deutschland werden gegenwärtig jährlich ca. 29,9 Mio. Festmeter Nadel- und Laubholz eingeschnitten, die u. a. zu Holzwerkstoffen verarbeitet werden (z. B. Spanplatten). Daneben werden 2,15 Mio. t Holzschliff und Papierzellstoff sowie ca. 18,5 Mio. t Papier, Karton und Pappe jährlich in Deutschland produziert (Peters 2006). Zum Holzverbrauch nach Endverbrauchssektoren sind derzeit

keine Statistiken verfügbar. Nach Schätzungen der FNR (Peters 2006) lag jedoch der Bausektor mit ca. 50 Prozent Verbrauchsanteil deutlich vor der Möbelfertigung (ca. 30 Prozent) und sonstigen Verwendungsbereichen (z. B. Papier-, Druck- und Verpackungsindustrie) mit ca. 20 Prozent. Im Wohnungsbau lag der Anteil des Holzbaus bei ca. 13 Prozent (2004).

Der Holzbedarf der Säge-, Furnier- und Holzwerkstoffindustrie wird vorwiegend durch heimische Rohstoffe gedeckt. Zusätzlich importiert werden Holzhalbwaren (Schnittholz, Holzwerkstoffe etc.) zur weiteren Verarbeitung. Die Papier- und Zellstoffindustrie wird zur Holzschliffherzeugung überwiegend mit heimischen Rohstoffen versorgt, während bei Papierzellstoff die Produktion aus heimischen Rohstoffen nur ein Viertel des Verbrauchs ausmacht (Peters 2006). Das deutliche Ungleichgewicht zwischen geringer Zellstoff- aber hoher Papierproduktion und die Abhängigkeit von Importen an Sulfatzellstoff sind eine Folge fehlender Zellstoffproduktionskapazitäten in Deutschland. Da dem hier praktizierten Sulfitverfahren keine Zukunftsperspektiven eingeräumt wurden, andererseits aber dem Einsatz von wirtschaftlich effizienteren Sulfatverfahren vor allem standortspezifische Umweltrestriktionen entgegenstanden, hat sich die deutsche Papierindustrie zunehmend aus der Zellstoffproduktion zurückgezogen. Jedoch gibt es innovative Verfahren, die eine Alternative zu den konventionellen Holzaufschlussprozessen darstellen und auf deren Basis die Zellstoffproduktion in Deutschland wieder ausgeweitet werden könnte (Rösch 2006).

Neue Nutzungsarten von Holz(bestandteilen) beziehen sich z. B. auf den Einsatz von Lignocellulose, einer Gemengelage aus Cellulose (Zuckerpolymer der Glucose), Hemicellulosen (Zuckerpolymer aus zumeist Pentosen) und Lignin (Polymer des Phenols) wie sie u. a. auch im Holz vorkommt. Neben Holz gibt es noch weitere Rohstoffquellen für Lignocellulose: Miscanthus sinensis, Getreidestroh, Schilf, Gras, aber auch Reststoffe (Papierabfälle etc.). Lignocellulose kann eingesetzt werden als Faser im Baustoffbereich (beim Hausbau etc., Rösch 1999) sowie zukünftig in sog. Lignocellulose-Feedstock-Bioraffinerien (Kap. IV). Darüber hinaus können aus Lignocellulose auch Kraftstoffe und -komponenten gewonnen werden (Ethanol, Methanol, Biomass-to-Liquid(BTL)-Kraftstoffe¹⁸, Methyltertiärbutylether (MTBE), Ethyltertiärbutylether (ETBE), Benzinkomponenten).

1.2 Produkte

Die Verarbeitung von nachwachsenden Rohstoffen zu Produkten schließt die direkte Nutzung von natürlichen Bestandteilen (z. B. Biopolymere wie Stärke oder von Wirkstoffen im pharmazeutischen Bereich), eine fermentative Herstellung, aber auch kombinierte Verfahren (mit Rückgriff auf petrochemische Ausgangsstoffe wie etwa bei den Tensiden) ein. In der Weiterverarbeitung spielen auch che-

¹⁸ Die Umwandlung von Lignocellulose in Kraftstoffkomponenten erfolgt durch Enzyme (biochemisch) oder durch Vergasung von Biomasse (thermochemisch) gefolgt von einem Fischer-Tropsch-Verfahren zur Herstellung der BTL-Kraftstoffe.

mische Umsetzungen eine Rolle, um Produkte mit – für den anvisierten Einsatz – günstigeren Eigenschaften auszustatten (z. B. durch Umesterung der Bioschmierstoffe). Die folgenden Ausführungen, die sich auf wesentliche Einsatzfelder beschränken, basieren auf FHW/C.A.R.M.E.N. (2006) und Peters (2006). Ausführungen zu Markt- und Akzeptanzfragen ausgewählter Produkte finden sich in Kapitel VII, Aspekte der ökologischen Bewertung finden sich in den Kapiteln III.2.1, III.2.2 und III.2.3.

Tenside in Wasch- und Reinigungsmitteln, Kosmetika

Die mengenmäßig bedeutungsvollste Stoffgruppe, die heute bereits in der chemischen Industrie in relevanten Anteilen auf nachwachsenden Rohstoffen basiert, sind die Tenside. In die Herstellung von Tensiden gehen jährlich in Deutschland ca. 430 000 t pflanzlicher Öle (überwiegend Kokosöl und Palmkernöl¹⁹), wobei für die Herstellung von Wasch- und Reinigungsmitteln (Spül- und flüssige Feinwaschmittel, Allzweck- und Industriereiniger etc.) ca. 23 Prozent und für andere Tenside (Pharmaka, Kosmetikprodukte, Textilhilfsmittel etc.) ca. 13 Prozent verwendet werden (Peters 2006). Tenside finden daneben auch Anwendung in der Kunststoff- (als Polymere/Polymerhilfsmittel) sowie in der Lack- und Farbenproduktion (als Korrosionselimitoren). Erhebliche Mengen der hergestellten Tenside werden exportiert; der Inlandsverbrauch (Haushalt, Gewerbe, Industrie) liegt nur etwa bei 250 000 t/Jahr²⁰ (FNR 2006a).

Tenside werden sowohl aus petrochemischen als auch aus oleochemischen Grundstoffen gewonnen (derzeit anteilig zu jeweils 50 Prozent). Rohstoffe für umweltverträgliche Tenside sind pflanzliche Fette und Öle sowie niedermolekulare Kohlenhydrate (z. B. Glycerin, Glucose). Neben Kokos- und Palmkernöl lassen sich auch heimische Rohstoffe für die Tensidherstellung nutzen: Für die Herstellung von Alkylpolyglycosiden (APG) können Stärke (Mais, Kartoffeln) und Saccharose (Zuckerrübe) eingesetzt werden. Die Kombination pflanzlicher Fette und Öle mit anderen nachwachsenden Rohstoffen zur Herstellung von Waschmitteln erscheint jedoch noch ausbaubar.

Zu den Vorteilen von Tensiden (und daraus hergestellten Wasch- und Reinigungsmitteln) auf Basis nachwachsender Rohstoffe im Vergleich zu synthetischen Tensiden gehören, dass diese in Abwässern relativ schnell biologisch vollständig abbaubar und zudem hautverträglicher als Erdölprodukte sind (FNR 2006a, nach FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

Bioschmierstoffe und -hydrauliköle

Auch für die Herstellung von Bioschmierstoffen spielen Fette und Öle eine Rolle, wobei hier aufgrund ihrer besse-

¹⁹ Vom Kokos- und Palmkernöl sind für die Tensidherstellung insbesondere die kurzkettigen, gesättigten laurinischen Fettsäuren interessant, da diese anwendungsseitig bessere Eigenschaften aufweisen als langkettige, ungesättigte Fettsäuren.

²⁰ Der Verbrauch von Tensiden in Deutschland mit 250 000 t teilt sich auf in anionische Tenside mit ca. 136 000 t, nichtionische Tenside mit ca. 97 000 t sowie kationische und amphotere Tenside mit ca. 17 000 t (Peters 2006).

ren Schmiereigenschaften vorrangig langkettige Fettsäuren (z. B. aus Rapsöl, Sonnenblumenöl oder tierischen Fetten) eingesetzt werden.

Bioschmierstoffe – auf teilweiser oder vollständig pflanzlicher Basis – zeichnen sich durch eine hohe biologische Abbaubarkeit, eine geringe Toxizität sowie gute Schmiereigenschaften aus. Der Einsatz biogener Schmierstoffe und Hydrauliköle bietet sich in umweltsensiblen Bereichen an, wie z. B. an Schleusen, Kläranlagen, Wasserkraftwerken, in der Schifffahrt, beim Einsatz von Nassbaggern, Rohr- und Tunnelvortriebsmaschinen sowie beim Brunnenbohren. Weiterhin zählen dazu die Baubranche, die Bahn (Fahrzeugbetriebsstoffe, Weichenschmierfette), die Forstwirtschaft/Holzindustrie (Sägegatter-, Blockzugöle) sowie der Garten- und Landschaftsbau. Ein Einsatz darüber hinaus ist überall dort sinnvoll, wo gesundheitliche Aspekte eine besondere Rolle spielen, wie in der Lebensmittelindustrie oder in Teilbereichen der Landwirtschaft (z. B. Melkmaschinenöl) (ISSUS 2005).

Die Relevanz der biologischen Abbaubarkeit wird vor dem Hintergrund deutlich, dass in Deutschland jährlich insgesamt etwas über 1 Mio. t Schmierstoffe verbraucht werden, wobei nur etwa die Hälfte nach Gebrauch über die Altölsammlung erfasst und dann recycelt oder zur Energieerzeugung weiterverwendet wird. Der Rest (etwa 450 000 t) gelangt – hervorgerufen durch Verlustschmierung oder bei Leckagen und Unfällen – in Boden und Grundwasser (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

Biokunststoffe

Unter Biokunststoffen werden – mangels eindeutiger Definition – einerseits ausschließlich aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellte Polymere bezeichnet, die ähnliche bis vergleichbare Eigenschaften wie herkömmliche Kunststoffe aufweisen, aber in relativ kurzer Zeit (wenige Wochen) biologisch abbaubar sind. Andererseits wird der Begriff „Biokunststoffe“ aber auch als übergeordnete Bezeichnung für „nur“ anteilig aus nachwachsenden Rohstoffen bestehende Kunststoffe genutzt. Ein Beispiel hierfür stellen sog. biologisch abbaubare Werkstoffe (BAW) dar. BAW sind kunststoffähnliche Werkstoffe, die aus nachwachsenden Rohstoffen, aber auch vollsynthetisch (z. B. auf Esterbasis) hergestellt werden können und in jedem Fall biologisch abbaubar und wie herkömmliche Kunststoffe verarbeitbar sind. Zumeist verwendet werden Blends (z. B. aus thermoplastischer Stärke mit synthetischen BAW). Modifizierungen haben zumeist den Hintergrund, die Materialeigenschaften der Biokunststoffe zu verbessern (z. B. Verarbeitbarkeit, Beständigkeit, Farbe). Die Herstellung und Verarbeitung von Biopolymeren bzw. -produkten ist heute technisch möglich, hat sich jedoch erst ansatzweise etabliert.

Stärke – als natürliches Biopolymer – ist der wichtigste nachwachsende Rohstoff für die Herstellung von Biokunststoffen. In Reinstform eher feuchtigkeitsanziehend wird Stärke durch den Zusatz natürlicher Weichmacher und Plastifizierungsmittel wie Sorbitol (Zuckeralkohol) und Glycerin thermoplastisch verarbeitbar gemacht. Zusammen mit einem eher wasserabweisenden Bestandteil (biologisch abbaubaren Polymeren wie Polyvinylalko-

hole, Polyester etc.) werden sog. Stärkeblends hergestellt. Diese wasserfesten Stärkekunststoffe werden individuell weiterverarbeitet (Folien, Taschen, Spritzgussartikel etc.). Stärkeblends besitzen beispielsweise eine hohe Gasbarrierewirkung für Sauerstoff (vorteilhaft für die Haltbarkeit von verpackten Lebensmitteln) und eine hohe Wasserdampfdurchlässigkeit (vorteilhaft bei der Bioabfallsammlung in Stärkesäcken, da der Bioabfall abtrocknen kann und dann weniger schimmelt). Als Werkstoffkomponente in Autoreifen verringern Stärkeblends den Rollwiderstand und tragen damit dazu bei, den Energieverbrauch zu senken (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006). Daneben kommen Cellulose, Pflanzenöle, Harze und diverse (landwirtschaftliche) Reststoffe, wie z. B. Lignin, Holzmehl, Getreidespelzen, zum Einsatz (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

Polymilchsäure (PLA) ist ein synthetisches Polymer (Polyester) mit thermoplastischen Eigenschaften und ein „transparenter Kunststoff“. Ihre mechanischen Eigenschaften sind (über das Molekulargewicht) einstellbar. Das Ausgangsmonomer, die Milchsäure, ist via Fermentation von Stärke (oder von Zuckerarten, wie Glucose, Fructose) durch Mikroorganismen herstellbar, welches anschließend mithilfe chemischer Verfahren zu PLA polymerisiert wird.²¹ PLA und PLA-Blends werden u. a. zu Verpackungsfolien, Tiefziehprodukten (Jogurtbecher, Obstschalen etc.) sowie im medizinisch-pharmazeutischen Bereich (z. B. resorbierbares Nähmaterial) verarbeitet.

Polyhydroxyalkanoate (PHA) sind Biopolymere, die fermentativ (z. B. aus Stärke, Cellulose oder Glucose durch Mikroorganismen synthetisiert) erzeugt werden. Das innerhalb der PHA-Familie am besten untersuchte Polymer ist Polyhydroxybutyrat (PHB). PHA sind thermoplastisch und wasserunlöslich. Sie unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Verarbeitbarkeit kaum von Kunststoffen mit petrochemischer Rohstoffbasis (Hüsing et al 2002, S. 20). Aus der Vielfalt der Monomere ergibt sich – in Kombination mit Zusatzstoffen²² – eine entsprechende Vielfalt an Produkten. Eingesetzt werden können diese zur Herstellung von Folien, Fasern, Beschichtungen, Klebstoffdispersionen, Lebensmitteleinwegverpackungen sowie als Additive für andere Kunststoffe.

Ein Vorteil von Biokunststoffen besteht darin, dass sie nach Gebrauch vollständig biologisch abbaubar (kompostierbar), biokompatibel und nichttoxisch sind. Sie können petrochemisch hergestellte Kunststoffe in vielen Anwendungen ersetzen. Bereits heute erhältlich sind Biokunststoffe u. a. in Verpackungen, die zusammen mit Folien den derzeit größten Anwendungsbereich ausmachen. Darüber hinaus wurde eine Vielzahl marktreifer Produkte aus Biokunststoffen entwickelt, die – wenn auch in kleineren Mengen – bereits in verschiedenen Ländern am Markt verfügbar sind (Tabelle 7).

²¹ Die weltweit erste größere PLA-Produktionsanlage wurde 2002 in Nebraska (USA) in Betrieb genommen. Sie hat eine Kapazität von ca. 140 000 t/Jahr (European Bioplastics 2002, nach FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

²² Beispielsweise können bei PHB-Blends durch den Zusatz von Celluloseacetaten (u. a. Abfallprodukt der Zigarettenfilterproduktion) oder Stärke, Kork sowie anorganische Materialien die Kunststoffeigenschaften verändert werden (www.biokunststoffe.com/content/view/71/36/lang.de/).

Tabelle 7

Derzeit international gehandelte Produkte aus Biokunststoffen

Produkte	Anwendungsbereich
Mulchfolien*, Pflanztöpfe, Bindegarne, Befestigungsclips für Obst- und Gemüsepflanzen	Landwirtschaft und Gartenbau
Obst- und Gemüsenetze, (geschäumte) Ablagen für Obst/Gemüse/Fleisch, Folien und Beutel für Obst und Gemüse, Tragetaschen, loses Füllmaterial, geschäumte Formteile für Elektronikgeräte, Hüllen für Grablichter	Verpackungen
Besteck, Teller, Ablagen, Becher	Catering/Fast-Food
chirurgisches Nahtmaterial, Implantate, Diagnostikprodukte	medizinischer Bedarf
Bioabfallsäcke, Windeln, Damenbinden, Wattestäbchen, Fasern/Textilien, Bastelmaterial, Golfmarkierungen, Füllstoff in (treibstoffsparenden) Autoreifen	sonstiges

* Mulchfolien müssen als kompostierbare Produkte nach der Ernte nicht vom Feld abgeräumt, sondern können direkt in den Boden eingepflügt werden, wodurch ein Arbeitsschritt sowie die Entsorgung entfallen.
Quelle: FHW/C.A.R.M.E.N. 2006, geändert

Das Potenzial nachwachsender Rohstoffe, sowohl als strukturbestimmendes Matrixpolymer als auch als eigenschaftsverändernde Blend- oder als Füllstoffkomponente für biopolymertypische Einsatzfelder scheint noch nicht ausgeschöpft zu sein.

Sonstige Chemikalien

Die wichtigsten Vertreter sind Oleochemikalien (Tenside, Bioschmierstoffe etc.), aber auch Chemikalien wie Zitronen-, Milch- und Lävulinsäure, Sorbit, Glycerin, sowie Cellulosederivate. Über Produktionsmengen einzelner Grundstoffe können keine Aussagen getroffen werden, da hierzu keine gesonderten Statistiken vorliegen²³ (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

Die petrochemische Verarbeitung erfolgt für Basischemikalien über ein Stammbaumsystem. Dieses existiert für nachwachsende Rohstoffe, die chemisch aus analogen Grundbausteinen Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasserstoff bestehen – in verschiedenen atomaren Bindungen und funktionellen Gruppen –, noch nicht, sodass hier zunächst Nutzungen im Vordergrund stehen, die bereits praktiziert werden. Stammbaumfähige Ansätze für nachwachsende Rohstoffe (analog zur Petrochemie) werden separat in Kapitel IV betrachtet.

Die Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen in der chemischen Industrie erfolgt sowohl durch chemische als auch fermentative Konversion. Hergestellt werden u. a. Fein- und Spezialchemikalien, Pharmaprodukte, Struktur-

und Funktionspolymere, Polymerhilfsstoffe, Lack- und Textilhilfsstoffe sowie Papieradditive und Papierhilfsstoffe. Zum Einsatz kommen hier insbesondere Kohlenhydrate (Stärke, Zucker, Cellulose) sowie Fette und Öle. So werden im chemisch-industriellen Bereich gegenwärtig 147 000 t Stärke²⁴ sowie 240 000 t Zucker (Saccharose, Melasse, Glucose, Zuckeralkohole etc.) verarbeitet (Peters 2006). Die Verarbeitung von Stärke und Zucker im chemisch-industriellen Bereich erfolgt größtenteils biotechnologisch durch mikrobielle oder enzymatische Verfahren.

Charakteristisch für die Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen im chemisch-technischen Bereich sind vergleichsweise geringe Produktionsmengen, die zudem (noch) nicht (offiziell) statistisch erfasst sind. Fette und Öle werden hier – neben o. g. oleochemischem Einsatz – insbesondere zur Herstellung von Polymeren und Polymeradditiven sowie Lösungsmitteln eingesetzt. Pflanzenöle verbessern zudem als Additive die Eigenschaften von Kunststoffen. Als Weichmacher in petrochemisch basierten Kunststoffen (z. B. PVC) werden jährlich ca. 80 000 t Sojaöl und ca. 40 000 t erucasäurereiches Rapsöl verwendet. Leinöl (ca. 30 000 t/Jahr) wird zur Produktion von Linoleum eingesetzt. Etwa 10 000 t Leinöl werden als selbsttrocknendes Öl zur Herstellung von Naturfarben verwendet. Aus Rizinusöl (ca. 35 000 t) und chemisch modifiziertem Sonnenblumenöl (ca. 35 000 t) werden Polyurethane und Polyester hergestellt (Peters 2006). Polyurethane können als Schäume (PUR-Weich-, -Hart- und -Integralschaumstoffe), als massive PUR-Werkstoffe, als PUR-Anstrichstoffe und -Beschichtungen, als PUR-Klebstoffe, als Bindemittel und PUR-Elastomerfasern eingesetzt werden.

²³ Im Auftrag des BMELV und der FNR wurde von einem Konsortium eine Studie zur „Marktanalyse Nachwachsender Rohstoffe“ erarbeitet (FNR 2006b). Ein Bestandteil dieser Studie ist die Erhebung von Daten zur stofflichen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen, die derzeit nicht über Statistiken zugänglich sind. Die Studie lag im Januar 2007 vor und wurde für den TAB-Bericht nicht mehr ausgewertet.

²⁴ Hinzu kommen noch 493 000 t Stärke, die bei der Herstellung von Papier und Wellpappe Anwendung finden (Peters 2006).

Neben dem Polymerbereich sind die Einsatzmöglichkeiten von Cellulose relativ breit. So werden in Deutschland ca. 130 000 t Cellulosederivate und 190 000 t Celluloseregenerate produziert (auf Basis von ca. 320 000 t Chemiezellstoff). Zu den wichtigsten Cellulosederivaten gehören Celluloseether und -ester, die insbesondere als Funktionspolymere in der Bau-, Kosmetik- und Pharmaindustrie Verwendung finden. Celluloseester werden u. a. als Bindemittel in Farben, Lacken und Beschichtungen eingesetzt und zu Folien verarbeitet (Cellophan, Celluloid). Einsatzgebiete von Celluloseether sind u. a. Bindemittel und Verdickungsmittel, Stabilisatoren, Bauhilfsstoffe und Papierhilfsmittel. Celluloseregenerate werden hauptsächlich zu Fasern, Filamenten und Filmen verarbeitet (Textilien, Vliesstoffe, Reifencord, Wursthüllen etc.). Aus Cellulose werden auch cellulosische Chemiefasern produziert (2004 betrug deren Anteil 21 Prozent an der Gesamtproduktion von Chemiefasern in Deutschland (202 000 t) mit Einsatzmöglichkeiten z. B. im Textilbereich (Peters 2006).

Im Textilbereich finden neben cellulosischen Chemiefasern auch Naturfasern Verwendung (2004: Baumwolle 75 000 t, Leinen 16 000 t, Wolle 49 000 t). Diese wurden verarbeitet zu Bekleidungs- (61 Prozent) und Heimtextilien (34 Prozent) oder zu technischen Produkten (5 Prozent) (Peters 2006).

Auch Proteine (rund 55 000 t) bzw. Naturharze und Wachse (rund 31 000 t) finden Verwendung, besonders in den Bereichen Klebstoffe bzw. Lacke und Farben. Zucker wird z. B. zur Herstellung von Zuckertensiden, als Tabletierungshilfsmittel in der Pharmaindustrie und im Polymerbereich genutzt (Peters 2006).

Naturfaserverstärkte Werkstoffe

Naturfasern werden derzeit hauptsächlich in zwei Verbundwerkstofflinien eingesetzt: thermo- und duroplastische Formpressteile sowie Naturfaser-Polypropylen (NF-PP)-Spritzguss. Neben Flachs und Hanf werden auch exotische Fasern (Kenaf, Sisal, Jute, Kokosfasern) verarbeitet (Peters 2006). Auch Holzfasern sind einsetzbar.

Haupteinsatzgebiet ist der Innenausbau in Fahrzeugen. 2003 wurden in der Automobilindustrie in Deutschland ca. 88 000 t Fasern aus nachwachsenden Rohstoffen verarbeitet (Holzfasern 25 000 t, Baumwollfasern 45 000 t, Flachsfasern 9 400 t, Hanffasern 2 300 t, exotische Fasern 6 300 t). Autoinnenteile werden seit Anfang der 1990er Jahre z. B. aus thermoplastischen bzw. duroplastischen Naturfaserverbundstoffen hergestellt. In deutschen Fahrzeugen werden durchschnittlich 5 bis 10 kg Naturfasern eingesetzt. Die Bauteile bestehen zu je ca. 50 Prozent aus Naturfasern und Bindemitteln (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006). In der Automobilindustrie (Mittel- und Oberklassewagen) ist der Einsatz von Naturfasern heute Standard (thermo- und duroplastische Formpressteile an Türinnenverkleidungen, Hutablagen oder Kofferraumauskleidungen). Der Einsatz von Naturfasern in der Automobilindustrie ist anfänglich (seit 1996) jährlich um 10 bis 20 Prozent gestiegen, der Wachstumstrend hat sich mittlerweile abgeschwächt (5 Prozent) (Peters 2006).

Außerhalb der Automobilindustrie, z. B. im Bereich der NF-PP-Spritzgussteile, ist der industrielle Durchbruch noch nicht gelungen. Die Kunststoffgranulate aus Naturfasern enthalten einen Faseranteil von 20 bis 60 Prozent. Für viele Einsatzbereiche erfüllen die NF-PP-Werkstoffe die geforderten Eigenschaften, sodass sich hier große Einsatzpotenziale eröffnen, wobei sich alle Materialien noch in einer Einführungs- und Testphase befinden (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006). Im Jahr 2003 wurden erstmalig 500 t NF-PP industriell abgesetzt, erwartet werden für Folgejahre jährlich 1 000 bis 2 000 t. Daneben werden einzelne Entwicklungen zu Strukturbauteilen vorangetrieben (u. a. Entwicklung sog. Bioverbunde, bei denen nicht nur die Fasern, sondern auch die Matrix aus nachwachsenden Rohstoffen besteht) (Peters 2006).

Zu den naturfaserverstärkten Werkstoffen lassen sich auch die naturfaserverstärkten Kunststoffe (NFK) zählen. Dazu wiederum gehören die sog. Wood-Plastic-Composites (WPC) (wörtliche, aber unübliche Bezeichnung: Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoffe), die zumeist aus thermoplastischen Kunststoffen und Holzfasern (sowie Additiven) bestehen. Der Holzfaser- oder auch -mehlanteil kann bei 50 bis 90 Prozent liegen und ist in einer Kunststoffmatrix eingebettet. Die Kunststoffmatrix besteht aus thermoplastischen Massenkunststoffen wie Polypropylen (PP), Polyethylen (PE) und Polyvinylchlorid (PVC) (Vogt et al. 2006, S. 11). Eine Zumischung anderer Kunststoffe (auch von Biokunststoffen) ist technisch möglich. In Deutschland hat diese Produktgruppe bis heute noch keine große Relevanz (nova 2006). Haupteinsatzgebiete (z. B. in Amerika) sind im Bausektor, bei Inneneinrichtung (Möbel, Fußboden) und im Automobilbereich zu finden (Vogt et al. 2006, S. 46).

Dämmstoffe und Textilfasern

Gegenwärtig werden jährlich ca. 1,3 Mio. m³ Naturdämmstoffe in Deutschland verwendet, was einem Marktanteil von ca. 5 Prozent entspricht, wobei Holz- und Cellulosedämmstoffe dominieren. Die Anteile der verschiedenen Naturdämmstoffe in Deutschland betrug 2004 bei Dämmstoffen aus Holz 48 Prozent, aus Cellulose 32 Prozent, aus Hanf und Flachs 9 Prozent, aus Schafwolle 4 Prozent und aus sonstigen Materialien 7 Prozent (ADNR 2005, nach Peters 2006).

Während im Werkstoffbereich eher die Kurzfasern Verwendung finden, sind es in der Textilindustrie die Langfasern. Beispielsweise werden aus Cellulose Chemiefasern hergestellt (z. B. Viskose, Modal, Lyocell). Diese werden mit synthetischen Fasern oder untereinander zu Mischfasern verarbeitet, wodurch verbesserte Textileigenschaften erzielt werden (z. B. Formstabilität, Trockenzeit, Knitteranfälligkeit). Aber auch Fasern aus Polymilchsäure (PLA) – fermentativ auf der Basis von Stärke gewonnen – werden eingesetzt.

Lacke und Farben

Auch Lacke auf Pflanzenölbasis machen nur einen geringen Anteil an der Produktpalette von Fetten und Ölen in

Deutschland aus, wobei 8 Prozent dieser Ausgangsstoffe für den Bereich Farben und Lacke verwendet werden. Lacke auf der Basis von nachwachsenden Rohstoffen werden größtenteils aus Leinöl²⁵ hergestellt. Sonnenblumen- oder Rapsöl spielen auf dem Gebiet der Lackherstellung nur eine geringe Rolle (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006). Zur Herstellung von Druckfarben auf Basis nachwachsender Rohstoffe werden Pflanzenöle (z. B. Sonnenblumen- oder Rapsöl), Cellulose und Baumharze verwendet.

2. Ökologische Aspekte ausgewählter Biomassepfade

Neben der nach technischen Kriterien angestrebten vergleichbaren Nutzbarkeit von aus fossilen bzw. aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellten Produkten spielen auch ökologische Aspekte eine wesentliche Rolle. Dabei steht als Grundannahme zumeist im Raum, dass auf Basis von nachwachsenden Rohstoffen hergestellte Produkte tendenziell „ökologisch besser abschneiden“, als solche aus fossilen Rohstoffen. Um diese implizit angenommenen ökologischen Vorteile von Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen zu beleuchten, wurden exemplarisch drei Einsatzbereiche ausgewählt, die bereits eine vergleichsweise hohe industrielle Relevanz aufweisen (und damit „repräsentativ“ für die Bandbreite der heutigen stofflichen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen stehen) und für die auch bereits zitierbare Auswertungen existieren. Dies sind:

- Hydraulik- und Schmieröle: hier Schmierstoffe aus Raps- oder Sonnenblumenöl, die erdölbasierte Schmierstoffe ersetzen,
- Biokunststoffe: hier Werkstoffe auf Basis von Maisstärke (d. h. Mater-Bi und Polymilchsäure [PLA, polylactic acid]), die Massenkunststoffe wie Polypropylen (PP), Polyethylen (PE), Polystyrol (PS) ersetzen, und
- Fasermaterialien und -produkte: hier Werkstoffe aus Flachs und Polypropylen bzw. aus Flachs und leinölbasiertem Epoxydharz (sog. Naturfaserverbundwerkstoffe) die glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) ersetzen können.

Basis für die folgenden Ausführungen ist eine Auswertung verfügbarer Literatur zu ökologischen Bewertungen im Vergleich zu ihren konventionellen Pendanten. Hierzu liegt zwar bereits eine Reihe von Untersuchungen vor, doch fehlt bislang eine umfassende Gesamtdarstellung zu Umweltwirkungen der stofflichen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen. Diese Lücke kann im Rahmen dieser Studie zwar nicht geschlossen werden, jedoch soll ein Beitrag dazu geliefert werden, um zusammenfassende Aussagen zu ökologischen Vor- und Nachteilen von Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen abzuleiten.

²⁵ Die Anbaufläche von Öllein verringert sich seit dem Jahr 1999 kontinuierlich. Die Leinölproduktion nahm zum einen aufgrund der verminderten Beihilfen (Beschluss der Agenda 2000 der Europäischen Kommission) und zum anderen wegen der Anbauzunahme von Raps und Mais ab (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

Die folgenden Betrachtungen nehmen daher – soweit möglich – Bezug auf den gesamten Lebensweg der betrachteten Haupt- und der erhaltenen Kuppelprodukte. Dazu werden alle Prozesse von der Förderung der Rohstoffe über die Materialherstellung, Produktfertigung und -nutzung bis hin zur Entsorgung (Verwertung/Beseitigung), also der Weg „von der Wiege bis zur Bahre“, in die Betrachtung integriert. Den gewünschten Haupt- und den erhaltenen Kuppelprodukten werden Teile der Umweltwirkungen des gesamten Produktsystems zugeordnet, wobei hier Auswertungen zugrunde liegen, die nach dem Verfahren der Äquivalenzprozessbilanzierung²⁶ erstellt wurden (IFEU 2005a).

Dazu werden die Ergebnisse der Literaturanalyse für die drei ausgewählten Produktgruppen synoptisch zusammengestellt und die sich ergebenden Bandbreiten der Ergebnisse – soweit möglich – begründet (methodische Festlegungen der Studien, technische Eigenschaften der betrachteten Systeme etc.). Daraus werden in einem zweiten Schritt Aussagen zu den Vor- und Nachteilen von Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen abgeleitet. Soweit vorliegende Informationen es zulassen, werden auch Vergleiche zwischen nachwachsenden Rohstoffen durchgeführt. Basis dafür ist der Bezug der Umweltwirkungen auf die Anbaufläche²⁷ (im Gegensatz zum Bezug auf eine bestimmte Einheit des Produkts [z. B. kg Produkt] oder eine bestimmte Produktleistung) (IFEU 2005a).

Die Aussagen zur ökobilanziellen Betrachtung sind einerseits jeweils nur in Bezug zu den getroffenen Basisannahmen interpretierbar und daher nur begrenzt verallgemeinerbar. Sie stellen jedoch andererseits Ansatzpunkte dar, die ökologische Relevanz von auf nachwachsenden Rohstoffen basierten Produkten auch quantitativ zu belegen. Für die betrachteten Produktgruppen bzw. Produkte wird eine Herstellung aus angebauten nachwachsenden Rohstoffen angenommen. Die aufgeführten Bewertungen beziehen sich auf die Gegenwart und die nähere Zukunft. Sofern die in der Literatur verfügbaren Daten im Sinne einer Ökobilanz unvollständig aufgeführt sind (z. B. ohne Betrachtungen zur Entsorgung), konnten zumeist dennoch Teilabschnitte zum gesamten Lebensweg ins Verhältnis gesetzt werden, woraus wiederum Aussagen ableitbar waren (IFEU 2005a).

Die aus der Literatursauswertung gewonnenen Ergebnisse sollen im Folgenden zur Diskussion gestellt werden. Die Ausführungen in den Kapiteln III.2.1, III.2.2 und III.2.3 zur ökologischen Bewertung und Einordnung entsprechen in weiten Teilen denen des Gutachtens IFEU (2005a).

²⁶ Grundidee des Verfahrens der Äquivalenzprozessbilanzierung: Durch das Auftreten von nutzbaren Nebenprodukten in einem Prozess wird die Produktion dieser Produkte in anderen Prozessen (Äquivalenzprozesse und -produkte) vermieden; und damit auch deren Umweltwirkungen. Diese vermiedenen Umweltwirkungen sowie die der Nutzung etc. werden als Gutschriften von den Umweltwirkungen des gesamten betrachteten Produktsystems abgezogen. Beispiel: „Hauptprodukt“ hanffaserverstärktes Kunststoffteil, „Nebenprodukt“ Leichtbauplatte aus Schäben, „Äquivalenzprodukt“ Leichtbauplatte aus Holz (IFEU 2005a).

²⁷ Dieser Bezug gestattet Aussagen dazu, mit welchen nachwachsenden Rohstoffen auf welcher – potenziell knapper werdenden – Fläche die größten Umweltvorteile erzielt werden können (IFEU 2005a).

2.1 Biohydraulik- und Bioschmieröle

Hydraulik- und Schmieröle sind prinzipiell aus jedem pflanzlichen Öl herstellbar. Verglichen werden hier im Folgenden die Lebenswege von Raps- und fossilem Hydrauliköl (auf Erdölbasis) aus verschiedenen Studien. Der Lebensweg von Raps hydrauliköl beginnt mit der landwirtschaftlichen Produktion von Rapssaat. Die geerntete Rapssaat wird zum Hof transportiert, gereinigt und getrocknet und anschließend gekühlt gelagert. Die eigentliche Ölgewinnung erfolgt durch Pressung und Extraktion der Rapssaat und anschließender Raffinierung. Das bei der Extraktion anfallende Kuppelprodukt Rapsschrot wird als Tierfutter genutzt und ersetzt Sojaschrot. Das Rapsöl wird in der Regel modifiziert (d. h. umgeestert und hydriert), um die gewünschten Eigenschaften einstellen zu können.²⁸ Dabei wird Glycerin als Kuppelprodukt gebildet, das petrochemisch produziertes Glycerin ersetzt.²⁹ Für geringere Beanspruchungen (geringer Anforderungen an die Produkteigenschaften) kann Rapsöl auch

direkt als Hydraulikflüssigkeit (ohne Hydrierung) eingesetzt werden. Die Raps hydrauliköle werden in Niedertemperaturbereichen eingesetzt, wo ihre biologische Abbaubarkeit (z. B. bei Leckagen) von Bedeutung ist, etwa in der Forstwirtschaft. Nach der Nutzungsphase werden die Öle thermisch verwertet und ersetzen fossile Energieträger (IFEU 2005a, S. 8).

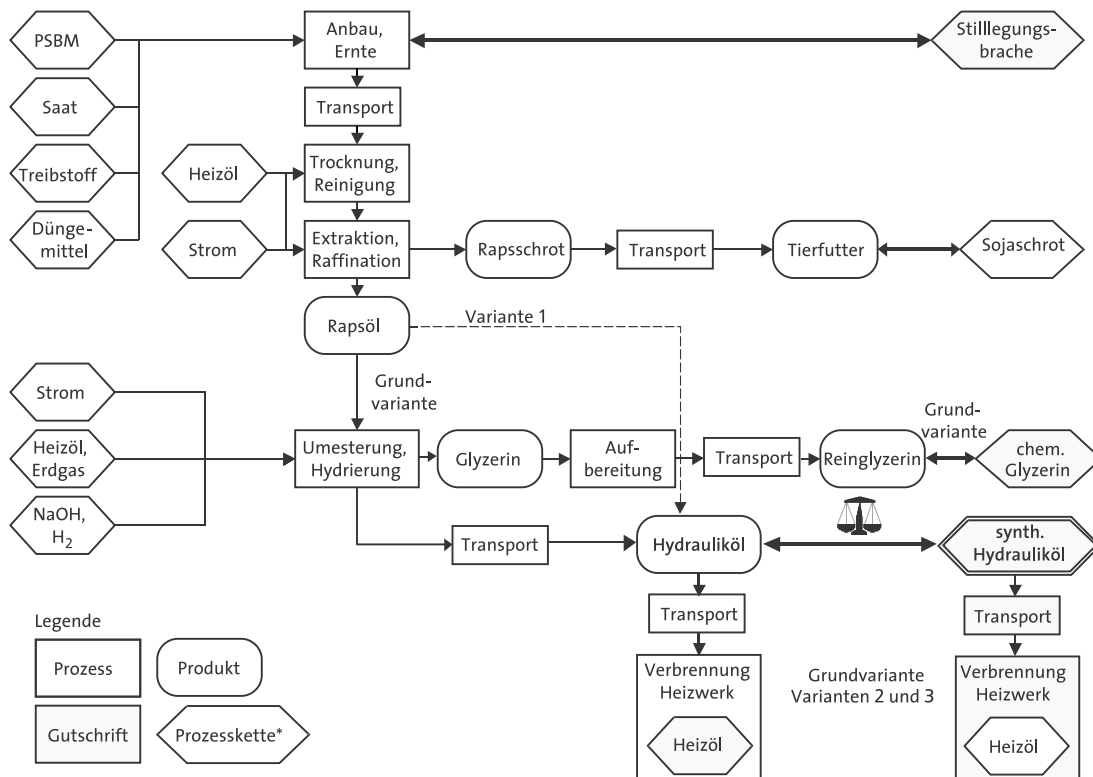
Die Herstellung von Hydrauliköl aus nachwachsenden Rohstoffen besteht im Wesentlichen aus der Ölgewinnung und -aufbereitung bzw. zusätzlich einer Hydrierung als weiteren Hauptprozess. Ökobilanziell betrachtet wird daher die Nutzung des modifizierten Rapsöls (Grundvariante) und des reinen Rapsöls in Hydrauliken (Variante 1). Die Varianten 2 und 3 gehen von einer verringerten Lebensdauer des Rapsöls (modifiziert, rein) gegenüber Mineralöl aus. Abbildung 7 zeigt beispielhaft die Lebenswege von Raps- und fossilem Hydrauliköl inkl. Gutschriften für Kuppelprodukte (Müller-Sämann et al. 2003).

²⁸ Das modifizierte Öl ist zwar qualitativ höherwertiger, jedoch eingeschränkt biologisch abbaubar (das reine Rapsöl ist vollständig biologisch abbaubar).

²⁹ Die bei der Herstellung von technischen Ölen (z. B. aus Raps) und zudem insbesondere von Biodiesel (bei der Umesterung) anfallenden Mengen an Glycerin sind erheblich.

Abbildung 7

Betrachtete Lebenswege von Raps- und fossilem Hydrauliköl



* Prozessfolge ab Rohstoffförderung; Grundvariante = Nutzung des modifizierten Rapsöls in Hydrauliken; Variante 1 = Nutzung reinen Rapsöls in Hydrauliken; Varianten 2 und 3 = Grundvariante mit kürzerem Ölwechselintervall: um ein Drittel reduzierte Haltbarkeit des modifizierten Rapsöls (2) bzw. des Rapsöls (3)
 PSBM = Pflanzenschutz- und Pflanzenbehandlungsmittel; NaOH = Natronlauge; H₂ = Wasserstoff
 Quelle: Müller-Sämann et al. 2003, nach IFEU 2005a

Die in der Literatur verfügbare Anzahl an Produktökobilanzen von technischen Ölen ist gering. In Abbildung 8 sind die Ergebnisse aus Müller-Sämann et al. (2003) zusammenfassend dargestellt. Untersucht wurden sowohl unmodifiziertes Rapsöl als auch hydriertes Öl. Dargestellt sind die Differenzen „Rapshydrauliköl – Mineralöl“ für die einzelnen Umweltwirkungen sowie einige Emissionen jeweils in Einwohnerwerten/100 ha.

Die Ergebnisse des Lebenswegvergleichs lauten zusammengefasst (Müller-Sämann 2003 et al., S. 81):

- Die Energie- und Treibhausbilanzen fallen aufgrund der Gutschrift für synthetisches Glycerin, besonders aber durch die Gutschrift des bei der Entsorgung ersetzten Heizöls deutlich zugunsten von Rapsöl aus.
- Für die Kategorien Eutrophierung, Ozonabbau und Versauerung ergeben sich, bedingt vor allem durch die Emissionen aus der Landwirtschaft, Nachteile für Rapsöl, die jedoch bei der Versauerung am wenigsten ausgeprägt sind.
- Für die Emissionen von toxischen Luftschadstoffen entsteht ein uneinheitliches Bild: Für den biogenen Schmierstoff ergeben sich bei den Schwefeldioxid- und Dieselpartikelemissionen Vorteile, bei den Ammoniakemissionen Nachteile. Die Schwefeldioxidbi-

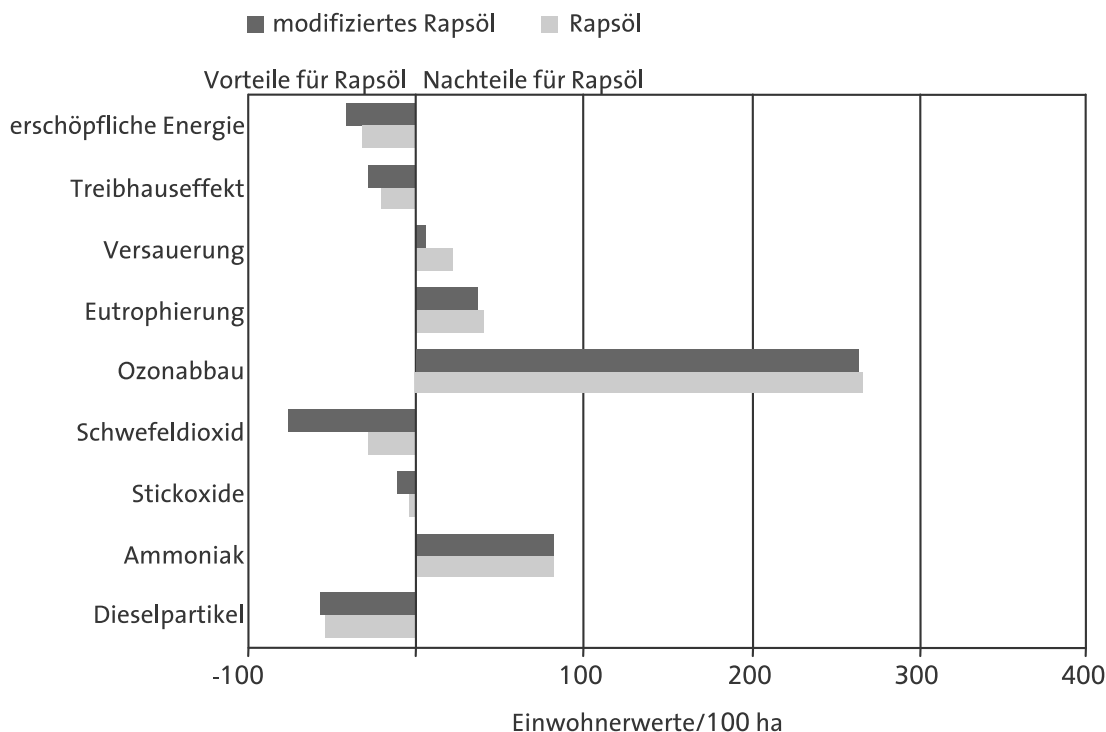
lanz wird durch die Gutschrift synthetischen Glycerins dominiert, die von Ammoniak zu über 90 Prozent von der landwirtschaftlichen Produktion (Düngemittelproduktion und Emissionen aus dem Feld). Für Stickoxide resultiert ein leicht vorteilhaftes Ergebnis.

Im Ergebnis schneidet die Hydraulikflüssigkeit aus reinem Rapsöl ungünstiger ab als die aus hydrierten Rapsölestern (was mit der Glyzeringutschrift bei den Rapsölestern zusammenhängt). Das oft aufgeführte Problem des häufigeren Ölwechsels beim Einsatz biogenen Hydrauliköls ist im Hinblick auf die Umweltwirkungen gering. Die Verschlechterungen, die sich in allen Umweltwirkungen zeigen, betragen bei den Umweltwirkungen mit eindeutigen Ergebnissen weniger als 5 Prozent vom Saldo bei einer Verkürzung der Ölwechselintervalle um ein Drittel. Einige der für die modifizierten Rapshydraulikflüssigkeiten ungünstigen Ergebnisse wie Versauerung, Eutrophierung, Ozonabbau und Ammoniakemissionen werden stark von der landwirtschaftlichen Produktion – und dort durch den Einsatz stickstoffhaltiger Mineraldünger – bestimmt (Müller-Sämann et al. 2003, S. 82).

Zur Einordnung wurden Ergebnisse einer weiteren Studie (McManus et al. 2003) ausgewertet und – im Verhältnis zu o. g. Aussagen – in Abbildung 9 dargestellt (relative

Abbildung 8

Differenzen ausgewählter Umweltwirkungen von „Rapshydrauliköl – Mineralöl“



Lesebeispiel für den ersten Balken: Durch die Nutzung von Rapsöl anstelle von fossilen Ölen als Hydraulikflüssigkeiten werden pro 100 ha angebautem Raps im Saldo so viele nichterneuerbare Energieressourcen eingespart, wie sie von etwa 40 Bundesbürgern jährlich im Durchschnitt verbraucht werden.

Quelle: Müller-Sämann et al. 2003, nach IFEU 2005a

Bandbreiten der Differenzen „Rapsöl – Mineralöl“). Die Bandbreiten resultieren aus den Sensitivitätsanalysen zu den Ölwechselintervallen. Als Basis wurde die gleiche, als Variante eine auf ein Drittel verkürzte Nutzungsdauer des modifizierten Rapsöls (Grundvariante) gegenüber Mineralöl angenommen. Die Entsorgung nach Ende der Nutzung wurde nicht untersucht.

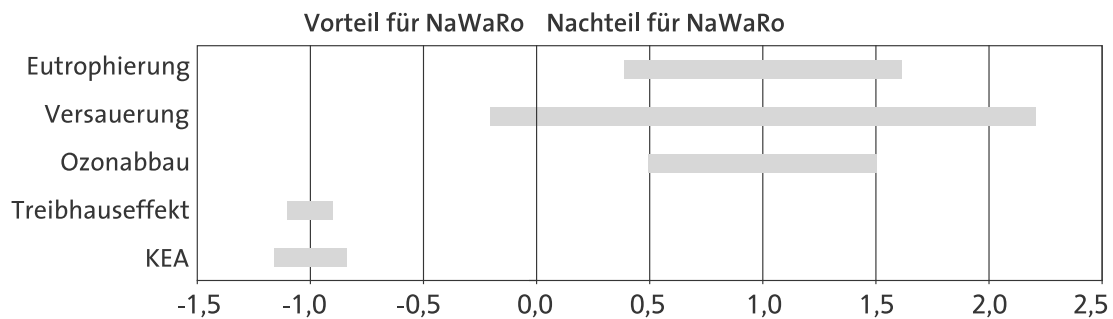
Eine weitere Studie (EPFL 2005), in welcher auch eine Auswertung von Ökobilanzstudien zur stofflichen und energetischen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen durchgeführt wurde, kam auch zu dem Ergebnis, dass für biogene Öle meist Vorteile beim Verbrauch nichterneuerbarer Energien und beim Treibhauseffekt (ggf. auch Indifferenzen) resultieren und für die Versauerung, die Eu-

trophierung und den Ozonabbau eher Nachteile oder Indifferenzen (ggf. auch geringe Vorteile für Versauerung) aufgeführt werden.

Die Auswertung weiterer Quellen ist in Abbildung 10 exemplarisch für die Aufwendungen an nichterneuerbaren Energieträgern (KEA) als Differenzen „NaWaRo-Öl – Mineralöl“ aufgeführt. Die Bandbreiten der einzelnen Produktsysteme resultieren im Wesentlichen aus Variationen von Nutzungsdauer (McManus et al. 2003) und Nutzungs- und Entsorgungsarten (Müller-Sämman et al. 2003). Für den KEA lässt sich festhalten, dass trotz Unwägbarkeiten in den Rand- und Nutzungsbedingungen von einem Vorteil für die Bioschmieröle beim Einsparen fossiler Energieträger ausgegangen werden kann.

Abbildung 9

Umwelteigenschaften von Rapshydrauliköl – relative Bandbreiten*



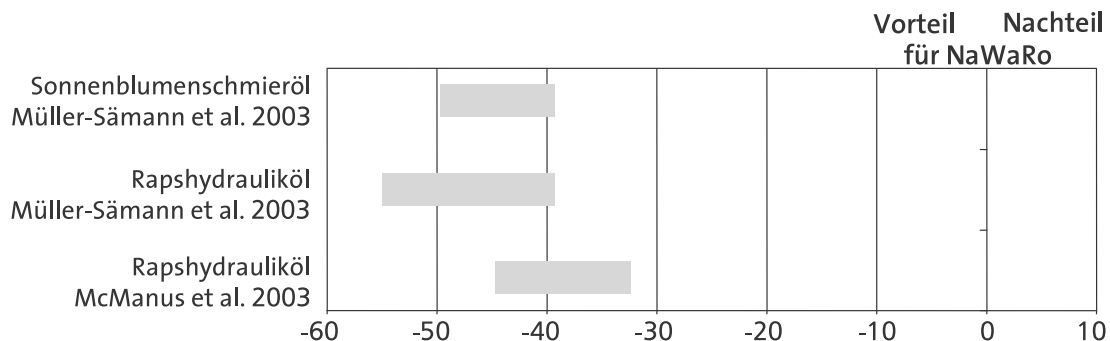
* Die relativen Bandbreiten sind dargestellt als Differenzen „Rapshydrauliköl – Mineralöl“ für verschiedene Nutzungsdauern (dimensionslose Werte; Mittelwerte: –1 bzw. 1).

Lesebeispiel für den zweiten Balken: Im Vergleich von Raps- und Mineralöl ergibt sich im Mittel der untersuchten Varianten für die Versauerung ein Nachteil für Rapsöl. In der ungünstigsten Variante ist der Nachteil etwa 2,2-mal so groß wie im Mittel. Günstigstenfalls ergibt sich ein Vorteil für Rapsöl gegenüber Mineralöl in Höhe eines Viertels des Nachteils im Mittel.

Quelle: McManus et al. 2003, nach IFEU (2005a)

Abbildung 10

Hydraulik- und Schmieröle: Bandbreiten der KEA-Differenzen*



* Die Bandbreiten der KEA-Differenzen „NaWaRo-Öl – Mineralöl“ sind angegeben in (MJ/kg). KEA = kumulierter Energieaufwand (Aufwendungen an nichterneuerbaren Energieträgern). Zu beachten: unterschiedliche Systemgrenzen in den Studien.

Lesebeispiel für den ersten Balken: Abhängig von den konkreten Bedingungen (hier: Umlauf- bzw. Verlustschmierung) werden pro kg Sonnenblumenschmieröl etwa 40 bis 50 MJ fossiler Energie durch den vermiedenen Einsatz von Mineralschmieröl eingespart.

Quelle: IFEU 2005a

Weitere Ergebnisse

Die Ergebnisse der Ökobilanzen für modifiziertes Rapsöl von Müller-Sämann et al. (2003) und von McManus et al. (2003) unterscheiden sich qualitativ nur für die Versauerung. Der mögliche Vorteil für modifiziertes Rapsöl bei der Versauerung ist nach McManus et al. (2003) allerdings viel geringer als der mögliche Nachteil. Bei Sonnenblumenschmieröl erhält man ähnliche Ergebnisse wie für Rapshydrauliköl. In EPFL (2005) wurden im Wesentlichen die Ergebnisse der anderen Studien bestätigt. Als allgemeine Tendenz ergibt sich:

- Vorteile für NaWaRo beim Aufwand an nichterneuerbaren Energieträgern (KEA) und beim Treibhauseffekt sowie
- Nachteile für NaWaRo bei Ozonabbau, Versauerung und Eutrophierung (IFEU 2005a, S. 18).

Unterschiede in der quantitativen Ausprägung ergeben sich u. a. aufgrund der Annahmen zu den Kuppelprodukten (z. B. Glycerin und Schrot sowie resultierenden Gutschriften für Chemieprodukte und Futtermittel), der berücksichtigten Verwertungs-/Entsorgungsoption³⁰, der verwendeten Schmiertechnik³¹ sowie den Ölwechselintervallen.

2.2 Biokunststoffe

Wichtigstes Ausgangsmaterial für die Herstellung von Biokunststoffen ist Stärke (Kap. III.1.2). Exemplarisch werden im Folgenden die Lebenswege von Polymilchsäure (PLA) aus Maisstärke und von Polyethylen (PE) aus Erdöl betrachtet sowie Grundaussagen weiterer Literaturstudien, die sich mit Biokunststoffen beschäftigen, zusammengestellt.

Der PLA-Lebensweg beginnt mit der landwirtschaftlichen Produktion von Mais. Der geerntete Mais wird zum Hof transportiert, getrocknet und anschließend gekühlt gelagert. Die Stärkegewinnung erfolgt zentral in der Stärkefabrik im Nassverfahren. Dabei fallen Keime und Glutenfutter als Nebenprodukte an. Die Keime werden nach einer Trocknung zu Speiseöl verarbeitet, das z. B. Sonnenblumenöl ersetzt. Der Presskuchen und das Glutenfutter werden als Tierfutter genutzt und ersetzen Sonnenblumenschrot. Maisstärke bzw. -mehl werden zu PLA-Kunststoffen und diese zu Verpackungen verarbeitet. Der Biomasserückstand wird fermentiert; das anfallende Biogas ersetzt fossile Energieträger. Nach der Nutzungsphase werden die Verpackungen aus Biokunststoff in Müllverbrennungsanlagen thermisch verwertet (Abbildung 11).

Insgesamt ist die Anzahl der in der Literatur verfügbaren Produktökobilanzen gering. In Abbildung 12 wurden zunächst die Ergebnisse aus Müller-Sämann et al. (2003) zusammengefasst. Dargestellt sind die Differenzen „Mais-PLA-Verpackung – PE-Verpackung“ für einzelne Umweltwirkungen sowie für ausgewählte Emissionen je-

weils in Einwohnerwerten/100 ha. Die aufgeführten Bandbreiten resultieren aus verschiedenen betrachteten Varianten zur Datenverifikation (z. B. Variation des Energiebedarfs der Biokunststoffproduktion (100 Prozent, – 50 Prozent), Einsatz von Stärke direkt statt PLA sowie als Referenz PP statt PE (IFEU 2005a).

In der Grundvariante (PLA aus Maisstärke) zeigen die Energie- und Treibhausgasbilanzen keine signifikanten Vor- oder Nachteile für das eine oder andere Material. Andere Umweltwirkungen stellen sich deutlich nachteilig für den nachwachsenden Rohstoff dar. Dies liegt zum einen an den hohen Aufwendungen für die Stärkegewinnung und die Kunststoffherstellung, die sich besonders in einem hohen Ressourcenverbrauch und hohen Treibhausgasemissionen niederschlagen. Zum anderen spielt auch die Landwirtschaft eine für die Bilanz entscheidende Rolle, und zwar bei der Versauerung, der Eutrophierung und dem Ozonabbau. Bei den toxischen Emissionen hat der Biokunststoff aus Mais Vorteile beim Schwefeldioxid und den Dieselpartikeln, während Stickoxid- und Ammoniakemissionen, verursacht durch die Landwirtschaft, nachteilig für das Maisprodukt ausfallen (Müller-Sämann et al. 2003, S. 89).

In Würdinger et al. (2002) wurden Loose-Fill-Verpackungen aus Stärke und Polystyrol (PS) untersucht. Für alle relevanten Lebenswegabschnitte wurden jeweils Varianten analysiert, u. a. mehrere Stärkepflanzen, Primär- und Sekundär-PS, Entsorgung als Restmüll, Kompostierung, thermische Nutzung. Die Ergebnisse aus Würdinger et al. (2002) sind in Abbildung 13 dargestellt (relative Bandbreiten der Differenzen „NaWaRo – fossil“; brutto: ohne Gutschriften, netto mit Gutschriften). Die Bandbreiten resultieren aus den erwähnten Variationen. Zu erkennen ist, dass die Gutschriften in den meisten Kategorien eine untergeordnete Bedeutung haben (mit Ausnahme beim KEA).

In weiteren Studien, z. B. in EPFL (2005), in denen eine Auswertung von Ökobilanzstudien zur stofflichen und energetischen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen erfolgte, wurden meist Vorteile beim Verbrauch nichterneuerbarer Energien und beim Treibhauseffekt aufgeführt, bei synthetischen Polymeren (z. B. PLA) ggf. auch Nachteile; für Versauerung, Eutrophierung und Ozonabbau ergaben sich Nachteile oder Indifferenzen (ggf. auch geringe Vorteile für Eutrophierung) (nach IFEU 2005a).

Die Ergebnisse der Literaturlauswertung für verschiedene Biokunststoffe sind inhomogen und in Abbildung 14 – um die dokumentierten Bandbreiten aufzuzeigen – für den Energieverbrauch (KEA) exemplarisch dargestellt. Aufgeführt sind die Differenzen der Aufwendungen an nichterneuerbaren Energieträgern „NaWaRo – fossil“.

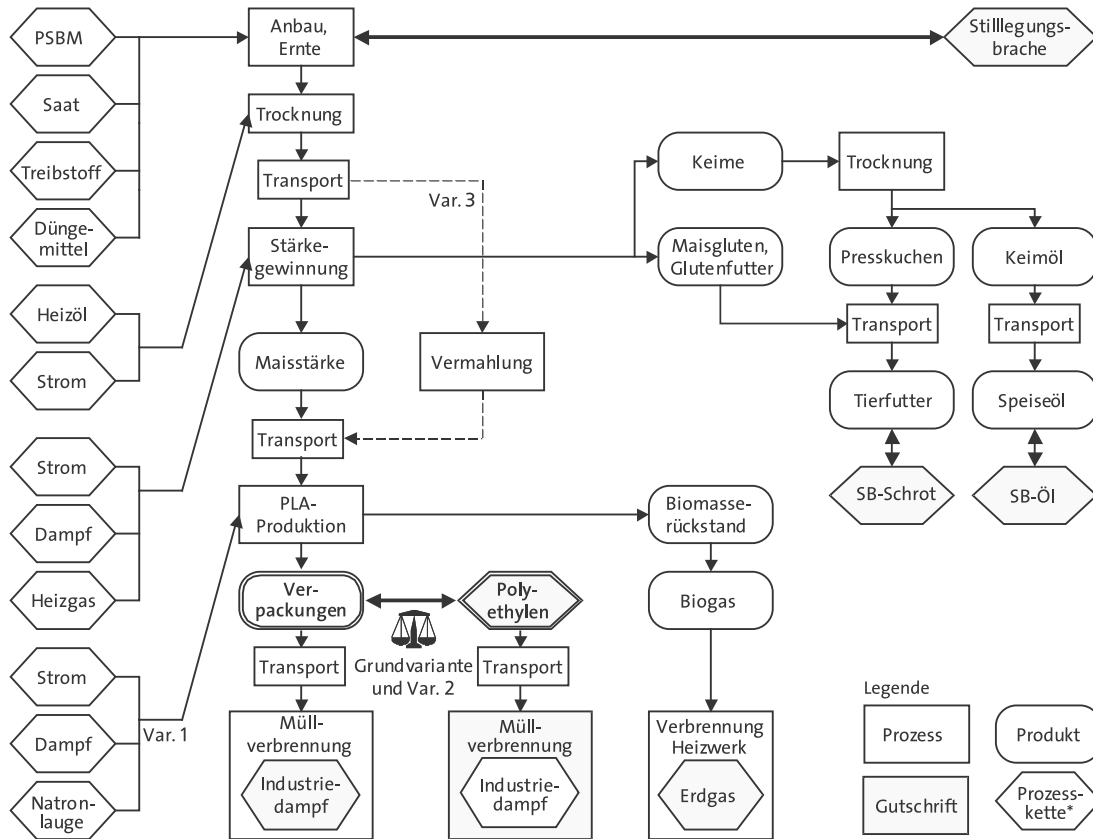
Aus Abbildung 14 ist erkennbar, dass sich bereits für einzelne Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen große Bandbreiten ergeben, die bestimmt werden durch die Wahl der konventionellen Vergleichsprodukte und die Lebenswege der biogenen und konventionellen Produkte im Detail (z. B. Art der Stärkepflanze, Primär- oder recyceltes fossiles Material, Art der Verwertung bzw. Beseitigung). Die extremen Ergebnisse bei Heyde (1998)

³⁰ Bei thermischer Verwertung fallen ggf. erhebliche Gutschriften für substituierte fossile Brennstoffe an.

³¹ Verlust- oder Umlaufprinzip bedingen die Relevanz der Entsorgung.

Abbildung 11

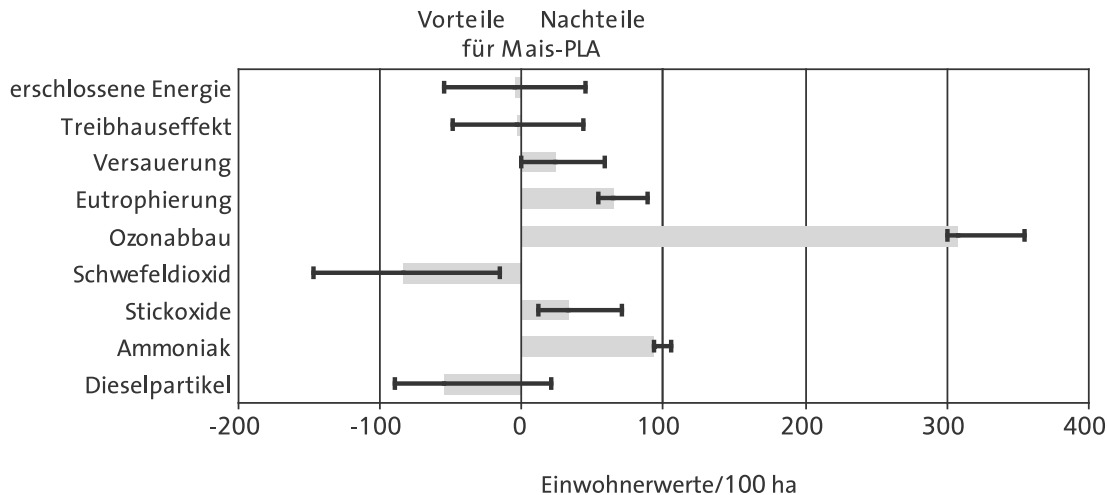
Lebenswege von Mais-PLA- und PE-Verpackungen



* Prozessfolge ab Rohstoffförderung; Grundvariante: Produktion von PLA aus Maisstärke; Variante 1: Variationen im Energiebedarf bei der Biokunststoffproduktion (doppelter bzw. halb so hoher Energiebedarf bei der Biokunststoffproduktion); Variante 2: Variationen im Gewicht des Vergleichsprodukts (um ein Viertel verringertes bzw. um ein Drittel erhöhtes Gewicht des Vergleichsproduktes); Variante 3: Vermahlung des Mais statt Stärkegewinnung und Variante 4: Herstellung von konventionellen Verpackungen aus PP anstelle von PE.
 PSBM = Pflanzenschutz- und Pflanzenbehandlungsmittel; PLA = Polymilchsäure; PP = Polypropylen; PE = Polyethylen, T = Transport; SB = Sonnenblumen
 Quelle: Müller-Sämman et al. 2003, nach IFEU 2005a

Abbildung 12

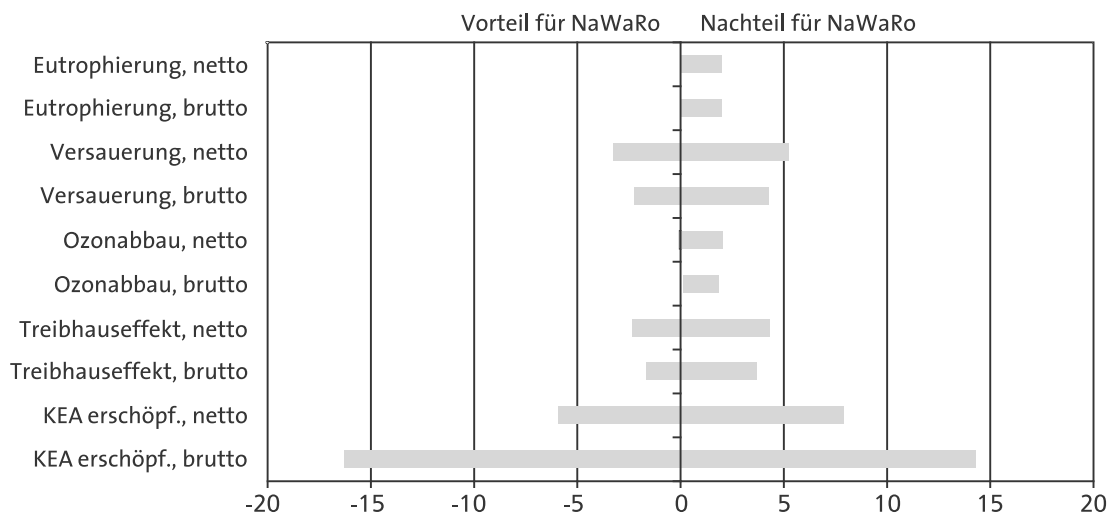
Umwelteigenschaften von Verpackungen aus Mais-PLA-Differenzen „Mais-PLA-Verpackung – PE-Verpackung“ für ausgewählte Umweltwirkungen und Emissionen



Lesebeispiel für den ersten Balken: Durch die Nutzung von Mais-PLA anstelle von PE als Verpackung werden je nach Variante pro 100 ha angebautem Mais im Saldo so viele nichterneuerbare Energieressourcen eingespart (niedrigere Produktionsenergie und äquivalente Masse) bzw. zusätzlich verbraucht (höhere Produktionsenergie und äquivalente Masse), wie sie von etwa 50 Bundesbürgern jährlich im Durchschnitt verbraucht werden.
Quelle: Müller-Samann et al. 2003, nach IFEU 2005a

Abbildung 13

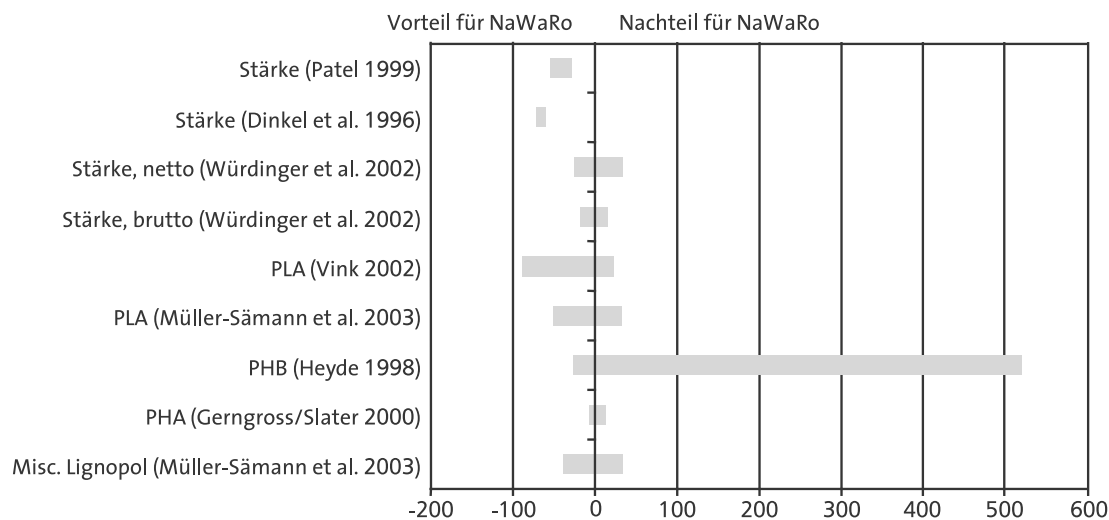
Umwelteigenschaften von Stärke-Loose-fill-Verpackungen: relative Bandbreiten der Differenzen „NaWaRo – fossil“



Angaben sind dimensionslos; Mittelwerte: -1: KEA erschöpflich (brutto); 1: alle übrigen; brutto: ohne Gutschriften, netto mit Gutschriften;
Lesebeispiel für den letzten Balken: Im Vergleich von Stärke- und Polystyrolverpackungen ergibt sich im Mittel der untersuchten Varianten für den KEA (brutto) ein Nachteil für Stärke. In der ungünstigsten Variante ist der Nachteil etwa 14-mal so groß wie im Mittel. Günstigsten falls ergibt sich ein Vorteil für Stärke gegenüber Polystyrol, im Betrag etwa das 16-Fache des Nachteils im Mittel.
Quelle: Würdinger et al. 2002, nach IFEU 2005a

Abbildung 14

Bandbreiten der KEA-Differenzen „NaWaRo – fossil“ (in MJ/kg)



KEA = kumulierter Energieaufwand; PLA = Polymilchsäure; PHA = Polyhydroxyalkanoate; PHB = Polyhydroxybutyrat. Zu beachten: Aufgrund unterschiedlicher Produktfunktionen und Systemgrenzen der verschiedenen Quellen ist kein quantitativer Vergleich möglich.

Lesebeispiel für den dritten Balken: Abhängig von den konkreten Bedingungen werden pro kg Stärke-Loose-Fill-Verpackung bis zu etwa 15 MJ fossiler Energie eingespart (Verbrennung der Verpackungen, Primärpolystyrol etc.) bzw. mehr verbraucht durch den vermiedenen Einsatz von Polystyrolverpackungen.

Quellen: aus verschiedenen Quellen zusammengestellt von IFEU (2005a)

werden durch konservative Daten für Anlagen zur Müllverwertung/-brennung der 1990er Jahre einerseits und theoretisch vollständig optimierte Anlagen andererseits aufgespannt (hier wird ein „best“ und ein „worst case“ dargestellt). Bemerkenswert ist, dass nur wenige Literaturquellen ausschließlich Vorteile für Biokunststoffe beim Verbrauch erschöpflicher Energie dokumentieren. Verallgemeinerbare Aussagen zu Vor- oder Nachteilen für Biokunststoffe aus nachwachsende Rohstoffen im Vergleich zu fossilbasierten Kunststoffen hinsichtlich KEA sind deshalb nicht möglich (IFEU 2005a, S. 19).

Insgesamt betrachtet, lässt sich für keine Umweltwirkung eine allgemeine Tendenz hinsichtlich Vor- oder Nachteilen von nachwachsenden Rohstoffen gegenüber konventionellen Pendanten feststellen. Die Ergebnisse hängen vom Gesamtdesign der Studien bzw. des konkret untersuchten technischen Systems ab. Wichtige Einflussgrößen sind z. B. die Behandlung von Kuppelprodukten sowie der Nutzungs- und Verwertungs-/Entsorgungsphase, die gewählte Pflanzenart (z. B. bei stärkebasierten Produkten ist der Anbau als auch die Verarbeitung der verschiedenen Ausgangspflanzen ergebnisrelevant) und die jeweiligen Anbaubedingungen (nach IFEU 2005a, S. 19).

2.3 Fasermaterialien und -produkte

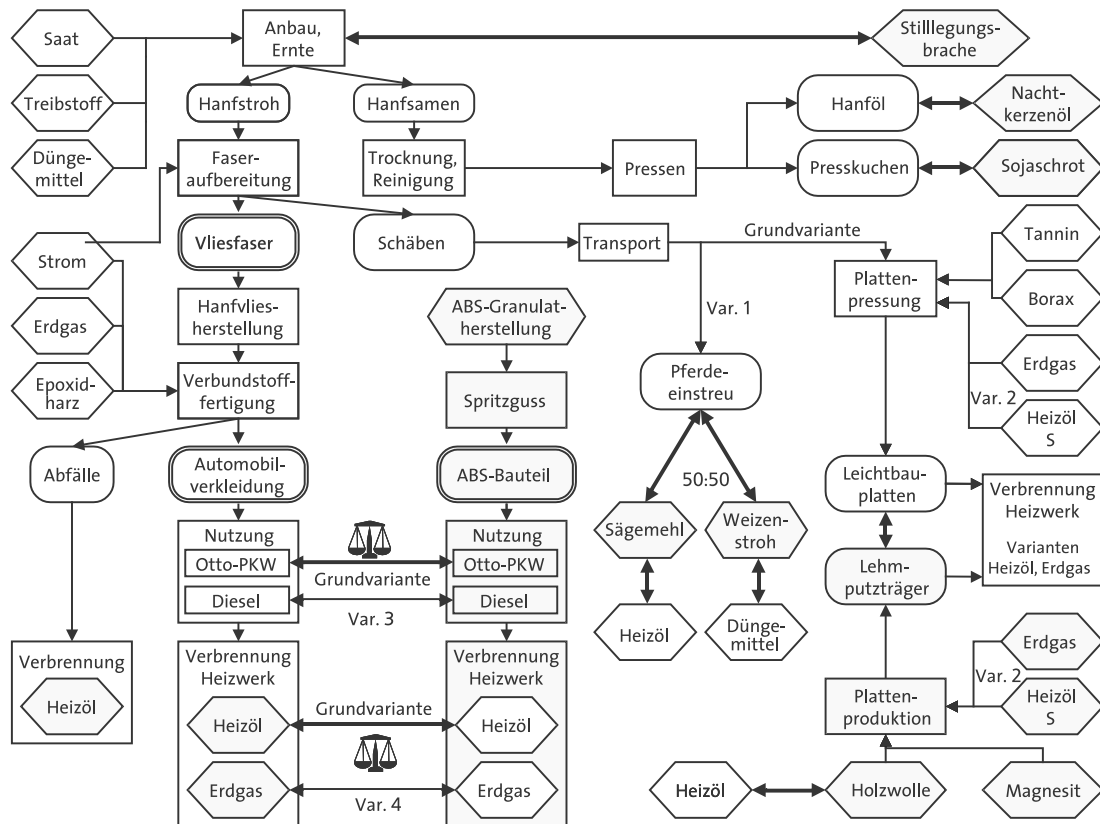
Für die folgende Darstellung wurden aus der Vielzahl der Produkte Dämmstoffe und faserverstärkte Werkstoffe ausgewählt. Abbildung 15 zeigt exemplarisch die Le-

benswege von Autoinnenverkleidungsteilen aus Hanffaserverbundwerkstoff und aus Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) basierend auf Müller-Sämann et al. (2003).

Die dort untersuchten Varianten beziehen sich auf die Nutzung von Hanffaserteilen in Otto-PKW mit der Nutzung der Hanfschäben zur Herstellung von Leichtbauplatten oder als Pferdeeinstreu. Variiert wird der Energieträger zur Trocknung der Leichtbauplatten (Erdgas), die Nutzung des Produkts (in Diesel-PKW) und die Entsorgung des Produkts unter Ersetzung von Erdgas (nach IFEU 2005a). Zum Lebensweg der biogenen Komponente des Autoteils gehören die landwirtschaftliche Produktion von Hanf und die anschließende Fasergewinnung. Das Kuppelprodukt Hanfsamen wird zu Hanföl verarbeitet, welches Nachtkerzenöl ersetzt. Der hierbei anfallende Presskuchen ersetzt Sojaschrot. Das Hanfstroh wird in Fasern und Schäben getrennt. Die Schäben können zu Leichtbauplatten verarbeitet werden, die konventionelle Lehmputzträgerplatten ersetzen (Alternative: Verwendung als Tierstreu). Die Fasern werden vervliest und mit Epoxidharz zu Autoinnenverkleidungen verarbeitet. Die bei der Fertigung entstehenden Abfälle werden thermisch verwertet. Die Teile können in verschiedenen Fahrzeugen eingesetzt werden (mit unterschiedlichen Effekten auf die Umweltwirkungen der Gesamtlebenswege). Nach der Nutzungsphase werden die Autoteile thermisch verwertet und ersetzen fossile Energieträger (IFEU 2005a).

Abbildung 15

Lebenswege von Autoinnenverkleidungsteilen aus Hanffaserverbundwerkstoff und ABS



ABS = Acrylnitril-Butadien-Styrol, Heizöl S = schweres Heizöl

Grundvariante: Nutzung von Hanffaserteilen in Otto-PKWs mit Nutzung der Hanfschäben zur Herstellung von Leichtbauplatten, Trocknung von diesen unter Einsatz von schwerem Heizöl und Entsorgung des Verbundstoffs und der Platten unter Substitution von Heizöl; Variante 1: Nutzung der Hanfschäben als Pferdeeinstreu; Variante 2: Energiebereitstellung zur Trocknung der Leichtbauplatten durch Erdgas; Variante 3: Grundvariante und Variante 1 mit Nutzung des Produkts in Diesel-PKWs; Variante 4: Grundvariante und Variante 1 mit Entsorgung des Produkts unter Ersetzung von Erdgas

Quelle: Müller-Sämann et al. 2003, nach IFEU 2005a

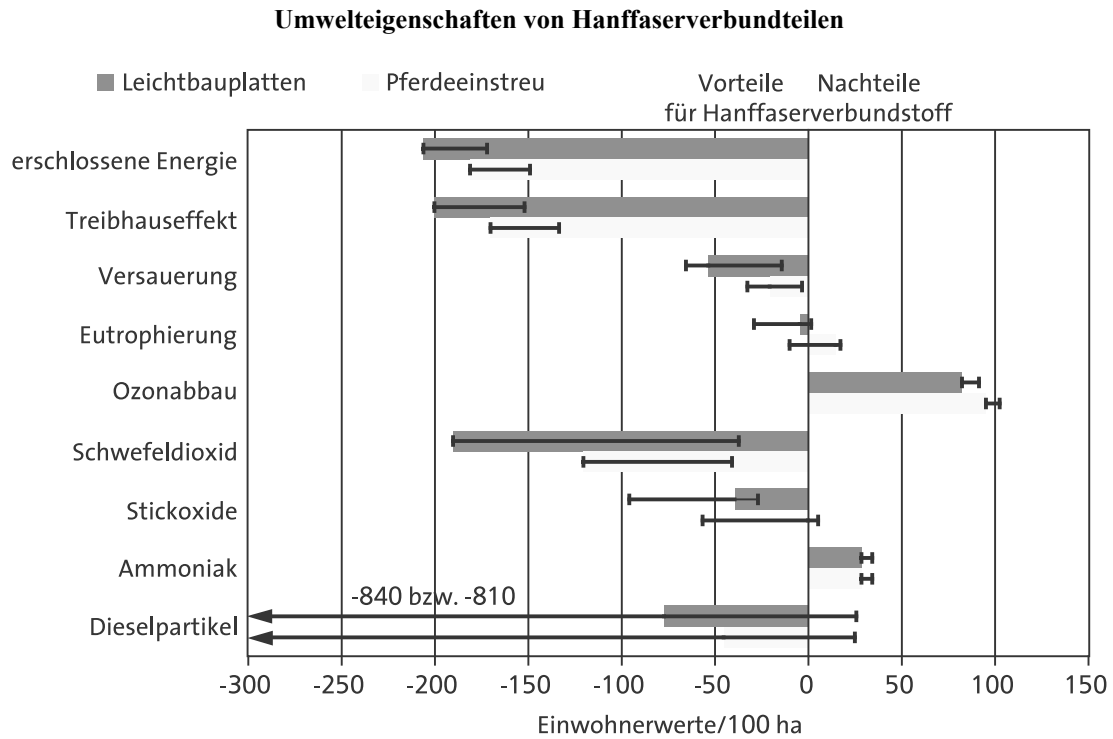
In Abbildung 16 werden die Ergebnisse aus Müller-Sämann et al. (2003) zusammenfassend dargestellt. Aufgeführt sind die Differenzen „Hanffaserverbundteil – ABS-Teil“ für die einzelnen Umweltwirkungen sowie einige Emissionen jeweils in Einwohnerwerte/100 ha. Für das wichtigste Kuppelprodukt der Faserherstellung, die Schäben, wurden die beiden Nutzungsarten Pferdeeinstreu und Leichtbauplatten untersucht. Die Bandbreiten innerhalb dieser Varianten resultieren aus der Variation der Nutzungsphase (Otto- oder Diesel-PKW) und des fossilen Energieträgers, der durch die thermische Verwertung substituiert wird (Heizöl oder Erdgas) (IFEU 2005a).

Die Hanffaserverbundstoffe zeigen Vorteile gegenüber ABS-Kunststoff in nahezu allen Wirkungskategorien. Den größten Anteil an diesen Vorteilen hat die Nutzungsphase im PKW. Da eine Verkleidung aus Hanffaserverbundmaterial leichter ist als eine ähnlich haltbare aus ABS, ergibt sich eine Gewichtsersparnis, die zu einem etwas verminderten Kraftstoffverbrauch führt. Auf die Lebenszeit des Fahrzeugs gerechnet wird dies – außer bei

Lachgas und Ammoniak – zum stärksten Faktor in der Bilanz. Bei den Schadstoffen zeigt sich beim Einsatz von Hanf statt ABS eine Verringerung von Schwefeldioxid (hauptsächlich getragen von der Produktion des ABS), während die Ammoniakemissionen ansteigen, verursacht durch fast ausschließlich landwirtschaftliche Emissionen. Stickoxide und Dieselpartikel zeigen kaum Abweichungen (Müller-Sämann et al. 2003, S. 93).

Die in einer weiteren Studie (IBO 2000) dokumentierten Ökoprofile für die Produktion einer Vielzahl von biogenen, mineralischen und fossilen Dämmstoffen sind in Abbildung 17 als relative Bandbreiten der Differenzen „NaWaRo-Dämmstoffe – konventionelle Dämmstoffe“ dargestellt. Die Bandbreiten für die einzelnen Wirkungskategorien werden durch die Differenzen „bester NaWaRo – schlechtester konventioneller (mineralisch/fossil)“ und „schlechtester NaWaRo – bester konventioneller (mineralisch/fossil)“ aufgespannt. Nachteile für NaWaRo-Dämmstoffe ergeben sich vor allem im Vergleich zu den mineralischen Dämmstoffen, wenn nur die

Abbildung 16



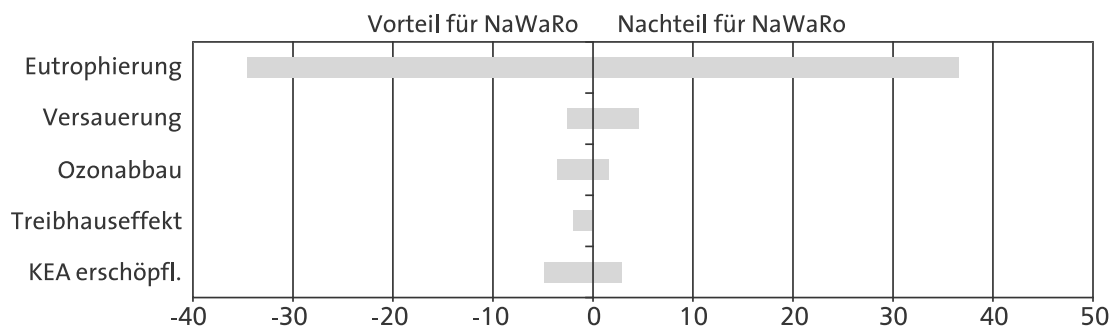
Lesebeispiel für den ersten Balken: Durch die Nutzung von Hanffaser- anstelle von ABS-Teilen für Autoinnenverkleidungen werden pro 100 ha angebautem Hanf im Saldo so viele nichterneuerbare Energieressourcen eingespart, wie sie von etwa 210 Bundesbürgern jährlich im Durchschnitt verbraucht werden.

Die Umwelteigenschaften sind dargestellt als Differenzen „Hanffaserverbundteil – ABS-Teil“ in Einwohnerwerten pro 100 ha Anbaufläche für ausgewählte Umweltwirkungen und Emissionen.

Quelle: Müller-Samann et al. 2003, nach IFEU 2005a

Abbildung 17

Umwelteigenschaften von Dämmstoffen – relative Bandbreiten der Differenzen „NaWaRo-Dämmstoffe – konventionelle Dämmstoffe“



Dimensionslose Angaben; Mittelwerte: -1: KEA erschöpflich, Treibhauseffekt, Ozonabbau; 1: Versauerung, Eutrophierung.

Lesebeispiel für den ersten Balken: Im Vergleich von verschiedenen NaWaRo- und konventionellen Dämmstoffen ergibt sich im Mittel der untersuchten Produkte für die Eutrophierung ein Nachteil für NaWaRo-Dämmstoffe. In der ungünstigsten Variante ist der Nachteil etwa 35-mal so groß wie im Mittel. Günstigsten falls ergibt sich ein Vorteil für NaWaRo-Dämmstoffe gegenüber konventionellen, ebenfalls etwa das 35-Fache des Nachteils im Mittel.)

Quelle: IBO 2000, nach IFEU 2005a

Produktion betrachtet wird. Eine Berücksichtigung der Entsorgung durch thermische Nutzung verbessert die Ergebnisse für die NaWaRo-Dämmstoffe, da mineralischen Dämmstoffen (z. B. Steinwolle) die thermische Nutzung nicht offen steht (IFEU 2005a). In die beachtliche Bandbreite bei der Eutrophierung fließen landwirtschaftliche Effekte aus den betrachteten Vorketten ein.

In weiteren Studien führten z. B. van Dam/Bos (2004a u. b) einen Vergleich von flachs- und glasfaserverstärkten Kunststoffteilen durch. In EPFL (2005) erfolgte eine Auswertung von Ökobilanzen mit dem Ergebnis, dass Faserprodukte meist Vorteile beim Verbrauch nichterneuerbarer Energien und beim Treibhauseffekt sowie Nachteile oder Indifferenzen bei Versauerung, Eutrophierung und Ozonabbau aufweisen. Wötzel (1999) verglich Autoinnenverkleidungsteile aus Hanffaserverbundmaterial und ABS, wobei allein für die Herstellung Vorteile beim Verbrauch nichterneuerbarer Energieträger, beim Treibhauseffekt und bei der Versauerung sowie Nachteile bei Eutrophierung und Ozonabbau aufgezeigt wurden (nach IFEU 2005a). Die Ergebnisse der Literatursauswertung für verschiedene Faserprodukte sind in Abbildung 18 exemplarisch für den Energieverbrauch dargestellt, wobei die Differenzen der Aufwendungen an nichterneuerbaren Energieträgern „NaWaRo-Faserprodukt – konventionelles Produkt“ aufgeführt sind.

Die aufgezeigten Bandbreiten sind bereits für einzelne Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen erheblich. Ein wesentliches Kriterium ist die Behandlung der Entsor-

gung (Verwertung, Beseitigung), die z. B. in Müller-Sämann et al. (2003), nicht aber in IBO (2000) erfasst ist. Für die Gesamtheit der hier dargestellten Vertreter der „Fasermaterialien und -produkte“ kann die Frage nach Vor- oder Nachteilen für nachwachsende Rohstoffe tendenziell beantwortet werden mit: Es lässt sich ein Vorteil konstatieren, wobei diese Aussage jedoch durch zahlreiche Einzelfälle eingeschränkt wird (IFEU 2005a, S. 14).

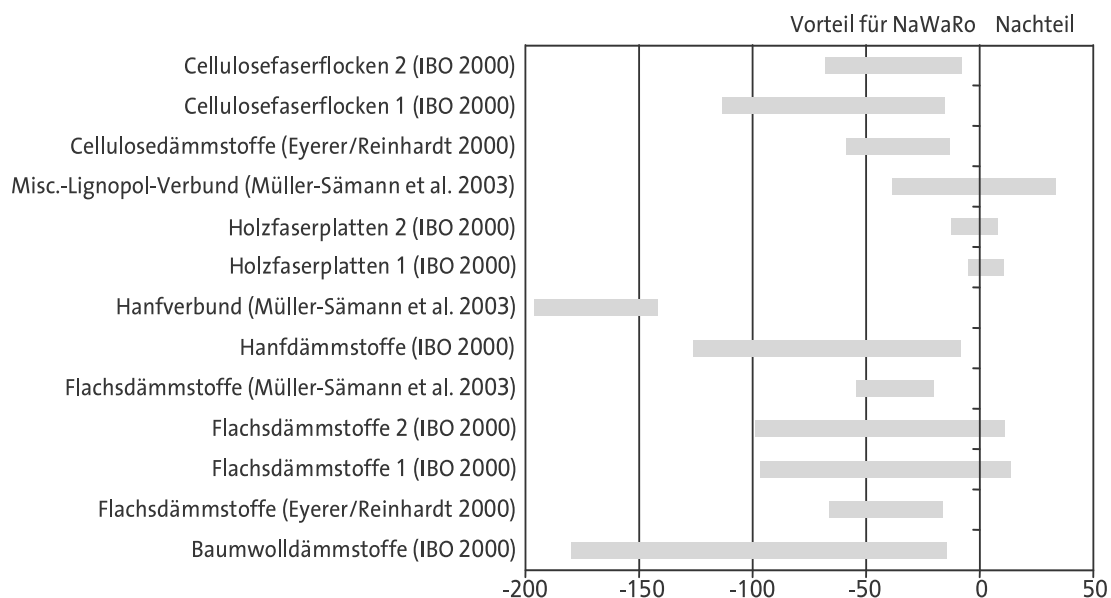
Unter Berücksichtigung der verschiedenen Systemgrenzen (insbesondere mit oder ohne Verwertung/Entsorgung) ergeben sich nur wenige eindeutige, verallgemeinerbare Ergebnisse. Dazu gehören (IFEU 2005a):

- Vorteile für NaWaRo beim Aufwand an nichterneuerbaren Energieträgern (KEA) und beim Treibhauseffekt,
- Indifferenz bei allen übrigen Kategorien,
- keine zuverlässige Angabe zu den Nachteilen möglich.

Zu wesentlichen Einflussfaktoren gehören ergebnisrelevante Gutschriften für Kuppelprodukte (z. B. Schäben), Unterschiede im Gewicht (unterschiedlicher Energieverbrauch in der Nutzungsphase), thermische Entsorgung oder Kompostierung, sinnvolle Auswahl der konventionellen Pendanten, Berücksichtigung noch nichtetablierter Fertigungsverfahren (Datenunsicherheiten) und die Berücksichtigung von Kosubstraten sowie Additiven (z. B. Kunststoffe als Matrix) (nach IFEU 2005a, S. 15).

Abbildung 18

**Bandbreiten der KEA-Differenzen aus „NaWaRo-Faserprodukt – konventionelles Produkt“
(in MJ/kg)**



KEA = kumulierter Energieaufwand; zu beachten sind unterschiedliche Produktfunktionen und Systemgrenzen, daher ist kein quantitativer Vergleich möglich.

Lesebeispiel für den ersten Balken: Abhängig von den konkreten Bedingungen werden pro kg Flachsdämmstoff bis zu knapp 100 MJ fossiler Energie eingespart durch den vermiedenen Einsatz von konventionellen Dämmstoffen (Ersatz von Polystyrol) bzw. bis zu etwa 15 MJ mehr verbraucht (Ersatz von Glaswolle).

Quelle: nach IFEU 2005a

2.4 Zusammenfassende Bewertung

Die untersuchten Studien lassen nur bedingt verallgemeinernde Aussagen zu. Insbesondere bei den Biokunststoffen ist dies aufgrund der Heterogenität der verfügbaren Studien nicht möglich. Dennoch wird hier versucht, die Ergebnisse ansatzweise produktgruppenübergreifend zu diskutieren. Zusammenfassend lässt sich für den bisherigen Vergleich von „NaWaRo-Produkten – konventionelle Pendant“ der drei Produktgruppen festhalten (IFEU 2005a):

- Biohydraulik- und Bioschmieröle: Vorteile für NaWaRo beim Aufwand an nichterneuerbaren Energieträgern (KEA) und beim Treibhauseffekt; Nachteile bei Ozonabbau, Versauerung, Eutrophierung,
- Biokunststoffe: keine allgemeinen Aussagen möglich,
- Fasermaterialien und -produkte: Vorteile für NaWaRo beim Aufwand an nichterneuerbaren Energieträgern (KEA) und beim Treibhauseffekt; Indifferenzen bei allen übrigen; Nachteile: keine zuverlässige Angabe möglich.

Vergleich von NaWaRo-Produkten untereinander – Flächeneffizienz

Neben den bisher aufgeführten Produktgruppen werden nachfolgend weitere integriert. Die Basis für diesen Vergleich bilden die (anbau)flächenbezogenen Differenzen der Umweltwirkungen von NaWaRo- und konventionellen Produkten. Dieser Vergleich wird bestimmt durch die Umweltwirkungen pro Masseneinheit bzw. Produktleistung und die Produktmenge pro Fläche (ha). Damit sind Aussagen über die Effizienz der Flächennutzung möglich. Für die hier betrachteten NaWaRo-Gruppen sind bei-

spielhaft Ergebnisse aus Müller-Sämann et al. (2003) in Abbildung 19 zusammengefasst.

Aufgrund der Bandbreiten innerhalb der einzelnen Produktgruppen können keine eindeutigen Vor- oder Nachteile des einen oder anderen nachwachsenden Rohstoffs gegenüber den anderen abgeleitet werden, mit Ausnahme etwa von Hanfverbundmaterial (unter den betrachteten spezifischen Randbedingungen). In den meisten Fällen ergeben sich zwar Vorteile für die Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen, jedoch können beim Einsatz von Miscanthus-Lignopol sowie von PLA auch Nachteile auftreten (nach IFEU 2005a).

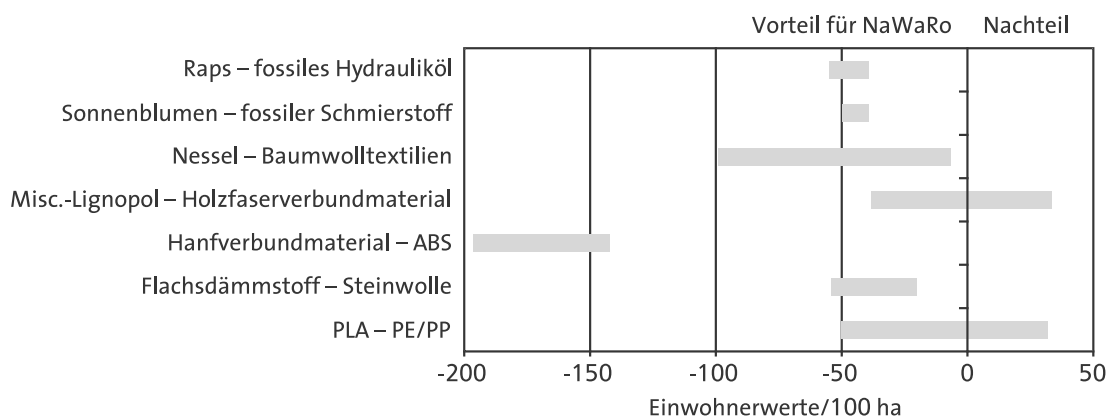
Übergreifende Aspekte

Für die Realisierung tendenzieller Vorteile, ihre Optimierung und die Minimierung von Nachteilen stofflich genutzter nachwachsender Rohstoffe ist es sinnvoll, sämtliche Einzelprozesse des Gesamtlebensweges zu optimieren. Dazu gehört auch die landwirtschaftliche Produktion (z. B. Stickstoffdüngerbedarf zur Reduktion der NH₃- und N₂O-Emissionen).

Nach Ende der Nutzung wäre eher eine thermische Verwertung vorzusehen, da diese für die Bilanz des Gesamtlebensweges von nachwachsenden Rohstoffen häufig vorteilhaft ist (Substitution von fossilen Energieträgern). Die Kompostierung ist dagegen mit geringeren Gutschriften und ggf. erheblichen Methanemission verbunden. Bioabbaubarkeit bedeutet damit nicht zwangsläufig Umweltfreundlichkeit und muss damit auch nicht unbedingt ein Hauptziel der Produktentwicklung sein; vielmehr kann der biologische Abbau kontraproduktiv und können längere Haltbarkeit und thermische Verwertung sinnvoller sein (IFEU 2005a, S. 24).

Abbildung 19

KEA (nichterneuerbare) von verschiedenen Produkten



Dargestellt sind die Differenzen „biogen – konventionell“ in Einwohnerwerten/100 ha Anbaufläche des KEA (nichterneuerbare): KEA = kumulierter Energieaufwand, ABS = Acrylnitril-Butadien-Styrol, PLA = Polymilchsäure, PE = Polyethylen, PP = Polypropylen
 Lesebeispiel für den ersten Balken: Durch die Nutzung von Rapshydrauliköl anstelle von Mineralöl werden pro 100 ha angebautem Raps im Saldo – abhängig von den genauen Bedingungen – so viele nichterneuerbare Energieressourcen eingespart, wie sie von etwa 40 bis 55 Bundesbürgern jährlich im Durchschnitt verbraucht werden.
 Quelle: Müller-Sämann et al. 2003, nach IFEU 2005a

Aus den Einzelergebnissen der Ökobilanzen heraus lassen sich keine objektiv-wissenschaftlich begründbaren Entscheidungen für oder gegen den Einsatz von modifiziertem Raps-Hydrauliköl, Autoinnenverkleidungen aus Hanffaserverbundstoff oder Biokunststoffen ableiten. Erst mit zusätzlichen Kriterien ist eine zusammenfassende Gesamtbewertung möglich. Ein möglicher (subjektiver) Bewertungsansatz aber besteht etwa darin, Prioritäten zu setzen (z. B. „Das Weltklima ist wichtiger als regional begrenzte Auswirkungen durch sauren Regen bzw. durch den Luftschadstoff Ammoniak etc.“). Entscheidet man sich z. B. dafür, Ozonabbau und Ammoniakemissionen nicht die höchste Priorität einzuräumen, dann folgt aus dieser Werthaltung, dass z. B. die Nutzung von Verkleidungen aus Hanf solchen aus ABS aus ökologischen Gründen eindeutig vorzuziehen ist (nach Müller-Sämann et al. 2003). Hierbei wären Kriterien wünschenswert, um eine solche Abstufung nachvollziehbar zu machen.

Da der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen nicht per se mit durchschlagenden Umweltvorteilen verbunden ist, sondern vielmehr an die konkrete Umsetzung gebunden ist, könnte die Realisierung dieser potenziellen Vorteile durch eine FuE-begleitende Erstellung von Produktökobilanzen unterstützt werden (Ecodesign). Dieses Vorgehen, welches auch in der integrierten Produktpolitik der EU-Kommission verankert ist, ist bislang jedoch die Ausnahme. Umsetzen ließe sich dies etwa durch eine umweltwissenschaftliche Begleitforschung. Um realistische Basisvarianten, Systemgrenzen und faire und realistische Pendanten zu integrieren, wäre eine Einbindung von Unternehmen und Verbänden erforderlich (IFEU 2005a). Weiterhin sind übergreifende Ökobilanzstudien für mehrere Produktgruppen sinnvoll, um optimale Produktlinien – insbesondere auch unter dem Aspekt der Flächennutzung – zu identifizieren und damit Fehlallokationen sowohl von Flächen als auch von Fördermitteln zur NaWaRo-Produktentwicklung zu vermeiden (IFEU 2005a). Angesichts zukünftig absehbarer zunehmender Flächenknappheit und unterschiedlichen Flächeneffizienzen der verschiedenen nachwachsenden Rohstoffe stellt letztere ein wesentliches Bewertungskriterium dar.

IV. Zukünftige stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen

Die zukünftige industrielle stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen, die im Folgenden primär für den Bereich der „Bioraffinerien“ beschrieben wird, ist nicht losgelöst von den Ausführungen in den Kapiteln III und V zu sehen. Zum Beispiel wäre die integrierte Herstellung von Schmier-, Kunst- aber auch von Biokraftstoffen in einem sog. „Bioraffineriekonzept“ möglich. Während die vorgenannte stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffen eher als punktuelle Aktivitäten – in einer auf fossile Rohstoffe ausgelegten stoffwandelnden Industrie – anzusehen sind, werden auch sehr viel weiter gehende Perspektiven entwickelt, wie beispielsweise in den USA: „Hier wird über die komplette Umstellung der Chemie von der Petrochemie zu einer Chemie, die auf nachwachsenden Rohstoffen basiert, diskutiert, d. h. über z. T. völlig neue

Produktstammbäume. Bioraffinerien würden petrochemische Raffinerien ablösen und Zucker, Öle, und Restbiomasse zur Verfügung stellen. Wirtschaftlich könnten derartige Anlagen allerdings nur unter Verwendung aller Produkte und Nebenprodukte betrieben werden. Die Landwirtschaft müsste in diesem Szenario nicht nur den Rohstoff bereitstellen, sondern auch Produkte z. B. in Form von Biomasse als Dünger oder Viehfutter wieder zurücknehmen. Dementsprechend hätte eine derartige Umstellung tiefgreifende Auswirkungen weit über den Bereich der chemischen Industrie hinaus. Auch wenn diese Überlegungen in Europa mit viel Skepsis verfolgt werden, so ist festzustellen, dass der gegenwärtig hohe Ölpreis ein derartiges Szenario realistischer erscheinen lässt, als es noch vor wenigen Jahren der Fall war.

In diesem Kapitel geht es vor allem um die folgenden Fragen: Was steht hinter dem Bioraffinerieansatz? Was bedeutet „Bio“ im Vergleich zu den herkömmlichen Raffineriekonzepten? Warum bedeuten „chemisch gleiche Grundbestandteile“ nicht automatisch „gleicher Weg“ in der Herstellung? Wo stehen wir heute? Im ersten Teil werden die Grundprinzipien der verschiedenen Systeme erläutert (Kap. IV.2), nachfolgend werden ökologische Aspekte diskutiert (Kap. IV.3).

1. Herstellung chemischer Grundstoffe – Plattformgedanke

Vonseiten der chemischen Industrie werden weltweit über 100 000 verschiedene chemische Substanzen in den Handel gebracht, wobei etwa 95 Prozent des Umsatzes auf ca. 1 500 Stoffe entfallen (Agenda 2004). Ein Großteil der Substanzen geht auf nur acht Basischemikalien bzw. Grundstoffe zurück: Benzol, Xylol, Toluol, Butan, Ethan/Ethylen, Chlor, Synthesegas (CO/H₂) und Schwefelsäure. Diese Basiskomponenten werden auf chemischem Weg, z. T. auch miteinander kombiniert, zu einer größeren Zahl von Sekundärprodukten umgesetzt (ca. 25), und jene wiederum in rund 40 Zwischenprodukte zusammengesetzt (Werpy/Petersen 2004, S. 10). Von diesen ausgehend entsteht letztendlich die Vielzahl an Endprodukten. Dies bedeutet, dass die heutige Petrochemie wie ein „Stammbaum“ aufgebaut ist (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

Auf Basis von Cellulose, Stärke und Pflanzenölen werden derzeit – aus Gründen der Wirtschaftlichkeit – nur ausgewählte chemische Grundstoffe produziert. Beispiele sind Zitronen-, Milch- und Lävulinsäure, Sorbit, Glycerin, Cellulosederivate und Oleochemikalien (BTAC 2002a). Prinzipiell eignen sich diese (Stärke, Zucker, Cellulose, Lignin, Pflanzenöle, Proteine) für die Herstellung zahlreicher chemischer Grundstoffe, die wiederum über einen „Stammbaum“ in eine Vielzahl chemischer Verbindungen umwandelbar sind (Werpy/Petersen 2004).

Biomasse ist wie Erdöl komplex zusammengesetzt, hat jedoch ein anderes Kohlen-/Wasser-/Sauer-/Stickstoffverhältnis als Erdöl. So spielen sauerstoffhaltige Kohlenhydrate – insbesondere die Zucker (Glucose, Fructose, Xylose, Arabinose, Sucrose) sowie Stärke eine besondere Rolle, auch deshalb, weil Biomasse insgesamt betrachtet zu über 75 Prozent aus Kohlenhydraten besteht. Von Be-

deutung wird es sein, inwieweit es gelingt, biobasierte sog. „building blocks“ (mehrfach funktionalisierte molekulare Bausteine) biotechnisch oder chemisch zu produzieren, die anschließend in eine Vielzahl hochwertiger Chemikalien und Materialien umgewandelt werden können. Ein Beispiel ist die Produktlinie Cellulose, Lignocellulose oder stärkehaltige Biomasse, die zunächst umgewandelt wird in Zucker (Plattform), dann zu Milchsäure (building block), um anschließend zu Polymilchsäure (Material) weiterverarbeitet zu werden (Busch et al. 2005).

Weltweit gibt es derzeit Bemühungen, im industriellen Maßstab machbare biobasierte sowie „stammbaumfähige“ building blocks, die sich „baukastenartig“ kombinieren lassen, zu lokalisieren. Parallel dazu gibt es in der Industrie bereits Überlegungen (z. B. in der Art von Machbarkeitsstudien), die von der Idee geprägt sind, bereits in einem frühen Entwicklungsstadium potenzielle biobasierte Basischemikalien und Produktstammbäume zu identifizieren, die eine chemische Logistik sowie energetische und ökonomische Effizienz aufweisen (Busch et al. 2005).

Eine Topliste potenzieller zuckerbasierter Basischemikalien³² ist beispielsweise vom U.S. Department for Energy vorgelegt worden (DOE 2005). Im Ergebnis der Untersuchungen³³ ergab eine erste Bewertung 30 Basischemikalien, wobei zu den „Top 12“ folgende building blocks gehören: 1,4-Disäuren, 2,5-Furandicarbonsäure, 3-Hydroxypropionsäure, Asparaginsäure, Glucarsäure, Glutaminsäure, Itaconsäure, Lävulinsäure, 3-Hydroxybutyrolacton, Glycerin, Sorbit, Xylit/Arabit. Ein grobes Schema eines biotechnisch-chemischen Zucker-Stammbaums findet sich in Anhang 6.

Vorläufer von Bioraffineriekonzepten (d. h. zunächst der Fraktionierung von Biomasse in Anlehnung an die Inhaltsstoffe und entsprechende Verarbeitung) gibt es schon länger. Auch wenn dafür der Begriff Bioraffinerie nicht verwendet wurde (z. B. in Zellstoffwerken, Stärke- und Zuckerfabriken, Ölmühlen), sind diese im Grunde genommen auch Mehrproduktsysteme. Aktuelle Überlegungen verbinden sich mit dem weiter gehenden Anspruch, zukünftig zunehmend teurer werdende und nur begrenzt zur Verfügung stehende fossile Rohstoffe auf breiter Ebene abzulösen. Die Entwicklung des Bioraffinerieansatzes insgesamt, Weiterverarbeitungsschritte(-verfahren) sowie die Erbauung von Pilotanlagen stehen heute

³² Basischemikalien sind Chemikalien (chemische Produkte und ihre Derivate sowie anorganische Verbindungen), die in hohen Produktionsvolumina hergestellt werden (z. B. Ethylen, Propylen, Benzol, Ammoniak etc.). Hiefür gibt es bereits ausgefeilte Technologien, eine exzellente Logistik und eine Verbundproduktion.

³³ Dazu wurden die Biomassehauptbestandteile Kohlenhydrate (Hemicellulose, Cellulose, Stärke), Lignin, Öle und Proteine einer Produktlinie gegenübergestellt. Einbezogen wurden verschiedene Plattformen (z. B. Zucker oder Syngas), Basischemikalien, sekundäre Chemikalien und Endprodukte. Untersucht wurden ca. 300 biobasierte Chemikalien. In die Bewertung einbezogen wurden weitere Kriterien wie Effizienz, chemische Funktionalität (einfach oder mehrfach funktionalisiert) Stammbaumfähigkeit, Nutzungspotenzial sowie Marktpotenzial (Busch et al. 2005).

noch ganz am Anfang. Viele Bereiche befinden sich noch weit im Stadium der Grundlagenforschung, wobei sich heute bereits große Entwicklungspotenziale abzeichnen.

Die Unterschiede in der stofflichen Zusammensetzung von nachwachsenden Rohstoffen erfordern teilweise neue Ansätze in der Technologie- und Produktentwicklung. Verfolgt werden dabei verschiedene methodische Ansätze wie der Erhalt der Synthesevorleistung der Natur (ohne Veränderung bzw. einstufige Modifikation), eine mehrstufige Modifikation vorhandener Strukturen oder der Totalabbau zu C1-Fragmenten (um diese dann wieder zu größeren Zielmolekülen zu verbinden).

Der eigentlich visionäre Gedanke besteht darin, die heute bekannten komplex vernetzten und historisch gewachsenen Strukturen der Kohle- und Erdölchemie auf nachwachsende Rohstoffe zu übertragen. Die Verarbeitung nachwachsender Rohstoffe hätte dann einen vergleichbaren Weg vor sich; „sie ist heute im Embryonalstadium, wie zu Beginn des Chemiezeitalters die Kohle- und Erdölchemie; und sie ist noch relativ weit entfernt von maßgeschneiderten, wirtschaftlichen Verfahrensverbunden“ (Bekker 2005). Die Petrochemie hat über einen längeren Zeitraum gelernt, aus Erdöl einfach zu handhabende, chemisch reine Grundstoffe in Raffineriesystemen zu erzeugen. Dies war ein Schlüssel zum Erfolg, ohne den es weder Kunststoffe noch viele andere Chemieprodukte gegeben hätte. Daher liegt es nahe, wenn man ein neues Stammbaumsystem für nachwachsende Rohstoffe aufbauen möchte, die Effizienz und Grundlogik heutiger petrochemischer Linien darauf zu übertragen.

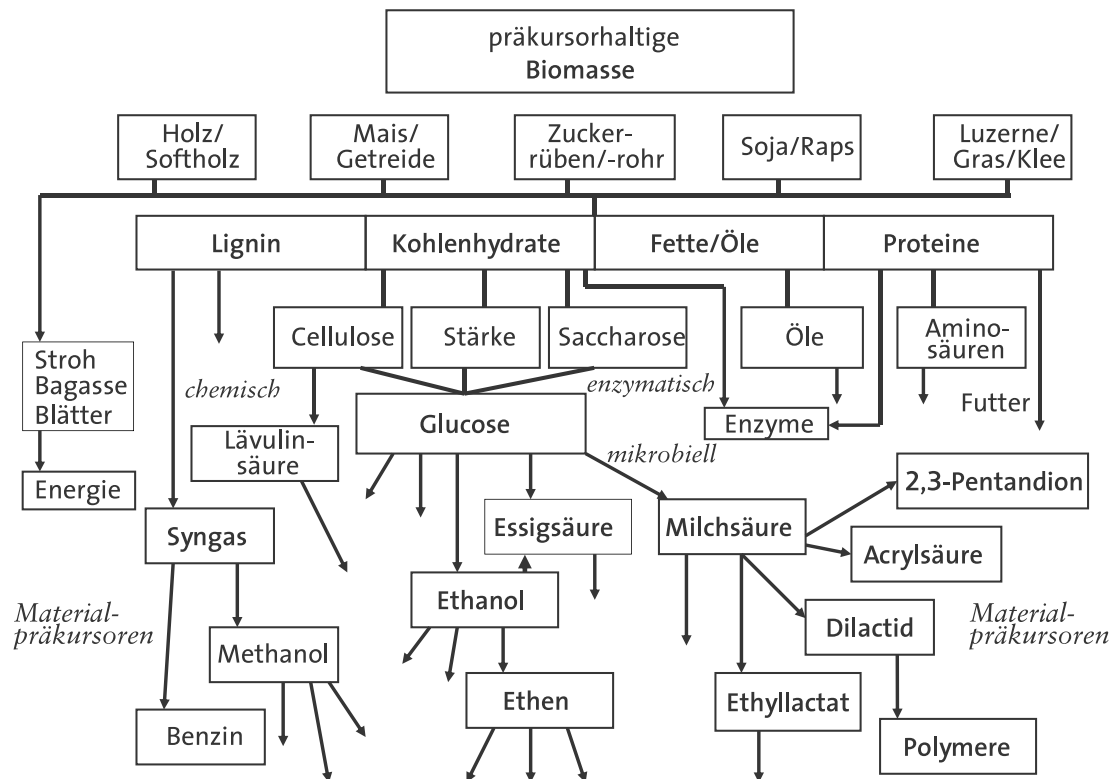
Ein wesentlicher Unterschied zur Verarbeitung von Erdöl ist der, dass Erdöl extraktiv aus der Natur gewonnen wird, während Biomasse bereits ein Produkt, zumeist eines landwirtschaftlichen Stoffwandlungsprozesses, ist und die Synthese(vor)leistung der Natur beinhaltet. Biomasse kann daher im Verlaufe ihrer Herstellung bereits so modifiziert werden, dass sie dem Zweck der nachfolgenden Verarbeitung angepasst ist und bestimmte gewünschte Hauptprodukte vorgebildet worden sind. Man hat für diese den Begriff „precursors, Präkursoren“ übernommen (Ringpfeil 2002, nach Biorefinery 2006a). Bioraffinerien stehen für die Gesamtheit der Technologien zur Verarbeitung der nachwachsenden Rohstoffe bis hin zu industriellen Zwischen- und Endprodukten. Ein entsprechendes Grobschema für eine Bioraffinerie ist in Abbildung 20 dargestellt.

Die hauptsächlich in Bioraffinerien verarbeiteten Rohstoffe lassen sich in drei Gruppen unterteilen: Lignocellulose (cellulosehaltige Biomassen wie Holz, Stroh und Schilf), Getreideganzpflanzen (z. B. Roggen, Weizen, Triticale, Gerste sowie Mais und grüne naturfeuchte Rohstoffe (z. B. Gras, Luzerne, Klee).

Für einen technisch realisierbaren Trennungsgang, der die separate Nutzung oder Weiterverarbeitung dieser Grundprodukte ermöglichen würde, sind bis heute lediglich Ansätze vorhanden (Biorefinery 2006a). Angesichts der Anteile – ca. 75 Prozent Kohlenhydrate (hauptsächlich in Form von Cellulose, Stärke und Saccharose), 20 Prozent

Abbildung 20

Bioraffineriegrubschema für präkursorhaltige Biomasse unter Bevorzugung der Kohlenhydratlinie



Quelle: Biorefinery 2006a

Lignin und 5 Prozent andere Naturstoffe wie Fette (Öle), Proteine und diverse Inhaltsstoffe (Röper 2001) – liegt es nahe, zunächst das Hauptaugenmerk auf einen effizienten Zugang zu den Kohlenhydraten, ihre Konversion zu chemischen Massenprodukten und deren Veredelungsprodukte zu richten. Durch mikrobielle oder chemische Methoden aus Stärke, Zucker oder Cellulose zugängliche Glucose ermöglicht die Herstellung einer breiten Palette an biotechnologischen und chemischen Produkten (Busch 2003; Thoen 2003). Um das energetisch vorteilhafte Potenzial für die mikrobielle Konversion von Substanzen ausgehend von Glucose zu nutzen, ist es sinnvoll, die Abbauprozesse via Glucose zu den Massenchemikalien möglichst eng mit den Aufbauprozessen zu Folgechemikalien und Materialien zu verknüpfen (Biorefinery 2006a).

2. Bioraffinerien – Grundidee und Aufbau

Eine Bioraffinerie ist ein komplexes, integriertes System von Prozessen und Anlagen, in welchem Biomasse in eine Vielzahl von Produkten umgewandelt wird oder bestimmte Verbindungen aus dieser isoliert werden. Eine Bioraffinerie ist an das Konzept einer petrochemischen Raffinerie angelehnt. Bioraffineriekonzepte werden auf das Ziel hin ausgelegt, die Effizienz und Logik der chemischen und stoffwandelnden Folgeindustrie sowie die bewährte Verknüpfung dieser mit Zwischen- und Endpro-

duzenten auf nachwachsende Rohstoffe zu übertragen (nach Biorefinery 2006a).

Im ersten Schritt einer Bioraffinerie werden präkursorhaltige Biomassen einer physikalischen Stofftrennung unterworfen. Die Haupt- und Nebenprodukte werden nachfolgend mikrobiologischen und/oder chemischen stoffwandelnden Reaktionen ausgesetzt. Die Folgeprodukte können weiterkonvertiert werden oder in eine konventionelle Raffinerie Eingang finden. Aktuell werden vier Bioraffinerie-systeme in Forschung und Entwicklung unterschieden (nach Biorefinery 2006a):

- die grüne Bioraffinerie, in welcher grasartige (feuchte) Biomasse zu stofflich und/oder energetisch nutzbaren Produkten verwertet wird,
- die Lignocellulose-Feedstock(LCF)-Bioraffinerie, in welcher naturtrockene cellulosehaltige Biomassen verarbeitet werden,
- die Getreide-Ganzpflanzen-Bioraffinerie (auch Getreidebioraffinerie³⁴), in welcher Getreide, auch Mais, einschließlich des Strohs umsetzbar ist, und

³⁴ Hier ist zu differenzieren, da auch Ausführungen denkbar sind, die nur den Strohteil des Getreides verarbeiten (Übersichtsökobilanzen Kap. IV.3.2).

- ein Zwei-Plattformen-Konzept, bei dem Biomasse zum einen biochemisch (Zucker-Plattform), zum anderen thermochemisch (Synthesegas-Plattform) verarbeitet werden kann.

Im Folgenden finden sich Ausführungen zu den einzelnen Systemen, sie stützen sich teilweise auf Biorefinery (2006a).

2.1 System der grünen Bioraffinerie (GBR)

In der grünen Bioraffinerie (GBR) können aus grünen „naturfeuchten“ Rohstoffen wie Gras, Luzerne, Klee und unreifem Getreide eine Vielzahl von Produkten wie Futtermittel, Proteine, Brennstoffe, Chemikalien und über Fermentation auch mikrobiologische Produkte wie organische Säuren, Aminosäuren, Ethanol und Biogas erzeugt werden (IFEU 2005a, S. 31). Ein Übersichtsschema ist in Abbildung 21 dargestellt.

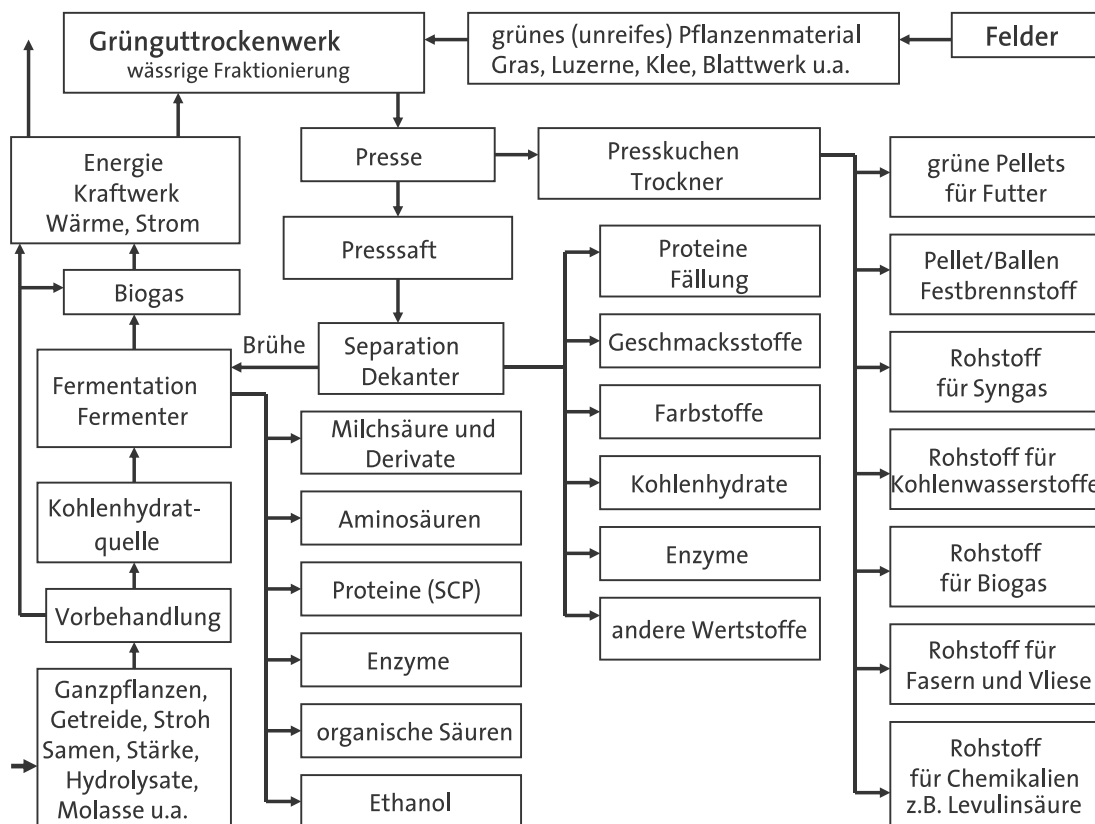
Um die Inhaltsstoffe weitestgehend naturbelassen zu isolieren, besteht die erste Stufe in einer Nassfraktionierung. Dabei wird die „grüne“ Biomasse in einen faserreichen Presskuchen und in den nährstoffreichen Presssaft getrennt. Der Presskuchen enthält neben Cellulose und

Stärke auch Farbstoffe sowie andere Organika. Der grüne Presssaft enthält Kohlenhydrate, Proteine, Aminosäuren, organische Säuren, Farbstoffe, Enzyme sowie weitere organische Substanzen und Mineralien. Zur Nutzung der im Grüngut enthaltenen, leicht fermentierbaren Kohlenhydrate und des vorhandenen Wassers bieten sich biotechnisch-chemische Basistechnologien an (z. B. zur Erzeugung von Milchsäure oder Lysin). Ein Schwachpunkt ist hierbei, dass eine schnelle Primärverarbeitung des Grün gutes notwendig ist (oder eine zu kontrollierende, da rohstoffverändernde Lagerung, Silage). Bei naturfeuchten Rohstoffen ist der Lignin-Cellulose-Verbund nicht so stark ausgebildet, wie bei lignocellulosehaltigen Materialien (nach Biorefinery 2006a).

Beim grünen Presssaft liegt der Fokus auf Produkten wie Milchsäure und Derivaten, Aminosäuren, Ethanol, und Proteine. Der Presskuchen kann genutzt werden, um Futtermittel herzustellen, oder als Ausgangsmaterial zur Herstellung von Chemikalien, wie Lävulinsäure, oder auch zur Konversion in Synthesegas und Kohlenwasserstoffe (synthetische Kraftstoffe) dienen. Die Reste der stofflichen Verwertung sind geeignet für die Herstellung von Biogas, um daraus Strom und Wärme zu gewinnen (nach Biorefinery 2006a).

Abbildung 21

Schematische Darstellung der möglichen Produktströme einer grünen Bioraffinerie



Quelle: Biorefinery 2006a

In Deutschland betrug die Dauergrünlandfläche ca. 4,9 Mio. ha (Stand 2005) und macht damit etwa 30 Prozent der insgesamt landwirtschaftlich genutzten Fläche aus (StaBu 2006). Produktionstechnische und züchterische Fortschritte insbesondere in der Milchviehhaltung führen allerdings dazu, dass die traditionelle Grünlandnutzung zur Raufuttererzeugung immer weiter abnimmt (Rösch et al. 2006). Eine mittelfristig mögliche Nutzungsoption für Grünlandüberschussflächen wäre die Bereitstellung von Grassilage als Rohstoff für eine grüne Bioraffinerie.

Pilotanlagen zu GBR gibt es noch nicht. Die ersten Verarbeitungsstufen einer GBR werden derzeit am Standort der Futtermittelfabrik Selbelang (Havelland, Land Brandenburg) vorbereitet, was sich momentan vornehmlich auf die Nutzung der Trockenwerkbasis bezieht (Kamm/Kamm 2001). Darüber hinaus gibt es theoretische Arbeiten: Zum Beispiel wurde in Mandl et al. (2006) und Wachter et al. (2003) der Fokus auf die in einer grünen Bioraffinerie anfallende Faserfraktion gelegt, da diese

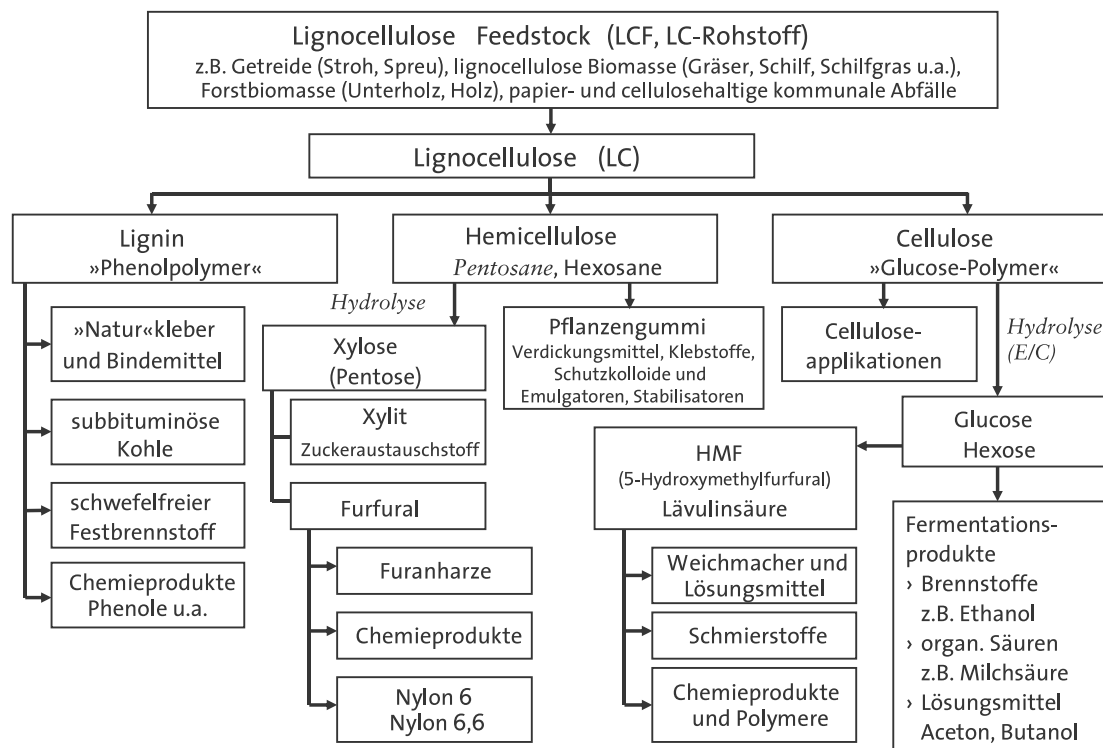
den mengenmäßig größten Stoffstrom darstellen würde, sowie deren Einsatzmöglichkeiten untersucht. In Schidler et al. (2003) wurde eine erste Bewertung der grünen Bioraffinerie auf Technologieebene auf Basis von Literatur- und Experteneinschätzungen erstellt. Trends in der Grünlandnutzung (z. B. als regionaler Rohstoff zur Energie-nutzung) finden sich u. a. in Rösch et al. (2006).

2.2 System der LCF-Bioraffinerie

In einer LCF-Bioraffinerie werden aus Stroh, verschiedenen Gräsern, Waldrestholz und cellulosehaltigen Abfällen (z. B. Papier) Produkte in drei Linien erzeugt: In der Lignin-Linie können Klebstoffe, Bindemittel, Brennstoffe oder Chemieprodukte hergestellt werden; in der Hemicellulose-Linie können zum einen Verdickungsmittel, zum anderen Folgeprodukte der Xylose (z. B. Furfural und Nylon) produziert und in der Cellulose-Linie können aus der Glucose Fermentationsprodukte wie Ethanol oder Milchsäure gewonnen werden (aber auch Lävulinsäure) (Abbildung 22).

Abbildung 22

Schematische Darstellung der möglichen Produktströme einer LCF-Bioraffinerie

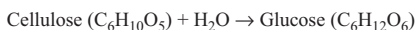
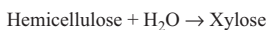


Quelle: Biorefinery 2006a

Für die industrielle Verwendung werden lignocellulosehaltige Rohstoffe in fünf Gruppen differenziert (nach Kamm et al. 2005):

- Rohstoffe aus der Land- und Forstbewirtschaftung, wie Weich- und Harthölzer, Schilf, Heu und Stroh,
- speziell angebaute schnellwachsende Baumarten und Gräser, wie Pappel, Weide, Robinie und Sudan-gras,
- Rohstoffe aus der Landschaftspflege, wie Restholz und Heu,
- Prozesslignocellulose, d. h. Reststoffe aus der Landwirtschaft und der Verarbeitung, wie Stroh, Nebenprodukte der Getreidemöhlen sowie der Papiermöhlen- und der Zellstoffindustrie,
- Abfallmaterialien (unbehandeltes Bau- und Abfallholz, Recycling-Papier).

Lignocellulosehaltige Materialien bestehen aus drei primären chemischen Fraktionen oder Präkursoren: den Hemicellulosen/Polyosen, einem Zuckerpolymer aus vorwiegend Pentosen, der Cellulose, einem Glucose-Polymer, und dem Lignin, einem Polymer des Phenols. Die zusammengefassten Umwandlungsgleichungen der Präkursorenkonversion einer LCF-Bioraffinerie lauten (Biorefinery 2006a):



Unter den potenziellen Bioraffineriekonzepten könnte sich vermutlich die LCF-Biorefinery am ehesten durchsetzen (Biorefinery 2006a), wobei es auch hier noch keine Pilotanlage gibt. Als Gründe werden u. a. die verfügbare Rohstoffbasis (ausreichende Mengen an lignocellulosehaltige Materialien) mit günstigen Rohstoffpreisen sowie eine gute Marktposition potenzieller Konversionsprodukte aufgeführt. Ein Schwachpunkt im LCF-Konzept ist die Ligninverwertung: Diese erfolgt entweder als Brenn-, Kleb- oder Füllstoff. Das LigninGrundgerüst enthält aber auch erhebliche Menge an Monoaromaten, die – sofern mit kostengünstigen Verfahren abgetrennt – zusätzlich genutzt werden könnten. Voraussetzung dafür wiederum ist, dass zukünftig ein adäquates Aufschlussverfahren für Lignin verfügbar wäre. Es soll hier angemerkt werden, dass in der Natur offensichtlich keine Enzyme vorkommen, mit deren Hilfe das von der Natur gebildete polymere Lignin ähnlich leicht in seine Grundkörper aufspaltbar wäre wie die ebenfalls von der Natur gebildeten polymeren Kohlenhydrate oder Proteine (Ringpfeil 2002). Lignin ist bis heute nicht weiter aufspaltbar, wobei an einer chemisch-enzymatischen Aufspaltung gearbeitet wird. Entsprechend besteht auch noch

FuE-Bedarf für eine saubere Separation von Hemicellulose, Cellulose und Lignin.

2.3 System der Getreide-Ganzpflanzen-Bioraffinerie

Rohmaterialien für die Getreide-Ganzpflanzen-Bioraffinerie sind Roggen, Weizen, Triticale und auch Mais. Der erste Schritt besteht in einer mechanischen Trennung des Getreidekorns und des Strohs. In einer Getreide-Ganzpflanzen-Bioraffinerie können aus dem Getreidestroh – analog wie in der LCF-Bioraffinerie – die Produkte der drei Lignin-, Hemicellulose- und Cellulose-Linien erzeugt werden. Das Stroh kann aber auch vergast werden.³⁵ Aus dem Synthesegas können Produkte wie Methanol oder PHB (Polyhydroxybutyrat) gewonnen werden³⁶; es kann auch zusammen mit Zwischenprodukten der Kornverarbeitung weiterverarbeitet werden. Das Korn kann nach der Vermahlung direkt aufgeschlossen und als Kleb- oder Füllstoff bzw. Bindemittel Verwendung finden. Wird aus dem Korn zunächst Stärke gewonnen, besteht technisch die Möglichkeit – über Extrusion und Plastifizierung – Kunststoffe herzustellen. Biotechnologisch kann aus Stärke Glucose gewonnen werden, woraus weitere Produkte, z. B. über Fermentation, herstellbar sind. Ferner kann Stärke nach chemischer Konversion auch für andere Produkte wie Acetatstärken oder Glucoamine verwendet werden (IFEU 2005a, S. 49). Die prinzipiellen Rohstoff- und Produktströme der Getreide-Ganzpflanzen-Bioraffinerie zeigt Abbildung 23.

Alternativ zu einer Trockenmühle können auch Nassmahlverfahren eingesetzt werden, womit sich als weitere Produktlinie die Herstellung von Ölen und Fettsäuren eröffnet. Aus dem Korn können dann somit primär Öle, Fasern und Stärke sowie weitere Produkte (z. B. Glutemehl) gewonnen werden (Biorefinery 2006a).

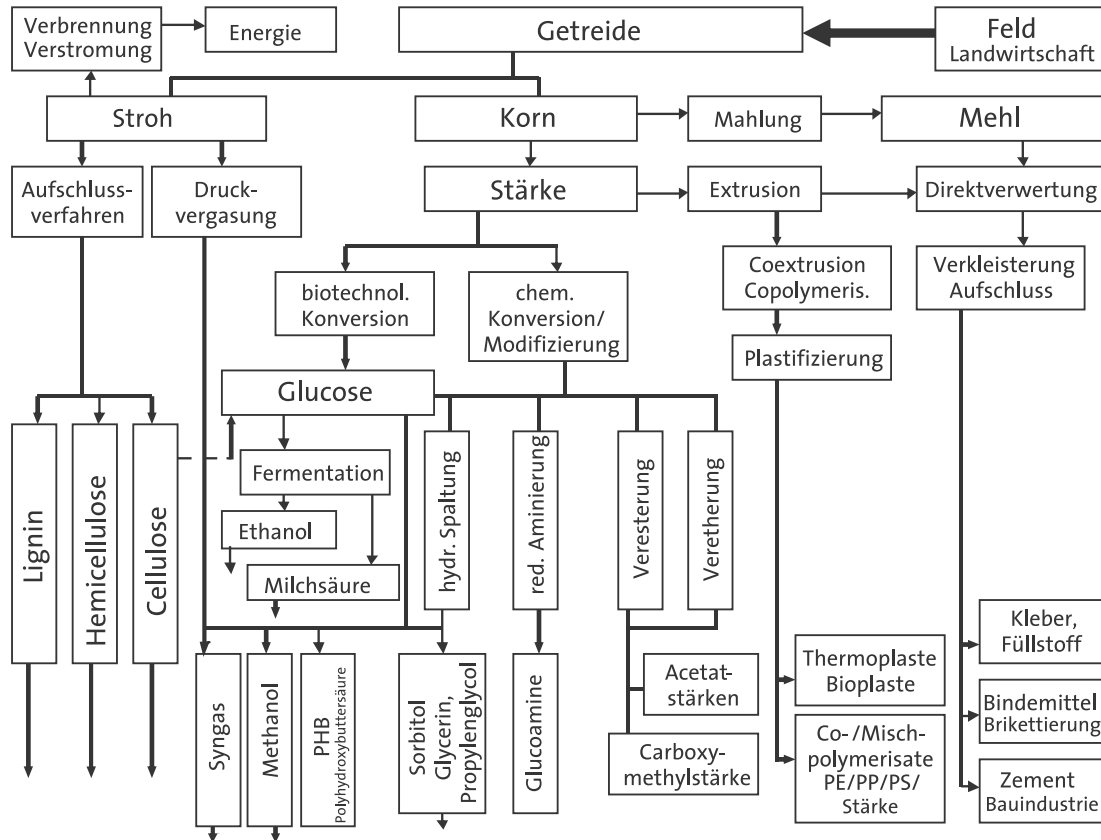
Ein Vorteil der Getreide-Ganzpflanzen-Bioraffinerie besteht darin, dass – wie bei den anderen Raffinerietypen – die natürlich vorgeprägten Strukturen sowie Heteroatome (zunächst) erhalten bleiben und herkömmliche Basis- und Verarbeitungstechnologien genutzt werden können. Primär wird Getreide heute für den Nahrungsmittelbereich angebaut. Derzeit werden dort aufgrund von Subventionen die höchsten Preise erzielt und es besteht keine Nachfrage für eine stoffliche Verwertung. Allerdings fällt zunehmend auch Getreide an, das nicht den gesetzlichen Qualitätsanforderungen (EU-Regelungen) und denen der Abnehmer (z. B. Proteingehalt) entspricht. Dieses könnte ggf. als (preiswerter) Rohstoff in einer Getreide-Ganzpflanzen-Bioraffinerie eingesetzt werden.

³⁵ Derzeit existieren noch keine Anlagen zur Strohvergasung. Im Pilotmaßstab getestet wird z. B. das bioliq-Verfahren am Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (Dahmen et al. 2006).

³⁶ Die Synthesegasschiene ist nicht als spezifisch für die Getreide-Ganzpflanzen-Bioraffinerie anzusehen: Synthesegas kann prinzipiell aus verschiedenen Ausgangsstoffen (mit unterschiedlichem technischem Aufwand) erzeugt werden.

Abbildung 23

Schematische Darstellung der möglichen Produktströme einer Getreide-Ganzpflanzen-Bioraffinerie (Trockenmahlverfahren)



Quelle: Biorefinery 2006a

2.4 Das Zwei-Plattformen-Konzept

Ein weiterer Ansatz beschäftigt sich mit der Kombination zweier Konzepte – der Erzeugung und Verarbeitung von Zucker einerseits und der von Synthesegas (Syngas) andererseits. Dabei werden die nachwachsenden Rohstoffe auf zwei technische Stränge (Plattformen) aufgeteilt. Die Nutzung der Konversionstechnologie (Zucker-Plattform, Syngas-Plattform) ist abhängig vom Wassergehalt der Biomasse³⁷ (Okkerse/van Bekkum 1999).

Die „Zucker-Plattform“ basiert wesentlich auf biochemischen Konversionen. Der benötigte Zucker wird aus nachwachsenden Rohstoffen durch Fraktionierung bzw. in Kombination mit Hydrolyseverfahren gewonnen (Biorefinery 2006a). Die Zucker-Plattform eröffnet Möglichkeiten der Herstellung einer Vielfalt von biobasierten Plattformchemikalien (Abbildung 25, s. a. Anhang 6).

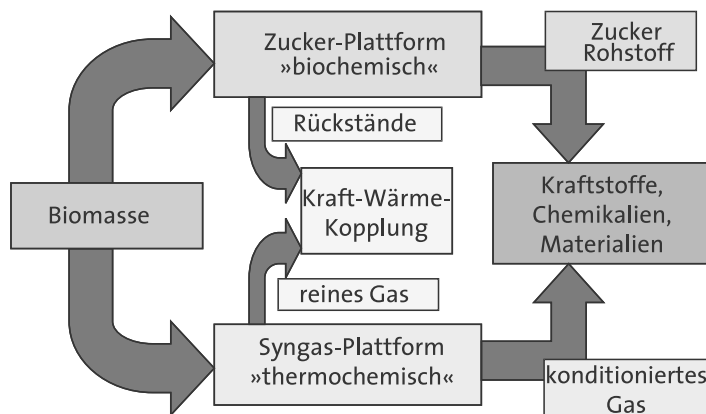
³⁷ Biomasse mit hohem Wassergehalt eignet sich tendenziell eher zur anaeroben Vergärung oder zur Fermentation. Für Verfahren im höheren Temperaturbereich (z. B. Vergasung, Pyrolyse oder direkte Verbrennung) ist ein hoher Wassergehalt störend.

Die „Syngas-Plattform“ (Abbildung 26) besteht aus thermochemischen Konversionen und fokussiert auf die Vergasung von Biomasse und Nebenprodukten aus diesen Konversionsprozessen (Biorefinery 2006a). Daneben laufen Prozesse der Hydrothermolysse, der Pyrolyse, der Thermolyse sowie der Verbrennung ab, die miteinander vernetzt werden können (www.nrel.gov/biomass/biorefinery.html).

Auf der Syngasebene spielen Fischer-Tropsch-Verfahren für die Kraftstoffherstellung eine Rolle (synthetische Kraftstoffe, Kap. V). Nachteilig bei der Synthesegasherstellung sind die Notwendigkeit der Entfernung von Heteroatomen (Sauerstoff, Stickstoff, Schwefel) sowie von Mineralien aus den nachwachsenden Rohstoffen und der hohe Energiebedarf der endothermen Prozesse (Lancaster 2002). Inwieweit es ökologisch und ökonomisch sinnvoll erscheint, nachwachsende Rohstoffe zunächst in Einzelbausteine zu zerlegen und anschließend wieder zu neuen Verbindungen zu synthetisieren, stellt ein noch zu untersuchendes Forschungsfeld dar. Auf alle Fälle scheint das Zwei-Plattformen-Konzept eine Vielzahl von Möglichkeiten zu bieten, an bestehende Verfahren anzuknüpfen sowie eine hohe Variabilität hinsichtlich der Anpassung an verfügbare nachwachsende Rohstoffzusammensetzungen aufzuweisen.

Abbildung 24

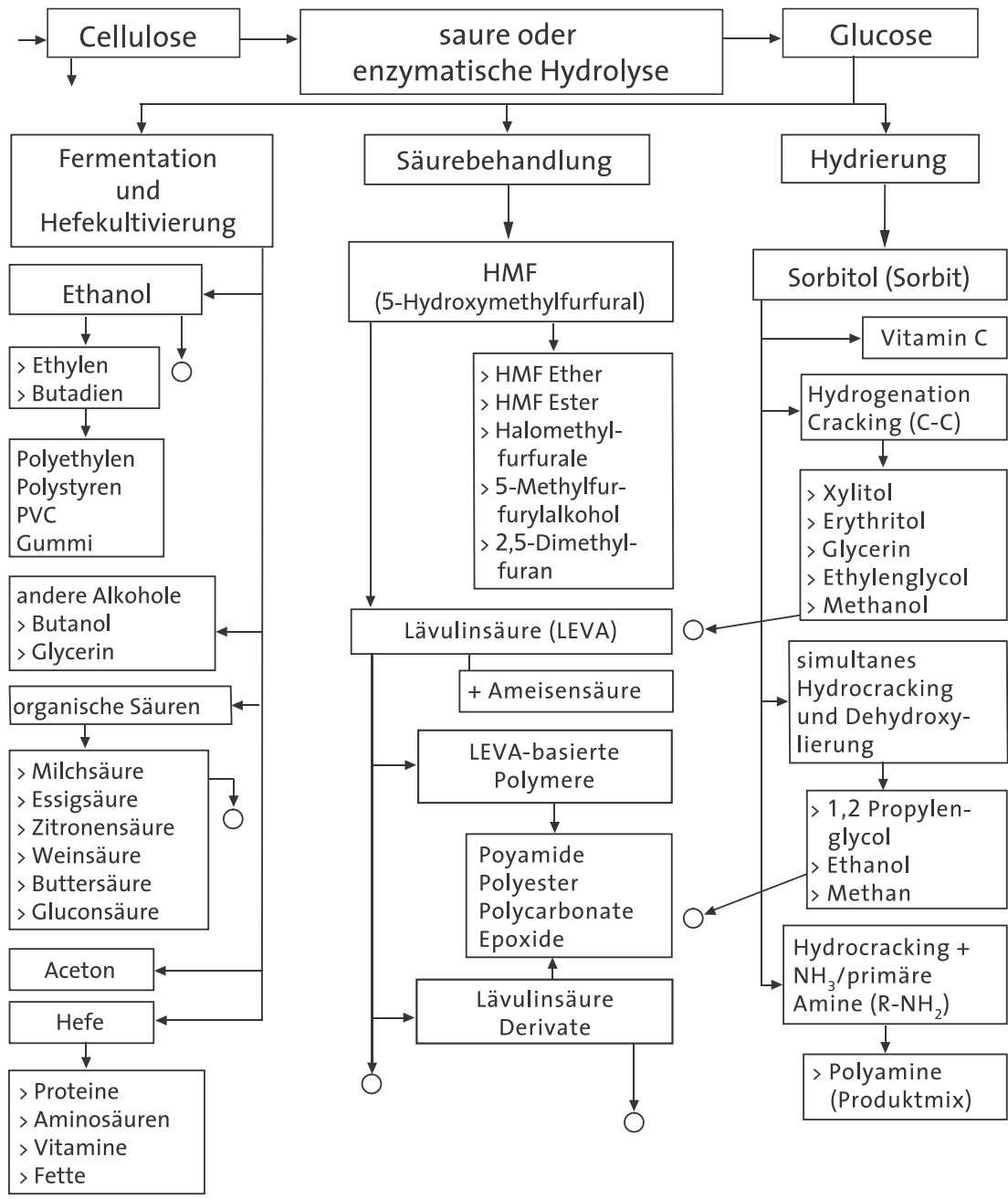
Das Zwei-Plattformen-Konzept (Zucker- und Syngas-Plattform)



Quelle: Kamm/Kamm 2005a

Abbildung 25

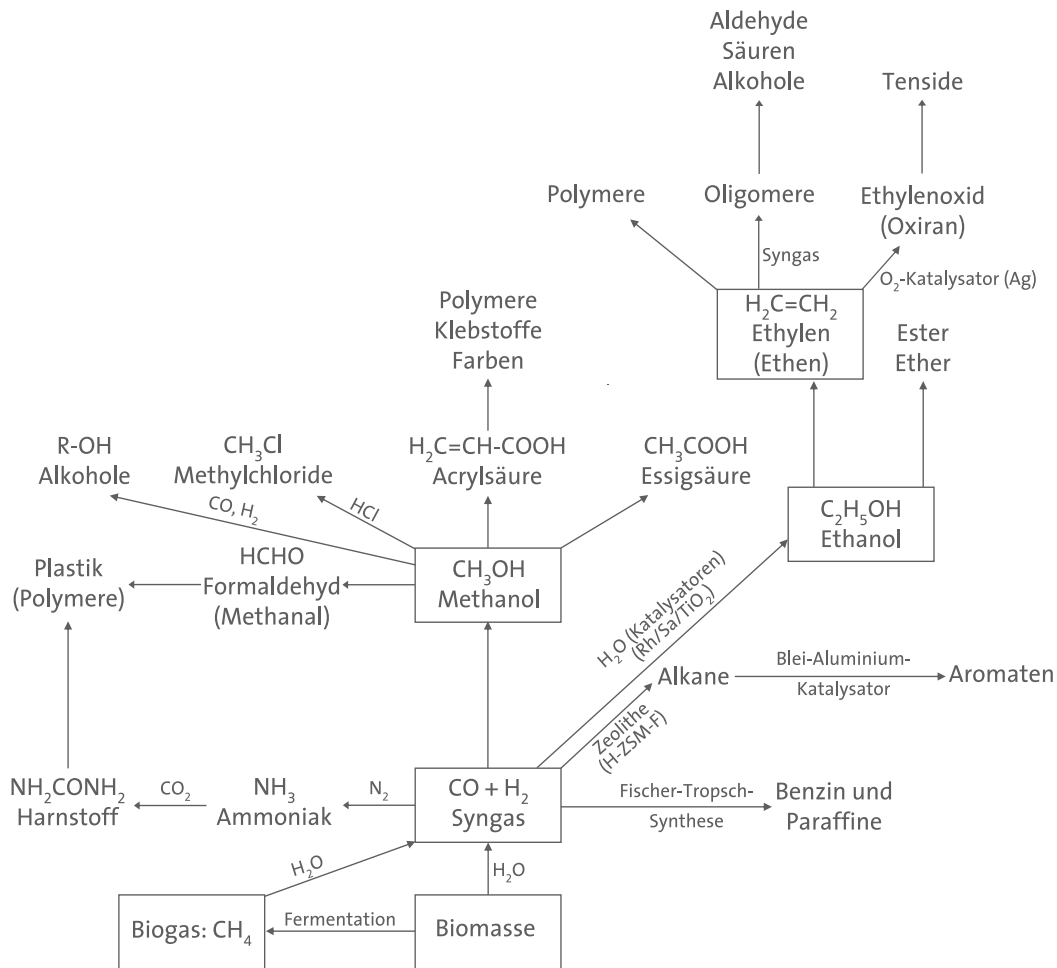
Beispiel eines industriellen biotechnisch-chemischen Produktstammbaums auf Basis von Cellulosezucker



Quelle: Kamm/Kamm 2005a (geändert)

Abbildung 26

Synthesegas(Syngas)basierter Produktstammbaum



Quelle: Lancaster 2002 und Matlack 2001, nach Biorefinery 2006a

2.5 Unterschiede zu Erdölraffinerien

Im Prinzip ähneln sich Bioraffinerien und Erdölraffinerien insofern, als der Rohstoff – ob rezent oder fossil – in einzelne Fraktionen (teilweise bis hin zu Einzelbausteinen) „zerlegt“ und anschließend weiterverarbeitet (teilweise neu „zusammengesetzt“) wird. In beiden Fällen werden „Ursprungsbestandteile“ der Rohstoffe 1:1 verwendet. Die Bezeichnung „Bioraffinerie“ ist im Grunde genommen nicht ganz präzise, da nicht im klassischen Sinne destilliert wird; sie hat sich aber als Bezeichnung durchgesetzt. Ein mit herkömmlichen Raffinerien vergleichbares Ziel ist der Aufbau von Stammbaumsystemen, wobei es Verbindungsmöglichkeiten auf technischer Ebene zwischen beiden Versionen geben kann.

Bio- und Erdölraffinerien sind vom Prinzip her Kuppelproduktionsprozesse mit unterschiedlichen Hauptproduk-

ten. Die stoffliche Nutzung von Erdöl (Petrochemie) ist technisch betrachtet bereits ausgereift, wohingegen die stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen heute erst punktuell erfolgt. Im Grunde genommen können einzelne Anwendungen, wie sie etwa in Kapitel III aufgeführt sind (z. B. die Herstellung von Biokunststoffen), in eine „umfassende Nutzung der Biomasse“ – wie sie in Bioraffineriesystemen angedacht ist – integriert werden. Bioraffinerien können auch als „Dachbegriff“ für eine Ansammlung verschiedenster Technologien (Technologiemix) angesehen werden, die aufeinander aufbauen, um eine bestimmte Kategorie nachwachsender Rohstoffe zu verarbeiten (z. B. Lignocellulose). Die hierfür notwendigen Technologien befinden sich teilweise noch in der Entwicklung. Eine energetische Verwendung (Kraftstoffherstellung, thermische Verwertung) ist in beiden Fällen (nachwachsende Rohstoffe, Erdöl) möglich.

In der heutigen Petrochemie ist das wichtigste Einsatzprodukt Rohbenzin (Naphtha), welches zu Primärchemikalien (hauptsächlich zu Olefinen, aber auch zu Aromaten und Synthesegas) verarbeitet wird. Bei der Verarbeitung anfallende Benzinkomponenten werden an die Raffinerien zurückgeführt (s. a. MWV 2003). Abbildung 27 fasst die wichtigsten Produktlinien der heutigen Petrochemie im Überblick zusammen. Wichtig ist hier zum einen, dass sich aus einer begrenzten Anzahl von Primärchemikalien eine Vielzahl von Produkten herstellen lässt. Zum anderen tauchen hier aufgeführte Primärchemikalien sowie Zwischen- und Endprodukte auch bei den oben vorgestellten Bioraffineriekonzepten auf.

Busch (2005) benannte als potenzielle „building blocks“ (Basischemikalien) aus nachwachsenden Rohstoffen Ethanol, 5-HMF (5-Hydroxymethylfurfural), Furfural, Milchsäure, Lävulinsäure, Bernsteinsäure, 3-Hydroxypropionsäure und 1,3-Propandiol. Ethanol als Plattformchemikalie (Anhang 7) lässt sich chemisch in Ethen (Ethylen) überführen. Damit liegt ein Anschlussprodukt für eine Erdölraffinerie vor (Kamm/Kamm 2001). Ausgehend vom petrochemisch erzeugten Ethen folgt heute eine Reihe großtechnischer Synthesen (Polyethylen, PVC etc.) (Abbildung 28). Synthesegas stellt ebenfalls ein Anschlussprodukt für eine Erdölraffinerie dar. Daraus lässt sich Methanol oder Benzin – via Fischer-Tropsch-Synthese – herstellen.

Abbildung 27

Die wichtigsten Produktlinien der heutigen Petrochemie

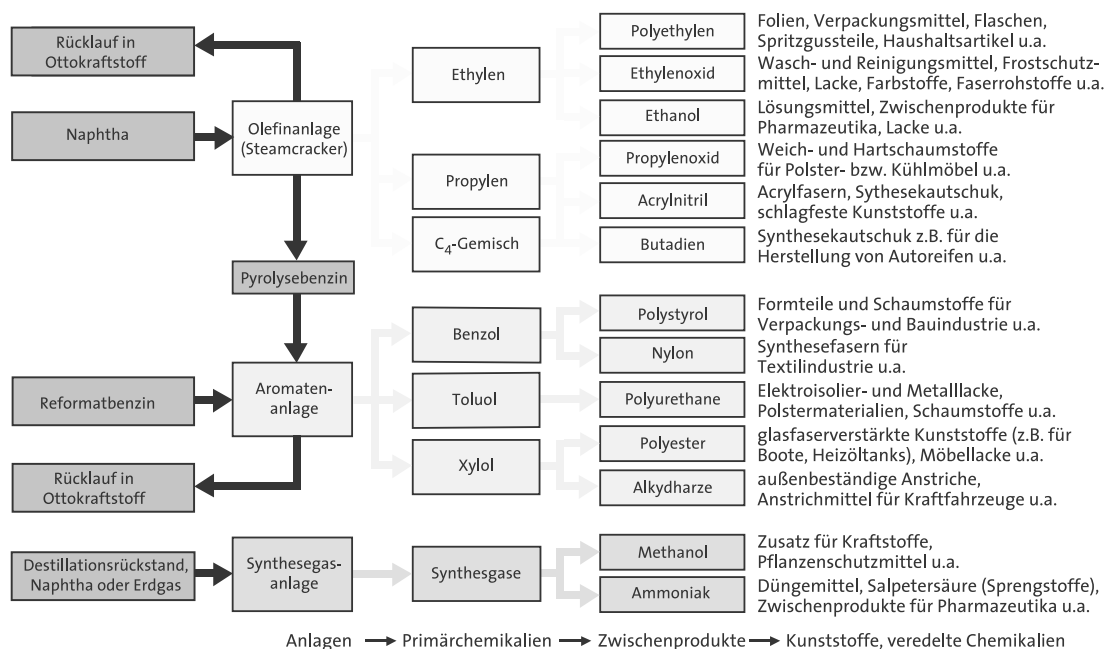
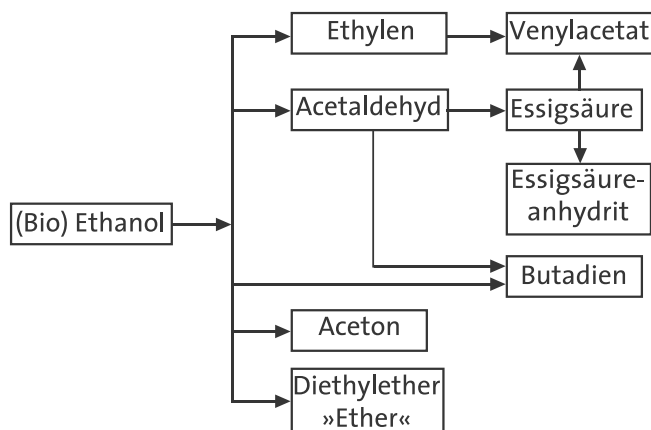


Abbildung 28

Biomasseethanol angedockt an eine erdölbasierte Chemieproduktlinie

Quelle: Kamm/Kamm 2001

3. Ökologische Aspekte ausgewählter Bioraffineriesysteme

In Bioraffinerien werden hohe Erwartungen gesetzt. Da mit der Produktion und dem Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen in Bioraffinerien nicht per se nur Vorteile, sondern auch spezifische Nachteile verbunden sein können (wie die Nutzung fossiler Energieträger, die wiederum spezifische Umweltbelastungen erzeugt), wurden – aus dem derzeit eher unübersichtlichen Forschungsfeld – exemplarisch für drei Bioraffineriekonzepte Übersichtsökobilanzen erstellt. Übersichtsökobilanzen zeichnen sich dadurch aus, dass die dargestellten Zahlenwerte zwar eine quantitative Richtung vorgeben, nicht aber im Detail diskutier- und auswertbar sind. Es geht in dieser Darstellung primär darum, eine erste grobe Einschätzung aktuell diskutierter Bioraffineriekonzepte vorzunehmen, die über den rein qualitativ beschreibenden Rahmen (zumeist der Grundidee) hinausgeht. Die folgenden Ausführungen zur ökologischen Bewertung und Einordnung entsprechen in weiten Teilen denen des Gutachtens von IFEU (2005a).

Ziel und Vorgehensweise

Bei der Erfassung und Einordnung möglicher ökologischer Auswirkungen von Bioraffineriekonzepten mithilfe von Übersichtsökobilanzen sollten sowohl eine Einschätzung möglicher Größenordnungen gegeben als auch die wesentlichen ergebnisrelevanten Parameter bestimmt werden. Dazu wurden für ausgewählte Bioraffineriekonzepte jeweils repräsentative Stoffströme beispielhaft bilanziert. Die Konzeptauswahl erfolgte durch Biopos (2005a):

- grüne Bioraffinerie (Verarbeitung von grasartiger (feuchter) Biomasse zu stofflich und/oder energetisch nutzbaren Produkten),

- Lignocellulose-Feedstock(LCF)-Bioraffinerie (Verarbeitung von naturtrockenen cellulosehaltigen Biomassen),
- Getreide-Ganzpflanzen-Bioraffinerie (Verarbeitung von Getreide, auch Mais, einschließlich des Stroh).

Für jedes Konzept wurden ein typisches Hauptprodukt definiert sowie Massen- und Energieflüsse erstellt. Für die grüne Bioraffinerie wurden aufgrund möglicher Ergebnisdifferenzen bei unterschiedlichen Hauptprodukten zwei Produktlinien gewählt (Milchsäure oder Lysin). Für die durchgeführten Berechnungen wurde auf die projektintern bereitgestellten Daten von Biopos (2005a) sowie auf die IFEU-interne Datenbank und eigene Datenermittlungen (IFEU 2005c) zurückgegriffen (vgl. a. Borken et al. 1999; Reinhardt/Zemanek 2000). Der Betrachtungsrahmen reicht bis 2030. Angenommen wurde die Bereitstellung nachwachsender Rohstoffe auf deutschen Anbauflächen, die Weiterverarbeitung, Nutzung und Entsorgung ebenfalls in Deutschland.³⁸ Die Bereitstellung der Betriebs- und Hilfsstoffe wie auch der konventionellen Vergleichsprodukte wurde auf Basis plausibler Annahmen deutschland- bzw. weltweit bilanziert (IFEU 2005a).

Aufgrund des langen Bezugszeitraumes wird einschränkend darauf hingewiesen, dass der Schwerpunkt des Erkenntnisinteresses in den erstellten Übersichtsökobilanzen auf der Erdölsubstitution liegt; daher wurde das

³⁸ Auf die Ökobilanz wirken sich Transportprozesse besonders aus (z. B. Import von Soja, da kein Anbau in Deutschland erfolgt, sondern in Italien, Frankreich, Österreich etc.; kein Export von Abfallstoffen; keine Weiterverarbeitung etwa in den USA, da hier zudem ein anderer Strommix zugrunde gelegt werden müsste). Daher wurde als Bezug für die Übersichtsökobilanzen für Erzeugung, Weiterverarbeitung, Nutzung und Entsorgung in erster Näherung Deutschland angenommen. Für weitere Untersuchungen wäre eine entsprechende Differenzierung anzustreben.

Hauptaugenmerk auf den Einsatz fossiler Ressourcen (KEA) und die Freisetzung fossilen Kohlendioxids sowie anderer Treibhausgase gelegt. Einige wichtige weitere Wirkungskategorien wurden zusätzlich erfasst (IFEU 2005a).

3.1 Übersichtsökobilanz zur grünen Bioraffinerie

Ausgehend von 40 000 t Grünschnitt wurde die Herstellung von Lysin, Milchsäure, Proteinen für Futtermittel- bzw. Kosmetikzwecke und die Nutzung des Reststoffs (Presskuchen) als Silagefuttermittel sowie die dafür notwendige Energie betrachtet. Dazu wurde folgender technischer Ablauf zugrunde gelegt (s. a. Anhang 1): Das Grüngut wird mithilfe fossiler Energien (hier Erdgas³⁹, Dampf⁴⁰ und Strom⁴¹) umgesetzt zu Grüngutpellets, Futterprotein, Zellbiomasse⁴², Kosmetikprotein, einem Fermentationsprodukt (entweder Milchsäure oder Lysin) und Biogasgärrest. Die Grüngutpellets, das Futterprotein und die Zellbiomasse werden als eiweißreiches Futtermittel eingesetzt und ersetzen das Eiweißfuttermittel Sojaschrot (hoher Proteingehalt). Mit dem Kosmetikprotein können fossil produzierte Acrylate und Tenside (zu jeweils gleichen Teilen nach Masse) substituiert werden. Milchsäure

³⁹ Da von einer neuen Anlage mit Trockenwerk ausgegangen wurde, wird statt Kohle Erdgas eingesetzt. Anzumerken ist, dass natürlich auch existierende Trockenwerke genutzt werden können, wobei jedoch zu beachten ist, dass heute eingesetzte Techniken zur Trocknung teilweise nicht mehr auf dem neuesten technischen Stand sind. Derzeit gibt es ca. 300 Grünguttrockenwerke in Europa, die über 5 Mio. t getrocknete Pellets produzieren (CIDE 2005, nach Biorefinery 2006a).

⁴⁰ Dampf = Industriemix (Kohle HS, vor allem Erdgas)

⁴¹ Strom = Strommix Deutschland

⁴² Zellbiomasse ist noch nutzbare Biomasse, die im Bioraffinerieprozess anfällt (eiweißreiches Kuppelprodukt).

bzw. Lysin ersetzen jeweils das gleiche auf mikrobiologischem Weg hergestellte Produkt. Schließlich wird der Gärrest der anlageninternen Biogasproduktion als Düngemittel auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht und ersetzt Mineraldünger nach Nährstoffanteilen (IFEU 2005a, S. 33).

Zwischenergebnis

Die erhaltenen Zwischenergebnisse für die verschiedenen Umweltwirkungen des untersuchten Konzepts der grünen Bioraffinerie (mit Trockenwerk und heutigem Energiemix) sind in Abbildung 29 dargestellt.

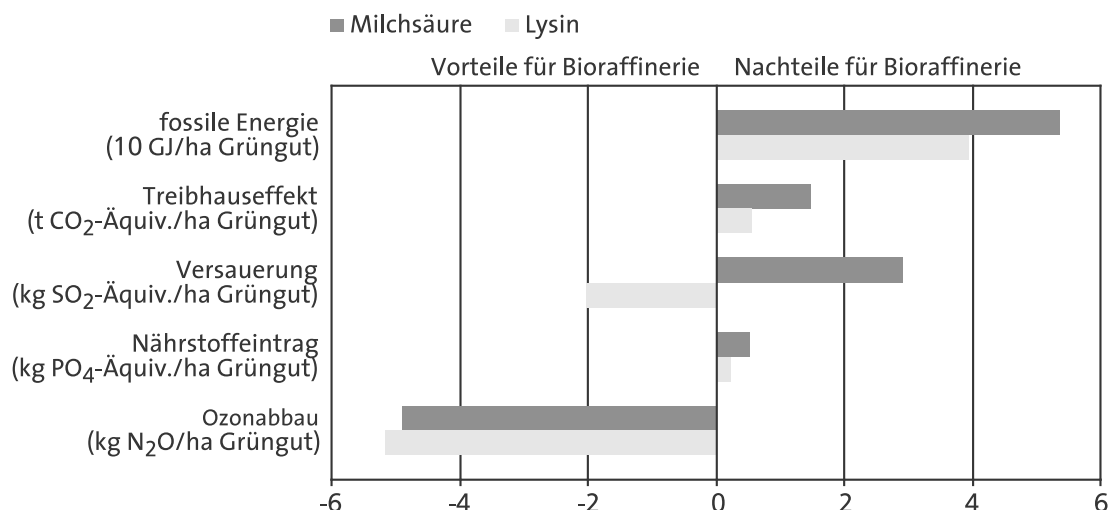
Wenn man sich den Einsatz fossiler Energie (KEA) genauer ansieht, fällt auf, dass die Aufwendungen für die grüne Bioraffinerie insgesamt höher ausfallen, als die Gutschriften durch die ersetzten Produkte (Detailaufschlüsselung Anhang 1). Als Grund hierfür ist der relativ hohe Energiebedarf⁴³ für die Trocknung des Grünguts zu Pellets gegenüber der weniger aufwendigen Herstellung von Sojaschrot zu nennen. Ferner spielt eine Rolle, dass die Produkte der grünen Bioraffinerie überwiegend andere nachwachsende Rohstoffe ersetzen, die ihrerseits oft einen relativ geringen Einsatz fossiler Energie und an Treibhausgasemissionen haben (IFEU 2005a). Wesentliche Ergebnisse in Bezug auf den KEA sind lt. IFEU (2005a):

- Die Wärmebereitstellung (Erdgas und Dampf) stellt die größte Aufwendung für das betrachtete grüne Bio-

⁴³ Wenn anstelle von Erdgas und (fossilem) Dampf regenerative Energieträger zum Einsatz kämen, würde dies erst die Ökobilanz verändern, wenn die gesamte Energieversorgung regenerativ wäre. Ein punktueller regenerativer Energieeinsatz „nur für die Bioraffinerien“ steht dem Ökobilanzkonzept entgegen, da diese dann auch prinzipiell woanders eingesetzt werden könnten.

Abbildung 29

Umweltwirkungen der grünen Bioraffinerie



Quelle: IFEU 2005a, S. 35

raffineriekonzept dar. Die Strombereitstellung spielt demgegenüber keine so große Rolle.

- Größere Gutschriften bringt die Einsparung von Sojaschrot durch die Grüngutpellet- und die Futterproteinproduktion mit sich.
- Weiterhin von Bedeutung sind neben der Gutschrift für Acrylate und Tenside, die durch das Kosmetikprotein ersetzt werden können, besonders diejenigen für die konventionell hergestellten Fermentationsprodukte Milchsäure bzw. Lysin.
- Die Differenz zwischen den Gutschriften der Milchsäure und des Lysins zeigt, dass je nach ersetzttem konventionellem Produkt die Bilanz durchaus unterschiedlich ausfallen kann.

Unter Berücksichtigung dessen, dass für eine vollständige Übersichtsökobilanz noch alternative Nutzungsmöglichkeiten des Grünguts berücksichtigt werden sollten (s. u.), lässt sich insgesamt für alle Kategorien vorerst Folgendes festhalten (nach IFEU 2005a, S. 35):

- Insgesamt zeigen sich bei der Betrachtung des gewählten Konzepts der grünen Bioraffinerie gegenüber konventioneller Produktion Nachteile beim Einsatz fossiler Energien (KEA) sowie beim Treibhauseffekt und Vorteile beim Ozonabbau.
- Je nach hergestellten Stoffen – Milchsäure oder Lysin – und den von ihnen ersetzten konventionellen Produkten können sich in verschiedenen Umweltwirkungen größere Unterschiede in den Bilanzen ergeben. Das Ergebnis für die Versauerung ist stark vom Einzelfall abhängig.
- Die Nachteile für die grüne Bioraffinerie sind im vorliegenden Fall nur für den Einsatz fossiler Energien stark ausgeprägt. In den übrigen Umweltwirkungen sind sie – abhängig von den erzeugten bzw. den durch sie ersetzten Produkten – unbedeutend:
 - Die Vorteile beim Ozonabbau sind auf die eingesparten N₂O-Emissionen aus dem Sojaanbau zurückzuführen (Vorkette). Dies wirkt sich auch abschwächend auf die Nachteile beim Treibhauseffekt aus.
 - Die Differenzen bei der Versauerung stammen aus Unterschieden in der konventionellen Lysin- zur konventionellen Milchsäureproduktion (hauptsächlich Stickstoffquelle: Ammoniak bei der Lysinproduktion).
 - Der Nährstoffeintrag zeigt relativ geringe Änderungen bei der Herstellung unterschiedlicher Fermentationsprodukte. Zudem liegt er verglichen mit anderen Bilanzen zu nachwachsenden Rohstoffen nahe der Nullmarke und lässt daher keine eindeutige Aussage zugunsten oder zuungunsten der Bioraffinerie zu.

Berücksichtigung alternativer Nutzungsmöglichkeiten

Von landwirtschaftlichen Flächen stammendes Grüngut wird vielfach als Tierfutter verwendet, teils durch direkte

Beweidung, teils nach Ernte und Silierung, teils in Form von Trockenpellets. Weiterhin können landwirtschaftliches Grüngut und feuchte organische Reststoffe, wie Landschaftspflegegut, auch zur energetischen Nutzung verwendet werden (z. B. Biogasanlagen auf Basis des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes, die feuchte organische Reststoffe, aber auch Anbaubiomasse zur Energiegewinnung fermentieren) (IFEU 2005a, S. 36). Für die ökobilanzielle Betrachtung wurden als alternative Nutzungsmöglichkeiten dem System „grüne Bioraffinerie“ die Systeme „Trockenwerk“ und „Biogasanlage“ gegenübergestellt (Anhang 2).

Im Trockenwerk wird das Grüngut unter Einsatz fossiler Energien getrocknet und zu Pellets gepresst, die als eiweißreiches Futtermittel Sojaschrot⁴⁴ ersetzen. In der Biogasanlage wird das Grüngut vergoren, wobei mit dem entstehenden Biogas ein Motorblockheizkraftwerk (BHKW) betrieben werden kann, welches wiederum Strom in das öffentliche Netz einspeist und Nahwärme bereitstellt. Der Gärrest wird auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht und ersetzt Mineraldünger (IFEU 2005a, S. 37 f.).

Wird der Rohstoff Grüngut, der in allen drei Systemen in gleicher Menge zur Verfügung steht, als gegeben betrachtet, so kann seine Nutzung in den Systemen „grüne Bioraffinerie“ und „Trockenwerk“ landwirtschaftliche Flächennutzung einsparen, nämlich die Anbaufläche des sonst nötigen Sojaschrots sowie – in geringerem Maße – die für die Milchsäure- bzw. Lysinproduktion benötigte Fläche für den Zuckerrübenanbau (Anhang 2) (IFEU 2005a, S. 36).

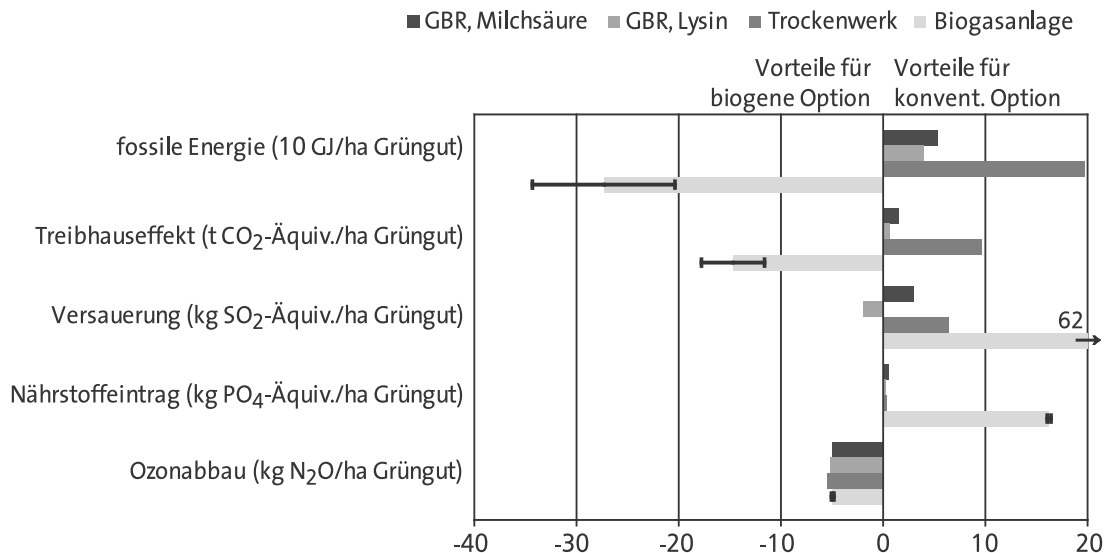
Abbildung 30 fasst zunächst die Ergebnisse der Übersichtsökobilanz für die Nutzung von Grüngut in einer grünen Bioraffinerie (Milchsäure-/Lysinproduktion etc.) zusammen und stellt diese einer alternativen Nutzung des Grüngutes in einem Trockenwerk (reine Futtermittelproduktion) sowie einer Biogasanlage (Strom-/Wärmebereitstellung) gegenüber. Dargestellt sind die Umweltwirkungen jeweils im Vergleich mit den ersetzten konventionellen Produkten, wobei zunächst keine alternative Flächennutzung (d. h. die nichtbenötigte Fläche läge dann brach) berücksichtigt wird.

Aus Abbildung 30 ist zu entnehmen, dass die grüne Bioraffinerie und das Trockenwerk zunächst – unterschiedlich stark ausgeprägte – Nachteile gegenüber der Verwendung des ersetzten Sojaschrots beim Einsatz fossiler Energien, beim Treibhauseffekt und bei der Versauerung (Ausnahme: GBR: Lysin) aufweisen. In der Relation betrachtet weist das Trockenwerk stärker ausgeprägte Nachteile auf als die Bioraffinerie. Vorteile zeichnen sich dagegen beim Ozonabbau ab. Die Aussage zum Nährstoffeintrag ist bei beiden Varianten nicht signifikant.

⁴⁴ Sojaschrot ist das wichtigste Eiweißfuttermittel in Deutschland und Europa. Es wurde daher hier in der Betrachtung verwendet, auch wenn es nicht hier angebaut wird.

Abbildung 30

Ergebnisse für die Nutzung von Grüngut in der grünen Bioraffinerie im Vergleich zum Trockenwerk und zur Biogasanlage (ohne Berücksichtigung alternativer Flächennutzung)



GBR = grüne Bioraffinerie
Quelle: IFEU 2005a, S. 39

Die Nutzung von Grüngut in der Biogasanlage weist Vorteile beim Einsatz fossiler Energien, beim Treibhauseffekt und beim Ozonabbau und Nachteile bei der Versauerung und beim Nährstoffeintrag⁴⁵ auf. In der Relation betrachtet weist die Biogasanlage stärker ausgeprägte Nachteile bei der Versauerung und beim Nährstoffeintrag aus, beim Ozonabbau zeigt sich keine klare Tendenz (nach IFEU 2005a, S. 39).

Im nächsten Schritt wird der Tatsache Rechnung getragen, dass die in Deutschland und Europa zur Verfügung stehende Ackerfläche begrenzt ist und dass von einer zunehmenden Nutzungskonkurrenz⁴⁶ zwischen Nahrungs- und Futtermittelproduktion, Naturschutzbelangen und dem Anbau von Energiepflanzen sowie stofflich genutzten nachwachsenden Rohstoffen ausgegangen werden kann. Daher wird hier zusätzlich ein „erweitertes Szenario“ analysiert (s. a. Anhang 2), welches davon ausgeht, dass die durch Substitution freiwerdende Fläche nicht mehr für die Nahrungs- und Futtermittelproduktion oder den Naturschutz benötigt wird und somit für den Energiepflanzenanbau genutzt werden könnte (IFEU 2005a, S. 36). Dahinter steht die Annahme, dass in 2020 oder 2030, wenn Bioraffinerien nach heutigem Kenntnisstand voraussichtlich in größerem Maßstab eingesetzt werden, vermutlich ein höherer Energiebedarf besteht als heute,

sodass dann vermutlich auf freiwerdenden Flächen eher Energiepflanzen angebaut werden.

In Abbildung 31 wird das Ergebnis des „erweiterten Szenarios“ mit Berücksichtigung einer alternativen Flächennutzung aufgeführt. Dargestellt sind auch hier die Umweltwirkungen für die Nutzung von Grüngut in den verschiedenen Anlagen jeweils im Vergleich mit den ersetzten konventionellen Produkten.

Zu erkennen ist in Abbildung 31 eine Veränderung in der ökologischen Bewertung bei Berücksichtigung des Energiepflanzenanbaus auf den freiwerdenden Flächen. Nach den Berechnungen von IFEU (2005a) ergeben sich im „erweiterten Szenario“ für alle betrachteten Varianten Vorteile für die biogene Option beim Einsatz fossiler Energien (KEA) und beim Treibhauseffekt und Nachteile bei der Versauerung, beim Nährstoffeintrag und beim Ozonabbau (Ausnahme Biogasanlage beim Ozonabbau). Da nur bei der Bioraffinerie und beim Trockenwerk eine Nutzung freiwerdender Flächen zu berücksichtigen ist, weisen diese Aussagen Parallelen zu typischen Umweltimplikationen für den Anbau und die Nutzung von Energiepflanzen⁴⁷ auf (IFEU 2005a, S. 40). Die Vorteile des Trockenwerks und der grünen Bioraffinerie gegenüber der konventionellen Futtermittelproduktion aus Sojaschrot beim KEA und beim Treibhauseffekt resultieren aus dem Ersatz fossiler Energieträger, die Nachteile bei der Versauerung, beim Nährstoffeintrag und beim Ozonabbau aus dem landwirtschaftlichen Anbau der Energiepflanzen.

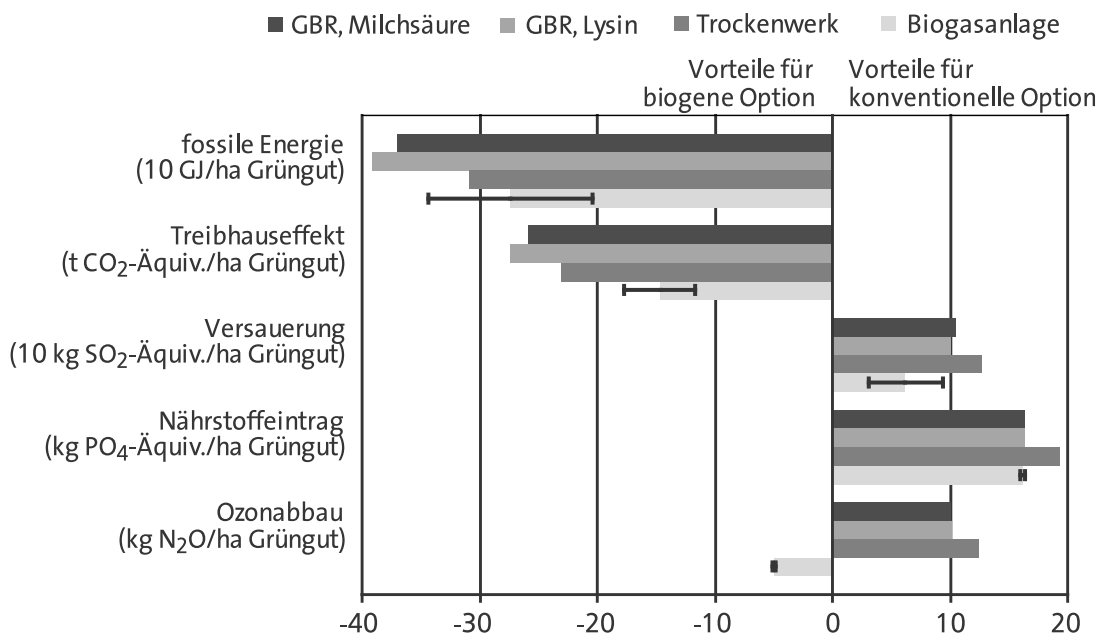
⁴⁵ Hier ist zu beachten, dass die Höhe dieser Emissionen von den Annahmen bezüglich der technischen Ausbringung des Gärrestes der Biogasanlage auf das Feld, dem Zeitfenster bis zum Unterpflügen etc. abhängen.

⁴⁶ Diese Nutzungskonkurrenz tritt heute noch nicht deutlich zutage. Sie wird eher zukünftig (mittelfristig) erwartet (Kap. VI).

⁴⁷ Hier wird der Anbau unter heute üblichen landwirtschaftlichen Bedingungen unterstellt (kein Ökolandbau).

Abbildung 31

Ergebnisse für die Nutzung von Grüngut in der GBR im Vergleich zum Trockenwerk und zur Biogasanlage unter Berücksichtigung alternativer Flächennutzung (erweitertes Szenario)



Zu beachten ist die veränderte Skalierung bei der Versauerung.
Quelle: IFEU 2005a, S. 40

Innerhalb der Kategorien können die technischen Varianten miteinander verglichen werden: Beim Einsatz fossiler Energie und beim Treibhauseffekt steht die grüne Bioraffinerie gegenüber dem Trockenwerk vorteilhafter da; in Relation zu Abbildung 30 fallen diese Vorteile allerdings geringer aus. Bei der Versauerung, beim Nährstoffeintrag und beim Ozonabbau fallen die Nachteile für das Trockenwerk wiederum höher aus, aber Trockenwerk und Bioraffinerie nähern sich bei den Nachteilen an. Beim Vergleich der Biogasanlage mit der grünen Bioraffinerie weist letztere jetzt einen verringerten Einsatz von fossiler Energie und einen niedrigeren Treibhauseffekt auf, aber Nachteile bei der Versauerung und dem Ozonabbau. Beim Nährstoffeintrag ist keine Differenzierung möglich (nach IFEU 2005a, S. 40).

Insgesamt lässt sich schlussfolgern: Die Einbeziehung der alternativen Flächennutzung für den Energiepflanzenanbau ergibt für die grüne Bioraffinerie gegenüber den anderen Nutzungsarten von Grüngut beim Einsatz fossiler Energien und beim Treibhauseffekt deutliche Vorteile; die anderen Umweltwirkungen stellen sich unterschiedlich dar (IFEU 2005a, S. 40). Letztlich ist bei der Bewertung des Systems „grüne Bioraffinerie“ das Gesamtnutzungskonzept zu berücksichtigen. Die zentrale Bewertungsfrage wäre dann eher die nach der Flächennutzung; eine Gegenüberstellung einzelner Produkte (z. B. Milchsäure versus Bioenergie) wäre somit eher nachgeordnet.

Das erweiterte Szenario stellt eine „Extremabschätzung nach oben“ bei möglicher Flächennutzung durch den

Energiepflanzenanbau dar. Dagegen ist die Analyse ohne die Berücksichtigung der alternativen Flächennutzung eine Abschätzung „nach unten“. Im Einzelfall werden die Ergebnisse eher zwischen beiden liegen. Nach IFEU (2005a, S. 41) lässt sich Folgendes festhalten:

- Grüne Bioraffinerie gegenüber Trockenwerk: Die grüne Bioraffinerie schneidet gegenüber dem Trockenwerk besser ab. Während sie ohne Berücksichtigung alternativer Flächennutzung fossile Energie und Treibhausgase einspart und eine geringere Versauerungswirkung hat, weist sie im „erweiterten Szenario“ in allen untersuchten Umweltwirkungen Vorteile gegenüber dem Trockenwerk auf. Damit hat die grüne Bioraffinerie gegenüber dem Trockenwerk in allen Fällen mindestens gleichwertige, wenn nicht vorteilhaftere Umwelteigenschaften.
- Grüne Bioraffinerie gegenüber Biogasanlage: Die grüne Bioraffinerie verbraucht gegenüber der Nutzung von Grüngut in der Biogasanlage mehr fossile Energie und emittiert mehr Treibhausgase, während sie Vorteile bei anderen Umweltwirkungen aufweist. Wird das „erweiterte Szenario“ der alternativen Flächennutzung zum Anbau von Energiepflanzen berücksichtigt, würden mit der grünen Bioraffinerie fossile Energie und Treibhausgase eingespart werden, aber Nachteile bei anderen Umweltwirkungen auftreten.

Da die grüne Bioraffinerie gegenüber der Biogasanlage teils Vor- und teils Nachteile aufweist, kann eine wissen-

schaftlich begründete Entscheidung für die eine oder die andere Grüngutnutzung nicht erfolgen. Erst wenn zusätzliche Kriterien herangezogen werden, ist eine Gesamtbewertung näherungsweise möglich. Wenn man beispielsweise dem Verbrauch fossiler Energie und dem Treibhauseffekt größere ökologische Bedeutung zumisst als den anderen Umweltwirkungen, so wäre es plausibel, im „erweiterten Szenario“ mit alternativer Flächennutzung die grüne Bioraffinerie günstiger zu beurteilen als die Biogasanlage. Allerdings muss für den Einzelfall untersucht werden, wie die realen Gegebenheiten ausfallen und ob dann die grüne Bioraffinerie oder die Biogasanlage zu bevorzugen wäre.

Einschränkend ist festzuhalten, dass sich im Falle anderer Nutzungsarten der grünen Bioraffinerie durchaus andere Ergebnisse einstellen können. Wird beispielsweise das gepresste Grüngut nicht zum überwiegenden Teil getrocknet und zu Pellets gepresst, sondern für weitere Non-Food-Produkte eingesetzt, sind durchaus günstigere Ergebnisse denkbar. Auch dies müsste jedoch für jeden Einzelfall gesondert untersucht werden.

3.2 Übersichtsökobilanz zur Lignocellulose- und Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerie

Die LCF- und die Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerie werden unter ökobilanziellen Gesichtspunkten zusammen dargestellt, da hier zunächst nur die Umweltwirkungen des Strohanteils des Getreides betrachtet werden. Für den Kornanteil wird angenommen, dass er in der Nahrungs- und Futtermittelproduktion eingesetzt wird.

3.2.1 LCF-Bioraffinerie

Für die konkrete ökobilanzielle Analyse wurden folgende Stoffumwandlungen betrachtet: Das Getreidestroh wird mithilfe fossiler Energien (Erdgas, Dampf und Strom),

konzentrierter Schwefelsäure, gebranntem Kalk, Wasser, Wasserstoff und Nährstoffen zu verschiedenen Produkten umgesetzt: Tetrahydrofuran (THF, ein chemischer Grundstoff), Ethanol, Kohlendioxid (CO₂) und Gips, die wiederum auf konventionelle Art produzierte Waren in jeweils gleicher Menge ersetzen. Lignin substituiert Kunststoffe wie Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)-Copolymerisat oder Kunstharze⁴⁸, Zellbiomasse aus dem Fermentationsprozess ersetzt als Futtermittel Sojaschrot auf Proteinbasis, und der Gärrest der anlageninternen Biogasproduktion wird als Düngemittel auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht und ersetzt Mineraldünger nach Nährstoffanteilen (IFEU 2005a, S. 46). Eine schematische Darstellung der betrachteten Verfahrensschritte findet sich in Anhang 3.

Zwischenergebnis

Die Ergebnisse für die verschiedenen Umweltwirkungen für das untersuchte Konzept der LCF-Bioraffinerie sind in Abbildung 32 dargestellt.

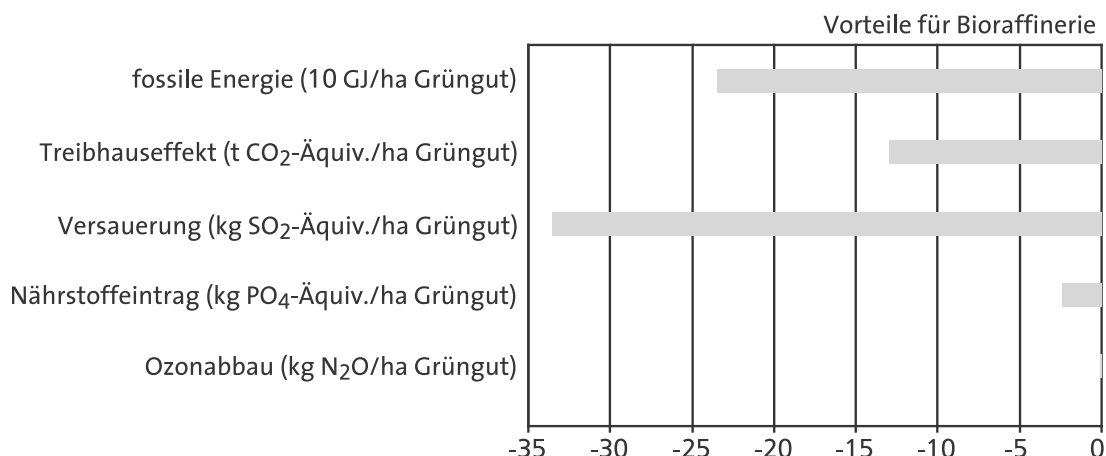
Als vorläufiges Ergebnis lässt sich zu den Umweltwirkungen für die LCF-Bioraffinerie (ohne Berücksichtigung alternativer Nutzungsmöglichkeiten des Strohs) Folgendes festhalten (IFEU 2005a, S. 48):

- Die LCF-Bioraffinerie zeigt Vorteile bei allen betrachteten Umweltwirkungen außer dem Ozonabbau. Damit ist die Strohnutzung in der LCF-Bioraffinerie günstiger als die Produktion und Nutzung der ersetzten konventionellen Produkte. Allerdings sollte die Nutzung in der Bioraffinerie den alternativen Nut-

⁴⁸ Diese Nutzung von Lignin ist eine Zukunftsoption, die heute noch nicht (groß)technisch umgesetzt ist, aber deren Nutzung im Sinne einer optimalen Ausnutzung der Biomasse in der Zukunft erwartet und daher in dieser Berechnung berücksichtigt wird.

Abbildung 32

Ergebnisse der Umweltwirkungen für die LCF-Bioraffinerie



Quelle: IFEU 2005a, S. 48

zungsmöglichkeiten von Stroh gegenübergestellt werden, da dieser Vergleich für sich genommen nur für wenige spezielle Fragestellungen Aussagekraft besitzt.

- In allen Umweltwirkungen außer dem Ozonabbau hat der ersetzte ABS-Kunststoff den größten Einfluss auf das Ergebnis.⁴⁹
- Die Ergebnisse sind in ihren Grundaussagen stabil und unabhängig von den ersetzten Materialien. Zwar kann sich die Höhe der Vorteile bei unterschiedlichen ersetzten Kunststoffen deutlich ändern, die Aussagen bleiben aber die gleichen.

3.2.2 Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerie

Für die konkrete ökobilanzielle Analyse wurden folgende Stoffumwandlungen betrachtet (schematische Darstellung s. Anhang 4): Das Stroh wird in der Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerie mithilfe fossiler Energien (Erdgas, Dampf und Strom), konzentrierter Schwefelsäure, Kalk, Wasser und Nährstoffen zu verschiedenen Produkten umgesetzt: Ethylen, Kohlendioxid (CO₂) und Gips ersetzen auf konventionelle Art produzierte Waren in jeweils gleicher Menge. Lignin substituiert Kunststoffe wie

⁴⁹ Hier spielt eine Rolle, dass relativ große Mengen an Lignin anfallen würden (Anhang 3), die in Form der Gutschrift für ABS die Vorteile des Gesamtkonzepts signifikant mitbestimmen. Sensitivitätsanalysen hierzu zeigen, dass die Ergebnisse auch bei anderen Verwendungen des Lignins, z. B. bei einer „nur“ energetischen Nutzung, qualitativ gleich ausfallen – lediglich die Zahlenwerte ändern sich (IFEU 2005c).

ABS-Copolymerisat oder Kunstharze⁵⁰, Zellbiomasse aus dem Fermentationsprozess ersetzt als Futtermittel Sojashrot auf Proteinbasis und der Gärrest der anlageninternen Biogasproduktion wird als Düngemittel auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht und ersetzt Mineraldünger nach Nährstoffanteilen (IFEU 2005a, S. 51).

Zwischenergebnis

Die Ergebnisse für die verschiedenen Umweltwirkungen des untersuchten Konzepts der Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerie sind in Abbildung 33 dargestellt.

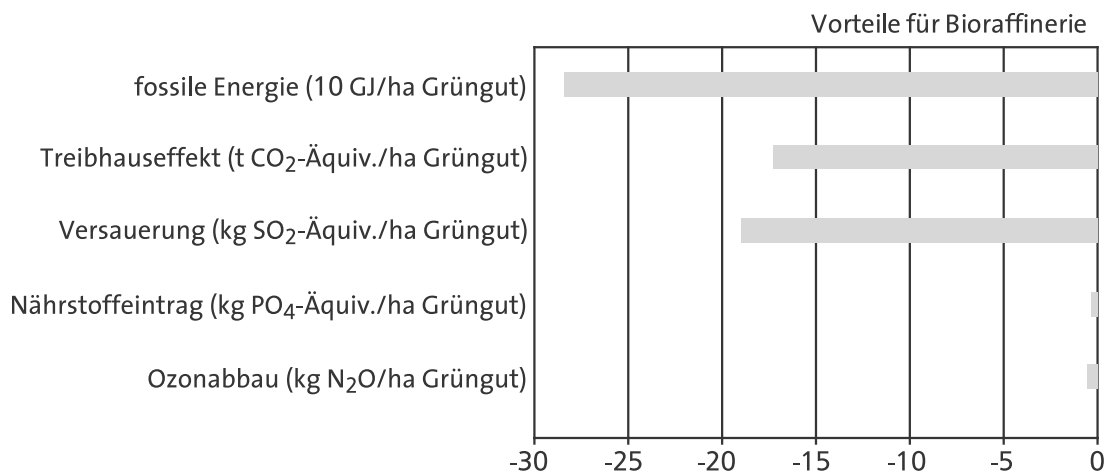
Als vorläufiges Ergebnis zu den Umweltwirkungen der Getreide-(Ganzpflanzen-) Bioraffinerie lässt sich nach IFEU (2005a, S. 48) – ohne Berücksichtigung alternativer Nutzungsmöglichkeiten des Strohs – Folgendes festhalten:

- Insgesamt ist die Strohnutzung in der Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerie günstiger als die Produktion und Nutzung der ersetzten konventionellen Produkte. Allerdings muss die Nutzung in der Bioraffinerie den alternativen Nutzungsmöglichkeiten von Stroh gegenübergestellt werden. Ein Vergleich, wie er hier dargestellt ist, hat für sich genommen nur für wenige spezielle Fragestellungen Aussagekraft.
- Die Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerie zeigt Vorteile beim Einsatz fossiler Energie, beim Treibhauseffekt und bei der Versauerung. Beim Nährstoffeintrag und dem Ozonabbau zeigen sich keine klaren Tendenzen.

⁵⁰ Die Nutzung von Lignin wird auch hier für die Zukunft angenommen.

Abbildung 33

Ergebnisse der Umweltwirkungen für die Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerie



Quelle: IFEU 2005a, S. 53

- In allen Umweltwirkungen außer dem Ozonabbau hat der ersetzte ABS-Kunststoff den größten Einfluss auf das Ergebnis.⁵¹
- Die Ergebnisse haben in ihrer Grundaussage (Vorteil) Bestand, und zwar unabhängig von den ersetzten Materialien. Verändern kann sich die Höhe der Vorteile bei unterschiedlichen ersetzten Kunststoffen.

3.2.3 Berücksichtigung alternativer Nutzungsmöglichkeiten

Um die Übersichtsökobilanzen zur LCF- und zur Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerie zu vervollständigen, wird im Folgenden die alternative Nutzung des Rohstoffs Stroh berücksichtigt (wenn dieses nicht in der Bioraffinerie verarbeitet werden würde). Getreidestroh kann alternativ auf dem Feld verbleiben (wird dann nach der Getreidernte als Bodenverbesserer untergepflügt und gibt dabei dem Boden Nährstoffe zurück, die die entsprechende Menge Nährstoffe aus mineralischen Düngemitteln ersetzen), in der Biosmass-to-Liquid(BTL)-Produktion eingesetzt werden (aus trockener Biomasse können BTL-Kraftstoffe⁵² erzeugt werden, die dann entsprechende Mengen fossilen Dieselmotorkraftstoffs ersetzen) oder im Heizkraftwerk eingesetzt werden (energetische Nutzung). Die Systeme „LCF- und die Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerie“ wurden somit den Systemen „Feldverbleib“, „BTL-Produktion“ und „Heizkraftwerk“ gegenübergestellt (schematische Darstellung Anhang 5). Die Annahmen bezüglich der Flächennutzung sind analog wie bei der grünen Bioraffinerie dargestellt.

Ergebnisse der Übersichtsökobilanzen zur LCF- und Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerie

Abbildung 34 fasst die Ergebnisse der Übersichtsökobilanz für die Nutzung von Getreidestroh beim Verbleib auf dem Feld, für die BTL-Produktion, für die Bioenergienutzung sowie in der LCF- und der Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerie jeweils gegenüber den ersetzten konventionellen Produkten für die beiden Umweltwirkungen Aufwand an „fossiler Energie“ und dem „Treibhauseffekt“ zusammen.

Aus dieser Darstellung (und aus der hier nicht dargestellten Gesamtanalyse) lassen sich folgende Aussagen ableiten (IFEU 2005a):

- Der Verbleib des Getreidestrohs auf dem Feld hat nur geringe, wenn auch vorteilhafte, Wirkungen auf die Umwelt. Dies gilt für alle fünf analysierten Umweltwirkungen.

⁵¹ Auch hier zeigt sich – analog zur LCF-Bioraffinerie –, dass die relativ große Menge an Lignin (in Form der Gutschrift für ABS) die Vorteile des Gesamtkonzepts massiv mitbestimmt. Sensitivitätsanalysen hierzu zeigen, dass die Ergebnisse auch bei anderen Verwendungen des Lignins, z. B. bei einer „nur“ energetischen Nutzung, qualitativ gleich ausfallen (mit geringen quantitativen Änderungen) (IFEU 2005c).

⁵² Es gibt bereits erste Pilotanlagen, die Biomasse (zumeist Hölzer, aber auch Stroh ist denkbar) vergasen und mittels des Fischer-Tropsch-Verfahrens zu biogenen Dieselmotorkraftstoffen umwandeln.

- Die Produktion von BTL-Kraftstoff weist größere Vorteile beim Einsatz fossiler Energie, beim Treibhauseffekt und auch bei der Versauerung auf, wobei die übrigen beiden Umweltwirkungen keine klare Tendenz zeigen.
- Die Nutzung von Stroh als Bioenergieträger in einem Heizkraftwerk hat beim Einsatz fossiler Energie und beim Treibhauseffekt noch größere Vorteile als die beiden vorstehenden Nutzungsarten (bei der Versauerung dagegen deutliche und beim Nährstoffeintrag und beim Ozonabbau geringere Nachteile).
- Die Verarbeitung von Stroh in einer LCF- oder einer Getreide-(Ganzpflanzen-) Bioraffinerie hat gegenüber den anderen Möglichkeiten der Strohnutzung die größten Vorteile im Einsatz fossiler Energie, dem Treibhauseffekt und der Versauerung.

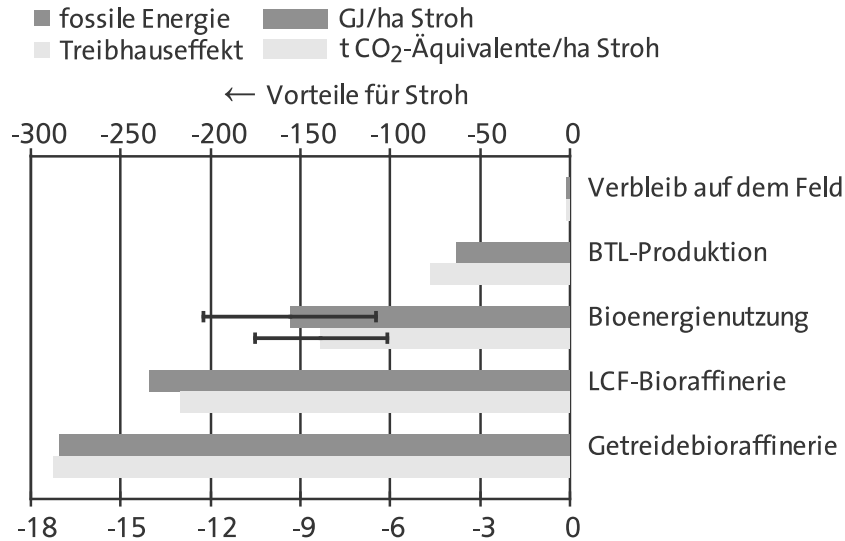
Insgesamt betrachtet spielen die hergestellten und die von ihnen ersetzten Produkte eine entscheidende Rolle, da verschiedene Produktpaletten denkbar sind, bei denen die Ergebnisse beim Einsatz fossiler Energien und beim Treibhauseffekt für die Bioraffinerien im gleichen Bereich liegen wie für die energetische Nutzung von Stroh. Auch beim Vergleich zwischen LCF- und Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerie hängt es in erster Linie von den Produkten ab, ob und bei welcher Umweltwirkung die eine oder die andere Bioraffinerie größere Vorteile aufweist. Und schließlich beeinflussen die Produktlinien die Frage, ob der Nährstoffeintrag der Bioraffinerien geringer oder ähnlich dem der anderen Strohnutzungsarten ist. Der Ozonabbau zeigt keine klare Tendenz (IFEU 2005a, S. 56). Eine Zusammenführung der Ergebnisse für die LCF- und die Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerie zeigt Abbildung 35 für die beiden Umweltwirkungen Einsatz fossiler Energien und Treibhauseffekt.

Insgesamt lässt sich zur zusammenführenden Betrachtung festhalten, dass die Nutzung von Stroh in der LCF- und der Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerie gegenüber den anderen Nutzungsmöglichkeiten von Stroh überwiegend Vorteile aufweist. Aus dieser Darstellung (und aus der hier nicht dargestellten Gesamtanalyse) lässt sich Folgendes ableiten (IFEU 2005a, S. 57):

- Die beiden betrachteten Bioraffinerien weisen gegenüber dem Verbleib auf dem Feld und der BTL-Produktion Vorteile beim Einsatz fossiler Energie, beim Treibhauseffekt (und der Versauerung) auf. Beim Nährstoffeintrag können sich teils Vorteile für die Bioraffinerien, teils ähnliche Werte wie für den Feldverbleib und die BTL-Produktion ergeben. Beim Ozonabbau zeigt sich keine klare Tendenz für die eine oder andere Nutzungsmöglichkeit des Strohs.
- Die LCF- und die Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerie weisen gegenüber der Bioenergienutzung im Strohheizkraftwerk Vorteile beim Einsatz fossiler Energie, beim Treibhauseffekt (und der Versauerung) auf. Allerdings kann unter bestimmten Umständen die energetische Nutzung von Stroh ähnlich viel fossile Energie und Treibhausgase einsparen. Ob der Nährstoffeintrag der Bioraffinerien ähnlich dem der Bio-

Abbildung 34

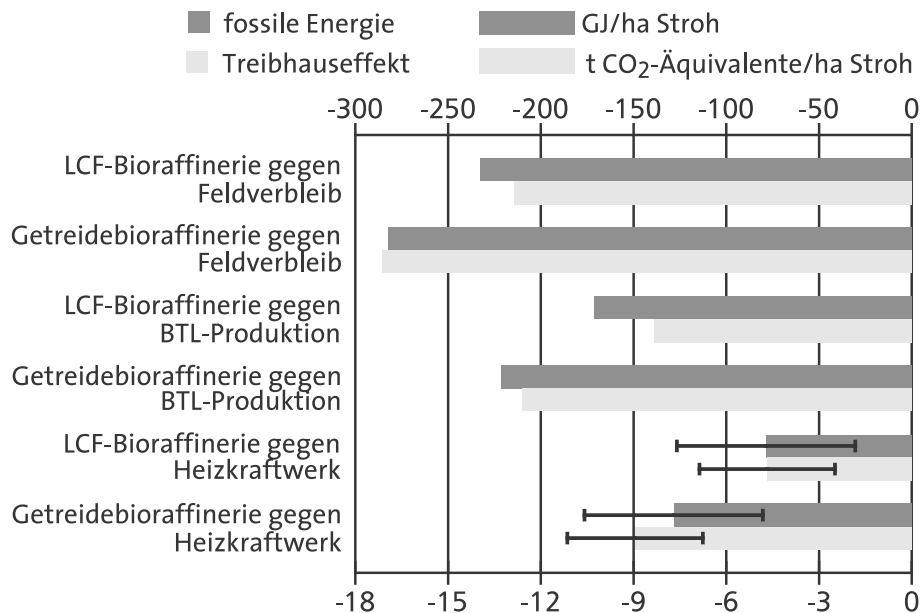
Ergebnisse für alternative Nutzungsarten von Getreidestroh



Quelle: IFEU 2005a, S. 56

Abbildung 35

Ergebnisse der Übersichtskobilanzen für die LCF- und die Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerie (Zusammenführung)



Quelle: IFEU 2005a, S. 57

energienutzung oder geringer ist, hängt von den Produktlinien ab. Beim Ozonabbau zeigt sich keine klare Tendenz.

Damit weisen die LCF-Bioraffinerie und die Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerie in allen untersuchten Umweltwirkungen – gegenüber dem Feldverbleib, der BTL-Produktion und der energetischen Nutzung von Stroh – mindestens gleichwertige, wenn nicht vorteilhafte Umweltwirkungen auf. Sie sind diesem eindeutig vorzuziehen. Wesentlich ist dabei die Nutzung des Lignins: Nur wenn damit hochwertige Kunststoffe und -harze ersetzt werden, gelten diese Aussagen. Bei Substitution weniger aufwendiger Kunststoffe kann die energetische Strohnutzung ähnlich gut abschneiden wie die Bioraffinerie. Für den Fall, dass das Lignin energetisch genutzt wird, wäre die energetische Strohnutzung der in einer Bioraffinerie vorzuziehen. Im Einzelnen ergeben sich folgende Aussagen (IFEU 2005a, S. 58):

- Zwischen LCF- und Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerie hängt es in erster Linie von den hergestellten Produkten und den von ihnen ersetzten Produkten ab, ob und bei welcher Umweltwirkung die eine oder die andere Bioraffinerie die größten Vorteile aufweist.
- Die Aufwendungen für die LCF- und die Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerie sind gegenüber den Gutschriften von Ethanol bzw. Ethylen, THF und insbesondere dem durch Lignin ersetzten Kunststoff oder Kunstharz sehr gering.
- Ob die Ergebnisse zum Nährstoffeintrag der Bioraffineriesysteme geringer oder ähnlich dem der anderen Strohnutzungsarten sind, hängt von der Verwendung der Einzelprodukte der Bioraffinerien bzw. den dadurch ersetzten konventionellen Äquivalenzprodukten ab.
- Abgesehen vom Nährstoffeintrag haben die Ergebnisse in ihrer Grundaussage Bestand, und zwar unabhängig von den ersetzten Materialien. Ändern kann sich die Höhe der Vorteile bei unterschiedlichen ersetzten Kunststoffen.

LCF- und Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerien weisen interessante ökologische Potenziale auf, wobei eine entsprechende ökonomische Beurteilung derzeit noch offen ist. Die größte Herausforderung für die Zukunft liegt hier bei der Erschließung der Potenziale, das Hauptprodukt Lignin stofflich zu nutzen. Aber auch bei einer eher ungünstigen Nutzung von Lignin (rein energetische Nutzung) resultiert ein signifikanter Vorteil aus den Übersichtsökobilanzen der betrachteten LCF- und Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerien. Das heißt, die ökologische Auswertung bleibt in ihrer Grundaussage in allen untersuchten Varianten konstant: signifikant positiv bei KEA, CO₂ und Versauerung; nicht so stark positiv ausgeprägt bei den restlichen Umweltwirkungen (Nährstoffeintrag, Ozonabbau).

3.3 Zusammenführung der Ergebnisse der Übersichtsökobilanzen

Die hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen untersuchten Bioraffineriekonzepte werden im Folgenden anhand wesentlicher Aussagen zusammengefasst dargestellt. Die Ausführungen basieren zu weiten Teilen auf IFEU (2005a, S. 59f.):

Grüne Bioraffinerie

Die grüne Bioraffinerie hat gegenüber der Verarbeitung von Grüngut im Trockenwerk ökologische Vorteile beim Einsatz fossiler Energie und beim Treibhauseffekt. Je nach realen Gegebenheiten gelten diese Vorteile teilweise in allen untersuchten Umweltwirkungen. Die grüne Bioraffinerie ist damit dem Trockenwerk eindeutig vorzuziehen.

Die grüne Bioraffinerie benötigt gegenüber der Nutzung von Grüngut in der Biogasanlage mehr fossile Energie und emittiert mehr Treibhausgase, während sie Vorteile bei anderen Umweltwirkungen zeigt. Wird die alternative Flächennutzung, d. h. der Anbau von Energiepflanzen, berücksichtigt, ergeben sich für die grüne Bioraffinerie Vorteile beim Einsatz fossiler Energie und beim Treibhauseffekt und wiederum Nachteile in anderen Umweltwirkungen. Somit kann eine wissenschaftlich begründete Entscheidung für die Biogasanlage oder die grüne Bioraffinerie nicht erfolgen.

Insgesamt betrachtet weist die untersuchte Variante der grünen Bioraffinerie noch erhebliche Optimierungsmöglichkeiten auf. Insbesondere die Trocknung des Presskuchens zu Grüngutpellets erfordert einen vergleichsweise hohen Energieaufwand. Werden andere Produkte aus dem Grüngut gewonnen, so kann sich durchaus eine günstigere Bilanz für die grüne Bioraffinerie ergeben. Ob diese sich beim Einsatz fossiler Energie und beim Treibhauseffekt ähnlich vorteilhaft auswirkt wie bei der Biogasanlage, wäre im Einzelfall (ggf. in weiteren Untersuchungen) zu überprüfen.

LCF-Bioraffinerie und Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerie

Bei Berücksichtigung alternativer Nutzungsmöglichkeiten von Stroh weisen die LCF- als auch die Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerie ökologische Vorteile auf gegenüber der Möglichkeit, Getreidestroh zur BTL-Produktion zu verwenden oder nach der Ernte auf dem Feld zu belassen. Auch gegenüber der Strohverbrennung zur energetischen Nutzung haben beide Bioraffineriesysteme dann Vorteile, wenn zukünftig das anfallende Lignin einen hochwertigen Kunststoff wie ABS ersetzen kann. Bei geringwertigen Nutzungsmöglichkeiten von Lignin und gleichzeitig optimaler Bioenergienutzung ergeben sich für beide Systeme bezüglich der Einsparung von fossiler Energie und von Treibhausgasen in etwa gleiche Größenordnungen.

Insgesamt betrachtet ist die Nutzung von Getreidestroh in einer LCF- oder Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerie

den anderen Nutzungsmöglichkeiten vorzuziehen. Wesentlich ist dabei die Nutzung des in größeren Mengen anfallenden Lignins: Die Bilanz bleibt positiv, sofern Lignin hochwertige Kunststoffe und -harze ersetzt. Für den Fall der energetischen Nutzung von Lignin ist die energetische Strohnutzung gegenüber der Bioraffinerie in Bezug auf die betrachteten Umweltwirkungen vorteilhafter.

Der Vergleich von LCF- und Getreide-(Ganzpflanzen-) Bioraffinerie untereinander ist abhängig von den jeweils hergestellten Produkten und hierbei insbesondere von der zukünftigen Nutzung des Lignins. Die Herstellung und Nutzung von Ligninmaterialien sollte daher verstärkt erforscht bzw. weiterentwickelt werden.

Vergleich aller untersuchten Bioraffinerien

In bestimmten Fällen mag es interessant sein, die ökologischen Auswirkungen aller drei, mit verschiedenen Rohstoffen betriebenen Bioraffinerien miteinander zu vergleichen, um z. B. zu ermitteln, ob eine beabsichtigte Investition in eine Bioraffinerie eher in eine grüne, eine LCF- oder eine Getreide-(Ganzpflanzen-) Bioraffinerie getätigt werden soll. In einem solchen Vergleich werden Anlagen in etwa der gleichen Größenordnung gegenüber gestellt. Dazu werden die Ergebnisse auf 1 t Trocken-

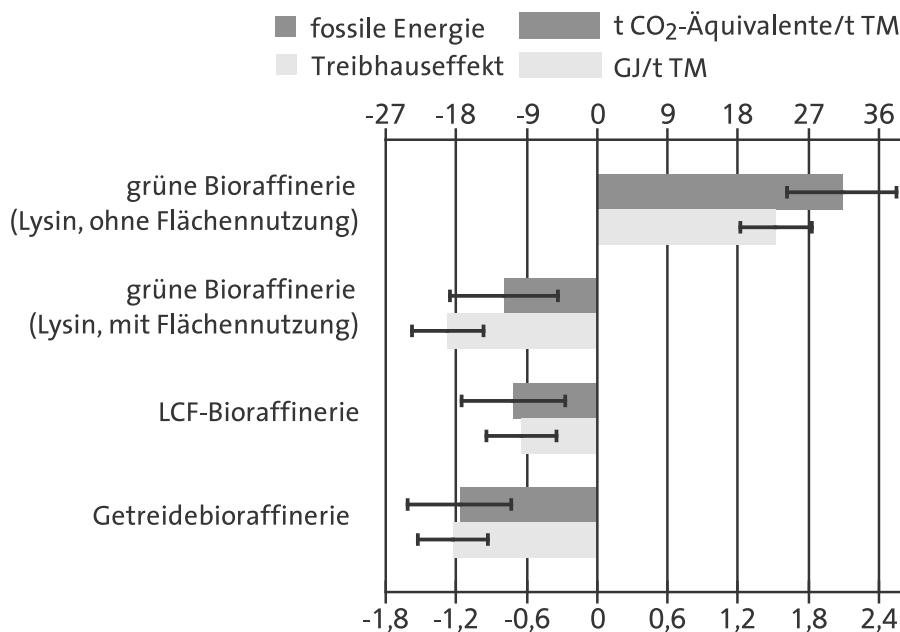
masse des jeweiligen Rohstoffs bezogen. Die jeweilige alternative Verwendung des Rohmaterials wird mit berücksichtigt, was im besten Fall die energetische Nutzung sein kann. Daher werden in Abbildung 36 die Differenzen zwischen den Umweltwirkungen der Bioraffinerien und der energetischen Verwendung des jeweiligen Rohmaterials dargestellt.

Wie bereits erwähnt, sind die Unterschiede zwischen der LCF- und der Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerie ausschließlich auf die unterschiedlichen Produkte zurückzuführen, die in dieser Analyse untersucht wurden. Beide Bioraffinerien können also die gleichen Vorteile gegenüber der energetischen Nutzung von Stroh erreichen. Die Ergebnisse der grünen Bioraffinerie mit und ohne Berücksichtigung der Flächennutzung stellen die Extremwerte der möglichen Umweltwirkungen gegenüber der Biogasanlage dar (IFEU 2005a, S. 61).

Damit lassen sich anhand der hier abgeleiteten Ergebnisse für die untersuchten exemplarischen Auslegungen der Bioraffineriekonzepte keine grundsätzlichen ökologischen Vor- oder Nachteile der einzelnen Bioraffineriekonzepte ableiten. Es zeigt sich jedoch, dass es noch beachtliches ökologisches Optimierungspotenzial bei der tatsächlichen Ausgestaltung eines spezifischen Gesamtkonzepts von Rohstoffen und Produkten gibt.

Abbildung 36

**Vergleich „Bioraffinerie gegenüber energetischer Nutzung der jeweiligen Biomasse“
(Vergärung für Grüngut, Verbrennung für Stroh)**



Für die grüne Bioraffinerie wurden die Ergebnisse ohne und mit alternativer Flächennutzung im „erweiterten Szenario“ dargestellt. Quelle: IFEU 2005a, S. 60

V. Energetische Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen

Im Vergleich der hier im Vordergrund stehenden stofflichen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen hat deren energetische Nutzung in Deutschland bereits einen beachtlichen Stellenwert erreicht. Diesen synoptisch zu dokumentieren, steht im Fokus des folgenden Kapitels.

Die folgenden Ausführungen zur energetischen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen entsprechen in weiten Teilen denen des Gutachtens IFEU (2005b).

1. Bioenergieträger – aktueller Stand der Nutzung

Nahezu alle Arten von Biomasse⁵³ können als Energieträger eingesetzt werden. Die Bandbreite reicht von Gülle über Restholz und Stroh hin zu Energiepflanzen wie Miscanthus oder auch Raps (IFEU 2005b, S. 1). Einen Überblick über die Möglichkeiten der Bereitstellung von Bioenergie gibt Abbildung 37.

Die energetisch genutzte Biomasse wird zumeist unterteilt in feste, flüssige und gasförmige Bioenergieträger, die unterschiedlich einsetzbar sind. So können u. a. viele flüssige und zum Teil auch gasförmige Bioenergieträger als Kraftstoffe eingesetzt werden. Die festen Bioenergieträger lassen sich wiederum in holz- und halmgutartige sowie weitere (z. B. stärkehaltige oder tierische) Biomassen unterteilen, während die flüssigen Bioenergieträger sich überwiegend in Öle, Fette, Alkohole und deren Derivate aufgliedern. Gasförmige Bioenergieträger sind Biogase (Vergärungsprodukte und biogene Synthesegase), die mittels fermentativer oder thermochemischer Umwandlung aus Biomasse gewonnen werden. Unterschieden wird ferner zwischen Anbaubiomasse (Kulturen, die explizit für die energetische Nutzung angebaut werden), Reststoffen (Rückstände der Land- und Forstwirtschaft, Haushalte, Gewerbe und Industrie) sowie verschiedenen flüssigen oder gasförmigen Sekundärprodukten (wie Bioethanol oder Synthesegas), die sowohl aus Reststoffen als auch aus Anbaubiomasse hergestellt werden können. Für

⁵³ Die verschiedenen Biomassearten und -nutzungstechnologien werden beispielsweise in C.A.R.M.E.N. (2005), FNR (2002) und Kaltschmitt/Hartmann (2001) erläutert. Potenziale und Umweltwirkungen von Bioenergieträgern untersuchen u. a. DLR et al. (2004), Fritsche et al. (2004), Thrän/Kaltschmitt (2004) und Thrän et al. (2005a).

Bioenergieträger lässt sich Folgendes festhalten (IFEU 2005b, S. 2):

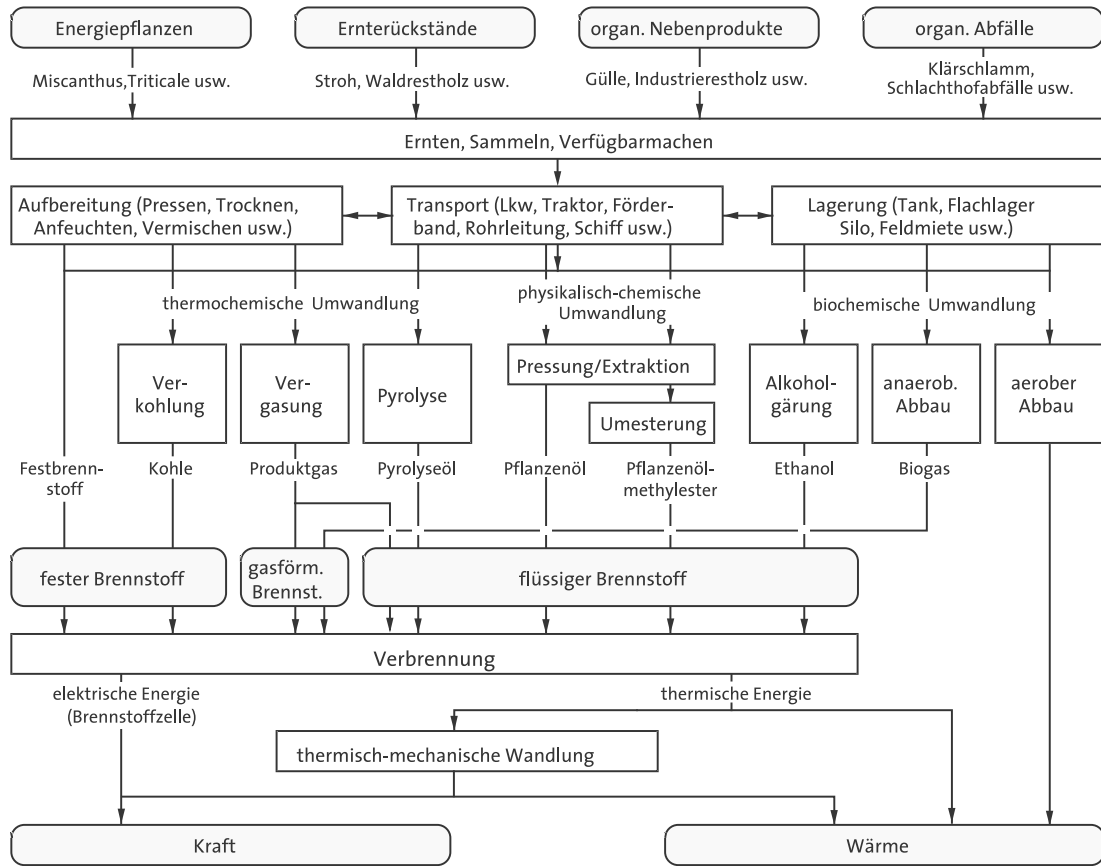
- Anbaubiomasse: holzartige: Holz aus Kurzumtriebsplantagen; halmgutartige: Getreideganzpflanzen, Mais, mehrjährige Kulturen wie Miscanthus; weitere feste Bioenergieträger: Getreide; flüssige Bioenergieträger: Raps- und Sonnenblumenöl, Bioethanol aus Weizen, Zuckerrüben oder Kartoffeln; Biogase: aus stärke- und halmgutartiger Anbaubiomasse,
- Sekundärprodukte: flüssige Bioenergieträger: Biomass to Liquid (BTL), Biomethanol oder Bioethanol aus holz- oder halmgutartiger Biomasse; Synthesegase: aus holz- und halmgutartiger Biomasse,
- Reststoffe: holzartige: Waldrestholz, Durchforstungsrestholz, Holz aus Park- und Landschaftspflege, Industriestholz, Altholz, industrielle feste Bioabfälle; halmgutartige: Stroh, Grünschnitt, z. B. von Dauergrünland, Parks und Straßenrändern; weitere feste Bioenergieträger: Klärschlamm, Tiermehl, Tierfett; Biogase: aus Gülle und Festmist, aus Ernterückständen der Landwirtschaft, aus Abfällen von Haushalten, Gewerbe und Industrie sowie Klärgas, Deponiegas.

Die verstärkte Förderung der Nutzung von Bio- und anderen erneuerbaren Energien hat in den vergangenen Jahren in Deutschland zu einer deutlichen Produktionssteigerung insbesondere im Strom- und im Kraftstoffbereich geführt (Abbildung 38).

Die Anteile der Bioenergieträger an der Bereitstellung von Primärenergie sind in Abbildung 39 dargestellt. Von den festen Bioenergieträgern (2002 wurden daraus 274 PJ Primärenergie erzeugt) wird im Wesentlichen Holz eingesetzt, zum überwiegenden Teil Brenn- und Waldrestholz gefolgt von Alt- und Industrierestholz (FNR 2005a). Auch Biodiesel hat einen hohen Stellenwert bei der Primärenergiebereitstellung (Staiß et al. 2005). Weniger bedeutend sind andere feste Bioenergieträger zur Strom- und Wärmeerzeugung wie Stroh sowie der Kraftstoff Bioethanol und gasförmige Bioenergieträger (Bio-, Klär- und Deponiegas). Der Anteil erneuerbarer Energien am Gesamtprimärenergieverbrauch sowie auch der Bioenergie ist insgesamt betrachtet noch relativ gering (Abbildung 40). Deutschland liegt damit noch unter dem EU-Durchschnitt, der 2002 bei etwa 3 Prozent Bioenergieanteil am gesamten Primärenergieverbrauch lag (IFEU 2005b, S. 7).

Abbildung 37

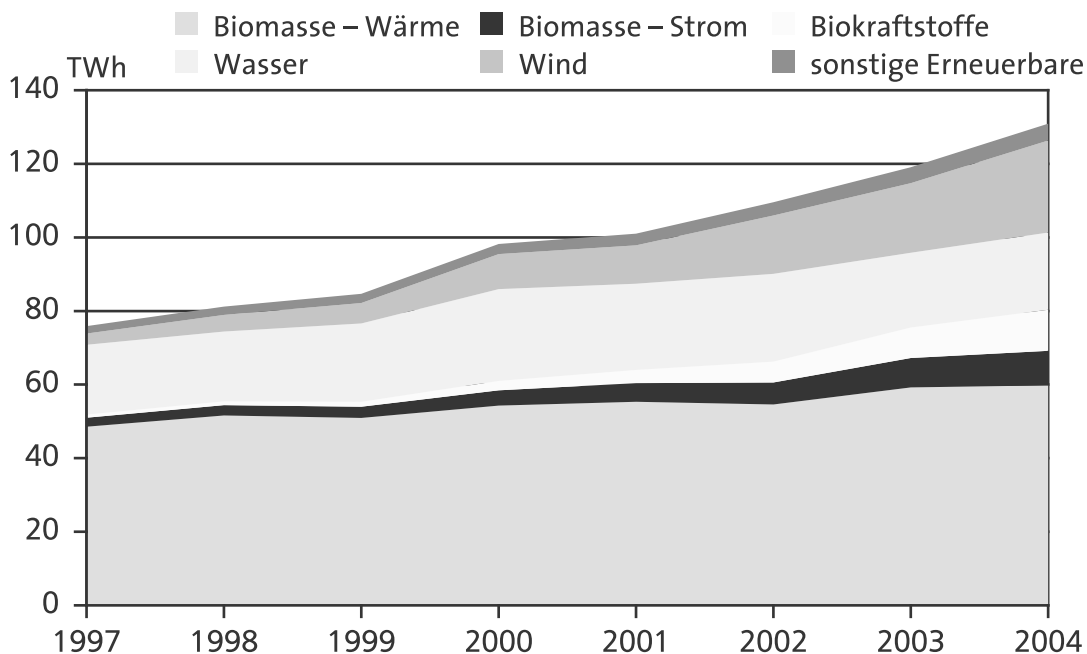
Möglichkeiten einer Energiebereitstellung aus Biomasse



Graunterlegung = Energieträger; keine Unterlegung = Umwandlungsprozesse; vereinfachte Darstellung ohne Licht als Nutzenergie
 Quelle: Kaltschmitt/Hartmann 2001

Abbildung 38

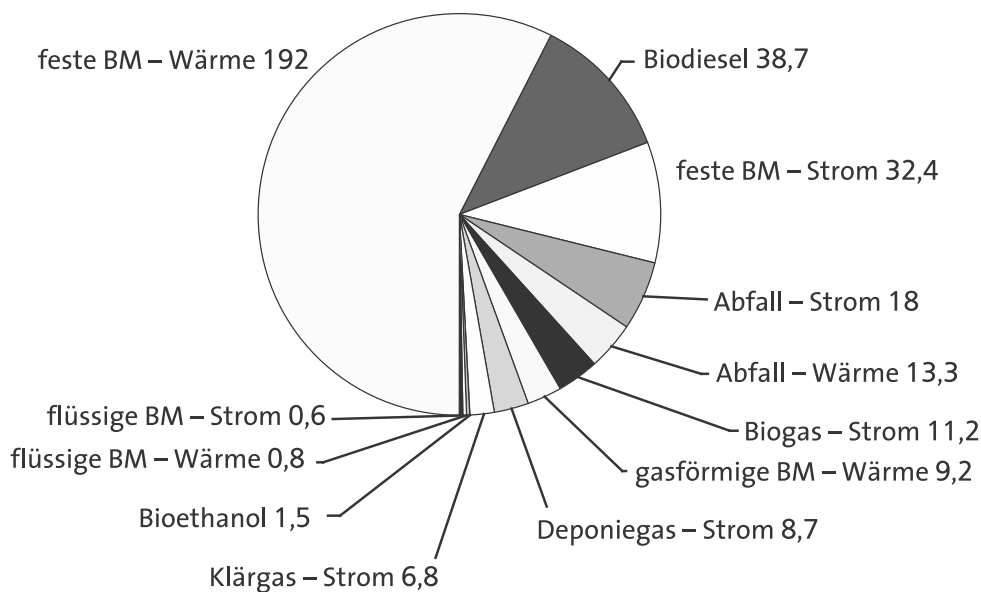
**Entwicklung der Energiebereitstellung aus Biomasse und anderen erneuerbaren Energien
(in TWh Endenergie)**



Quelle: nach Staiß et al. 2005

Abbildung 39

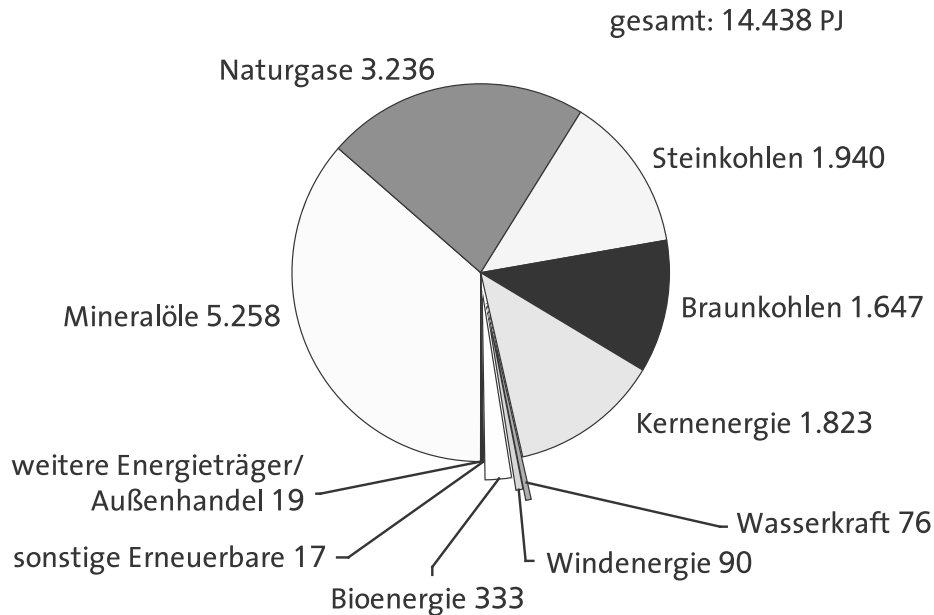
**Anteile der Energiebereitstellung aus Biomasse 2004
(in PJ Primärenergie)**



Quelle: nach Staiß et al. 2005

Abbildung 40

Primärenergieverbrauch in Deutschland 2004 (in PJ)



Quelle: AGE B 2005, Staiß et al. 2005 nach IFEU 2005b, S. 8

Aus Sicht der Flächennutzung belegen derzeit lediglich Energiepflanzen für die Biokraftstoffproduktion Anbauflächen in nennenswertem Umfang (IFEU 2005b, S. 7). Raps für den deutschen Biodieserverbrauch im Inland wurde 2004 auf etwa 650 000 ha und im Ausland auf über 300 000 ha angebaut (Gärtner/Reinhardt 2005). Bioethanol wurde auf einer Anbaufläche von 200 bis 250 000 ha produziert, überwiegend aus Weizen, zum kleineren Teil aus Zuckerrüben (Reinhardt/Gärtner 2005). Andere Energiepflanzen werden kaum angebaut und Reststoffen wird – nach allgemeiner Übereinkunft – kein Flächenverbrauch zugeschlagen. Flächen in Form von Produktionsanlagen, Lagerplätzen u. Ä. sind gegenüber den Anbauflächen marginal.

2. Nutzungspotenziale in Deutschland

In den letzten Jahren gab es diverse Versuche, die aktuellen Biomassepotenziale in Deutschland und ihre Entwicklung in den kommenden Jahrzehnten abzubilden. Das momentan verfügbare Wissen dazu findet sich im Wesentlichen in drei umfassenden Studien: die des BMU-Projekts „Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland“ (DLR et al. 2004), die des BMU-ZIP-Projekts „Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse“ (Fritsche et al. 2004) und die zusammenfassende Publikation „Status quo und Potenziale der energetischen Biomassennutzung in Deutschland. Wozu sollen welche Biomasse-

potenziale genutzt werden?“ (Thrän/Kaltschmitt 2004). Da diese sich in wesentlichen Punkten voneinander unterscheiden, wurden sie vergleichend gegenübergestellt. Wesentliche Eckpunkte der Szenarien dieser drei Studien lassen sich folgendermaßen charakterisieren (IFEU 2005b, S. 9):

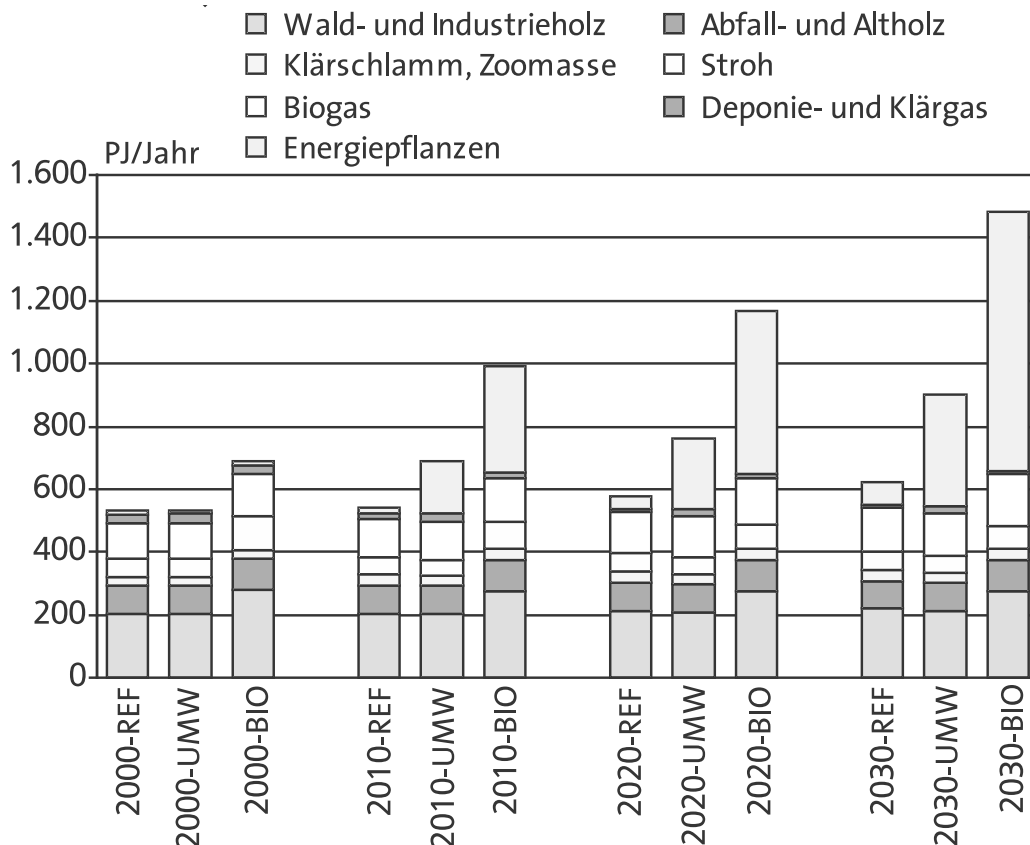
Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse

Für die zur Verfügung stehenden Potenziale der Bioenergie wurden im „Stoffstromprojekt“ (Fritsche et al. 2004) drei Szenarien angenommen:

- Das Referenzszenario orientiert sich am Referenzszenario der Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“.
- Das Umweltszenario basiert im energiewirtschaftlichen Teil auf dem BMU/UBA-Nachhaltigkeitsszenario (Fischedick/Nitsch 2002) in Kombination mit einer verstärkten Berücksichtigung des Natur- und Landschaftsschutzes sowie der Prämisse, Biomassereststoffe im Strom- und Wärmesektor und Energiepflanzen überwiegend für Biokraftstoffe zu nutzen.
- Im Biomasseszenario werden die Obergrenzen der Biomassepotenziale ohne größere Naturschutzrestriktionen genutzt sowie eine massive Unterstützung der Biomassebereitstellung und -nutzung unterstellt.

Abbildung 41

Entwicklung der Bioenergieträger in den Szenarien Referenz, Umwelt und Biomasse 2000 bis 2030



Quelle: Fritsche et al. 2004, nach IFEU 2005b, S. 11

Generell wurde in dem Projekt ein Vorrang der stofflichen Nutzung angenommen.⁵⁴ Beschrieben wurden die technischen Potenziale für 2010, 2020 und 2030. Nicht berücksichtigt wurden Reststroh von Raps und Mais sowie Waldrestholz aus theoretisch möglichem höherem Einschlag und Mittel- und Niederwaldnutzung. Ferner wurden für die Biomassereststoffe folgende Annahmen getroffen: Rückstände aus der Landwirtschaft werden nur in dem Maße genutzt, wie der Kohlenstoffkreislauf der Böden nicht gestört wird. Auch erfolgt ein Umbau des Waldes hin zum Mischwald mit verschiedenen Altersklassen. Das Ergebnis ist in Abbildung 41 grafisch dargestellt.

⁵⁴ In Fritsche et al. (2004) wird unterstellt, dass alle Arten von stofflicher Nutzung gegenüber der energetischen Vorrang haben. Praktisch wurde dies durch Differenzrechnung umgesetzt, um eine Eingrenzung vorzunehmen (z. B. Gesamtaufkommen an Stroh abzüglich der dokumentierten nichtenergetischen Verwendung oder bei Schwachholz der dokumentierte Brusthöhendurchmesser (BHD) (z. B. ab 16 cm stoffliche Nutzung, darunter ein gemischter Übergangsbereich stofflicher und energetischer Nutzung und noch kleinere BHDs mit rein energetischer Nutzung). Der für eine stoffliche Nutzung infrage kommende Anteil wurde für die beschriebenen Energieszenarien nicht berücksichtigt.

Status quo und Potenziale der energetischen Biomassennutzung in Deutschland

Thrän/Kaltschmitt (2004) beschrieben die damals aktuell verfügbaren Potenziale aus Reststoffen, Nebenprodukten und Abfällen sowie der für Energiepflanzen zur Verfügung stehenden Anbaufläche. Für den Energiepflanzenanbau wurde die Annahme getroffen, dass perspektivisch ca. 2 Mio. ha Stilllegungsfläche zur Verfügung stehen. Es wurden Berechnungen für die Rapsölgewinnung, die Bioethanolgewinnung aus Weizen und Zuckerrüben, die Festbrennstoffgewinnung (Getreide, Energiegräser, Kurzumtriebsplantagen), die Biogasgewinnung aus Energiepflanzen sowie für einen Anbaumix durchgeführt (IFEU 2005b, S. 12).

Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland

Die Bioenergiepotenziale in DLR et al. (2004) wurden auf Basis zweier Hauptszenarien ermittelt: Das Basisszenario, welches die technischen Potenziale für alle Biomassefraktionen bestimmt, und das NaturschutzPlus-Szenario, welches diverse naturschutzspezifische Aspekte berücksichtigt.

Dabei wurden zunächst alle Biomassepotenziale außer der Anbaubiomasse aus dem Biomasseszenario von Fritsche et al. (2004) übernommen. Zusätzlich wurde berücksichtigt bei „Stroh“ ein Zuschlag für Raps- und Maisstroh, „zusätzlich erschließbares Waldholz“ (aus der Annahme heraus, dass auch das derzeit ungenutzte Waldholz als Brennstoffpotenzial zur Verfügung steht), „Landschaftspflegegut iwS“ (im weitesten Sinn, diverse Subkategorien an Landschaftspflegegut und Grünschnitt), „Offenland“ (holz- und halmgutartige Biomasse, die aus Naturschutzsicht erwünscht auf sogenannten Offenlandflächen erfasst und energetisch genutzt werden kann), „Waldsaumentwicklung“ (naturschutzfachlich erwünschte Bildung von Übergangszonen zwischen der Kernzone eines Waldes und seiner Nachbarflächen, die in den kommenden Jahrzehnten potenziell eine Mehrmenge an Holz verursachen würde), „Grünschnitt: Kompensationsflächen“ (Biomassen von Flächen, die im Ausgleich für Eingriffe in die Natur, z. B. Straßenbauvorhaben, nach Naturschutzzielen angelegt werden). Für die Anbaubiomasse wurden Flächenpotenziale auf Basis der im Referenzszenario von Fritsche et al. (2004) abgeleiteten Werte berechnet, ohne die dort ausgewiesenen Ausgleichs- und Naturschutzflächen einzurechnen und unter Einbeziehung eines Grünlandumbruchs für Energiepflanzenanbau (IFEU 2005b, S. 13).

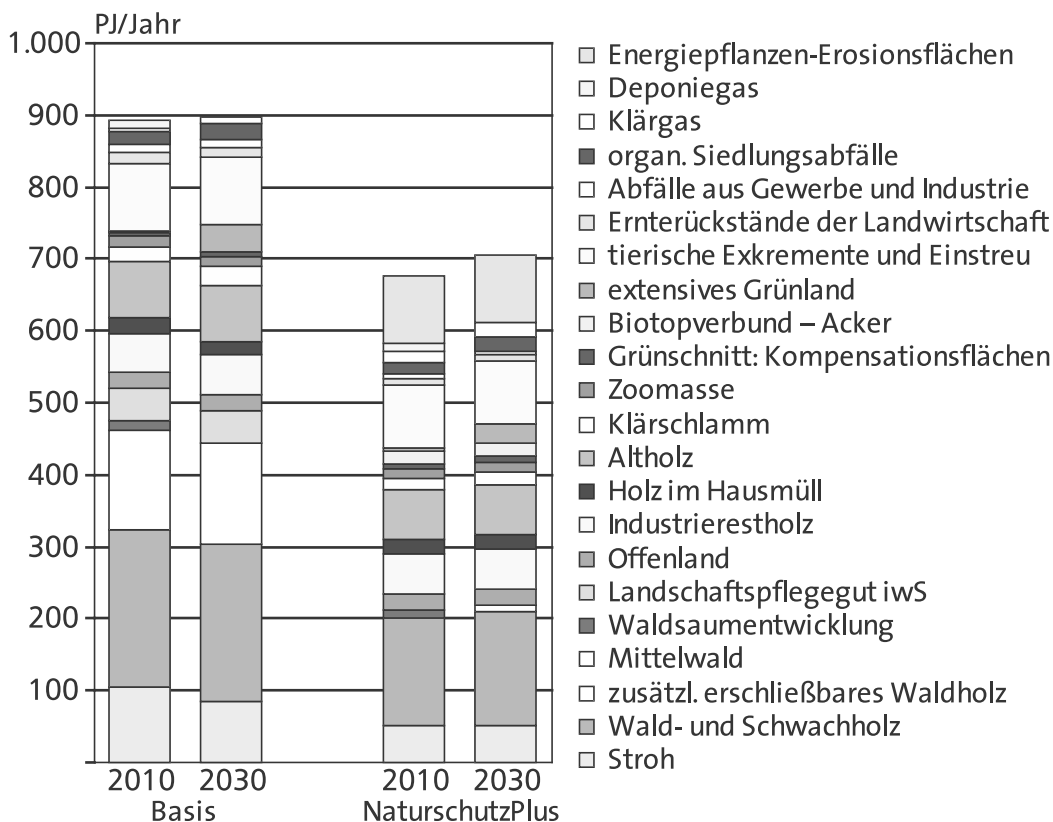
Für das NaturschutzPlus-Szenario wurde ferner berücksichtigt „Mittelwald“ (als energetisch nutzbare Biomasse aus Waldbereichen, die aus Artenschutzgründen als Mittel- oder Niederwald geführt werden), „Biotopverbund – Acker“ (Ackerflächen, die für das Naturschutzziel des Biotopverbunds umgewandelt werden und von denen Biomasse gewonnen werden kann), „Extensives Grünland“ (Biomasse von Grünland, das in extensiver Nutzung etabliert wurde) und „Energiepflanzen – Erosionsflächen“ (mehrfährige Energiepflanzen, die auf Ackerflächen angebaut werden können, die erosionsgefährdet sind) (IFEU 2005b, S. 14).

Das Ergebnis ist in Abbildung 42 dargestellt, wobei die geringeren Potenziale im NaturschutzPlus-Szenario gegenüber dem Basisszenario insbesondere auf geringere Potenziale für Stroh und verschiedene Restholzarten zurückgehen. Die zusätzliche Berücksichtigung der oben genannten Biomassearten im NaturschutzPlus-Szenario wiegt diesen Rückgang nicht auf (IFEU 2005b, S. 15).

Aus Abbildung 42 ist ersichtlich, dass die Biomassepotenziale unter Berücksichtigung von weiteren Naturschutzzielen (NaturschutzPlus-Szenario) deutlich geringer ausfallen als beim Basisszenario. Die Veränderung der Biomassepotenziale ergeben sich wesentlich aus der

Abbildung 42

Biomassepotenziale „Basis“ und „NaturschutzPlus“ 2010 bis 2030 nach Einzelkategorien (ohne Energiepflanzen von Anbauflächen)



Quelle: DLR et al. 2004 nach IFEU 2005b, S. 17

Restholz- und -strohnutzung⁵⁵. Darüber hinaus kann es unter besonderer Berücksichtigung von Naturschutzaspekten sinnvoll sein, bestimmte Flächen mit mehrjährigen Pflanzen – hier z. B. Energiepflanzen – zu belegen.

Eine tabellarische Gegenüberstellung der Ergebnisse der drei Studien für die Jahre 2000, 2010 und 2030 findet sich im Anhang 8. Wesentliche Unterschiede gehen auf unterschiedliche Bilanzierungsweisen (z. B. Thrän/Kaltschmitt [2004] berücksichtigten die technischen Potenziale sowie DLR et al. [2004] im Szenario Basis zusätzlich erschließbares Waldholz) sowie auf verschiedene Herangehensweisen bei der Bestimmung der für Energiepflanzen zur Verfügung stehenden Anbaufläche zurück. Auch die Potenziale unter Naturschutzaspekten (bei DLR et al. [2004] NaturschutzPlus, bei Fritsche et al. [2004] Umwelt) sind deutlich anders: Während DLR et al. (2004) dafür höhere Reststoffmengen zugrunde legten, wurden in diesem Szenario kleinere Anbauflächen als bei Fritsche et al. (2004) angenommen. Auch hier liegt der Grund in unterschiedlichen Ansätzen der Bilanzierung (IFEU 2005b, S. 17).

3. Szenarien für Deutschland

Um die Jahrtausendwende wurden diverse umfangreiche Studien durchgeführt, um aus unterschiedlichen Blickwinkeln Szenarien zur Zukunft der Energieversorgung zu entwickeln. Für die Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen in den kommenden Jahrzehnten (Szenarien bis 2030) sind insbesondere zwei Untersuchungen hervorzuheben, die bereits angesprochen wurden: Fritsche et al. (2004) und DLR et al. (2004). In Fritsche et al. (2004) wurden im Wesentlichen Bioenergieträger betrachtet, in DLR et al. (2004) alle erneuerbaren Energieträger (IFEU 2005b, S. 20).

Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse

In Fritsche et al. (2004) wurden aufgrund der drei Szenarien zu Biomassepotenzialen (Kap. V.2) vier Szenarien zur energetischen Nutzung definiert:

- Das Referenzszenario (allgemeiner Vergleichsmaßstab) orientiert sich an der entsprechenden Referenzentwicklung der Enquête-Kommission (wesentliche Strukturdaten und Ergebnisse, z. B. Struktur und Höhe des Energieverbrauchs, Entwicklung der erneuerbaren Energien u. a., sind mit diesem identisch).
- Im Umweltszenario wird eine Nachhaltigkeitsstrategie im Energiesektor⁵⁶ insgesamt, in der Land- und Forst-

sowie in der Abfallwirtschaft abgebildet. Dabei werden Natur- und Landschaftsschutz verstärkt berücksichtigt und Bioenergieträger aus Reststoffen im Strom- und Wärmesektor sowie Anbaubiomassen als Biokraftstoffe im Verkehrssektor eingesetzt.

- Das Biomasseszenario legt die Obergrenzen der Biomassepotenziale ohne weitere Naturschutzrestriktionen, unter Annahme eines maximalen technischen Fortschritts und massiver Förderung der Nutzungstechniken fest.
- Vom Umwelt- und Biomasseszenario zusammen wird ein Korridor aufgezeigt, der die mögliche zusätzliche Biomassenutzung unter ökologischen Restriktionen bei Gewinnung und Nutzung aufzeigt. Auf Basis der Analyse der darin unterstellten Maßnahmen wird das Nachhaltigszenario entworfen, welches sich deutlich am Biomasseszenario orientiert, wobei Arbeitplatzeffekte berücksichtigt werden und eine höhere Technologievielfalt unterstellt wird (IFEU 2005b, S. 20f.).

Die Ergebnisse der Szenarien bis 2030 sind in Abbildung 43 dargestellt. Erkennbar ist beim Umwelt-, Biomasse- und Nachhaltigszenario eine Verringerung des Primärenergiebedarfs, die sich aus Effizienzsteigerungen ergibt (Einsparung etwa eines Viertels des Energiebedarfs bis 2030). Bioenergie kann nach Fritsche et al. (2004) einen Anteil von 8 bis 14 Prozent am Gesamtenergiebedarf erreichen, während die anderen regenerativen Energien 2030 zusammen etwa 9 Prozent ausmachen würden. Im Szenario Nachhaltig weist Bioenergie einen Anteil wie Stein- und Braunkohle zusammen auf. Die Studie geht davon aus, dass das Potenzial der Biomassereststoffe in den nächsten ein bis zwei Dekaden überwiegend in der Strom- und Wärmeproduktion eingesetzt wird, da sie mit den verfügbaren Nutzungstechnologien dort die besten Verwertungsmöglichkeiten besitzen. Ferner würden sich neue Bioenergieträger etablieren, die hohe Erträge auf gegebener Fläche unter Wahrung der Nachhaltigkeit erreichen können. Genannt werden Kurzumtriebsholz sowie extensive Feuchtgutlinien mit zwei Kulturen in einer Saison und möglichen Mischkulturen.

Neben Restholz und Reststroh, Biogas aus organischen Reststoffen und Gülle würden vor allem Biogas aus Feuchtgut sowie mehrjährige Energiepflanzen wie Kurzumtriebsholz oder Miscanthus in der Nutzung stark zunehmen, während die Ölpflanzen und die Ganzpflanzennutzung von Weizen und Mais (für Bioethanol bzw. Biogas) nur eine geringe Rolle spielten (Fritsche/Wiegmann 2005).

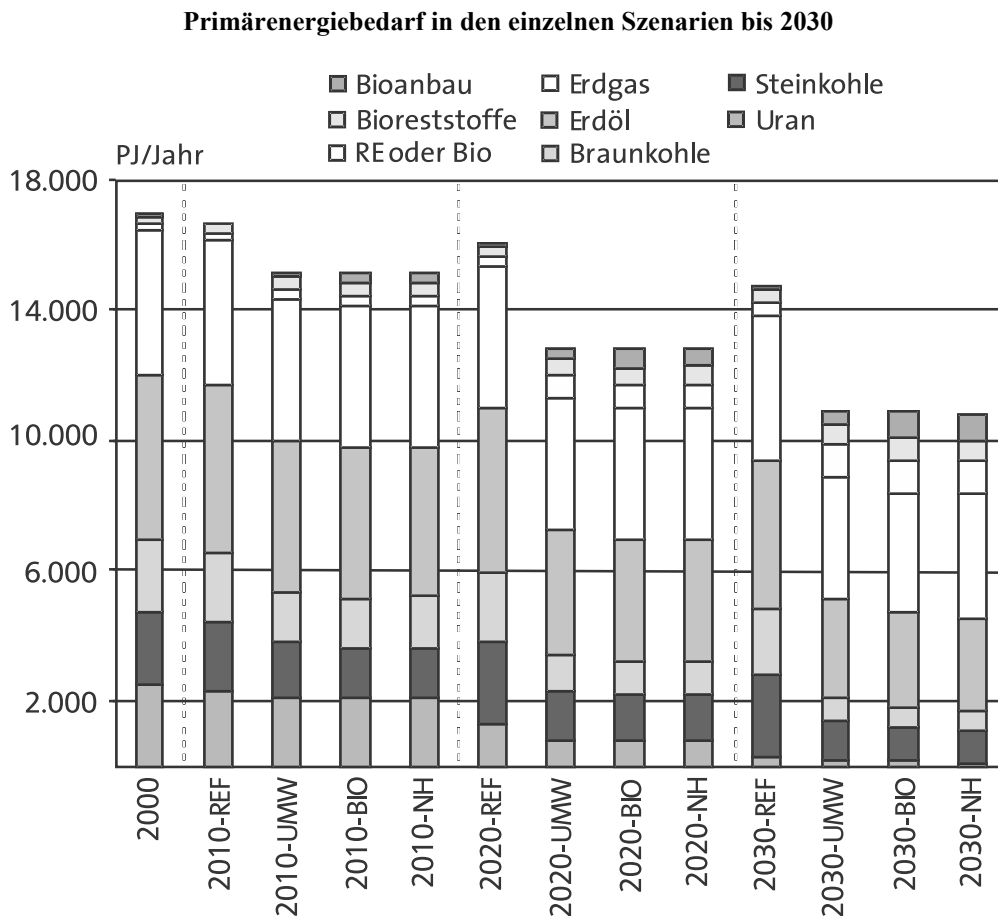
Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland

In DLR et al. (2004) wurden fünf Szenarien zur Bioenergienutzung in Deutschland analysiert: vier „Ausbauszenarien“ Basis I und II, NaturschutzPlus I und II sowie ein Referenzszenario. Die Basisszenarien zeigen ein technisch-strukturell nutzbares Potenzial erneuerbarer Energien auf, welches Belange des Naturschutzes einbezieht sowie Synergieeffekte (aus Naturschutzaspekten) berücksichtigt.

⁵⁵ So macht es etwa unter Naturschutzaspekten nicht in allen Fällen Sinn, das verfügbare Waldrest- und Schwachholz auch weitestgehend aus dem Wald zu entfernen. Beim Stroh wird z. B. ein unterschiedlicher Anteil an Ökolandbaubetrieben angenommen, womit u. a. unterschiedliche Mengen an Stroh als Tiereinstreu oder auch Mengen, die auf dem Feld verbleiben, einfließen (IFEU 2007).

⁵⁶ Der energiewirtschaftliche Teil beruht auf dem Nachhaltigkeitszenario von BMU/UBA (Fischedick/Nitsch 2002).

Abbildung 43



REF = Referenzszenario, UMW = Umweltszenario, NH = Nachhaltigszenario, Daten inkl. Auslandsanteile durch Vorketten (z. B. Ölförderung, Gaspipelines), Bioanbau = Anbaubiomasse, RE o. Bio = Regenerative Energien ohne Biomasse
 Quelle: nach Fritsche et al. 2004

Um zusätzlich naturschutzfachliche Anforderungen zu berücksichtigen und damit das nutzbare Potenzial erneuerbarer Energien nicht zu überschätzen, wird in der Variante „NaturschutzPlus“ ein aus naturschutzfachlicher Sicht begründetes Potenzial abgeleitet, das langfristig auch unter strengen naturschutzfachlichen Anforderungen für die Nutzung erneuerbarer Energien zur Verfügung steht. Daraus ergibt sich eine Minderung des zur Verfügung stehenden Potenzials. Andererseits bedingen die aus Naturschutzgründen entstehenden Synergieeffekte einen zusätzlichen Biomasseanfall. Zu den entsprechenden Potenzialen zählen „Mittelwald“, „Biotopverbund – Acker“ und „Energiepflanzen – Erosionsflächen“ (Kap. V.2).

Abbildung 44 zeigt die Entwicklung in den verschiedenen Szenarien bis 2050. Die Verhältnisse im Jahr 2030 sind im Wesentlichen ähnlich zu denen im Jahr 2050.

Im Szenario Basis I wird der stationären Nutzung der Biomasse soweit Vorzug eingeräumt, wie es die strukturellen Möglichkeiten des Wärmemarktes zulassen, was zu ca. 900 PJ/Jahr Brennstoffangebot für KWK-Anlagen und Heizungsanlagen bis zum Jahr 2030 führt und gleichzeitig die Bereitstellung von 130 PJ/Jahr an Biokraftstof-

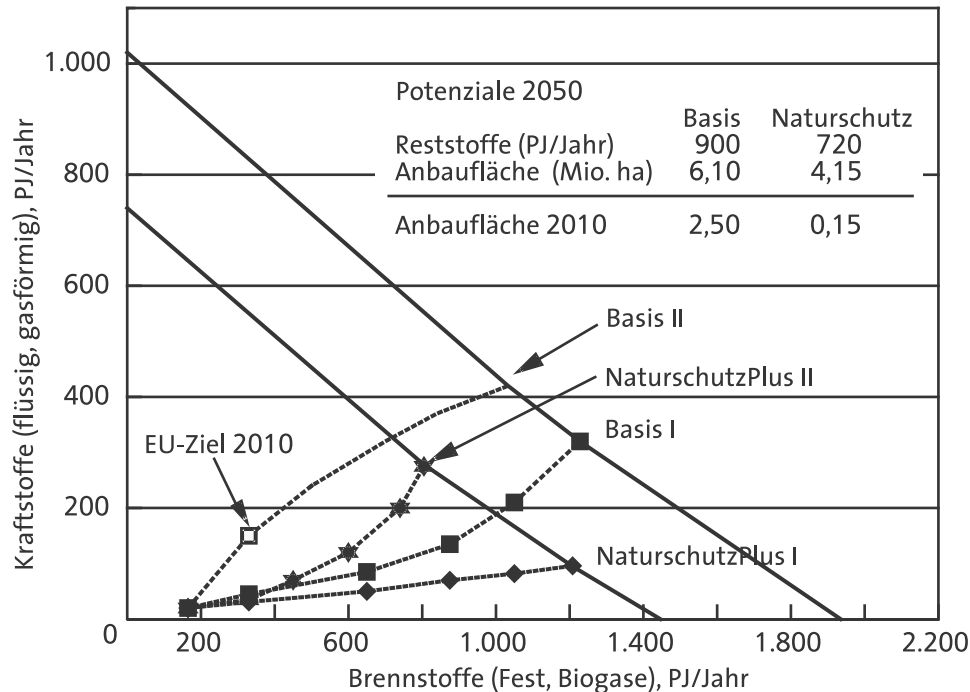
fen erlaubt. Ein Ausbau, der neben der Erfüllung des Verdopplungsziels für Strom und Wärme für 2010 auch das Ziel eines möglichst rasch wachsenden Kraftstoffanteils erfüllt (Szenario Basis II), würde im Jahr 2030 zu rund 300 PJ/Jahr Kraftstoffen führen. Damit bleiben im Szenario Basis II rund 700 PJ/Jahr an Brennstoffen für die stationäre Nutzung übrig (IFEU 2005b, S. 23).

Die Szenarien NaturschutzPlus I und II sind ähnlich definiert. Würde die stationäre Nutzung in ähnlichem Umfang aufrechterhalten werden wie in Basis I, so verbleiben nur noch rund 70 PJ/Jahr an Kraftstoffen (Szenario NaturschutzPlus I). Soll der Umfang der Kraftstoffbereitstellung etwa so wie in Basis I erhalten bleiben (Szenario NaturschutzPlus II), so reduziert sich der Beitrag an Brennstoffen auf 600 PJ/Jahr. Da gleichzeitig größere Flächen praktisch voraussichtlich erst nach 2010 zur Verfügung stehen, beginnt in diesen Szenarien der Einstieg in die Kraftstoffherstellung eher verhalten. Bei allen Szenarien werden die Reststoffe ausschließlich im stationären Bereich genutzt (IFEU 2005b, S. 24).

Für die Bereiche Stromerzeugung, Brennstoff- und Kraftstoffbereitstellung wurden für die Szenarien Basis I und II

Abbildung 44

Zwei Pfade einer möglichen stationären und mobilen Nutzung der ermittelten Biomassepotenziale in den Szenarien BASIS und NaturschutzPlus bis 2050



Anmerkung: Jede Markierung auf den vier „Szenarienvläufen“ entspricht einem Abstand von zehn Jahren beginnend im Jahr 2000. Durch die beiden durchgehenden Linien wird ein Korridor aufgezeigt.

Lesebeispiel für die obere Linie: Wenn man die gesamte Biomasse im Basisszenario als Kraftstoff nutzen würde, dann wären etwas mehr als 1 000 PJ/Jahr nutzbar; im Gegenzug wären dies etwas mehr als 1 900 PJ/Jahr als Brennstoff. Für das Naturschutzszenario fällt das nutzbare Biomasse-Potenzial jeweils geringer aus. In der Praxis wird eher eine Mischung aus diesen Eckdaten umgesetzt werden.

Quelle: DLR et al. 2004

die direkt nutzbaren Beiträge erneuerbarer Energien berechnet. Der Anteil regenerativer Energien insgesamt würden demnach ca. 22 Prozent an der gesamten Primärenergie ausmachen (entspricht ca. dem 10-Fachen des heutigen Beitrags), dies würde wiederum einer Verminderung der CO₂-Emission auf rund 450 Mio. t/Jahr in 2030 entsprechen (von 835 Mio. t/Jahr in 2000) (IFEU 2005b, S. 24).

Fazit der beiden Szenarienstudien

Beide Studien kommen zu dem Ergebnis, dass Bioenergie (als Bestandteil regenerativer Energien) bis 2030 einen Anteil von 8 bis 14 Prozent am gesamten Primärenergiebedarf in Deutschland decken kann, wenn Bestrebungen zur Effizienzsteigerung forciert werden. Dies entspricht in beiden Studien nahezu dem Anteil, den Stein- und Braunkohle dann am gesamten deutschen Energiemix haben werden. Die Studien empfehlen übereinstimmend, dass biogene Reststoffe vorrangig stationär genutzt werden sollten und dass es die Flächenknappheit zum Erreichen der Ziele erfordert, auf zur Verfügung stehenden Flächen nachhaltige Energiepflanzen mit hohen Erträgen anzubauen (IFEU 2005b, S. 25).

4. Bewertung von Bioenergieträgern

Analog zu Kap. III und IV soll an dieser Stelle auf die zu Bioenergieträgern derzeit verfügbaren (ökologischen) Bewertungen eingegangen werden. Zu den Umweltwirkungen von Bioenergieträgern im Vergleich zu ihren fossilen Pendanten liegt – im Gegensatz zur stofflichen Nutzung – eine Vielzahl von Untersuchungen vor. Dies trifft weniger auf innovative Bioenergieträger – insbesondere Ethanol aus Lignocellulose sowie für einige Biogasoptionen – zu, wo belastbare Ökobilanzen noch rar sind. Diese Studien wurden in der Regel orientiert am Konzept der Produktökobilanzen ausgeführt, wobei sich der tatsächliche Untersuchungsumfang – insbesondere hinsichtlich erfasster Parameter und Lebenswegabschnitte – zum Teil deutlich unterscheidet. Neben Studien zu einzelnen bzw. mehreren Bioenergieträgern gibt es umfangreiche Meta-studien (IFEU 2005b). Im Folgenden sind auf der Basis einer zusammenfassenden Darstellung vorhandener Informationen (IFEU 2005b) Bioenergieträger hinsichtlich ihrer ökologischen Vor- und Nachteile gegenüber nicht-erneuerbaren Energieträgern bewertend zusammengestellt.

Tabelle 8

Untersuchte Bioenergieträger, Biomassearten, Konversions- bzw. Nutzungsarten und fossile Pendant

Bioenergieträger	Biomasse	Nutzung	fossiles Pendant
<i>Biokraftstoffe</i>			
Biodiesel	Raps	Fahrzeuge	Diesel
Bioethanol/ETBE	Weizen, Zuckerrübe, Lignocellulose (zuk.)	Fahrzeuge	Ottokraftstoff/MTBE
BTL	Lignocellulose (zukünftig)	Fahrzeuge	Diesel
<i>Festbrennstoffe</i>			
Hackschnitzel	Miscanthus	HW/KW	Heizöl/Erdgas/Kohle
Holz hackschnitzel	Wald(rest)holz, Kurzumtriebsplantage	HW/KW	Heizöl/Erdgas/Kohle
Pellets	Reststroh, Energiegetreide	HW/KW	Heizöl/Erdgas/Kohle
<i>Biogas</i>			
	Gülle	BHKW	Heizöl/Erdgas
	Gülle und andere Biomasse (Energiegetreide, Mais, Grünschnitt)	BHKW	Heizöl/Erdgas
	Anbaubiomasse (Energiegetreide, Mais)	BHKW	Heizöl/Erdgas

ETBE = Ethyltertiärbuthylether; MTBE = Methyltertiärbuthylether; BTL = Biomass to Liquid; HW = Heizkraftwerk; KW = Kraftwerk; BHKW = Blockheizkraftwerk
Quelle: IFEU 2005b, S. 29

Betrachtet werden die in Kapitel V.1 aufgeführten Bioenergieträger, wobei maßgebliches Kriterium für deren Auswahl ihr Massenpotenzial ist.⁵⁷ Die relevanten Bezüge finden sich in Tabelle 8.

4.1 Vergleich „Bioenergieträger – fossile Energieträger“

Da hierzu eine Reihe von Untersuchungen verfügbar ist, werden diese hier in Bezug auf den Vergleich „Bioenergieträger – fossile Energieträger“ zusammenfassend dargestellt (Tabelle 9). Aufgeführt sind qualitativ die Ergebnisse der vergleichenden Produktökobilanzen der betrachteten Bioenergieträger aus Anbaubiomasse (Reinhardt/Zemanek 2000).

Zusammengefasst weisen alle betrachteten Bioenergieträger aus Anbaubiomasse im Vergleich zu fossilen Energie-

trägern sowohl ökologische Vorteile als auch Nachteile auf. Vorteile zeigen diese Bioenergieträger in allen Fällen beim Verbrauch nichterneuerbarer Energieträger und beim Treibhauseffekt; Nachteile zeigen sich in fast allen Fällen bei Ozonabbau, Versauerung und Eutrophierung. Beim Photo-smog ist kein verallgemeinerbares Ergebnis feststellbar. Eine objektive Entscheidung zugunsten eines Energieträgers lässt sich damit nicht treffen. Würde man aber z. B. dem Treibhauseffekt die höchste ökologische Priorität einzuräumen, dann schnitten alle untersuchten Bioenergieträger besser ab als die fossilen Alternativen (IFEU 2005b, S. 33).

Für Reststoffe ergeben sich bei der Substitution fossiler Energieträger qualitativ ähnliche Ergebnisse wie bei Anbaubiomasse. Vorteile ergeben sich auch hier insbesondere für den Verbrauch nichterneuerbarer Energieträger und den Treibhauseffekt. Für die Wirkungskategorien Ozonabbau, Versauerung, Eutrophierung und Photo-smog ergeben sich tendenziell seltener Nachteile und häufiger indifferente Ergebnisse und auch Vorteile als bei Anbaubiomasse. Ursache dafür ist, dass der größte Teil der – ökologisch problematischen – Bereitstellung von Anbaubiomasse entfällt (Feldarbeit, Düngemittelproduktion) (IFEU 2005b, S. 34).

⁵⁷ Bioenergieträger mit geringen Massenpotenzialen können zwar durchaus sinnvoll genutzt werden, ihr Beitrag zur Reduktion des Verbrauchs nichterneuerbarer Energien und des Treibhauseffekts ist jedoch entsprechend gering.

Tabelle 9

Ergebnisübersicht Produktökobilanzen von Bioenergieträgern aus Anbaubiomasse

Bioenergieträger	Verbrauch nicht-erneuerbarer Energieträger	Treibhauseffekt	Ozonabbau	Versauerung	Eutrophierung	Photosmog
Pappel	+	+	–	–	–	+
Weide	+	+	–	–	–	–
Miscanthus	+	+	–	–	–	–
(Riesen-)Pfahlrohr	+	+	–	–	–	–
Knautgras	+	+	–	–	–	–
Weizenganzpflanze	+	+	–	–	–	–
RME*	+	+	–	–	–	+/-
EtOH (Zuckerrübe)	+	+	–	–	–	+
ETBE (Zuckerrübe)	+	+	–	–	–	+
Biogas (Rapsschrot)	+	+	–	–	–	–
Biogas (Maissilage)	+	+	–	–	–	–

* In Anhang 10 ist exemplarisch die Ökobilanz für Rapsmethylester(RME)-Diesel dargestellt. RME wurde vor allem in Deutschland intensiv diskutiert, ist gut untersucht, auch für andere Länder relevant und wird bereits in größeren Mengen produziert.

+ : Vorteil Bioenergieträger; – : Vorteil fossiler Energieträger; +/- : nicht signifikant

Quelle: IFEU 2005b, S. 33

4.2 Vergleich von Bioenergieträgern untereinander

Bioenergieträger aus Anbaubiomasse können hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen (genauer: deren Differenz zu fossilen Pendanten) in Bezug auf eine bestimmte Fläche (1 ha) miteinander verglichen werden. Aus einer Gegenüberstellung flächenbezogener Differenzen „biogen – fossil“ des Verbrauchs nichterneuerbarer Energieträger und des Treibhauseffekts in IFEU (2005b, S. 36) für Biokraftstoffe sowie Strom und Wärme aus Festbrennstoffen und aus Biogas ergibt sich, dass eine Strom- und Wärmeerzeugung aus ökologischer und flächenbezogener Sicht günstiger als die Nutzung als Biokraftstoff⁵⁸ ist. Ein Vergleich der energetischen Nutzung von Reststoffen mit der von Anbaubiomasse untereinander ist in den meisten Fällen nicht sinnvoll, da der Bezug fehlt, was auch für den Vergleich von Reststoffen⁵⁹ untereinander gilt. Betrachtet man den Bereich Strom- und Wärmeerzeugung aus verschiedenen Bioenergieträgern aus Anbaubi-

masse separat, so ergeben sich auch hier beim Verbrauch nichterneuerbarer Energien für Pappel (Kurzumtrieb), Miscanthus und Weizen (Ganzpflanze) vergleichbar große Vorteile. Für Biogas hängt die Größe des Vorteils vom Ertrag der fermentierten Pflanzenart ab (großer Vorteil für Biogas aus Maissilage, geringster Vorteil von allen verglichenen Lebenswegen für Biogas aus Rapsschrot). Beim Treibhauseffekt weisen Pappel und Miscanthus die größten Vorteile auf, gefolgt von Biogas aus Maissilage, Weizen und Biogas⁶⁰ aus Rapsschrot. Beim Ozonabbau zeigen alle Bioenergieträger Nachteile, den kleinsten die Pappel, gefolgt von Miscanthus und mit größerem Abstand Biogas aus Rapsschrot, Weizen und Biogas aus Maissilage (bedingt durch N₂O-Emissionen infolge des N-Düngereinsatzes und der Ausbringung der Gärreste). Bei der Versauerung und Eutrophierung bestimmen die NH₃-Emissionen (infolge des Einsatzes von N-Dünger bzw. der Ausbringung von Gärresten aus der Biogaserzeugung) für alle betrachteten Lebenswegver-

⁵⁸ Das ist vor allem dadurch begründet, dass pro ha geerntete Biomasse bei einer Festbrennstoffnutzung massen- und brennwertbezogen mehr Biomasse in die energetische Nutzung einfließt, als bei den Biokraftstoffen, wo entweder nur ein Teil (Rapskorn anstelle der gesamten Pflanze) genutzt wird und zusätzlich noch enorme Konversionsenergien (zur Umwandlung von Biomasse zu Biokraftstoff) aufzuwenden sind.

⁵⁹ Reststoffe weisen im Vergleich zu Anbaubiomasse seltener Nachteile auf bei den Umweltwirkungen, die bei Anbaubiomasse durch land-

wirtschaftliche Prozesse bestimmt werden. Außerdem sind die Nachteile häufig geringer als bei Anbaubiomasse. Ein Vorteil von Reststoffen besteht in jedem Fall darin, dass sie keinen zusätzlichen Flächenbedarf verursachen (IFEU 2005b).

⁶⁰ Das im Vergleich zu Pappel und Miscanthus ungünstigere Verhältnis CO₂-Äq./GJ resultiert bei Weizen und den Biogasen aus den höheren N₂O-Emissionen, bei Weizen durch den N-Düngerverbrauch und bei den Biogasen durch die Ausbringung des Gärrestes, bei den Biogasen außerdem durch Methanemissionen aus der Biogasanlage (IFEU 2005b).

gleiche die Nachteile (am geringsten bei der Pappel, gefolgt von Miscanthus, Biogas aus Rapsschrot, Weizen und Biogas aus Maissilage) (IFEU 2005b, S. 37).

Im Bereich der Biokraftstoffe gibt es für jeden der fossilen Kraftstoffe mehrere biogene Pendanten, von denen wiederum einige nach unterschiedlichen Verfahren und aus verschiedenen Rohstoffen hergestellt werden können. Produktökobilanzen von Biokraftstoffen kommen hier meist zu dem Ergebnis, dass Biokraftstoffe mehr oder weniger CO₂-neutral sind. Die Ergebnisse differieren allerdings beträchtlich (Abbildung 45). Die Bandbreiten der betrachteten Studien können im Wesentlichen auf Unterschiede in den Basisdaten⁶¹, den Erträgen, der Verfahrenstechnik und in der Bewertung der Kuppelprodukte zurückgeführt werden.

Eine vergleichende Analyse zu Biokraftstoffen wurde zudem von Schmitz (2006) veröffentlicht, in welcher u. a. folgende Aussagen getroffen werden: Die Flächen- und Rohstoffpotenziale für Biokraftstoffe in Deutschland sind begrenzt, was vor allem für Biodiesel und Pflanzenöl aufgrund der beim Rapsanbau einzuhaltenden Fruchtfolgen gilt. BTL und Ethanol aus Lignocellulose bieten größere Rohstoffreserven aufgrund einer breiteren Rohstoffbasis (Energiepflanzen, Holz, Stroh und Bioabfälle), die in ge-

⁶¹ Beispielsweise variierte der N-Düngereinsatz – eine der wesentlichen Determinanten für Energieverbrauch, CO₂-, N₂O- und NH₃-Emissionen in der Landwirtschaft – in den analysierten Studien zu Bioethanol aus Weizen zwischen 53 und 195 kg N/ha, der Primärenergieaufwand für die Bereitstellung von N-Düngemitteln in den Studien zu Bioethanol aus Mais z. B. zwischen 70 und 42 MJ/kg N (IFEU 2005b).

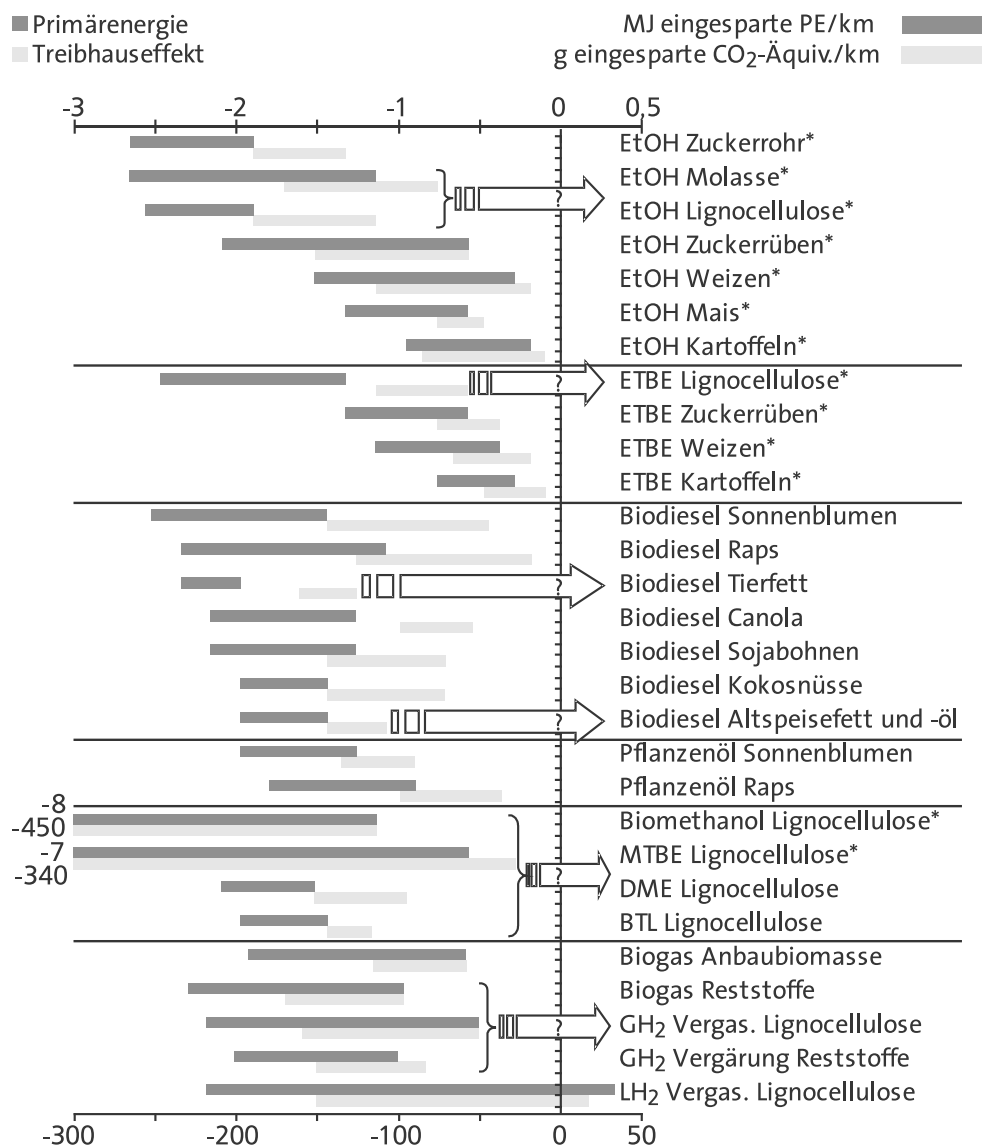
ringerer Konkurrenz zur Nahrungsmittelerzeugung steht. In Bezug auf die Einsparung von Treibhausgasen werden die Potenziale von BTL-Kraftstoffen am Höchsten angesehen (mittelfristig geringe Vermeidungskosten neben Pflanzenöl).

Der technische Stand der BTL-Herstellung aus Holz via Synthesegaserzeugung nach dem Carbo-V[®]-Verfahren von Choren und der Kraftstoffsynthese nach Fischer Tropsch ist von Baitz et al. (2004) beschrieben worden. Zur weiteren Verbesserung der Bewertungsgrundlage von BTL-Kraftstoffen kann eine Studie von Reinhardt et al. (2006) beitragen, die im Auftrag des BMELV und der FNR erstellt wurde. In dieser Studie wurden verschiedene Anbaubiomassen und Reststoffe sowie verschiedene Verfahren der Synthesegaserzeugung und Kraftstoffsynthese untersucht. Die Studie konnte nicht berücksichtigt werden.

Aus dem in IFEU (2005b) durchgeführten Vergleich verschiedener Biokraftstoffe ergeben sich folgende Ergebnisse: Die untersuchten Optionen für Bioethanol und ETBE, insbesondere aus Zuckerrüben, sind signifikant besser als der hier betrachtete Biokraftstoff aus Pflanzenöl RME (Rapsmethylester). ETBE schneidet besser ab als Ethanol. Ethanol aus Zuckerrüben hat Vorteile gegenüber der Ethanolherstellung aus Weizen und Kartoffeln, wobei Ethanol aus Weizen die zweitbeste Alternative und Ethanol aus Kartoffeln die ungünstigste Option in allen Kategorien (Ausnahme: Ozonabbau) darstellt. Eine optimierte Ethanolproduktion weist größere Vorteile beim Energieverbrauch und Treibhauseffekt, dafür größere Nachteile bei den anderen Kategorien auf (ETBE analog) (IFEU 2005b).

Abbildung 45

Biokraftstoffe: Bandbreiten der Differenzen „biogen – fossil“ des Verbrauchs nichterneuerbarer Energieträger und des Treibhauseffekts



* Bezug: 100 Prozent Biokraftstoff (bei ETBE/MTBE auch der fossile Anteil des ETBE/MTBE)

Pfeile mit Fragezeichen bei Biokraftstoffen aus Reststoffen: mögliche Verringerung der Vorteile (ggf. Entstehen von Nachteilen) bei Berücksichtigung der bisher nichterfassten Alternativnutzungen von Reststoffen, die im Falle der Biokraftstoffherzeugung nicht realisiert werden.

EtOH = Ethanol, ETBE = Ethyltertiärbutylether, MTBE = Methyltertiärbutylether, DME = Dimethylether, BTL = Biomass to Liquid, GH₂ = gasförmiger Wasserstoff, LH₂ = flüssiger Wasserstoff

Quelle: IFEU 2005b; aus verschiedenen Quellen auf Basis von IFEU 2004a

4.3 Vor- und Nachteile von Bioenergieträgern

Für alle Bioenergieträger, Anbaubiomasse und Reststoffe, können im Vergleich zu fossilen Energieträgern folgende, überwiegend belastbare Ergebnisse festgehalten werden (IFEU 2005b):

- Vorteile für Bioenergieträger ergeben sich in der Regel beim Verbrauch nichterneuerbarer Energieträger und beim Treibhauseffekt.
- Für die übrigen Wirkungskategorien ist zu unterscheiden zwischen Anbaubiomasse und Reststoffen. Bei Anbaubiomasse zeigen sich tendenziell Nachteile bei Ozonabbau, Versauerung und Eutrophierung. In seltenen Fällen können einzelne Parameter indifferent sein oder können sich Vorteile für Bioenergieträger zeigen. Bei Reststoffen sind auch für die genannten Kategorien häufiger Vorteile oder geringere Nachteile festzustellen.
- Eine objektive Entscheidung zugunsten eines Energieträgers kann damit nicht gefällt werden. Auf der Basis von notwendigerweise subjektiven Werthaltungen ist dies – sofern z. B. dem Treibhauseffekt die höchste ökologische Priorität eingeräumt wird – insoweit möglich, als dann alle untersuchten Bioenergieträger besser als die fossilen Alternativen abschneiden würden.
- Im Vergleich der Bioenergieträger untereinander lässt sich tendenziell festhalten, dass feste Bioenergieträger in der Regel günstiger abschneiden als Biokraftstoffe, und dass gasförmige Bioenergieträger in der Bandbreite der festen und flüssigen Bioenergieträger liegen.
- Ein Ranking der Bioenergieträger ist tendenziell möglich. Bioenergieträger, die verschiedene fossile Energieträger ersetzen können, bieten die größten Vorteile (bzw. kleinsten Nachteile), wenn sie Kohle ersetzen, am wenigsten vorteilhaft ist die Substitution von Erdgas; Heizöl nimmt eine Mittelstellung ein.

Für zukünftige Bezugsjahre ändern sich vor allem die flächenbezogenen Erträge, für die meist relativ kontinuierliche Steigerungen angenommen werden, was aber keinen Einfluss auf den Vergleich „biogen – fossil“ hat. Durch optimierte Fruchtfolgen und Düngemethoden können zukünftig Emissionen reduziert werden, die bislang häufig zu Nachteilen für Bioenergieträger führen. Fortschritte bei Bereitstellungs- und Konversionsprozessen sind für biogene und fossile Energieträger zu erwarten, für neue Bioenergietechnologien wie Ethanol aus Lignocellulose und BTL allerdings in größerem Maße. Dabei ist davon auszugehen, dass die Fortschritte bei den biogenen Energieträgern größer sein dürften als bei den fossilen, sodass die Bilanzergebnisse sich grundsätzlich weiter zugunsten der Bioenergieträger entwickeln dürften (IFEU 2005b).

5. FUE-Bedarf

Die Förderung der energetischen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen ist deutlich umfassender als bei der stofflichen Nutzung. Es gibt eine Reihe von Förderprogrammen zur verstärkten Nutzung von Bioenergie, die

auf verschiedene Zielgruppen (Bioenergieerzeuger, Verbraucher, Forschung und Entwicklung von Bioenergietechnologien) ausgelegt sind. Auf Bundes- und Länderebene sind dies etwa drei Dutzend Programme (IFEU 2005b). In Anhang 9 ist eine Auswahl aufgeführt, wobei auch EU-weite Programme erwähnt werden.

Technologische Konversion

Die verschiedenen Bioenergieketten sind unterschiedlich weit umgesetzt, wobei insbesondere bei bestimmten Konversionsverfahren noch wesentlicher Entwicklungsbedarf besteht.

Für die Gewinnung von Ölen (Pressen, Extrahieren, Umesterung) und die Fermentierung von Zucker und Stärke zu Alkohol sind ausgereifte Technologien verfügbar, die kommerziell eingesetzt werden. FuE-Bedarf besteht derzeit nicht (FhG-ISI 2005; Öko-Institut 2005; Schmitz 2005).

Die Herstellung von Ethanol aus Lignocellulose (Cellulose, Hemicellulose und Lignin) ist komplizierter.⁶² Bei der Aufspaltung von Cellulose und Hemicellulose in Zucker sowie bei der Fermentierung (insbesondere der C5-Zucker) sind noch Probleme zu lösen. Angestrebt wird eine Aufspaltung ohne Enzym- bzw. Säurezusatz. Zur Fermentierung mithilfe von Mikroorganismen (die sowohl C5- als auch C6-Zucker gleich effizient umsetzen) existieren bislang nur Pilotprojekte. Hier besteht Forschungsbedarf (FhG-ISI 2005; Öko-Institut 2005; Schmitz 2005).

Die Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen wird derzeit intensiv untersucht. Die Konversion der Biomasse zu BTL-Kraftstoffen umfasst drei Hauptprozesse: Synthesegaserzeugung, Gaskonditionierung und Fischer-Tropsch-Synthese. Die Synthesegaserzeugung erfolgt entweder einstufig über verschiedene Vergaser (Festbett-, Wirbelschicht-, Flugstromvergaser) oder über mehrstufige Verfahren (z. B. Carbo-V[®]-Verfahren von Choren, bioliq-Verfahren⁶³ vom Forschungszentrum Karlsruhe). Das entstehende Synthesegas dient meist als Input für die Fischer-Tropsch-Synthese von Kraftstoffen oder auch zur Stromerzeugung mit Gasturbinen (IGCC). Für fossile Brennstoffe (Stein-, Braunkohle) sind die Vergasungsverfahren weitgehend ausgereift. Für biogene Brennstoffe, wo lange Zeit vor allem Brenngase zur Stromerzeugung mit Gasturbinen oder -motoren erzeugt wurden, sind noch nicht alle Probleme gelöst; die Anlagen haben überwiegend Technikums- oder „semikommerziellen“ Charakter (IFEU 2005b).

⁶² Für die Ethanolherstellung aus Lignocellulose werden hohe Mengenpotenziale erwartet. Zudem weisen auch erste Übersichtsökobilanzen auf ökologische Potenziale hin (IFEU 2005b). Auf technischer Seite besteht jedoch noch enormer Entwicklungsbedarf.

⁶³ Beim bioliq-Verfahren wird Biomasse dezentral einer Schnellpyrolyse unterzogen (Lurgi-Ruhrgas-Misch-Reaktor) (Dahmen et al. 2006). Pyrolyseöl und -koks werden zu einer Slurry gemischt und an zentralen Anlagen reformiert (Flugstromvergaser, GSP-Vergaser, Typ Schwarze Pumpe). Das Verfahren soll für eine Vielzahl von Biomassearten, u. a. auch Halmgüter geeignet sein. Vorteilhaft könnte die Verfügbarkeit der Komponenten sein (IFEU 2005b).

Im Vergleich zur Nutzung biogener Kraftstoffe in Motoren und Turbinen weist die Fischer-Tropsch-Synthese deutlich höhere Anforderungen an die Reinheit des Synthesegases auf. Somit sind alle Verfahren noch relativ weit von einer kommerziellen Nutzung entfernt. Konkrete Probleme sind z. B., dass alle einstufigen Verfahren für Halmgüter (Stroh, Triticale etc.) ungeeignet sind⁶⁴, Festbettvergaser auf Leistungen bis 5 MW beschränkt sind (Meyer et al. 2004) und Rohgase mit extrem hohem Teergehalt ergeben (Wirbelschichtvergaser mit hohem Staubgehalt), andererseits mehrstufige Verfahren (z. B. Blauer Turm[®], Carbo-V[®], bioliq), die zwar bessere Rohgase liefern und flexibler im Rohstoffinput sind, aber entsprechend aufwendiger sind. Tendenziell wird in den meisten Konzepten wegen des dezentralen Anfalls von Biomasse von kleineren Anlagengrößen als bei fossilen Brennstoffen ausgegangen, was zu höheren spezifischen Kosten führt (IFEU 2005b).

Das Ziel mehrstufiger Verfahren besteht darin, sauberere Rohgase zu erzeugen und Stoffe, die die Synthesegaserzeugung stören, aus den Vergasern fernzuhalten (z. B. niedrigschmelzende Aschen). Zugleich wird damit die Inputbasis verbreitert, da insbesondere Halmgüter für einstufige Verfahren problematisch sind. Relevante Konzepte sind das Carbo-V[®]-Verfahren von Choren⁶⁵, der „Blaue Turm[®]“ von D.M.²⁶⁶ und das bioliq-Verfahren. Hier besteht zumeist noch Forschungsbedarf.

Im Bereich der BTL-Kraftstoffproduktion besteht z. B. FuE-Bedarf bei der Synthesegaserzeugung. Bei der Gaskonditionierung sind Effizienzsteigerungen und die Reduktion von Eigenverbräuchen Ziele, wesentlich dafür ist aber auch die Qualität des Rohgases. Bei der eigentlichen FT-Synthese sind – allerdings auf bereits hohem Niveau – Ausbeuten und Selektivität noch weiter optimierungsfähig (IFEU 2005b).

Auch bei der Strom- und Wärmeerzeugung sind einige Verfahren großtechnisch etabliert, während bei anderen noch FuE-Bedarf besteht. Verfahren mit direkter Verbrennung von Holz sind im Wesentlichen ausgereift. Die Verbrennung von Stroh ist noch nicht etabliert, wobei hohe Chlor- und Aschegehalte und niedrige Schlackeschmelztemperaturen weiterhin problematisch sind und im Vergleich zu Holz zusätzliche Maßnahmen notwendig machen (z. B. Kühlung von Rosten, Entstauben von Kesselrohren, Optimierungsbedarf hinsichtlich der Prozesssicherheit).

⁶⁴ Der hohe Kalium- und Clorgehalt dieser Materialien fördert Verschlackung und Korrosion. Je nach Verfahren müssen die Halmgüter aufwendig konditioniert werden (staubfeines Mahlen oder Pelletieren) (IFEU 2005b).

⁶⁵ Beim Carbo-V[®]-Verfahren wird in der ersten Stufe Biomasse in einer Niedertemperaturvergasung mit einem Dampf-Sauerstoff-Gemisch (alternativ: Luft) autotherm in Pyrolysegas und -koks überführt. Die beiden Produkte werden in einem Flugstromvergaser mit Sauerstoff autotherm reformiert; Energielieferant ist das Gas (IFEU 2005b).

⁶⁶ Beim „Blauen Turm[®]“ wird Biomasse verschwelt und der Pyrolysekoks in einer separaten Feuerung verbrannt. Mit der Wärme wird sowohl die Verschwelung als auch die Reformierung des Pyrolysegases mit Dampf gestützt. Der Blaue Turm[®] stellt damit die Umkehrung des Nutzungskonzepts von Koks und Gas im Carbo-V[®]-Verfahren dar (IFEU 2005b).

Auch im Bereich der Biogaserzeugung besteht hinsichtlich Prozesssicherheit und Effizienz bei kleinen Anlagen noch Optimierungsbedarf (KTBL 2005a). Bei der Vergasung von Biomasse zur Verstromung des Brenngases besteht noch erheblicher Forschungsbedarf. Zur Biogaserzeugung können die oben (BTL-Kraftstoffe) dargestellten Verfahren eingesetzt werden. Hauptproblem ist eine Brenngasqualität, die den Anforderungen der nachgeschalteten Anlagen – Turbine oder Brennstoffzelle – entspricht. Alternativ bzw. ergänzend sind Weiterentwicklungen an diesen Anlagen möglich (IFEU 2005b).

Anbau und züchterische Anpassungen

Bei Praktikabilität und Prozesssicherheit können Anbau und Ernte der meisten etablierten Biomassearten als ausgereift gelten. Ertragssteigerungen sind erstrebenswert, um bei zukünftig stärkeren Flächenkonkurrenzen relevante Beiträge zu Energieversorgung und Klimaschutz durch Bioenergieträger zu realisieren. Hohe Erträge lassen sich vor allem mit Zwei-Energie-Kulturen in einem Vegetationsjahr erreichen. Forschungsbedarf besteht noch bei Fruchtfolgen sowie Saat- und Ernteterminierung (Konkurrenzsituation bei Anbau von zwei Kulturen im Jahr). Zur Ausschöpfung der Potenziale von Anbaubiomasse sind noch umfassende Anbauversuche notwendig, bei denen klimatisch unterschiedliche Standorte, Böden verschiedener Qualität und verschiedene Fruchtfolgen untersucht werden. In neuen Fruchtfolgen wäre zudem sicherzustellen, dass keine pflanzenhygienischen Probleme auftreten, was wichtig ist, um einen reduzierten Einsatz oder gar Verzicht auf Biozide zu erreichen (an Energiepflanzen werden geringere Qualitätsanforderungen gestellt als an Futter- oder Nahrungspflanzen). Ziel ist ein standortspezifischer maximaler Gesamtertrag, wozu für verschiedene Standortarten eine optimale Kombination von Zwei-Frucht-Kulturen und günstigen Terminen für die Ernte der ersten und die Saat der zweiten Kultur erforderlich ist (IFEU 2005b).

Der Ertrag im Zwei-Kulturen-Anbau⁶⁷ ist (analog konventioneller Fruchtfolgen) durch die Eigenschaften der verfügbaren Pflanzen limitiert. Rückgekoppelt mit der Optimierung der Fruchtfolge könnten Genotypen entwickelt werden, die zum einen an die Fruchtfolge angepasst sind und zum anderen für suboptimale klimatische Bedingungen geeignet sind. Freiheitsgrade für Kreuzungen bestehen dadurch, dass beim Energiepflanzenanbau die Ertragsmasse entscheidend ist (geringere Qualitätsanforderungen als Futter- oder Nahrungspflanzen). Damit können Sorten gekreuzt werden, die vor allem unter den Aspekten Ertrag, Robustheit gegen klimatische Bedingungen (viel oder wenig Regen, Wind), Bodenqualität und Schädlingsresistenz ausgezeichnet sind. Nach Schmidt/Landbeck (2004) wären so z. B. bei Energiemais Ertragsverdoppelungen innerhalb von zehn Jahren möglich. Züchterische Fortschritte werden zudem auch in konventionellen Fruchtfolgen wirksam (IFEU 2005b).

⁶⁷ Im Zwei-Kulturen-System erfolgt die Ernte von zwei Kulturen pro Jahr. Diese Art der Zweifachnutzung ist möglich, wenn die Ausreife der Erstkultur nicht abgewartet werden muss und somit die Vegetationszeit für den Anbau der Zweitkultur gewonnen wird (IE 2005a).

Zur Ausschöpfung des Ertragspotenzials von Hohertragsorten für Bioenergie sind allerdings gute Anbaubedingungen (humus- und nährstoffreiche Böden sowie eine ausreichende Wärme- und Wasserversorgung) sowie ein optimales Management (hinsichtlich Düngung und Pflanzenschutz) erforderlich (Rösch 2006). Zu effizienten Anbausystemen gehören auch mehrjährige Kulturen.⁶⁸

Energetische Nutzung von Getreide

Die direkte energetische Nutzung von Getreide rückt zunehmend als eine weitere Option hinsichtlich einer CO₂-ausgeglichenen Energieerzeugung in den Fokus der Betrachtung. Genutzt werden sollen dafür Stroh und minderwertiges Getreide, welche dezentral sowie unregelmäßig in landwirtschaftlichen Betrieben anfallen, und nicht für die Nahrungsgüterherstellung geeignet sind. Dies würde das energetisch nutzbare Biomassepotenzial weiter erhöhen. Problematisch sind zum einen ethische Bedenken (bei gegebener globaler Versorgungslage potenzielle Nahrungsmittel zu verbrennen) und auf der anderen Seite technische Implikationen (Einhaltung von Grenzwerten [inkl. Dioxinen] bei Verbrennung in Kleinfeuerungsanlagen⁶⁹). Die technische Option der Getreideverbrennung wurde in der vorliegenden Studie nicht weiter untersucht, wäre jedoch in weiterführende Arbeiten zu integrieren.

VI. Flächen- und Nutzungskonkurrenzen bei nachwachsenden Rohstoffen

Sowohl für die Bereitstellung von Biokraftstoffen als auch für den Ausbau der Strom- und Wärmeerzeugung aus Biomasse wurden in Deutschland und Europa ehrgeizige Ziele gesteckt, für deren Erreichung heute bereits beachtliche Flächen benötigt werden. Sollte mittelfristig auch die Bereitstellung von nachwachsenden Rohstoffen für die stoffliche Nutzung größere Bedeutung erlangen als bisher, dann nimmt der Flächenbedarf weiter zu. Die benötigten Flächen sollten jedoch nicht in Konkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion stehen oder zu einem Import von Nahrungsmitteln führen.

Im Folgenden werden ausgewählte Entwicklungsszenarien von Angebot und Nachfrage nach biogenen Ressourcen zusammenfassend dargestellt. Die Ausführungen entsprechen in weiten Teilen denen des Gutachtens IE (2005a).

1. Nachfrage

Die Nachfrage ist zunächst bestimmt durch den Flächenbedarf der Nahrungs- und Futtermittelproduktion, welcher tendenziell abnimmt. Dies ergibt sich aus Ertragssteigerungen beim Nahrungsmittelanbau, die in den letzten drei Jahrzehnten bei über 1 Prozent/Jahr lagen, und einer Flächenstilllegung, welche infolge von Über-

schussproduktion gegenwärtig bei ca. 1 Mio. ha Ackerland liegt (IE 2005a, S. 5). Die gesamte landwirtschaftliche Fläche in Deutschland beträgt etwa 17 Mio. ha, wovon 2005 knapp 12 Mio. ha als Ackerland genutzt wurden (StaBu 2006).

Flächenfreisetzungen

Freiwerdende Flächen können für den Anbau von nachwachsenden Rohstoffen und Energieträgern genutzt werden. Dabei hängt der Umfang freiwerdender Flächen von verschiedenen Faktoren ab (IE 2005a, S. 7) u. a.:

- von der Bevölkerungsentwicklung und dem Pro-Kopf-Verbrauch an Nahrungsmitteln (Mehrverbrauch reduziert, Minderverbrauch vermehrt die Flächen),
- von der erwartbaren Flächenumwidmung von Landwirtschafts- zu Siedlungs- und Verkehrsflächen etc. (reduziert Flächen),
- von Ertragssteigerungen in der Pflanzenproduktion sowie der Reduzierung des Futtermitelesinsatzes (setzt Flächen frei),
- vom Abbau von Exportüberschüssen etwa bei Zucker, Milch und Rindfleisch (Reduzierung der Nahrungsmittelproduktion führt zur Flächenfreisetzung).⁷⁰

Im Vergleich zu 2000 (Basisjahr), wo ein Flächenpotenzial für Bioenergeträger und nachwachsende Rohstoffe zur stofflichen Nutzung von 2,4 Mio. ha⁷¹ abgeschätzt wurde (IFEU 2004a), wird für 2010 eine zusätzliche Flächenverfügbarkeit im Umfang von ca. 2,1 Mio. ha angenommen. Somit würden akkumuliert im Jahr 2010 ca. 4,5 Mio. ha potenzielle Fläche für nachwachsende Rohstoffe zur stofflichen Nutzung und Energieträger zur Verfügung stehen, was ca. 28 Prozent der verfügbaren landwirtschaftlichen Nutzfläche ausmachen würde (IE 2005a, S. 10). Die entsprechende Projektion für das Jahr 2020 ergibt weitere 2,7 Mio. ha Flächenfreisetzung für nachwachsende Rohstoffe und Energieträger, was in der Summe zu etwa 7,2 Mio. ha (bzw. 43 Prozent der verfügbaren landwirtschaftlich genutzten Fläche in Deutschland) führt (IE 2005a, S. 10, ergänzt durch IE 2006b).

Da Grünlandflächen (Wiesen, Weiden) für einen Anbau von nachwachsenden Rohstoffen und Energieträgern nur eingeschränkt zur Verfügung stehen, stellt die in Tabelle 10 aufgeführte Entwicklung der Flächenfreisetzung ein Maximum dar (hier verwendete Zahlenbasis ist Thrän et al. 2005a).

Bei veränderten politischen Rahmenbedingungen der Agrar- und Umweltpolitik fällt diese Flächenfreisetzung vermutlich moderater aus. Um die Spannweite zu verdeutlichen, wurden beispielsweise in DLR et al. (2004) bei einem „ökologisch optimierten Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland“ eine starke Dynamik bei der Etablierung des ökologischen Landbaus, eine weitgehende Umsetzung der Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie sowie umfassende Ausgleichsflächen im Sinne der

⁶⁸ Als mehrjährige Kulturen kommen im Wesentlichen Miscanthus (Chinaschilf) und Pappeln im Kurzumtrieb in Betracht, deren Anbau auf den verfügbaren Flächen mit ökologischen Vorteilen verbunden sein kann (Pröbster 1990).

⁶⁹ Getreide ist derzeit nicht als Regelbrennstoff gemäß BImSchV zugelassen. In einigen Bundesländern gibt es Ausnahmegenehmigungen für die Getreideverbrennung in Kleinfeuerungsanlagen zur Eigennutzung in landwirtschaftlichen Betrieben im Außenbereich (z. B. Baden-Württemberg, Bayern).

⁷⁰ Wichtige Faktoren sind darüber hinaus auch die Ausdehnung des Ökolandbaus, der Fleischanteil in der Ernährung und die Nutzung importierter Futtermittel (z. B. Soja).

⁷¹ 2 Mio. ha Bioenergeträger; 0,6 Mio. ha NaWaRo-Anbau zur stofflichen Nutzung

Tabelle 10

Mögliche Entwicklung der Flächenfreisetzung und des Grünlandanteils in Deutschland (in ha)

	2000	2010	2015*	2020
Flächenfreisetzung insgesamt	2 410 000	4 540 000	5 920 000	7 300 000
davon Grünland	353 000	999 000	1 370 000	1 750 000
Saldo Ackerland	2 057 000	3 541 000	4 550 000	5 550 000

* gemittelte Angaben aus 2010 und 2020 Angaben, gerundet
Quelle: Thrän et al. 2005a, Basis = 2000

Eingriffsregelung unterstellt, sodass dort von moderaten Flächenfreisetzungen – in Abhängigkeit von politischen Rahmenbedingungen – von 2 bis 4,3 Mio. ha bis 2030 ausgegangen wird (nach IE 2005a, S. 10). Letztere wurden in die weitere Betrachtung integriert.⁷²

Aktuelle stoffliche Nutzung

Auf dem Gebiet der stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe gibt es bisher weder auf EU-Ebene noch in Deutschland einen gemeinsamen Handlungsrahmen (z. B. Richtlinien) (WEC 2002). Daher muss für eine zukünftige Konkurrenzbeurteilung von Annahmen hinsichtlich der benötigten bzw. verarbeitbaren Mengen ausgegangen werden. Dies trifft sowohl auf heute bereits in der stofflichen Verarbeitung befindliche Produkte (Kap. III) als auch auf zukünftige Bioraffinerien (Kap. IV) zu. Zu den heute im Anbau befindlichen nachwachsenden Rohstoffen in Deutschland gibt Tabelle 11 einen Überblick.

⁷² In die weitere Betrachtung wurde keine Umwandlung von Grünland angenommen, da hierzu keine belastbaren Studienergebnisse vorliegen.

Für die Ermittlung der Flächen für stofflich genutzte nachwachsende Rohstoffe sind davon diejenigen Flächen abzuziehen, die für die Produktion von Biodiesel und Bioethanol benötigt werden. Bioethanol wird in Deutschland erst seit Ende 2004 produziert (Thrän et al. 2005b) im Gegensatz zur Produktion von Biodiesel, die in den letzten fünf Jahren deutlich zugenommen hat. Die derzeit für den Anbau nachwachsender Rohstoffe zur stofflichen Verwendung insgesamt genutzten Flächen belaufen sich demzufolge auf ca. 496 000 ha (Tabelle 12).

Unter der Annahme eines Marktwachstums von etwa 15 Prozent in zehn Jahren⁷³ und erwarteten landwirtschaftlichen Ertragssteigerungen von jährlich etwa

⁷³ Nach IE (2005a u. b) ist diese Angabe als Obergrenze (unter optimistischen Randbedingungen) anzusehen. Bezug genommen wird dabei weniger auf Zucker und Stärke (seit einiger Zeit konstant), sondern auf Produktsegmente wie Biokunststoffe (BAW aus Milchsäure und Stärke), Naturfaserverbundstoffe (holzfaserverstärkte Kunststoffe, WTC) sowie chemische Produkte aus der weißen Biotechnologie (Fermentation oder Biokatalyse).

Tabelle 11

Anbau nachwachsender Rohstoffe in Deutschland (stofflich und energetisch, in ha)

Rohstoff	2000	2001	2002	2003	2004*
Stärke	125 000	125 000	125 000	125 000	125 000
Zucker	7 000	7 000	7 000	7 000	7 000
Rapsöl	407 978	512 698	662 171	668 753	859 907
Sonnenblumenöl	25 279	24 874	23 983	18 185	10 747
Leinöl	108 296	32 225	9 778	5 365	3 096
Faserpflanzen	4 078	2 018	2 407	2 927	1 992
Heilstoffe	4 606	4 747	4 388	4 693	4 465
sonstiges	1 354	2 765	3 960	5 051	35 352
Anbau insgesamt	683 591	711 328	838 687	836 974	1 047 559

* vorläufig

Quelle: BMELV 2005b, nach IE 2005a, S. 13

Tabelle 12

Anbau nachwachsender Rohstoffe für die stoffliche Nutzung in Deutschland (2004)

Rohstoff	Fläche (ha)	Verwendung u. a.
Ölpflanzen	357 500	biogene Öle, Schmierstoffe, Farben, Tenside etc.
Faserpflanzen	2 000	Textilien, Baustoffe, Dämmstoffe, Papier
Färberpflanzen	45	Textilfärbung, Farben, Kosmetika
Arzneipflanzen	4 500	Pharmaka
Stärke/Zuckerpflanzen	132 000	biologisch abbaubare Werkstoffe, Kleister/Kleber, Arzneimittel, Kosmetika etc.
gesamt (gerundet)	496 000	

Quelle: BMELV 2004; FNR 2005c, nach IE 2005a, S. 14

1,5 Prozent⁷⁴ wird in IE (2005a, S. 14) für 2015 und 2030 die gleiche Bedarfsfläche angenommen wie derzeit für den Anbau nachwachsender Rohstoffe benötigt wird. Demnach würden jährliche Ertragssteigerungen die steigende Nachfrage nach einzelnen nachwachsenden Rohstoffen kompensieren. Für die nachwachsenden Rohstoffe zur stofflichen Nutzung wird somit eine hohe Wertschöpfung bei geringem Flächenbedarf angenommen. Eine signifikante Erhöhung des Flächenbedarfs ist vermutlich zu erwarten, wenn der Massenmarkt stärker mit Produkten auf Basis nachwachsender Rohstoffe bedient werden würde.

Zukünftige stoffliche Nutzung

Für eine zukünftige stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen in potenziellen Bioraffineriesystemen wird nach Einsatzstoffen (Lignocellulose etc.) unterschieden

⁷⁴ Hinsichtlich der stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe (Arznei-, Faser-, Stärkepflanzen etc.) wird eine Ertragssteigerung von 1,5 Prozent unterstellt. Diese Angabe stellt ein gewichtetes Mittel dar (u. a. nach dem CAPSIM-Modell der Universität Bonn, mit welchem Marktbalancen von landwirtschaftlichen Roherzeugnissen erstellt werden). Die Angaben stammen aus IFEU (2004b).

(Kap. IV). Nach Angaben von Biopos (2005b) könnten – in Anlehnung an die US-Ziele – für grüne Bioraffinerien (Verarbeitung von Gras, Luzerne, Klee u. a.) zur Herstellung von Chemikalien oder Materialien für 2015 etwa 2 Mio. t und für 2030 rund 6 Mio. t nachgefragt werden. Diese Angaben basieren auf einem Trockensubstanzgehalt von 100 Prozent. Zudem wird für die Rohstoffe der grünen Bioraffinerie ein durchschnittlicher Hektarertrag von etwa 8 t (Feuchtmasse) angenommen, wie er für Futtergräser mit einem Wassergehalt von 15 Prozent angegeben wird (FNR 2005d). Der Rohstoffbedarf von Bioraffinerien auf Basis von Lignocellulose (Holz, Stroh, Getreide/Haferschalen, Heu u. a.) wird für 2015 mit etwa 5 Mio. t (Trockenmasse) und für 2030 mit ca. 15 Mio. t angenommen (Biopos 2005b). Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich hierbei momentan eher um programmatische Ziele handelt.

Der Lignocellulose-Feedstock wird im Folgenden als Reststoff eingeordnet, während die Rohstoffe für grüne Bioraffinerien für die weiteren Betrachtungen als Anbau-biomasse betrachtet werden. Aus diesem Grund ist für die Diskussion der Flächenkonkurrenz lediglich der Flächenbedarf der grünen Bioraffinerie relevant (Tabelle 13).

Tabelle 13

Nachfrage nachwachsender Rohstoffe für den Einsatz in Bioraffinerien

	2015		2030	
	grüne Bioraffinerie	LCF-Bioraffinerie	grüne Bioraffinerie	LCF-Bioraffinerie
Fläche (ha)	250 000		625 000	
Ertrag (t/ha)	8		8	
Nachfrage (t/Jahr)	2 Mio.	5 Mio.	6 Mio.	15 Mio.
Wassergehalt (in %)	15	18	15	18
Energiegehalt (PJ)	27	73	82	219

Quelle: IE 2005a, S. 12, ergänzt durch IE 2006a; Daten aus Biopos 2005b, FNR 2005d

Energetische Nutzung

Die Zahl der Biogasanlagen zur Strombereitstellung hat – seit dem Start des Marktanreizprogramms (MAP) und dem Inkrafttreten des EEG – kontinuierlich zugenommen. Die installierte elektrische Leistung lag im Mai 2005 bei rund 350 MW (IE 2005a, S. 16). Auch bei Biomasse(heiz)kraftwerken ist bezogen auf die Stromerzeugung eine dynamische Entwicklung zu verzeichnen: In Deutschland sind etwa 120 Kraftwerke bzw. Heizkraftwerke im Leistungsbereich bis 20 MW_{el} in Betrieb (Stand April 2005), die ausschließlich mit festen Biomassen gemäß Biomasseverordnung befeuert werden (IE 2005c). Derzeit kann noch ein Großteil der nachgefragten Bioenergieträger durch Reststoffe gedeckt werden. Sollte die Nachfrage durch den Einsatz dieser Reststoffe nicht in ausreichender Menge gedeckt werden können, so ist ein Ausweichen auf Anbauflächen unumgänglich. Durch die speziellen Vergütungsregelungen des EEG sind hier bereits teilweise Verlagerungen festzustellen⁷⁵ (IE 2005a, S. 17).

Als Biokraftstoffe wurden bis Ende 2004 fast ausschließlich Biodiesel (RME) und zu einem geringen Anteil naturbelassenes Rapsöl genutzt. Die Produktion und Nutzung von Biodiesel lag in Deutschland Ende 2004 bei ca. 1,21 Mio. t/Jahr (entspricht etwa 44 PJ/Jahr) (Thrän et al. 2005b). Zusätzlich können in Deutschland seit Ende 2004 jährlich ca. 500 000 t Bioethanol produziert werden, welches derzeit hauptsächlich als Beimischung in Form von ETBE (Ethyltertiärbutylether – ein Antiklopfmittel auf Basis von Bioethanol) genutzt wird (Thrän et al. 2005b). Der Anteil an Biokraftstoffen soll jedoch planmäßig weiter steigen – gemäß der EU-Kraftstoffdirektive 2003 (2003/30/EG) bis 2010 auf 5,75 Prozent (gemessen am Energiegehalt aller Otto- und Dieselmotorkraftstoffe). Zudem wird im Grünbuch der Kommission „Hin zu einer europäischen Strategie für Energieversorgungssicherheit“ das Ziel der 20%igen Substitution konventioneller Kraftstoffe durch alternative Kraftstoffe im Bereich des Straßenver-

⁷⁵ Beispielsweise wird Mais für Biogasanlagen angebaut, da ein NaWaRo-Bonus von 0,06 Euro/kWh(el) vergütet wird (nach novelisiertem EEG), wenn angebaute Biomasse als Rohstoff eingesetzt wird. Dadurch hat sich die Anbaufläche für Energiemais in kurzer Zeit stark ausgedehnt.

kehr bis 2020⁷⁶ aufgeführt. Gegenwärtig sind in Deutschland nur die Optionen Biodiesel und Bioethanol aus Zucker und Stärke verfügbar. Die Nutzung von Biogas als Kraftstoff ist in Deutschland nur in wenigen Pilotanlagen realisiert. Andere Bioenergieträger gelten gegenwärtig als Zukunftstechnologien – dabei wird für Bioethanol aus Lignocellulose und synthetische Kraftstoffe eine mittelfristige Marktablierung erwartet, für Wasserstoff hingegen frühestens in zwei Jahrzehnten (Thrän et al. 2005b). Weitere Ausführungen zu Anteilen der Biomassenutzung in den Bereichen Wärme und Strom sowie Kraftstoffe finden sich in Kapitel V.

2. Angebot

Das Angebot an nachwachsenden Rohstoffen und Energieträgern wird durch die sogenannten Biomassepotenziale beschrieben. Diese umfassen sowohl biogene Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle als auch Energiepflanzen. Dabei kann zwischen theoretischen, technischen, wirtschaftlichen und erschließbaren Potenzialen unterschieden werden (Anhang 11). Für die Abschätzung des kurz- und mittelfristig verfügbaren Angebotes werden nachfolgend das technische Roh- bzw. Brennstoffpotenzial sowie das technische Kraftstoffpotenzial dargestellt. Die Beschreibung des Biomassepotenzials erfolgt energiebezogen.⁷⁷

Das technische Roh- bzw. Brennstoffpotenzial

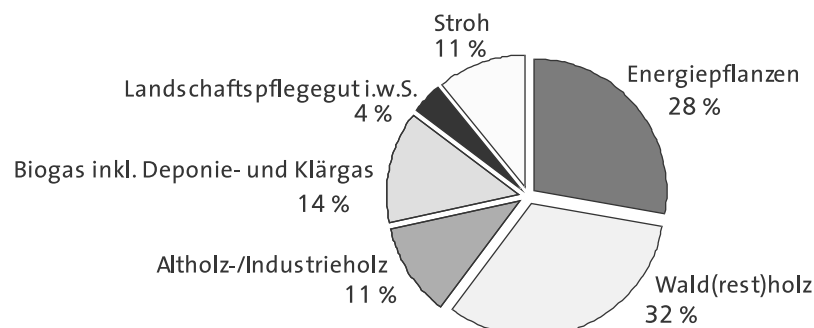
Das technische Roh- bzw. Brennstoffpotenzial aus Biomasse für Deutschland kann gegenwärtig auf ca. 1 200 PJ/Jahr geschätzt werden. Es setzt sich zusammen aus Reststoffen, Waldholz, welches nicht für eine stoffliche Nutzung vorgesehen ist, sowie Energiepflanzen, die auf Stilllegungsflächen angebaut werden (Abbildung 46). Mit diesem Potenzial könnten ungefähr 8 Prozent des deutschen Primärenergieverbrauchs gedeckt werden (IE 2005a, S. 30).

⁷⁶ Nach Auffassung des Mineralölwirtschaftsverbandes werden trotz Rückgang des Kraftstoffabsatzes dagegen auch 2020 noch über 90 Prozent des Bedarfs durch fossile Kraftstoffe gedeckt werden (MWV 2005b).

⁷⁷ Dies hat gegenüber einer massenbezogenen Darstellung den Vorteil, dass die unterschiedlichen Energiedichten der Biomassen (z. B. durch unterschiedliche Wassergehalte) nicht einbezogen werden müssen (IE 2005a).

Abbildung 46

Zusammensetzung des gegenwärtigen technischen Biomassepotenzials in Deutschland 2004



Quelle: Thrän 2005

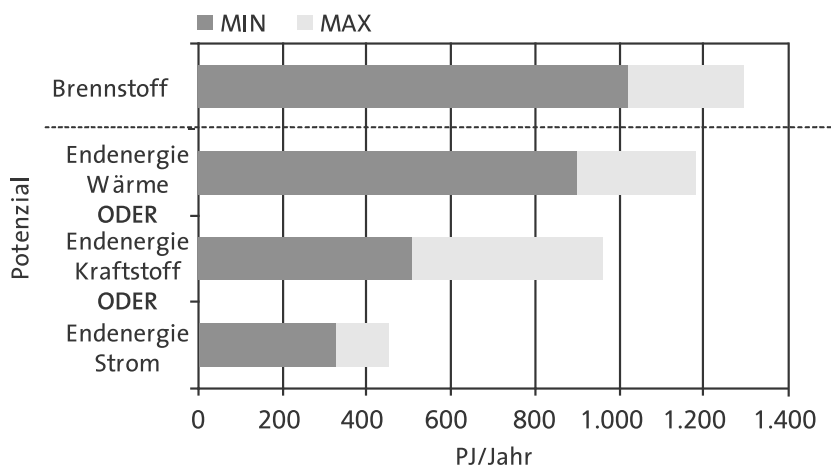
Aus dem technischen Brennstoffpotenzial lässt sich z. B. – bei Annahme typischer Wirkungsgrade und Verluste – das Strom-, Wärme- oder Kraftstoffpotenzial ableiten. Dabei wird unterstellt, dass das verfügbare Brennstoffpotenzial für die verschiedenen Endenergieoptionen jeweils vollständig zur Verfügung steht. Demnach kann das gegenwärtige Brennstoffpotenzial im Energiesystem (hier als Bandbreite von ca. 1 000 bis 1 300 PJ/Jahr dargestellt) entweder ca. 20 Prozent

der Bruttostromerzeugung, ca. 40 Prozent der Wärmenachfrage (Niedertemperatur) oder ca. 20 bis 35 Prozent des Kraftstoffbedarfs decken (Abbildung 47) (Thrän 2005). Alternativ ist eine stoffliche bzw. rohstoffliche Nutzung möglich.⁷⁸

⁷⁸ An eine stoffliche Nutzung ist im Regelfall eine energetische Nutzung anschließbar (sog. Kaskadennutzung).

Abbildung 47

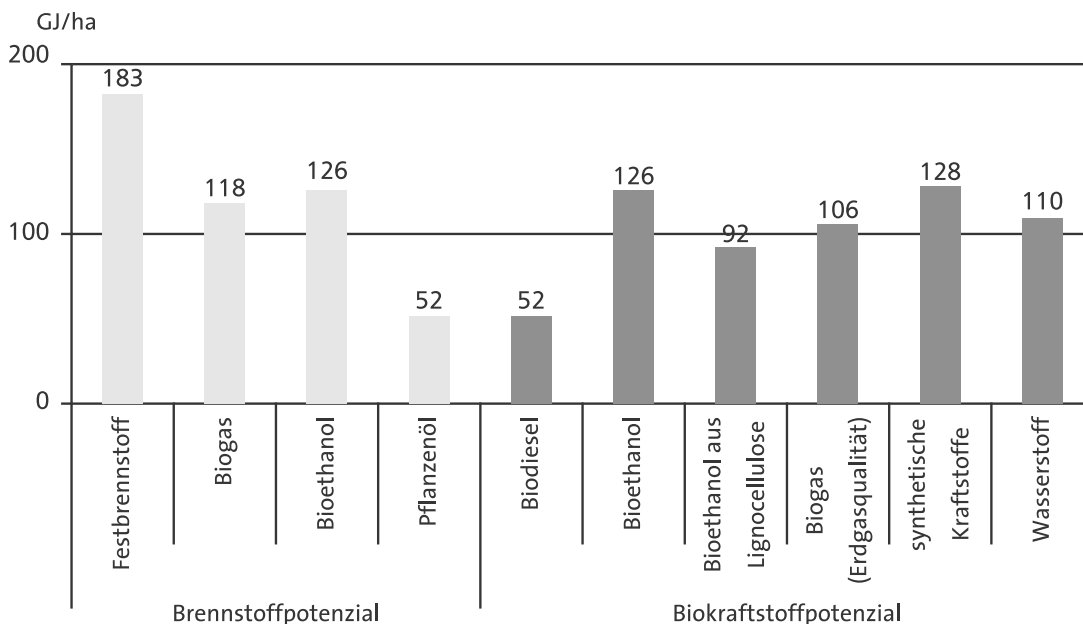
Einsatzmöglichkeiten des gegenwärtigen technischen Brennstoffpotenzials im Energiesystem



Quelle: Thrän 2005

Abbildung 48

Technisches Brennstoff- und Biokraftstoffpotenzial verschiedener Biokraftstoffe (flächenbezogen) für Deutschland



Bioethanol aus Weizen bzw. Zuckerrüben, Pflanzenöl aus Rapsöl/RME, Biogas aus Reststoffen (Gülle) und Anbaubiomas (Mais).
 Quelle: IE 2005a, S. 34, auf Basis von Daten aus Thrän et al. 2005b

Die Spanne zwischen minimalem und maximalem Endenergiepotenzial ist bei den Kraftstoffen besonders hoch. Dies ist zum einen in der noch geringen technischen Reife vieler Umwandlungssysteme (und den damit verbundenen Unsicherheiten), zum anderen aber auch in der Vielzahl der technischen Möglichkeiten zur Kraftstoffbereitstellung begründet. Dieses Potenzial wird daher nachfolgend detailliert betrachtet.

Technisches Biokraftstoffpotenzial

Als Biokraftstoffe werden gegenwärtig Biodiesel, Bioethanol aus zucker- und stärkehaltigen Pflanzen, Bioethanol aus Lignocellulose, synthetische Kraftstoffe aus Lignocellulose, aufbereitetes Biogas und Wasserstoff diskutiert. Diese Kraftstoffe können in unterschiedlichem Maße aus Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen sowie Energiepflanzen erzeugt werden. Dabei unterscheiden sich die Kraftstoffe sowohl in der Breite der Rohstoffbasis als auch in der Ausbeute. Um dies zu verdeutlichen zeigen Abbildung 48 exemplarisch den flächenspezifischen Ertrag verschiedener Brennstoffe und Biokraftstoffe (nur Anbaubiomasse) und Abbildung 49 die technischen Potenziale unter zusätzlicher Berücksichtigung von Reststoffen. Während Biodiesel und herkömmliches Bioethanol ausschließlich aus Energiepflanzen herstellbar sind, können für die übrigen Kraftstoffe auch Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle eingesetzt werden. Daher ergeben sich hier für synthetische Kraftstoffe und Wasserstoff rechnerisch die höchsten Potenziale, wobei anzumerken ist, dass gerade diese beiden Biokraftstoffe in der technischen Entwicklung noch am

Anfang stehen und eine nennenswerte Marktetablierung vor 2020 nicht erwartet werden kann (Abbildung 49).

Biomassepotenzial

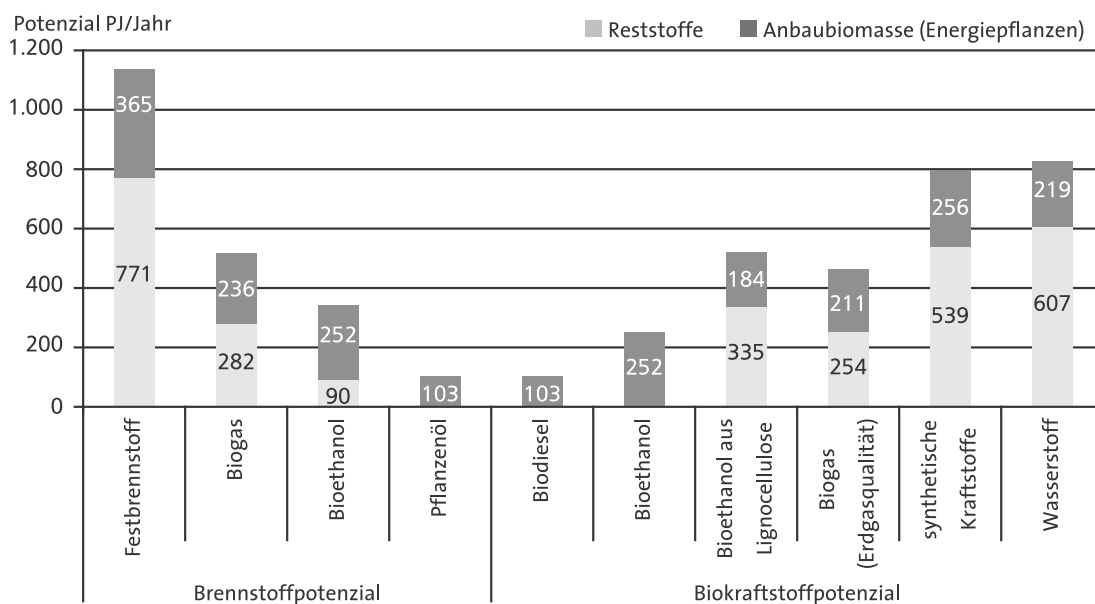
Das künftige Biomassepotenzial ist wesentlich von der weiteren Entwicklung der Nahrungs- und Futtermittelproduktion beeinflusst. Diese kann mit entsprechenden Unsicherheiten zwar abgeschätzt werden, führt jedoch je nach Annahmen für das künftige Biomassepotenzial zu unterschiedlichen Szenarien. Zudem sind Weiterentwicklungen beim Energiepflanzenanbau sowie bei den Verarbeitungs- bzw. Energieerzeugungstechnologien zu berücksichtigen. Letztere tragen mit etwa 0,1 Prozent/Jahr (DLR et al. 2004) gegenüber den Ertragssteigerungen in der Landwirtschaft mit etwa 1,5 Prozent/Jahr nur untergeordnet zur gesamten Leistungssteigerung der Nutzung von nachwachsenden Energieträgern bei.

Die nachfolgende Darstellung künftiger Biomassepotenziale basiert auf den Szenarien des Projekts „Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland“ (DLR et al. 2004). Die Randbedingungen der dort entwickelten Szenarien – Basis und Naturschutz-Plus⁷⁹ – finden sich in den Kapiteln V.2 und V.3. Wesentlich ist, dass die zukünftigen Potenziale an Reststoffen als vergleichsweise konstant angesehen werden, dagegen für Anbaubiomassen – infolge des rückläufigen Flächenbe-

⁷⁹ Das NaturschutzPlus-Szenario wird im Folgenden als Nachhaltigkeitsszenario bezeichnet, da hier für die stoffliche Nutzung weitere Annahmen einfließen.

Abbildung 49

Technisches Brennstoff- und Biokraftstoffpotenzial verschiedener Biokraftstoffe für Deutschland



Annahme: 2 Mio. ha Fläche für Energiepflanzenanbau; Bioethanol aus Weizen bzw. Zuckerrüben, Pflanzenöl aus Rapsöl/RME, Biogas aus Reststoffen (Gülle) und Anbaubiomasse (Mais).
 Quelle: IE 2005a, S. 35, auf Basis von Daten aus Thrän et al. 2005b

darfs für die Nahrungsmittelproduktion – künftig erhebliche Flächen frei werden (Thrän et al. 2005b).

3. Nutzungs- und Flächenkonkurrenzen

Um die Problematik zukünftiger Nutzungs- und Flächenkonkurrenzen aufzuzeigen, wird auf verfügbare Szenarien der energetischen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen zurückgegriffen, die plausibel um die stoffliche Nutzung ergänzt wurden. Als Grundlage für die Identifizierung von Konkurrenzen wurden die Szenarien aus DLR et al. (2004) verwendet.

Überblick und Annahmen

Zur Identifizierung von Nutzungskonkurrenzen wird die Nachfrage nach nachwachsenden Rohstoffen und Energieträgern dem vorhandenen Potenzial gegenübergestellt. Einen Überblick über die technischen Potenziale und die angenommenen Nachfrage für 2015 und 2030 findet sich in Tabelle 14, wobei jeweils das Basis- und das Nachhaltigkeits-

szenario betrachtet werden. Zur Vergleichbarkeit der Daten wird die Nachfrage für Strom, Wärme und Kraftstoffe⁸⁰ in Brennstoffäquivalenten angegeben. Zudem wird für 2015 ein mittlerer Wirkungsgrad von 56 Prozent sowie – aufgrund von Effizienzsteigerungen – für 2030 ein Wirkungsgrad von 60 Prozent angenommen (Thrän et al. 2005a). Für 2030 kann aufgrund der fehlenden Datenlage die Nachfrage nur abgeschätzt werden: Dazu wurde die Nachfrage anhand von Daten der „FORRES-Studie“ (Ragwitz et al. 2005) von 2020 extrapoliert.

Weiterhin wird u. a. unterstellt, dass die Erzeugung von Biokraftstoffen bis 2015 nur über Biodiesel und Bioethanol erfolgt (Fritsche et al. 2004; Thrän et al. 2005a), wozu ein entsprechender Energiepflanzenanbau notwendig

⁸⁰ Datengrundlage: FORRES 2020 (Ragwitz et al. 2005) und ergänzende Annahmen zu den künftigen Zielen der EU-Biotreibstoffdirektive (Kap. VI.1).

Tabelle 14

Gesamtüberblick über Potenziale und Nachfrage energetischer und stofflicher Nutzung nachwachsender Rohstoffe (in PJ/Jahr)

	Szenario Basis		Szenario Nachhaltigkeit	
	2015	2030	2015	2030
<i>technisches Potenzial¹</i>				
Festbrennstoffe inkl. Waldholz	739	748	541	564
Biogas	154	150	145	141
Energiepflanzen 100 % flüssig (min) ²	257	375	106	332
Energiepflanzen 100 % fest (max) ²	502	731	158	493
<i>Nachfrage Strom/Wärme/Kraftstoffe³</i>				
Brennstoffäquivalent Wärme	457	447	689	718
Brennstoffäquivalent Strom	207	248	258	305
Brennstoffäquivalent Kraftstoffe	200	282	535	735
<i>Nachfrage „stoffliche Nutzung“ und Bioraffinerien</i>				
LCF-Bioraffinerie ⁴	73	219	73	219
grüne Bioraffinerie ⁴	27	68	27	68
stoffliche Nutzung NawaRo ⁵	78	97	78	97

¹ Datenbasis „Stoffstromanalyse-Studie“ (Fritsche et al. 2004)

² In DLR et al. (2004) werden u. a. zwei Szenarien für das Potenzial der Energiepflanzen aufgeführt: Im Szenario „100 Prozent flüssig“ wird vereinfachend unterstellt, dass alle angebauten Energiepflanzen zur Produktion von Biokraftstoffen (Biodiesel, Bioethanol) genutzt werden und im Szenario „100 Prozent feste“ wird die verfügbare Fläche vollständig für den Anbau fester Biomasse zur Energiegewinnung (Kurzumtriebsplantagen, Biogas) genutzt (Abbildung 44). In der Realität ist zwar ein Anbaumix wahrscheinlich, dennoch wird hier ein Korridor aufgezeigt, in dem das Potenzial der flüssigen Bioenergieträger als Minimum und das der festen Bioenergieträger als Maximum zu sehen ist (IE 2005a).

³ Datenbasis „FORRES-Studie“ (Ragwitz et al. 2005)

⁴ Datenbasis von Biopos (2005) sowie eigene Berechnungen von IE (2005a)

⁵ Datenbasis Statistisches Bundesamt/BMELV: Anbau nachwachsender Rohstoffe zur stofflichen Nutzung, sowie eigene Berechnungen (BMELV 2004; BMELV 2005b)

Quelle: IE 2005a, S. 39

ist.⁸¹ Der hierfür berücksichtigte Flächenbedarf für 2015 bezieht sich somit ausschließlich auf Anbaubiomasse, wobei eine ambitionierte Nachfrage nach Biotreibstoffen unterstellt wird. Für 2030 wird zusätzlich eine technische Verfügbarkeit von Anlagen zur Bereitstellung von Ethanol aus Lignocellulose und synthetischen Kraftstoffen (BTL) angenommen. Zur Herstellung von Biokraftstoffen sind dann sowohl Reststoffe als auch Energiepflanzen verwendbar, wobei lignocellulosehaltige Biomasse grundsätzlich als vorteilhaft angesehen wird. Für Reststoffe wird kein Flächenbedarf unterstellt. Für die Darstellung der Flächenkonkurrenz wird Folgendes angenommen: Ist die Nachfrage nach Reststoffen größer als vom (technischen) Potenzial her möglich, wird ein zusätzlicher Bedarf von Anbaubiomasse unterstellt. Dies ist insbesondere bei den Nachhaltigkeitsszenarien der Fall (weitere Details IE 2005a, S. 40 f.).

Nutzungs- und Flächenkonkurrenz heute

In DLR et al. (2004) wurde für das Jahr 2000 keine Anbaufläche für nachwachsende Rohstoffe und Energieträger ausgewiesen, da ein Anbau zu diesem Zeitpunkt eine untergeordnete Bedeutung hatte. Die gegenwärtige Biomassenutzung zur stofflichen und energetischen Verwertung schöpft auch die bestehenden biogenen Reststoffpotenziale nur teilweise aus. Erwartungsgemäß wird der Anbau von Rohstoffen und Energieträgern zukünftig zu einem entsprechend hohen Bedarf an Ackerflächen führen. Kurz- und mittelfristig wird dies insbesondere für die Bereitstellung biogener Kraftstoffe zutreffen (aufgrund nationaler und europäischer Zielsetzungen). Auch für die Stromerzeugung aus Biomasse (nach EEG-Vergütung) werden voraussichtlich weitere Flächen, insbesondere für den Anbau von Biogassubstraten, benötigt werden (IE 2005a, S. 41).

Nutzungs- und Flächenkonkurrenz 2015

Im Fall des Basisszenarios für 2015 kann die Nachfrage für die stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen – inkl. eines potenziell unterstellten Einsatzes in Bioraffinerien – sowie die energetische Nachfrage für Strom, Wärme und Kraftstoffe durch die vorhandenen Potenziale gedeckt werden.

Im Nachhaltigkeitsszenario für 2015 wird zum einen von einem eingeschränkten technischen Potenzial an Anbaubiomasse und Reststoffen ausgegangen (umwelt- und naturschutzbedingte Restriktionen). Zum anderen wird unterstellt, dass der Bedarf an Strom, Wärme und Kraftstoffen verstärkt aus erneuerbaren Energien bzw. Biomasse gedeckt wird. Beide Faktoren führen dazu, dass die Nachfrage (stoffliche und energetische Nutzung) bereits 2015 deutlich größer sein dürfte als das verfügbare Angebot an Anbaubiomasse und Reststoffen. Im Fall einer

nachhaltigen Nutzung verfügbarer Biomassepotenziale reichen die in 2015 verfügbaren Reststoffe demzufolge nicht aus, um alle darauf ausgerichteten Nutzungsinteressen zu bedienen (LCF-Bioraffinerie, Strom, Wärme) (IE 2005a, S. 42). Die Mehrnachfrage nach Reststoffen müsste dann etwa durch den zusätzlichen Anbau von Energiepflanzen⁸² – insbesondere durch den Anbau von Lignocellulose (z. B. Kurzumtriebsplantagen, Miscanthus) – abgedeckt werden.

In den Abbildungen 50 und 51 sind die technischen Biomassepotenziale und die stoffliche und energetische Nachfrage für das Basis- und das Nachhaltigkeitsszenario grafisch dargestellt. Daraus sind potenzielle Nutzungs- und Flächenkonkurrenzen ableitbar.

Zu erkennen ist, dass die Hauptnachfrage im Jahr 2015 an nachwachsenden Rohstoffen nach wie vor energetisch dominiert ist. Bei Reststoffen gäbe es – unter den gesetzten Annahmen – eine Nutzungskonkurrenz: Eine erhebliche Nachfrage nach Reststoffen bestünde hier zum einen bei der Strom- und Wärmeerzeugung und zum anderen zur Deckung des Rohstoffbedarfs von (potenziellen) LCF-Bioraffineriesystemen (bzw. LCF-Teilsystemen). Aufgrund der Einschränkung der Flächen, die unter Berücksichtigung von Naturschutzbelangen für den Anbau von Energiepflanzen verfügbar wären, könnte die Nachfrage nach Anbauflächen jedoch nicht ausreichend gedeckt werden. Somit wären bereits 2015 Nutzungs- und Flächenkonkurrenzen zwischen der stofflichen und der energetischen Nachfrage nachwachsender Rohstoffe zu erwarten (IE 2005a, S. 42).

Nutzungs- und Flächenkonkurrenz 2030

Eine Vorausschau bis 2030 ist ungleich schwieriger durchzuführen, da hierfür kaum verlässliche Daten zur Verfügung stehen. Die energetische Nachfrage (Strom, Wärme, Kraftstoffe) kann bis 2020 anhand der FORRES-Studie (Ragwitz et al. 2005) abgebildet werden, wobei bereits 2020 voraussichtlich nicht mehr genügend Reststoffe verfügbar sein werden. Angenommen wird für 2030, dass die Nachfrage nach Kraftstoffen in erster Linie auf Reststoffen wie Lignocellulose basiert, weil Verfahren zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen (BTL) und Bioethanol aus Lignocellulose Marktreife erlangt haben werden. Weiterhin könnten aber auch biogene Kraftstoffe wie Biogas, Biodiesel und Bioethanol aus Anbaubiomasse an Bedeutung gewinnen.

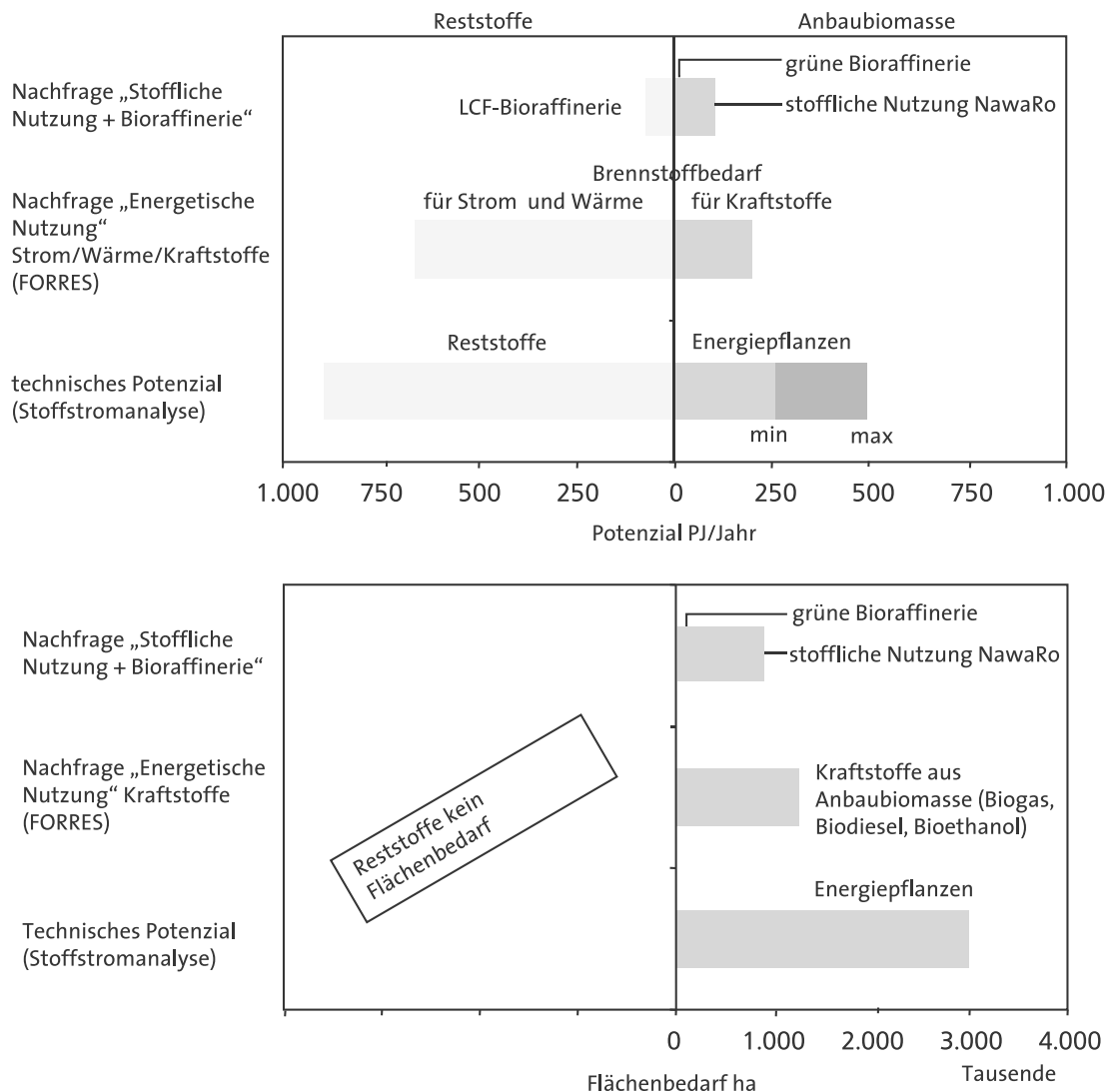
Obwohl die Datenlage für 2030 dürftig ist, kann tendenziell erwartet werden, dass die Diskrepanz zwischen der Nachfrage nach nachwachsenden Rohstoffen und der verfügbaren Biomasse größer wird. Diese Abschätzung in Bezug auf die energetische Nachfrage ist in den grafischen Darstellungen (Abbildung 52 u. 53) mit Pfeilen angedeutet. In diesem Fall muss die Nachfrage nach stofflicher und en-

⁸¹ Grundsätzlich ebenfalls als Kraftstoff künftig interessant ist aufbereitetes Biogas (aus Reststoffen oder aus Anbaubiomasse). Da seine Marktetablierung u. a. durch die mittelfristige Steuerreduzierung von Erdgas ungewiss ist, wird es im Folgenden nicht weiter betrachtet (IE 2005a).

⁸² Zur Ermittlung dieser zusätzlichen Anbauflächen für Energiepflanzen zur Strom- und Wärmeproduktion wurden die nicht durch Reststoffe gedeckten Brennstoffäquivalente als biogene Festbrennstoffe in Form von Energiepflanzen unterstellt und in einen entsprechenden Anbauflächenbedarf umgerechnet (IE 2005a).

Abbildung 50

Nutzungs- und Flächenkonkurrenz für das Basisszenario 2015



min bzw. max bezieht sich auf Fußnote 2 in Tabelle 14
 Quelle: IE 2005a, S. 43, auf Basis von Daten aus DLR et al. 2004

ergetischer Nutzung nachwachsender Rohstoffe zusätzlich durch den Anbau von Energiepflanzen gedeckt werden (IE 2005a, S. 45). Unter den gegebenen Annahmen wird auch im Basisszenario für 2030 impliziert (Abbildung 52), dass Reststoffe nicht in ausreichender Menge zur Deckung der Nachfrage zur Verfügung stehen.

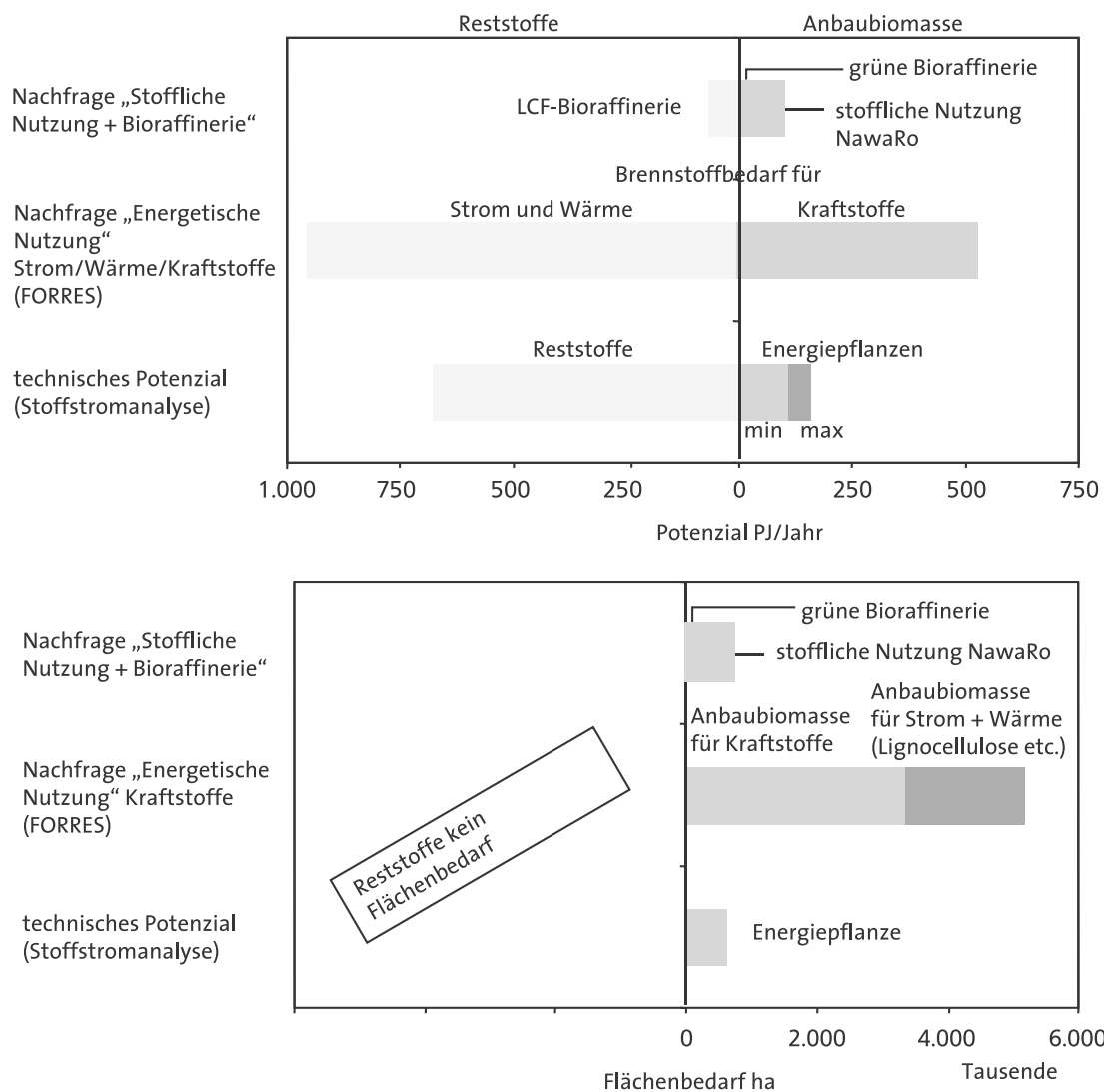
Eine grafische Darstellung der Flächenkonkurrenz ist aufgrund der Datenlage für 2030 nicht möglich; jedoch kann in erster Näherung davon ausgegangen werden, dass die Effekte hinsichtlich der Flächenkonkurrenz denen der Nutzungskonkurrenz vergleichbar sind. Für das Jahr 2030 wird zudem angenommen, dass die vorhandene technische Vielfalt zur Konversion von Reststoffen eine Koppelung an Anbaubiomasse nicht mehr notwendig macht. Es werden dann vermutlich eher wirtschaftliche Restriktio-

nen sein, die ein Ausweichen auf Anbaubiomasse notwendig machen (IE 2005a, S. 45).

Im Vergleich zum Basis- ist im Nachhaltigkeitsszenario (Abbildung 53) das Angebot an Reststoffen und Anbaubiomasse bereits aufgrund naturschutzrelevanter Restriktionen von vorneherein eingeschränkt. Zudem wird davon ausgegangen, dass sich der Anteil erneuerbarer Energieträger zur Deckung des Strom-, Wärme- und Kraftstoffbedarfs weiterhin stark entwickeln wird. Die bereits 2015 auftretende, nicht ausreichend abdeckbare Nachfrage nach Reststoffen würde sich in 2030 weiter verstärken und damit auch die Nachfrage nach Anbauflächen für Energiepflanzen (z. B. für einen zusätzlichen Anbau von Lignocellulose) als Ausgleich. Letztere wären jedoch aufgrund von Naturschutzbelangen begrenzt verfügbar.

Abbildung 51

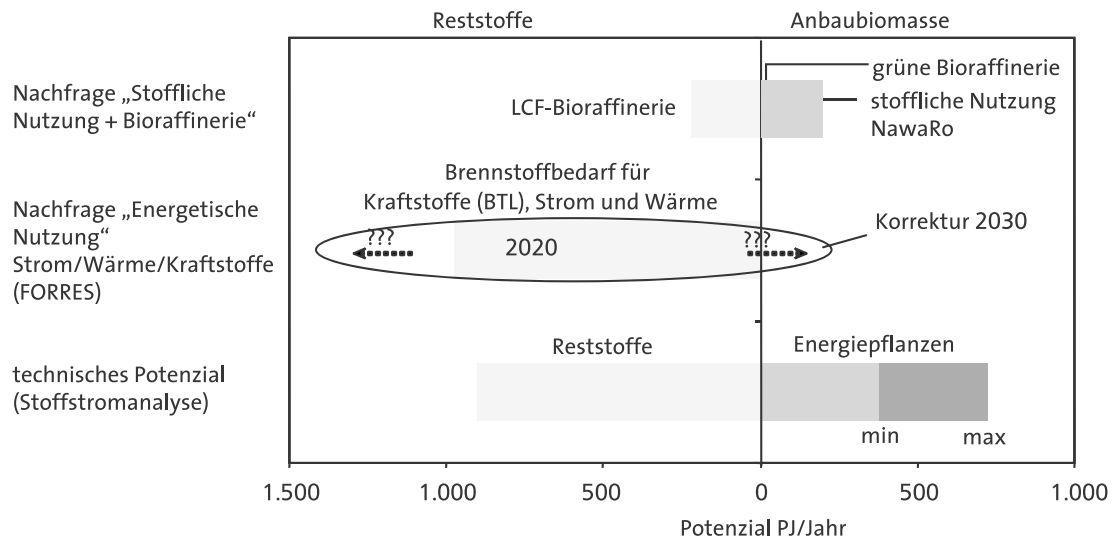
Nutzungs- und Flächenkonkurrenz für das Nachhaltigkeitsszenario 2015



min bzw. max bezieht sich auf Fußnote 2 in Tabelle 14
 Quelle: IE 2005a, S. 44, auf Basis von Daten aus DLR et al. (2004)

Abbildung 52

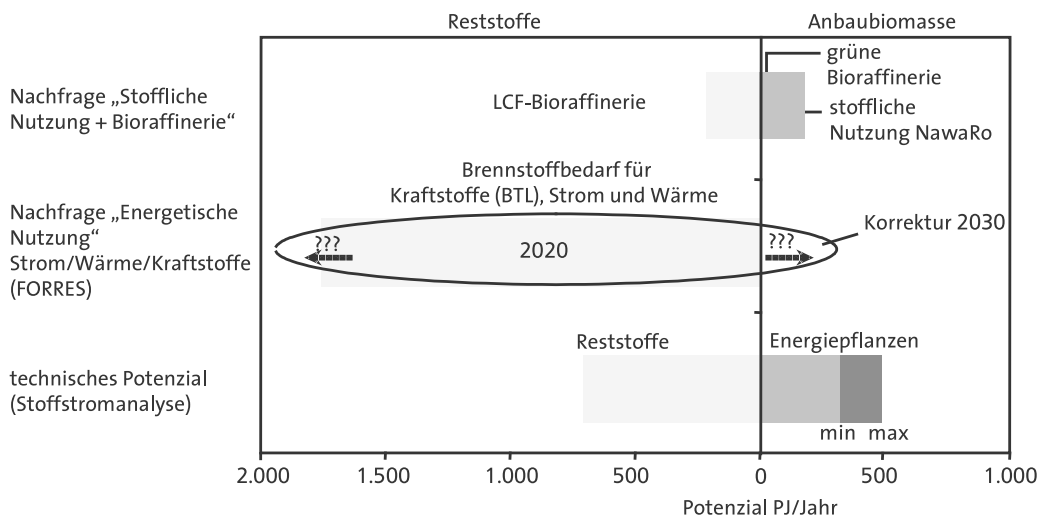
Technisches Potenzial und Bedarf (in Brennstoffäquivalenten) für das Basisszenario 2030



Die Nachfrage der energetischen Nutzung ist in der FORRES-Studie bis 2020 dokumentiert, die „Korrektur 2030“ soll verdeutlichen, dass die Nachfrage je nach Rahmenbedingung in beide Richtungen variieren kann.
Quelle: IE 2005a, S. 46

Abbildung 53

Potenzial und Bedarf in Brennstoffäquivalenten für das Nachhaltigkeitsszenario 2030



Die Nachfrage der energetischen Nutzung ist in der FORRES-Studie bis 2020 dokumentiert, die „Korrektur 2030“ soll verdeutlichen, dass die Nachfrage je nach Rahmenbedingung in beide Richtungen variieren kann.
Quelle: IE 2005a, S. 47

Flächenqualitäten

Die weiter führende Berücksichtigung von Flächenqualitäten, also die Integration von nachwachsenden Rohstoffen und Energieträgern in die bestehende landwirtschaftliche Produktion, ließe verfeinerte Aussagen hinsichtlich der daraus resultierenden Umwelteffekte und Anbaumengen zu, z. B. hinsichtlich eines nachhaltigen Anbaus nachwachsender Rohstoffe (Ökolandbau, neue Anbausysteme). Eine Integration von Flächenqualitäten in die Abschätzung der Biomassepotenziale bleibt weiter führenden Studien vorbehalten, wobei es prinzipiell um folgende Aspekte geht: Geht man davon aus, dass die bestehenden Anbausysteme hinsichtlich der Flächenqualitäten eine langjährige Optimierung der Anbausysteme erfahren haben, kann die Integration nachwachsender Rohstoffe und Energieträger zunächst umso einfacher erfolgen, je näher sie dem bestehenden Anbaumix kommt. Dieser verändert sich u. a. im Hinblick auf den Zuckerrübenanbau, wo die Änderung der EU-Zuckermarkttrichtlinie eine entscheidende Rolle spielt. Mit dem Fall der Zuckermarktordnung 2006 könnte sich der Anbau von Zuckerrüben aufgrund der Preissenkungen unter Umständen in vielen Regionen nicht mehr rentieren, sodass Zuckerrüben durch Alternativen wie Mais oder Getreide ersetzt werden (IE 2005a, S. 49). Mittelfristig können sich zudem zusätzliche Effekte auf die Flächenqualitäten ergeben, wenn es gelingt, neue effiziente Anbausysteme für Rohstoffe und Energieträger zu etablieren. Dazu gehören das Zwei-Kulturen-System, Anbau von Energiemais und von mehrjährigen Kulturen. Diese Möglichkeiten werden z. T. kontrovers diskutiert.

4. Wechselwirkungen im europäischen Kontext

Die Diskussion der potenziellen Flächen- und Nutzungskonkurrenzen hat gezeigt, dass sich bei paralleler Verfolgung von nachhaltigen agrar-, umwelt- und energiepolitischen Zielen deutliche Konkurrenzen um das verfügbare Angebot an nachwachsenden Rohstoffen und Energieträgern ergeben können. Diese werden nicht isoliert auftreten, sondern sind im europäischen Kontext zu betrachten. Hierzu stehen auch bereits szenarische Auswertungen von Ragwitz et al. (2005) und Thrän et al. (2005a) zur Verfügung. Für die stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe liegen solche Untersuchungen nicht vor, sodass die daraus zusätzlich resultierenden Effekte nur qualitativ diskutiert werden können. Auch beschränken sich die Studien auf den Zeitraum bis 2020 (IE 2005a). Aus der Sicht eines Basis- und eines Nachhaltigkeitsszenarios ergeben sich für die Nachfrageseite in Europa aus den verfügbaren Studien folgende Hinweise (IE 2005a, S. 57):

- In allen EU-Staaten ist eine von 2000 bis 2020 steigende Nachfrage nach Bioenergieträgern zu verzeichnen.
- Mengenmäßig ist die Nachfrage nach biogenen Energieträgern in der EU-25 wesentlich von den EU-15 bestimmt; gleichzeitig ist in den Beitrittsstaaten (EU+10) der Anteil der Bioenergie am Endenergieverbrauch in der Regel höher.

- Die künftig größte Bioenergienachfrage (bei gleichzeitig moderater Bedeutung für den Gesamtenergieverbrauch) kommt aus Frankreich und Deutschland, gefolgt von Italien und Spanien.
- Die Effekte unterschiedlicher politischer Randbedingungen (Basis- und Nachhaltigkeitsszenario) führen bis zum Jahr 2020 zu einem Nachfrageunterschied um den Faktor 2.
- Im Nachhaltigkeits-Szenario liegt der Beitrag der Bioenergieträger zum Endenergieverbrauch bis 2020 in der Regel unter 30 Prozent.

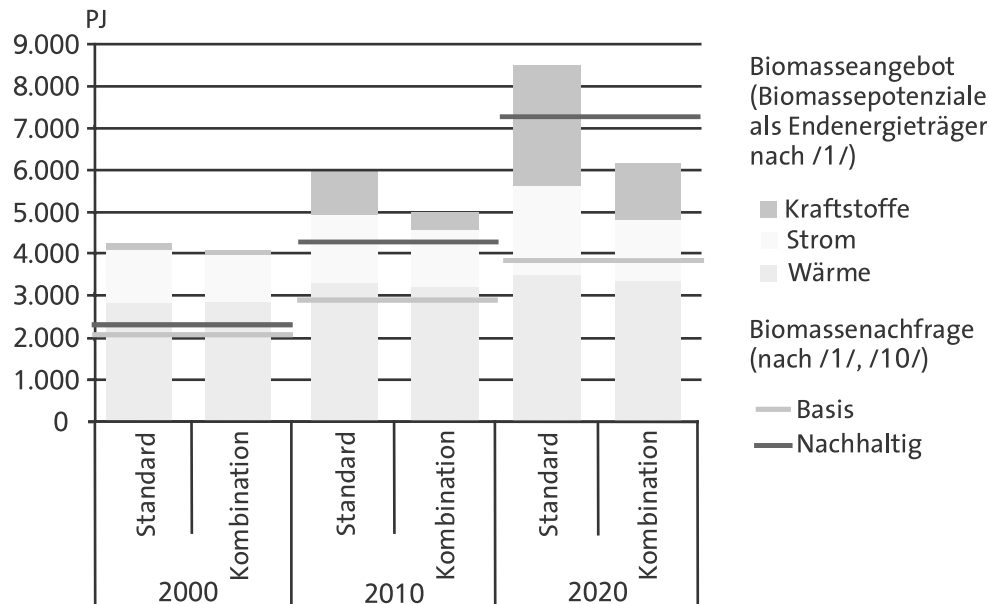
Wie auch für Deutschland ist das europäische Biomassenpotenzial von künftigen Entwicklungen der Flächenfreisetzung aus der Landwirtschaft geprägt. In Thrän et al. (2005a) wurden daher zwei Grenzfälle aufgezeigt: zum einen ein Standardszenario bei Fortschreibung der gegenwärtigen Entwicklungstrends und Nutzung sämtlicher freiwerdender Ackerflächen (welches eine Art Potenzialobergrenze darstellt) und ein Kombinationsszenario (u. a. unter Annahme reduzierter Ertragssteigerungen nach DLR et al. [2004]), welches eine mehr an Nachhaltigkeitskriterien orientierte Agrar- und Umweltpolitik unterstellt. Zusammenfassend lassen sich daraus folgende Aussagen ableiten (IE 2005a, S. 58):

- Die Potenziale aus Reststoffen und Waldholz sind europaweit bis 2020 weitgehend stabil.
- Die Potenziale aus Energiepflanzen zeigen erwartungsgemäß in den beiden Szenarien eine unterschiedliche Dynamik und unterscheiden sich bis zum Jahr 2020 um den Faktor 2 bis 3.
- Die Option des Energiepflanzenanbaus ist nicht in allen europäischen Ländern gegeben; entsprechend zeigt die Entwicklung bis 2020 für einige Länder (z. B. Finnland, Griechenland, Großbritannien, Italien, Slowakei, Türkei) in beiden Szenarien stagnierende bzw. leicht rückläufige Potenziale.
- Deutschland stellt zusammen mit Frankreich, Spanien, Polen und Schweden künftig die wesentlichen Biomassepotenziale in Europa bereit und ist damit – anders als im Bereich der fossilen Referenzsysteme – ein wesentlicher Rohstofflieferant.

Aus Nachfrage und Angebot können auch für Europa künftige Konkurrenzen grob abgeschätzt werden. Für die EU-25 ist dies summarisch in Abbildung 54 dargestellt, unter Berücksichtigung der energiewirtschaftlichen Nachfrageszenarien (Basis und Nachhaltig) einerseits und den landwirtschaftlichen Angebotsszenarien (Standard und Kombination) andererseits. Dabei zeigt sich für die prognostizierte Entwicklung bis 2020 – ähnlich wie für Deutschland –, dass bei gleichzeitiger Verfolgung einer an Nachhaltigkeit orientierten Energie- und Agrar- bzw. Umweltpolitik das verfügbare Biomasseangebot zur Deckung der erwarteten Nachfrage nicht ausreicht. Eine über die eigenen Potenziale hinausgehende Nachfrage ist dabei insbesondere in den EU-15 zu erwarten (IE 2005a, S. 60). Die Effekte einer zusätzlichen verstärkten Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen auf europäischer Ebene dürften also die dargestellten Probleme einer nachhaltigen Versorgung eher noch verschärfen (IE 2005a, S. 60).

Abbildung 54

Angebot und Nachfrage nach Bioenergie in der EU-25 2000 bis 2020



/1/= Thrän et al. 2005a; /10/= Ragwitz et al. 2005
 Quelle: Thrän et al. 2005a

Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Situation in den einzelnen Mitgliedstaaten sehr unterschiedlich ist: Dies betrifft sowohl die Biomassepotenziale als auch die nationalen Aktivitäten in Hinblick auf eine nachhaltige Energieversorgung. Zwar ist die Förderung und Etablierung der Bioenergie als EU-Ziel in allen Mitgliedstaaten vorgesehen, jedoch besteht in der Umsetzung ein erheblicher Gestaltungsspielraum, sodass die Marktetablierung im Betrachtungszeitraum ggf. in einigen Ländern nicht erreicht wird und damit die Biomassepotenziale dieser Länder z. B. für Nachbarstaaten zur Verfügung stehen könnten (IE 2005a, S. 61). Für solche Handlungsoptionen sind jedoch nur ausgewählte Biomassen geeignet, die eine hohe Energiedichte und Lagerfähigkeit aufweisen und in definierten Qualitäten und Mengen für einen überregionalen Markt bereitgestellt werden können (IFEU et al. 2004b). Dabei stellen sich Biokraftstoffe vergleichsweise günstig dar. Zusammen mit der gleichzeitig auf eine überregionale Versorgung ausgelegten Infrastruktur der Kraftstoffproduktion und -verteilung können hier voraussichtlich nicht nur europäische, sondern auch globale Versorgungsstrukturen erwartet werden (z. B. Bioethanol aus Brasilien).

Innerhalb von Europa können insbesondere Frankreich, Deutschland, Spanien, Schweden und die Beitrittsstaaten (hier insbesondere Polen) als Biomasse- bzw. Bioenergieexporteure erwartet werden, wenn in diesen Ländern keine weiter gehende Förderung der inländischen Nutzung der Potenziale erfolgt. Der Anteil der Biomassen, die aus stofflicher Sicht für einen Export grundsätzlich gut geeignet sind, liegt dabei in einer mittleren Größenordnung von einem Drittel des Biomassepotenzials – wobei in einzelnen Ländern erhebliche Abweichungen mög-

lich sind (Thrän et al. 2005a). Folgende Handlungsfelder für die künftige Gestaltung der nachwachsenden Rohstoffbasis können abschließend umrissen werden (IE 2005a, S. 63):

- Für den Anbau nachwachsender Rohstoffe und Energieträger sind im Kontext einer künftigen Agrarpolitik abgestimmte Vorstellungen (z. B. Richtlinien) einer nachhaltigen Flächennutzung entscheidend für den Beitrag, den die Landwirtschaft in Deutschland und Europa künftig auf diesem Gebiet leisten kann.
- Dabei sollten Rahmenbedingungen so gesetzt werden, dass vielfältige Rohstoffe und Energieträger angebaut werden. Damit könnten regionalen Rahmenbedingungen und Flächenqualitäten Rechnung getragen werden, sodass Monokulturen vermieden würden.
- Die Etablierung von mehrjährigen Lignocellulosepflanzen sollte weiterhin unterstützt werden. FuE-Bedarf besteht hier noch etwa bei vorteilhaften Anbaukulturen und Standorten, Erntetechnologien, Akzeptanzfragen etc.
- Für den Kraftstoffbereich sind sowohl auf europäischer als auch auf nationaler Ebene mittelfristig Zielvorstellungen notwendig, um die künftige Bedeutung von Importen von nachwachsenden Rohstoffen und Energieträgern festzulegen. Für etwaige Importe sollten geeignete ökologische und soziale Standards⁸³ entwickelt werden.

⁸³ Zum Beispiel Berücksichtigung der Herstellungs- und Erzeugungsbedingungen vor Ort etwa in Entwicklungsländern (Kinderarbeit bei der Palmölherzeugung etc.).

- Für die stoffliche Nutzung, die mengenmäßig auf dem Markt auch künftig vermutlich eine eher untergeordnete Rolle spielen wird, sollte die Verfügbarkeit der Rohstoffbasis durch geeignete Rahmenbedingungen gesichert werden.⁸⁴

VII. Marktliche Aspekte von Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen

Im Folgenden sind ausgewählte marktspezifische Aspekte einiger Produktgruppen aus nachwachsenden Rohstoffen zusammengestellt, die – unter Berücksichtigung der eingeschränkten Datenlage – einen Einblick in die aktuelle Marktsituation geben sollen. Zur Verbesserung der Datenlage könnte in einzelnen Fällen eine Studie der FNR (2006b) beitragen, die im Januar 2007 vorlag und daher im Folgenden nicht mehr berücksichtigt werden konnte. Die folgenden Ausführungen entsprechen in weiten Teilen denen des Gutachtens FHW/C.A.R.M.E.N. (2006).

1. Marktsituation für ausgewählte Produkte

Zunächst werden die beiden Einsatzsegmente Bioschmierstoffe und Biokunststoffe exemplarisch ausführlicher dargestellt. Weitere Produktgruppen werden nachfolgend im Überblick behandelt.

1.1 Bioschmierstoffe

Gesamtmarkt

Das Marktvolumen für Schmierstoffe betrug 2004 in Deutschland ca. 1,04 Mio. t (1999 waren es noch 1,16 Mio. t). Der Markt für Schmierstoffe ist mengenmäßig gesehen schrumpfend, was vor allem aus technischen Verbesserungen von Anlagen und Schmiersystemen resultiert (geringerer Schmierstoffverbrauch, weniger Schmierverluste, höhere Qualität der Grundöle). Knapp ein Drittel der eingesetzten Mengen wird im Motorenbereich verwendet (rückläufige Tendenz), jeweils ca. 14 Prozent sind Hydrauliköle für den mobilen und stationären Einsatz sowie Prozessöle (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

Markt für Bioschmierstoffprodukte

Der Einsatz biologisch schnell abbaubarer Schmierstoffe war bisher durch eine geringe Verbraucherakzeptanz bzw. höhere Preise deutlich eingeschränkt. Auch mit dem seit 2000 bestehenden Markteinführungsprogramm (MEP) „Biogene Treib- und Schmierstoffe“ des BMELV, welches die Preisdifferenz ausgleicht, die derzeit noch zwischen mineralischen Ölen und Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen besteht, haben sich schnell abbaubare

⁸⁴ Dies würde nur Sinn machen unter der Annahme, dass „eine intensivere stoffliche Nutzung als der Markt es selber regelt“ aus politischer Sicht angestrebt wird. Kurzfristig bestünde dabei kein Handlungsbedarf, eher mittelfristig (z. B. Vorrang für stoffliche Nutzung einbauen).

Schmierstoffe noch nicht auf breiter Basis durchgesetzt. In der Förderung der FNR ist ein Schwerpunkt bei den Hydraulikölen zu verzeichnen (nach FNR 2004 und Stelter 2004). 2003 wurden ca. 200 000 l Biohydrauliköle durch das MEP gefördert, dagegen nur etwa 5 000 l Motorenöle, 28 000 l Getriebeöle und 90 000 kg Schmierfette (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006). Auch bei der Umrüstung deckt vor allem der Hydraulikbereich – stationär und mobil – fast zwei Drittel der Gesamtförderung ab (jährlich etwa 10 Mio. Euro). Wenngleich basierend auf einem niedrigen Absatzniveau, sind als Ergebnis des Förderprogramms beachtenswerte Zuwachsraten von bis zu 20 Prozent in den vergangenen drei Jahren erreicht worden. Da mit dem Markteinführungsprogramm ausschließlich die Mehrkosten dieser Betriebsmittel und Mehraufwendungen für die Umrüstung kompensiert werden, ist der Anreiz für eine Umstellung durch die Reduzierung der Fördersätze gesunken (UFOP 2005).

Das jährliche Marktvolumen an Bioschmierstoffen und -ölen wurde in Deutschland für 2005 auf etwa 46 500 t geschätzt, wobei alle Schmierstoffe erfasst sind, die biogene Komponenten enthalten, also auch solche, die nicht in der Positivliste⁸⁵ erscheinen. Dies entspricht einem Gesamtmarktanteil von etwa 4 Prozent (Tabelle 15).

Dieser ist insofern nur bedingt aussagekräftig, da zum einen auch Öle und Schmierfette mit biogenen Anteilen unter 50 Prozent darin enthalten und zum anderen Bioschmierstoffe in bestimmten Schmierstoffmarktsegmenten, wie Motoren- und Getriebeöle, wenig vertreten sind (Bundesregierung 2005a; C.A.R.M.E.N. 2002; Kaup 2002, nach FHW/C.A.R.M.E.N. 2006). Während bestimmte Teilmärkte (Verlustschmierstoffe, Sägekettenöl) bereits deutlich von Bioschmierstoffen durchdrungen sind, ist dies bei Motoren- und Getriebeölen noch nicht der Fall. Die Marktstruktur im Bereich der Herstellung von Bioschmierstoff ist stark fragmentiert, neben einigen größeren Unternehmen sind viele KMUs aktiv. Besonders in umweltsensiblen Bereichen, wie der Baubranche oder in der Land- und Forstwirtschaft, liegen wesentliche Marktpotenziale für Bioschmierstoffe. Etwa 3 Prozent der verarbeiteten Ölsaaten fließen in den Bioschmierstoffmarkt (nach FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

Die Beschaffungskosten von biologisch schnell abbaubaren Schmierstoffen und Hydraulikflüssigkeiten im Vergleich zu mineralölbasierten Produkten sind in Tabelle 16 aufgeführt.

⁸⁵ Voraussetzung für die Gewährung einer Zuwendung für Erstausbzw. Umrüstung von Maschinen zur Verwendung eines Bioschmierstoffs ist, dass dieser in der so genannten Positivliste aufgeführt ist. Zur Aufnahme in die Positivliste sind alle Schmierstoffe und Hydraulikflüssigkeiten berechtigt, die zu mindestens 50 Prozent aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen. Darin inbegriffen sind Produkte, die native Pflanzenöle enthalten sowie synthetische Ester, deren Grundstoffe nativen Ursprungs sind. Des Weiteren sollen die Produkte biologisch schnell abbaubar sein sowie ein geringes Wassergefährdungspotenzial aufweisen.

Tabelle 15

Nutzung von Bioschmierstoffen und -ölen in Deutschland (2005)

Bioschmierstoffe und -öle	Verbrauch (t)	Marktanteil (in %)
Motoröle	2.000	<i>unter 1</i>
Hydrauliköle stationär	9.000	9
Hydrauliköle mobil	11.000	19
Metallbearbeitungsöle	11.800	15
Getriebeöle	800	<i>unter 1</i>
Schalöle	2.500	8
Schmieröle und -fette	3.100	10
Sägekettenöle	6.200	75
sonstige Öle	100	–
gesamt	46.500	4

Quelle: Peters 2006

Tabelle 16

Preisspannen der verschiedenen Schmierstoffe

Ölsorte	EURO/l bzw. EURO/kg			
	native Öle	synthetische Ester	Glykole	Mineralöle
Verlustschmierstoffe	1,25–4,00	ca. 3,25	*	0,75–5,00
Sägekettenöle	1,10–3,00	*	*	0,95–2,00
Haftöle	1,20–2,50	3,00–5,00	*	0,90–1,50
Schalöle	0,90–4,00	*	*	0,65–2,50
Schmieröle	1,00–7,00	2,00–7,00	ca. 4,00	1,50–4,00
Hydrauliköle	2,50–7,00	2,00–6,00	ca. 4,00	0,60–2,50
Getriebeöle	4,00–9,00	4,00–9,00	3,75–7,50	4,00–6,00
Schmierfette	1,00–6,00	3,00–8,00	*	1,40–6,00
Motorenöle	*	4,00–9,00	*	1,25–7,00
Kühlschmierstoffe	2,50–4,50	4,00–18,00	3,50–5,00	1,40–4,50
Abschmierfette	ca. 5,00	2,25–15,00	*	2,00–4,00

* geringe Bedeutung/gibt es nicht/keine Angaben der Hersteller verfügbar
 Quelle: BMELV 2005a; Kaup 2002; KTBL 2005b

Die erhobenen Preise weisen relativ große Spannen auf, was sowohl an unterschiedlichen technischen Qualitätsstufen als auch an Spezialölen oder Additiven liegt. Mit Zunahme des Produktionsaufwands und der Produktionsstufen steigen die Kosten entsprechend, was vor allem bei höherwertigen Estern und Polyglykolen mit dem durchschnittlich fünffachen Preis gegenüber den reinen Mineralölen durchschlägt. Bei den nativen bzw. teilgesättigten Estern muss in etwa mit dem Faktor 2 bis 3 gerechnet werden (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

1.2 Biokunststoffe

Gesamtmarkt

Im Jahr 2004 wurden weltweit 224 Mio. t Kunststoff produziert. Davon kamen 7,8 Prozent aus Deutschland und 23,6 Prozent aus Westeuropa (VKE 2006a).⁸⁶ Die Produktion von Kunststoffen lag in Deutschland 2005 bei 18 Mio. t (VKE 2006b). Bis 2010 werden weltweit ca. 260 Mio. t prognostiziert (16 Prozent) – trotz rückläufigen Verbrauchs in Westeuropa, Nordamerika und Japan (aber höheren Absatzerwartungen in Osteuropa und Südostasien). Massenkunststoffe wie Polyethylen, Polypropylen und Polystyrol machen dabei einen Anteil von ca. 60 Prozent an der weltweiten Kunststoffproduktion aus (PlasticsEurope 2005).

Kunststoffe sind universell einsetzbar. Hauptanwendungsgebiete sind der Verpackungsbereich mit ca. 37 Prozent, gefolgt vom Haushalt- und Baubereich mit jeweils fast 20 Prozent des Kunststoffverbrauchs in Westeuropa 2003 in Höhe von 39,7 Mio. t (PlasticsEurope 2004). Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass jährlich auch 14,8 Mio. t Kunststoffverpackungsabfälle entsorgt werden müssen (Zuwachs von 1,3 Prozent gegenüber 2002) (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

Markt von Produkten aus Biokunststoffen

Seit Anfang der 1990er Jahre werden biologisch abbaubare Werkstoffe (BAW) öffentlich gefördert und sind zusätzlich durch eine Übergangsvorschrift in der 2005 novellierten Verpackungsverordnung begünstigt (Befreiung von der Rücknahmepflicht und der Erfüllung bestimmter Verwertungsquoten bis 2012).

Der Verband „European Bioplastics“ schätzte den Gesamtverbrauch von Biokunststoffprodukten in Europa für das Jahr 2005 auf etwa 50 000 t und den in Deutschland auf ca. 5 000 t (Kaeb 2006, S. 21). Hier spielten wesentlich Folien und Verpackungen eine Rolle. Zu den bereits marktüblichen Biopolymerprodukten gehören Folien und Beutel aus Mater-Bi (Stärkeblend) oder NatureFlex (Cellulose), Verpackungen aus NatureWorks (PLA) sowie technische Formteile aus Fasal (Maisstärke/Naturharz/Holz), Arboform (Lignin/Bindemittel/Fasern) und Dämm-

material aus Getrex (Roggenmehl/Bindemittel) (Schnabel/Anton 2001).

Ein wesentlicher Teil der Biokunststoffentwicklungen, die inzwischen auch zur Marktreife gelangt sind, zielt darauf ab, Massenkunststoffe wie Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) und Polystyrol (PS) in kurzlebigen Anwendungen wie z. B. Verpackungen zu substituieren (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006). Offizielle Statistiken für Verbrauch und Produktion von Biokunststoffen liegen nicht vor; der europäische Verband für Biokunststoffe European Bioplastics (bis Ende 2005: IBAW) schätzte für 2006 die weltweiten Produktionskapazitäten auf ca. 350 000 t, in Europa auf ca. 100 000 t und in Deutschland auf ca. 20 000 t (Kaeb 2006). Als durchschnittlicher Marktpreis wurde von 3 000 bis 4 500 Euro/t ausgegangen (nach Kaeb 2005).

Somit haben Biokunststoffe in der EU, bezogen auf die gesamte Kunststoffproduktion, derzeit einen Marktanteil von rund 0,3 Prozent. Bezogen auf den Umsatz beträgt der Anteil an Biokunststoffen – einen Marktpreis von 1 000 bis 1 200 Euro/t für PE/PP/PS vorausgesetzt (PlasticsEurope 2005) – knapp 1 Prozent (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006). Trotz des derzeit geringen Marktanteils schätzt das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), dass Biokunststoffe aufgrund ihres Leistungsprofils ein technisches Substitutionspotenzial von ca. 30 Prozent (15,9 Mio. t) an der gesamten europäischen Kunststoffproduktion besitzen (Festel/Kölle 2005, S. 43).

Gegenwärtig liegen die Anteile verschiedener Biokunststoffe – bezogen auf den gesamten Biokunststoffmarkt – für Stärke und Stärkeblends bei rund 85 Prozent sowie für Polymilchsäure (PLA), Polyhydroxyfettsäuren (PHA), thermoplastische Cellulose und andere Biokunststoffe bei 15 Prozent. Im Teilmarkt Loose-Fill-Materialien für den Verpackungsbereich (mit einem Marktvolumen in Deutschland von ca. 700 000 m³) liegt der Anteil der Stärkeprodukte bei ca. 10 bis 20 Prozent. Bei den fermentativ hergestellten Biokunststoffen sind PLA und PHA die wichtigsten Vertreter (FNR 2006a; Peters 2006). PLA wird als Biokunststoff derzeit bereits in vergleichsweise „größeren Mengen“ produziert; neben Stärkeblends ist er einer der meist verwendeten BAW und auch unter ökonomischen Gesichtspunkten attraktiv. PHA befinden sich noch in der Markteinführung bzw. deren Produktentwicklung hat gerade begonnen (C.A.R.M.E.N. 2006).

Die Mehrheit der Biokunststofftypen (produktionsmengebezogen, weltweit) sind Biokunststoffblends, d. h. Gemische, die meist aus nachwachsenden Rohstoffen und einer synthetischen Komponente (synthetische BAW⁸⁷) bestehen. Etwa 80 Prozent der Unternehmen sind kleine

⁸⁶ 2003 lag die Absatzmenge der Kunststofferzeuger in Deutschland zur Verarbeitung (export- und importbereinigte Produktionsstatistik) lt. PlasticsEurope (2004a) bei 12,6 Mio. t.

⁸⁷ Synthetische BAW sind Polymere auf Erdölbasis, die aufgrund ihrer speziellen chemischen Struktur aber biologisch abbaubar sind. Zum Beispiel enthalten Biokunststoffe auf Stärkebasis (wie Stärkeblends) einen bestimmten Anteil (10 bis 50 Prozent) davon. Dieser wird benötigt, um aus Stärke einen wasserunlöslichen Werkstoff mit kunststoffähnlichen Eigenschaften herzustellen (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

oder mittelständische Unternehmen (KMU). Die Akteurskonstellation ist aufgrund der Vielzahl der Anwendungen sehr unterschiedlich (z. B. Lebensmittelbereich, Kunststoffverarbeitung, Einzelhandel, Entsorgungswirtschaft) (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

Preise und Wirtschaftlichkeit

Die deutlich höheren Preise von Biokunststoffen (3 000 bis 4 500 Euro/t) gegenüber herkömmlichen Massenkunststoffen PE, PP oder PS (1 000 bis 1 200 Euro/t) können zum einen darauf zurückgeführt werden, dass sie sich noch in einer frühen Entwicklungsphase befinden und gegenüber Massenkunststoffen einen Entwicklungsnachteil von 30 bis 40 Jahren besitzen (Preisentwicklung der letzten drei Jahre Abbildung 55). Die Produktionsverfahren von Biokunststoffen sind weder technisch noch wirtschaftlich mit denen für herkömmliche Massenkunststoffe vergleichbar optimiert. Zudem wird der Großteil der Biokunststoffe nur im 1 000- bis 10 000-t-Maßstab produziert (nicht im 100 000-t-Maßstab wie bei heutigen Massenkunststoffen üblich) (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006). Stärke, auf der ein Großteil heutiger Biokunststoffe basiert, trägt mit 300 bis 400 Euro/t nur in geringem Maße zu den hohen Werkstoffpreisen bei (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006). Nicht zuletzt wegen des günstigen Preises von Stärke wird daran gearbeitet, ihren Anteil in den Produktformulierungen zu erhöhen.

Um wirtschaftlich konkurrenzfähig zu werden, sind großindustrielle Produktionsmengen notwendig. Einen ersten Schritt in diese Richtung machte die Firma Cargill Dow Polymers⁸⁸, die seither in Nebraska, USA, eine Produk-

tionsanlage für PLA mit einer Kapazität von ca. 140 000 t/Jahr betreibt (European Bioplastics 2002, nach FHW/C.A.R.M.E.N. 2006). Beim Vergleich der Gesamtwirtschaftlichkeit zwischen Bio- und herkömmlichen Kunststoffen müssen auch die Entsorgungskosten berücksichtigt werden. Diese liegen für Biokunststoffe, im Falle der Kompostierung, bei ca. 400 Euro/t. Die Entsorgung von herkömmlichen Kunststoffen über das Duale System Deutschland (DSD) kostet derzeit ca. 1 400 Euro/t. Somit liegt der Preisunterschied zwischen einem Stärkeblend und einem herkömmlichen Kunststoff (LDPE, low density polyethylene) nicht mehr bei 1 700 Euro/t, sondern nur mehr bei 900 Euro/t (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006, Abbildung 56).

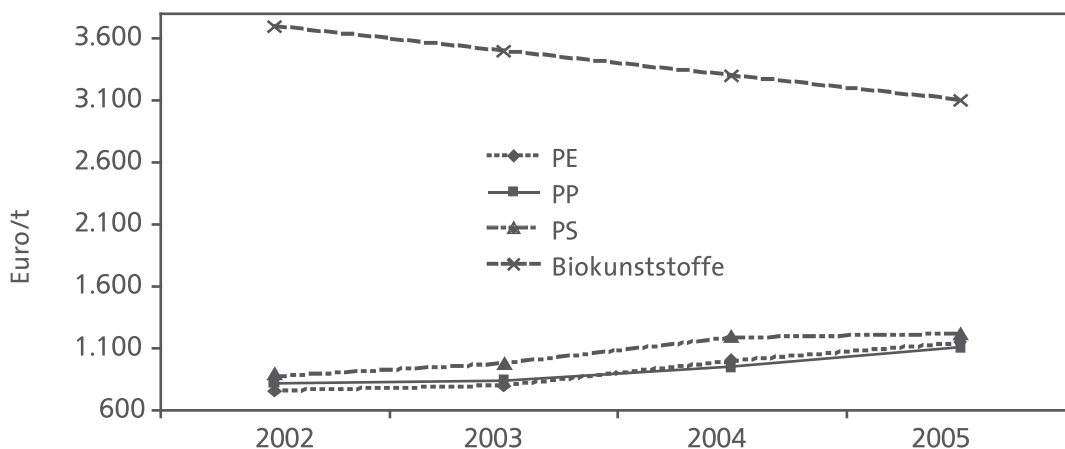
Mittelfristig kann erwartet werden, dass sich die Preise von Bio- und Massenkunststoffen – unabhängig von den Entsorgungskosten – immer stärker annähern werden, sofern der geplante Ausbau der Produktionskapazitäten der Biokunststoffe stattfindet. Zugleich könnten sich herkömmliche Kunststoffe aufgrund des steigenden Ölpreises (Kap. VII.2.5) voraussichtlich weiterhin verteuern: Gegenüber 2002 ist für Massenkunststoffe wie PP, PE und PS ein durchschnittlicher Preisanstieg von ca. 40 Prozent zu verzeichnen (European Bioplastics 2005). Wesentlich dabei ist der Rohölpreis, dessen Anteil bei herkömmlichen Massenkunststoffen in Abbildung 57 dargestellt ist.

Die weitere Marktdurchdringung von Biokunststoffen wird u. a. auch durch die aktuell geltende Abfallgesetzgebung gebremst. Einerseits begünstigt die Verpackungsverordnung (VerpackV) zertifizierte Verpackungen aus biologisch abbaubaren Werkstoffen durch eine Übergangsregelung bis 2012, was auch den Aufbau eines geeigneten Entsorgungssystems erleichtern soll. Andererseits verhindert die Bioabfallverordnung (BioabfV), dass Verpackungen aus nachweislich kompostierbaren, d. h.

⁸⁸ Die Biokunststoffaktivitäten von Cargill Dow werden seit dem Jahr 2005 von einem eigenständigen, neu gegründeten Unternehmen, NatureWorks LLC, weitergeführt.

Abbildung 55

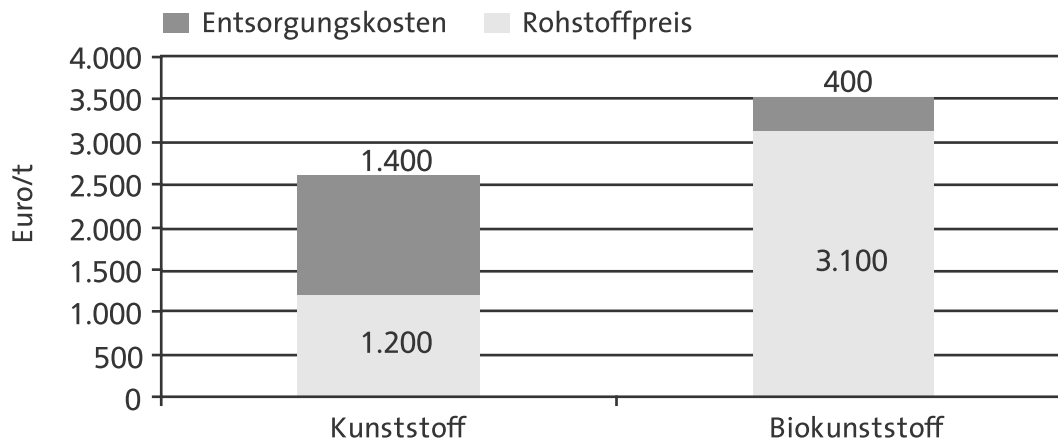
Marktpreisentwicklung der letzten Jahre von Massenkunststoffen und Biokunststoffen



Quelle: Kaeb 2005

Abbildung 56

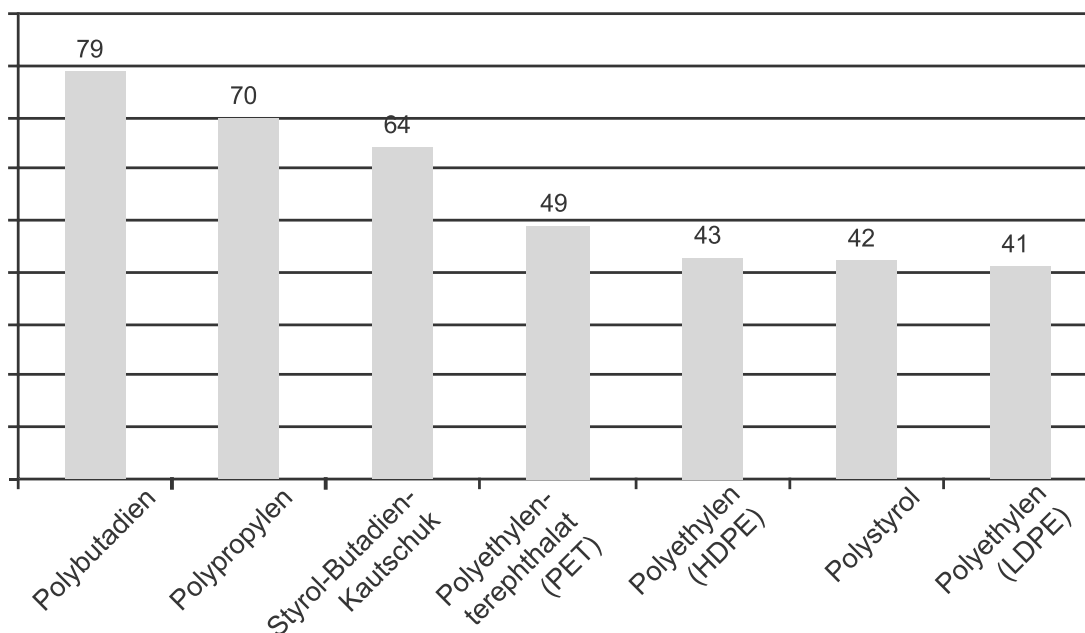
Preisvergleich zwischen einem Bio- (Stärkeblend) und einem herkömmlichen Kunststoff (LDPE) inkl. Entsorgungskosten



Quelle: C.A.R.M.E.N. 2005, nach FHW/C.A.R.M.E.N. 2006

Abbildung 57

Anteile des Rohölpreises bei heutigen Massenkunststoffen (in Prozent)



Polybutadien: ein technisch bedeutender Synthetikgummi (z. B. Reifenherstellung); Polypropylen: Verwendung für unzerbrechliche Behälter, Isolier- und Verpackungsmaterial (Plastikfolien) etc.; Styrol-Butadien-Kautschuk: weiterer technisch bedeutender Synthetikgummi (Reifenherstellung, Fußbodenbeläge etc.); Polyethylenterephthalat (PET): u. a. Getränkeflaschen; HDPE = high density polyethylene, ein Polyethylen mit hoher Dichte (Verpackungen, Flaschen, große Behälter, Rohre etc.); LDPE = low density polyethylene, ein Polyethylen mit geringer Dichte (Folien, Kabelummantelungen etc.)

Quelle: nach Buchholz 2006

zertifizierten, Biokunststoffen über die Biotonne gesammelt und anschließend in einer Kompostieranlage verwertet werden. Laut BioabfV sind nur solche Produkte zugelassen, die aus biologisch abbaubaren Werkstoffen „aus“ nachwachsenden Rohstoffen bestehen – was im Sinne von 100 Prozent nachwachsenden Rohstoffen ausgelegt wird. Da es sich bei einem großen Teil der Biokunststoffe jedoch um Biokunststoffblends handelt, die zur Herstellung bestimmter Gebrauchseigenschaften auf einen gewissen Anteil petrochemisch basierter Biokunststoffe angewiesen sind, bleibt für viele kompostierbare Verpackungen die Biotonne verschlossen (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006, S. 106).

Eine spezielle FuE-Förderung für Biokunststoffe wird nach FHW/C.A.R.M.E.N. (2006) nicht empfohlen, da der inzwischen erreichte technische Stand bei den meisten BAW als gut eingeschätzt wird, sodass als nächster Schritt eher eine Markteinführung der entsprechenden Produkte zu unterstützen wäre. Zudem sollte die Öffentlichkeitsarbeit ausgebaut werden (z. B. geförderte Markteinführungskampagnen). Auch könnte ein ähnliches Markteinführungsprogramm, wie es für Dämmstoffe und Schmierstoffe aufgelegt wurde, in Erwägung⁸⁹ gezogen werden (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

1.3 Weitere Produkte

Chemische Grundstoffe

In der chemischen Industrie werden in Deutschland ca. 17 Mio. t Erdöl und Erdgas für die Erzeugung chemischer organischer Produkte verbraucht – plus ca. 2 Mio. t nachwachsende Rohstoffe (Bezug 2002). Die petrochemischen Primärprodukte Ethylen (ca. 5,4 Mio. t), Propylen (ca. 3,9 Mio. t) und Benzol (ca. 2,5 Mio. t) machen einen wesentlichen Anteil (86 Prozent) an der Gesamtproduktion⁹⁰ 2005 aus (VCI 2006, S. 21).

Über Produktionsmengen chemischer Grundstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen – sei es als Haupt- oder Kuppelprodukt – bzw. erzielter Umsätze liegen keine separaten Statistiken vor. Es ist jedoch davon auszugehen, dass ihr monetärer Marktanteil, aufgrund der etwas höheren Marktpreise, etwas über 10 Prozent liegt (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006, S. 40). Insgesamt ist festzustellen, dass chemische Grundstoffe nur dann auf Basis nachwachsender Rohstoffe produziert werden, wenn dies bereits wirtschaftlich ist, was u. a. bei Oleochemikalien, Zitronensäure, Milchsäure und Sorbit der Fall ist (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

Nachwachsende Rohstoffe könnten mittel- und langfristig eine wichtige, wenn nicht zentrale Rolle für die Herstel-

lung chemischer Grundstoffe spielen, da aus diesen eine breite Palette organisch-chemischer Erzeugnisse (Kunststoffe, Fasern, Farben, Wasch- und Reinigungsmittel etc.) herstellbar ist, was derzeit zu ca. 90 Prozent auf Basis fossiler Rohstoffe geschieht. Der wirtschaftliche Erfolg der Petrochemie basiert auf einer jahrzehntelangen technischen und wirtschaftlichen Optimierung eines Systems von „stammbaumfähigen“ chemischen Substanzen. Verhältnismäßig „schnelle Erfolge“ verspricht jedoch die Substitution einzelner petrochemisch basierter Grundstoffe mit existierenden Märkten durch chemisch und nutzungstechnisch „ähnliche“ Substanzen auf Basis nachwachsender Rohstoffe. Für eine umfassende Umstellung der heute petrochemisch orientierten organischen Chemie auf stammbaumfähige Substanzen aus nachwachsenden Rohstoffen besteht aber noch erheblicher Forschungsbedarf. Wichtig wäre auch die Entwicklung biotechnologischer Verfahren⁹¹ zur Konversion nachwachsender Rohstoffe, da mit deren Hilfe neue Grundstoffe hergestellt werden können bzw. die Wirtschaftlichkeit bereits markteingeführter Substanzen deutlich verbessert werden kann (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

Ein wesentlicher Einflussfaktor für eine verstärkte Nutzung nachwachsender Rohstoffe ist die Ölpreisentwicklung (Kap. VII.2.5). Hinzu kommt die Konkurrenz⁹² durch aufsteigende Industrienationen, wie z. B. China, die inzwischen das Know-how für die Produktion petrochemischer Grundstoffe und auch standortbedingte Produktionskostenvorteile haben (niedrige Löhne, geringe Umweltauflagen, Steuern und Sozialabgaben) (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

Naturfaserprodukte

In der Textilindustrie kann weiterhin mit einem Wachstum des Gesamtmarktes gerechnet werden, wobei Naturfasern davon nur unterdurchschnittlich profitieren werden. In Deutschland ist mit einem nachhaltigen Wachstum diesbezüglich nicht zu rechnen: Textilindustrie, Bekleidungssektor und technische Textilien stehen weiterhin unter enormem Druck asiatischer Importe; mit weiteren Produktionsverlagerungen in diese Regionen ist zu rechnen (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

Bei naturfaserverstärkten Werkstoffen beträgt das gegenwärtige Marktvolumen 19 000 t (nur Naturfasern ohne Holz und Baumwollfasern) (Peters 2006). Weiterhin gute Wachstumschancen bestehen für technische Naturfaserprodukte z. B. in der Automobilindustrie und in anderen Sektoren, in denen naturfaserverstärkte Kunststoffe ein-

⁸⁹ Ähnlich wie bei den Dämm- und Schmierstoffen könnte den Anwendern (z. B. Herstellern von BAW-Verpackungen) der Mehrpreis gegenüber herkömmlichen Kunststoffen ersetzt werden. Erforderlich wäre hier, ähnlich wie bei den anderen MEP, eine sog. Positivliste, die z. B. alle Biokunststoffe, die nach DIN EN 13432 zertifiziert sind, enthalten könnte.

⁹⁰ Von Ethylen, Propylen, Butadien, Benzol, Toluol, o-Xylol, p-Xylol.

⁹¹ Beispielsweise wird Zitronensäure schon länger nicht mehr wie ursprünglich aus Zitrusfrüchten gewonnen, sondern biotechnologisch aus zuckerhaltigen Abfällen wie Melasse.

⁹² Der globale Wettbewerb bringt für Chemieunternehmen neue Herausforderungen mit sich, z. B. technisch verbesserte Endprodukte bzw. Grundstoffe für deren Produktion anzubieten. Die nachwachsende Rohstoffbasis ermöglicht u. a., Produkte mit neuen Eigenschaften zu generieren (z. B. atmungsaktive Polyester auf Basis von Stärke, NatureWorks LLC 2005) (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

gesetzt werden. In Deutschland ist hier gutes Know-how, insbesondere in der Zulieferindustrie, vorhanden. Die geringe Dichte und die gute Verarbeitbarkeit der Naturfasern stellen hierbei Hauptvorteile für einen Einsatz dar, nachteilig ist ein meist höherer Preis gegenüber fossilen Produkten. Flachs und Hanf, die in Deutschland angebaut werden können, stehen in Konkurrenz zu importierten Naturfasern wie Sisal und Jute. Mit dem Wegfall der Faserverarbeitungsbeihilfe gestalten sich Anbau und Ersterverarbeitung in Deutschland schwierig. Mit Neuinvestitionen in Flachs- oder Hanferstverarbeitungsanlagen ist nicht zu rechnen. Die weitere Entwicklung in Deutschland wird sich eher auf die weiterverarbeitende Industrie konzentrieren (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

Dämmstoffe

Nachdem der Baustoffmarkt seit einigen Jahren rückläufig ist, sinkt auch das Marktvolumen des Naturbaustoffmarktes (Brandhorst et al. 2006). Der Anteil an Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen steigt dabei seit 1995 langsam aber kontinuierlich an (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006), nicht zuletzt durch das Markteinführungsprogramm (Brandhorst et al. 2006). Gründe liegen aber auch in einer verbesserten Informationslage der Verbraucher.

Aufgrund der Änderungen der Energieeinsparverordnung kann bis 2010 mit einem Anstieg des Absatzes an Wärmedämmstoffen aus alternativen Materialien auf bis zu 10 Prozent des Dämmstoffmarktes bzw. rund 7 Mio. m³/Jahr gerechnet werden. Der prognostizierte Zuwachs dürfte allerdings vorwiegend bei den preisgünstigen Dämmstoffen mit guten Wärmedämmeigenschaften aus Recyclingmaterialien (z. B. Altpapier) sowie forst- und landwirtschaftlichen Produktionsrückständen erreicht werden. Hingegen bleiben die Absatzchancen der in der heimischen Landwirtschaft hergestellten Produkte, wie z. B. Hanf und Flachs, aufgrund der relativ hohen Produktionskosten begrenzt (TAB 1999). Die Arbeitsgemeinschaft für Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen e.V. (ADNR) schätzt den Marktanteil der Naturdämmstoffe 2015 auf ein Marktvolumen von rund 3,3 Mio. m³ (ADNR 2005).

Kosmetika, Wasch- und Reinigungsmittel

Es wird erwartet, dass der gesamte Marktanteil pflanzenölbasierter Tenside/Oleochemikalien aufgrund des gestiegenen Ölpreises bereits kurz- und mittelfristig zunehmen wird (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006). Angaben zu einzelnen Produktparten liegen nicht vor.

Inwieweit die Vorteile einer guten Umwelt- und Gesundheitsverträglichkeit von biologischen Wasch- und Reinigungsmitteln eine Rolle für die Erhöhung des Marktanteils spielen können, hängt auch von gesetzlichen Vorgaben (z. B. für die biologische Abbaubarkeit von Tensiden) und von der Verbrauchersensibilität für derartige Eigenschaften ab. Das Hauptthemnis, das derzeit

einer verstärkten Nutzung nachwachsender Rohstoffe im Bereich Tenside und Oleochemikalien entgegensteht, ist ökonomischer Natur. Hinzu kommen industrieseitige Befürchtungen, dass die EU-Chemikalienverordnung REACH gerade innovative Entwicklungen behindern könnte. Wichtig erscheinen hier entsprechende Aufklärungsmaßnahmen für die betroffene Industrie (v. a. KMU), um bestehende Unsicherheiten zu beseitigen (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

Im kosmetischen Bereich könnten heimische Rohstoffpflanzen an Bedeutung gewinnen, wenn die Qualitätsanforderungen der kosmetischen Industrie an die Rohstoffqualität weiterhin steigen. Die positive Marktentwicklung bei naturstoffbasierten Kosmetika bzw. „echten“ Naturkosmetika wird, wie auch im Bereich der Naturheilmittel, durch ein verändertes Konsumentenverhalten getragen (pro Natur, Gesundheit, Wellness). Preisunterschiede zwischen Naturstoffen und petrochemischen Substanzen spielen hier tendenziell eine eher untergeordnete Rolle (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006). Bei Kosmetika mit sekundären Pflanzeninhaltsstoffen kann auf umfangreiches Wissen aus dem Naturheilmittel- und Lebensmittelbereich zurückgegriffen werden – neue petrochemische Substanzen müssen nicht entwickelt werden. Ein Nadelöhr für den Einsatz sekundärer Pflanzeninhaltsstoffe in Kosmetika ist die Verfügbarkeit der Rohstoffe in gleichbleibend hoher Qualität (diese variiert z. B. nach Herkunftsland, Witterung, Ernte- und Verarbeitungsverfahren sowie dem oft niedrigen technologischen Entwicklungsstand der Herkunftsländer) (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

Farben und Lacke

Damit Färberpflanzen an Bedeutung gewinnen, müssten deren Vorteile gegenüber konventionellen Färbemethoden gezielter herausgestellt werden (z. B. durch neue Farbstoffe aus Färberpflanzen) (Wähling 2001). Aufgrund des höheren Preises und teilweise ungünstiger Gebrauchseigenschaften bzw. Qualitäten von Farben und Lacken auf Basis nachwachsender Rohstoffe im Vergleich zu synthetischen Ausgangsprodukten wird deren Marktanteil innerhalb der nächsten Jahre voraussichtlich bestenfalls leicht ansteigen (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006). Nachwachsende Rohstoffe lassen sich im Bereich der Lackchemie nur dann erfolgreich vermarkten, wenn sie in Produkte mit hoher Qualitätssicherheit einfließen. Lacke aus nachwachsenden Rohstoffen sollten sich von herkömmlichen Lacken durch neue Eigenschaften und Qualitäten hervorheben, denn nur durch solche spezifische Funktionalitäten können diese auf Dauer am Markt bestehen (nach FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

Heute haben nur noch wenige Hersteller von Druckfarben in Deutschland in ihrem Sortiment keine Ökodruckfarben (Tosques o. J.). Eine Chance für Druckfarben aus nachwachsenden Rohstoffen besteht z. B. in einer Zertifizierung (Ökoaudit), was zunehmend stärker in den Blickpunkt der Druckindustrie rückt (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

1.4 Energetische Nutzung

Die Nutzung von Biomasse zur Energiebereitstellung hat sich positiv entwickelt (Kap. V.1). Heute spielen im Kraftstoffbereich Biodiesel, Bioethanol und Pflanzenöle bereits eine Rolle, letztere sind auch – neben Biogas und Holz – für die Strom- und Wärmeerzeugung einsetzbar.

Biodiesel

Biodiesel ist bislang der einzige breit markteingeführte Biokraftstoff in Deutschland. Der Biodieselsatz in Deutschland hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Er lag 2004 bei 1,05 Mio. t (1,3 Mrd. l), wovon bislang etwa 70 Prozent als Reinkraftstoff in Fahrzeugflotten und in PKWs sowie weitere 30 Prozent als maximal 5-prozentige Beimischung zu Dieselmotoren zugesetzt wurden. Der Anteil der Beimischung wird in den nächsten Jahren zunehmen, bei einer Abnahme der Verwendung von Biodiesel als Reinkraftstoff (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

Gemäß Richtlinie 2003/30/EG der Europäischen Union sollen bis Anfang 2010 europaweit 5,75 Prozent (gemessen am Energiegehalt) aller Kraftstoffe aus pflanzlichen Rohstoffen kommen, bis Ende 2005 sollten es 2 Prozent sein. Dies hat Deutschland aufgrund der bisher geltenden Steuerbegünstigungen und den Preisanstiegen bei fossilen Kraftstoffen als einziges EU-Mitglied erreicht (Bensmann 2006). Die Produktionskapazität für Biodiesel in Deutschland lag im Juni 2005 bei 1,1 Mio. t. Zusätzlich waren Anlagen zur Biodieselproduktion mit einer Kapazität von 0,6 Mio. t in Planung (Bundesregierung 2005b). Ein weiterer Ausbau der Produktionskapazität auf 2,0 Mio. t wird für möglich gehalten, womit rund 3,7 Prozent des deutschen Gesamtkraftstoffbedarfs gedeckt werden könnten (UFOP 2006). Der Preis je l Biodiesel richtet sich nach dem für Diesel, wobei ersterer – bis Mitte 2006 von der Mineralölsteuer befreit⁹³ – bisher unterhalb des Preises für Diesel auf Mineralölbasis lag. Der Absatzboom im Treibstoffsektor hat sich bislang positiv auf die Rapsnachfrage ausgewirkt (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006). Ein Kuppelprodukt der Biodieselherstellung ist Glycerin, welches in marktrelevanten Mengen anfällt (die z. B. zu Preiseinbrüchen auf dem bestehenden Glycerinmarkt geführt haben).

Bioethanol

Bioethanol hat in Deutschland bei weitem nicht den Stellenwert wie Biodiesel – weltweit betrachtet jedoch den höchsten Stellenwert bei Biotreibstoffen. 1 l Bioethanol ersetzt ca. 0,66 l Benzin. Der Marktpreis für Bioethanol lag 2005 im Durchschnitt bei 0,5 Euro/l (FNR 2005c). Für die Produktion von Bioethanol werden in Deutschland Getreide (Weizen und Roggen) und Zuckerrüben verwendet. Die Bioethanolproduktion aus Getreide ist

aufgrund der bisherigen Getreidepreise am wirtschaftlichsten (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006). Bioethanol als Kraftstoff ist von der Mineralölsteuer befreit und kann Ottokraftstoff zugemischt werden – bis zu 5 Prozent nach DIN EN 228 (DIN 2004). Entsprechend den Zielen der EU-Biokraftstofflinie (2003/30/EG) errechnet sich durch die angestrebte Zumischung bis 2010 ein Marktvolumen von ca. 1,8 Mio. t Bioethanol (C.A.R.M.E.N. 2005). Dies entspricht einem Rohstoffbedarf von ca. 5 bis 6 Mio. t Getreide (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

Insgesamt befinden sich acht Anlagen in Deutschland im Bau, oder sind bereits in Betrieb. 2005 nahmen drei Treibstoffethanolanlagen auf Basis von Getreide den Betrieb auf. Bei Vollastbetrieb könnten zusammen 500 000 t Ethanol erzeugt werden (BMELV 2005a). Dennoch fiel 2004 die Produktionsmenge für Bioethanol in Deutschland mit 6 000 t (82 Mio. l) vergleichsweise gering aus, was mit Anlaufschwierigkeiten beim Anlagenbetrieb, aber auch mit Zurückhaltung der Mineralöl- und teilweise der Automobilindustrie erklärbar ist (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006). Bioethanol kann als Kraftstoff, aber auch stofflich genutzt werden (Kap. IV).

Pflanzenöl

Als Rohstoff für Pflanzenöle wird in Deutschland aus klimatischen und Kostengründen meist Raps verwendet. Auch Sonnenblumen kommen infrage, wobei ihr Öl in der Produktion jedoch deutlich teurer ist. Weltweit weisen auch Soja, Palm- und Olivenöl beträchtliche Potenziale auf, die aufgrund ihrer Zusammensetzung in Mitteleuropa jedoch nur bedingt eingesetzt werden können (FNR 2005c). Von 1 ha Raps können jährlich 1 300 l Rapsöl gewonnen werden. 1 l Rapsöl ersetzt ca. 0,96 l Diesel (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

Pflanzenöl kann entweder als Nahrungsmittel, für die Schmierstoffherstellung (Kap. III.1), als Kraftstoff oder für die Stromerzeugung eingesetzt werden. Beim Einsatz als Kraftstoff müssen die betreffenden Fahrzeuge im Unterschied zu Biodiesel und Bioethanol umgerüstet werden. Eine Beimischung zu vorhandenen Kraftstoffen ist nicht möglich (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006). Aufgrund der Mineralölsteuerbefreiung – welche ab 2008 für den Reinkraftstoff wegfällt – kann Pflanzenöl deutlich unter dem Marktpreis konventioneller Kraftstoffe angeboten werden. Die Nutzung von nativem Pflanzenöl als Kraftstoff ist aufgrund der Kosten für die notwendige Umrüstung eines konventionellen Motors in der Regel nur bei Kraftfahrzeugen mit relativ hoher Auslastung wirtschaftlich. Die Umrüstung beläuft sich je nach Fahrzeugtyp auf 2 000 bis 5 000 Euro, und es kann zudem nicht jeder Fahrzeugtyp umgerüstet werden (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006, S. 113).

Bei der Verstromung von Pflanzenöl mittels eines Blockheizkraftwerks (BHKW) belaufen sich dessen Anschaffungskosten auf rund 2 000 Euro/kW. Die Investitionen für einen Pflanzenölspezialmotor liegen im Regelfall zwi-

⁹³ Biodiesel wird ab August 2006 besteuert; Pflanzenöl als Reinkraftstoff ab 2008. Ab 2012 sollen beide Kraftstoffe voll besteuert werden, wobei eine stufenweise Anhebung geplant ist (Bensmann 2006).

schen 10 bis 30 Prozent über den notwendigen Investitionen eines Heizöldieselmotors. Außerdem ist der Pflanzenölpreis mit rund 0,55 bis 0,60 Euro/l höher als der Bezug von fossilem Heizöl. Daher sind für einen wirtschaftlichen Betrieb eine kommerzielle Nutzung der Abwärme sowie mindestens 4 000 Nutzungsstunden im Jahr erforderlich (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006). 2004 wurde die Zahl der in Betrieb befindlichen Pflanzenöl-BHKWs auf 150 geschätzt, die installierte elektrische Leistung auf 12,4 MW (IE 2005a). Die Stromerzeugung 2004 aus biogenen Flüssigbrennstoffen betrug 77 GWh, die Wärmeproduktion 222 GWh (BMU 2005).

Biogas

Die Biogasbranche hat innerhalb der letzten zehn Jahre einen Boom erlebt. Vor allem bedingt durch das EEG⁹⁴ wurden Anlagen für Betreiber rentabel. Die sinnvolle Nutzung der Abwärme entscheidet oft über die Wirtschaftlichkeit der gesamten Anlage⁹⁵ („Kraft-Wärme-Kopplungsbonus“). Der „Technologiebonus“ wird gewährt für den Einsatz neuer Technologien (z. B. Brennstoffzellen, Gasturbinen) (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006). Neben den Anlagenbetreibern (vornehmlich Landwirte) profitieren auch Anlagenhersteller von dem Boom.

Die Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage hängt von verschiedenen Faktoren ab (wie Anlagengröße, Bereitstellungskosten für das Substrat und dessen Zusammensetzung, Wirkungsgrad der Anlage) und ist im Allgemeinen schwierig zu bestimmen. In der Praxis werden oft projektspezifische Kosten-Nutzen-Analysen erstellt. Beispielsweise beläuft sich der Deckungsbeitrag für eine Arbeitskraftstunde (AKh) bei einer Biogasanlage mit 240 m³ Faulraum und 32 kW elektrischer Leistung auf 24,78 Euro/AKh, der einer Anlage mit 1 100 m³ Faulraum und 150 kW_{el} auf 96,42 Euro/AKh (KTBL 2005a u. b).

Die Gaserträge verschiedener Energiepflanzen sind unterschiedlich. Einsetzbar sind sämtliche pflanzlichen Rohstoffe, wobei aufgrund des unterschiedlichen Energiegehaltes und ungleicher Vergärungsdauer ein optimaler Rohstoffmix für eine bestmögliche Gasausbeute verwendet werden sollte (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006). 2003 waren ca. 3 900 Biogasanlagen in Betrieb (Fachverband Biogas 2004) – eher bei mittelständischen Unternehmen. Der Trend wird voraussichtlich weg von kleinen bäuerlichen hin zu größeren Gemeinschaftsbiogasanlagen gehen, was Vorteile bezüglich der variablen Kosten und in der Abwärmenutzung brächte (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

⁹⁴ Der Vergütungszeitraum lt. EEG beträgt 20 Jahre. Für Anlagen, die am 1. Januar 2005 oder später ans Netz gehen, reduziert sich die Grundvergütung für die gesamte Laufzeit um 1,5 Prozent bezogen auf die im Vorjahr gewährte Vergütung.

⁹⁵ Die EEG-Grundvergütung richtet sich zunächst nach der Anlagengröße; für den zusätzlichen Erhalt der Biomasseboni spielen die Ausgangssubstrate, die Verwendung der Abwärme und/oder der Gebrauch neuer Technologien eine Rolle.

Das produzierte Biogas wird vornehmlich zur Erzeugung elektrischer Energie verwendet (Verbrennung von Methan in einem BHKW). Der gewonnene Strom kann in das Stromnetz eingespeist werden (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006). Eine reine Wärmeverwendung des Biogases scheidet aus ökonomischen Gründen aus (C.A.R.M.E.N. 2005, S. 248). Die Einspeisung des produzierten Methans ins Erdgasnetz stellt eine weitere, eher zukünftige Möglichkeit der Nutzung von Biogas dar: Das erzeugte Methan kann auf Erdgasqualität gereinigt und somit ins Netz eingespeist werden. Ein weiterer zukünftiger Trend könnte die Nutzung von Biogas als Treibstoff sein, wofür dieses entsprechend aufbereitet (gereinigt) werden müsste, was technisch machbar ist.⁹⁶ Erdgasfahrzeuge spielen in Deutschland jedoch insgesamt bisher eine untergeordnete Rolle (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

Holz

Bei der energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe ist Holz immer noch der wichtigste Rohstoff, insbesondere zur Wärmeerzeugung. Stückholz wird dabei fast ausschließlich im kleinen Leistungsbereich eingesetzt und ist dort deutlich wirtschaftlicher als andere Möglichkeiten der Heizwärmeversorgung. Die Wärmeproduktion mit Holzpellets (im kleinen Leistungsbereich) ist gegenüber konventionellen Energieträgern knapp wirtschaftlich (Stand: Januar 2006) (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006). Im Gegensatz zu steigenden Preisen für fossile Energieträger (insbesondere Heizöl und Gas) haben sich die Verbraucherpreise für Holzpellets in Deutschland in den letzten Jahren kaum erhöht. Eine Umrüstung bestehender Heizsysteme ist technisch ohne hohen Aufwand möglich. Nachteilig wirken sich bei Pelletheizungen jedoch die höheren Investitionen für den Kessel und die Anlage aus, die durch eine staatliche Förderung (Marktanreizprogramm) nur teilweise kompensiert werden. Aufgrund des im Vergleich zu fossilen Energieträgern günstigeren Verbraucherpreises für Holzpellets ist eine Holzpellettheizung insbesondere verglichen mit einer Ölzentralheizung konkurrenzfähig. Die Anlagen (Bestand 2005 in Deutschland ca. 40 000) werden hauptsächlich in Privathaushalten genutzt. Der Marktanteil von Pelletheizungen am gesamten deutschen Heizungsmarkt liegt bei etwa 1 Prozent (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

Mittlere und große Anlagen zur Wärmeproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen werden in der Regel mit Holzhackschnitzeln betrieben. Die erreichbaren Wärmegestehungskosten liegen in den meisten Fällen unter denen konventioneller Varianten (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006). In den letzten Jahren kommen auch verstärkt große Pelletheizanlagen zum Einsatz, deren Wärmegestehungskosten allerdings in der Regel über denen von Hackschnitzelheizanlagen liegen.

⁹⁶ In Schweden gibt es bereits öffentliche Tankstellen, an denen Biogas getankt werden kann (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

Zukünftige Kraftstoffe

Über zukünftig nutzbare Biokraftstoffe ist wenig Information verfügbar, da diese bisher noch keine Marktrelevanz besitzen. Exemplarisch soll der aktuelle Diskussionsstand nach Schmitz (2006) aufgeführt werden, welchem eine vergleichende Analyse von Pflanzenöl, Biodiesel, Bioethanol, Biogas, BTL und Biowasserstoff zugrunde lag. Resümiert wird dort, dass

- die heute noch nicht im Markt vertretenen Biokraftstoffe BTL und Ethanol (aus Lignocellulose) mittelfristig bessere Kostenpositionen erreichen werden als derzeit verfügbare Biokraftstoffe (Pflanzenöl, Biodiesel und Ethanol aus Zucker und Stärke). Bei Biodiesel wird dabei mit einem Kostenanstieg aufgrund steigender Pflanzenölpreise und gesättigter Nebenproduktmärkte gerechnet;
- die Wettbewerbsfähigkeit von in Deutschland produzierten Biokraftstoffen im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen nicht gegeben ist bzw. erst bei einem Rohölpreis von etwa 75 US-Dollar/Barrel erreicht wird; FuE-Bedarf generell bei Biokraftstoffen der 2. Generation (BTL, Biogas, Bioethanol aus Lignocellulose und Biowasserstoff) besteht, z. B. durch Pilot- und Demonstrationsvorhaben (s. a. Kap. V);
- im internationalen Vergleich für die Ethanolproduktion aus Zucker und Stärke Brasilien kostenseitig Maßstäbe setzt: Dort erfolgt die Ethanolproduktion zu weniger als der Hälfte der Kosten in Deutschland. Diese Produktionskosten werden sich hierzulande nicht erreichen lassen. Allerdings kann der deutsche Bedarf nicht ausschließlich aus brasilianischen Exporten gedeckt werden, da die Bioethanolnachfrage weltweit steigt;
- sich Biodiesel aus Rapsöl mit Soja- und Palmölprodukten in internationaler Konkurrenz befindet;
- bei BTL-Kraftstoffen die Konkurrenzfähigkeit ggf. dann gegeben ist, wenn der Technologievorsprung gehalten werden und die Rohstoffversorgung günstig erfolgen können.

Bioenergieerzeugungskosten und Rohölpreis

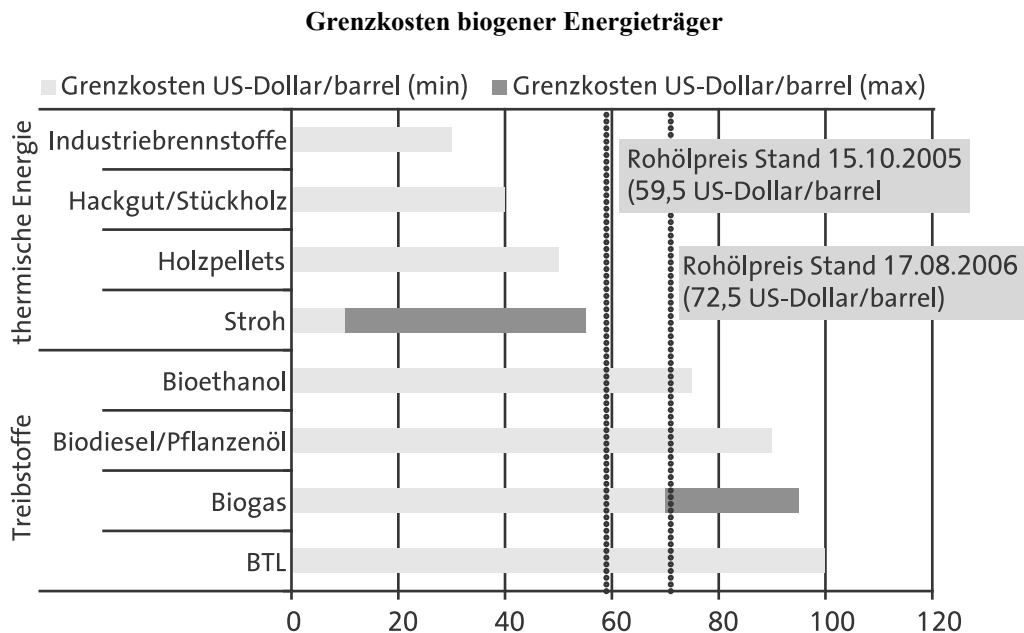
Wesentlich für die Marktablierung von Bioenergie und Biokraftstoffen ist zudem die Kostenentwicklung fossiler

Referenzsysteme, die signifikant durch den Rohölpreis beeinflusst ist. Dabei stellen sich die verschiedenen Bioenergieträger unterschiedlich dar (IE 2005a):

- Wärme (thermische Energie) aus Biomasse ist für Endkunden attraktiv, wenn diese sich kostenneutral oder kostengünstig gegenüber fossilen Referenzsystemen darstellt. Anhand von Kostenvergleichen typischer Modellsysteme lässt sich abschätzen, bei welchen Erdölpreisen dies der Fall ist. Exemplarisch ist dies in Abbildung 58 dargestellt, wobei sich beim gegenwärtigen Ölpreis eine Wärmeerzeugung aus Biomasse vielfach ökonomisch vorteilhaft darstellt.
- Strom aus Biomasse wird nach dem EEG vergütet und steht damit in den Erzeugungskosten nicht in direkter Konkurrenz mit den fossilen Referenzsystemen. Daher ist für die Einschätzung der weiteren Entwicklung ein Vergleich der Stromgestehungskosten mit der Einspeisevergütung des EEG entscheidend. Hier ist gegenwärtig in vielen Fällen bereits eine wirtschaftliche Stromerzeugung möglich.
- Kraftstoffe aus Biomasse müssen zwar gemäß der europäischen Kraftstoffdirektive mit gewissen Anteilen zur Kraftstoffversorgung beitragen, da es jedoch für diese bisher keinen Beimischungszwang oder Abnahmeverrang (wie beim EEG) gibt, unterliegt ihre Etablierung dem Marktgeschehen. In Abbildung 58 sind ebenfalls exemplarisch deren Erzeugungskosten denen fossiler Referenzsysteme gegenübergestellt. Dabei zeigt sich, dass Biokraftstoffe erst bei Rohölpreisen von 80 bis 100 US-Dollar/Barrel konkurrenzfähig sind. Dieser Kostennachteil wird durch die Mineralölsteuerbefreiung teilweise kompensiert.

Damit ist bei steigenden Rohölpreisen insbesondere im Wärmebereich eine verstärkte Etablierung von Biomasse zu erwarten – bei Strom- und Kraftstoffen entscheiden zumindest kurzfristig eher die Förderinstrumente. Mittelfristig könnte auch hier die weitere Preisentwicklung beim Rohöl entscheidend sein (IE 2005a). Die Entwicklung des Rohölpreises spiegelt langfristige Kosten-, Angebots- und Nachfragetrends, kurzfristige Marktlagen, die Preissetzungsmacht von Anbietergruppen sowie politische, ökologische, spekulative, wetter- und katastrophengebundene Einflüsse wider.

Abbildung 58



Quelle: IE 2005a, ergänzt

2. Interessen und Erwartungen von Akteuren

Die Interessen und Erwartungen der Akteure wurden durch eine Fragebogenaktion analysiert (deutschlandweit 337 Akteure aus Unternehmen, wissenschaftlichen Einrichtungen, Vereinen und Verbänden aus unterschiedlichen Bereichen der stofflichen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen). Die Antworten (Rücklauf 88, Mehrfachnennungen möglich) bezüglich der Vor- und Nachteile von nachwachsenden Rohstoffen im Vergleich zu fossilen Ausgangsmaterialien sind in den Abbildungen 59 und 60 dargestellt. Aus Sicht der Akteure wiesen demnach Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen vor allem unter Umweltgesichtspunkten Vorteile auf. An zweiter Stelle wurden qualitative Vorteile der Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen genannt. Einen gewissen Stellenwert haben auch die langfristige Verfügbarkeit und Gesundheitsaspekte. Monetäre Vorteile in Form langfristig stabiler Preise werden nur in 9 Prozent der Fälle angegeben (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

Bei den Nachteilen von nachwachsenden Rohstoffen stehen an erster Stelle monetäre (Abbildung 60), an zweiter Stelle qualitative. Zugleich wird als Schwierigkeit aufgeführt, Verbraucher von den Vorteilen nachwachsender Rohstoffe zu überzeugen (Kategorien „zu wenig Kenntnis in der Öffentlichkeit“, „geringe Akzeptanz“, „schwierige Markteinführung“ und „höherer Beratungsaufwand“) (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

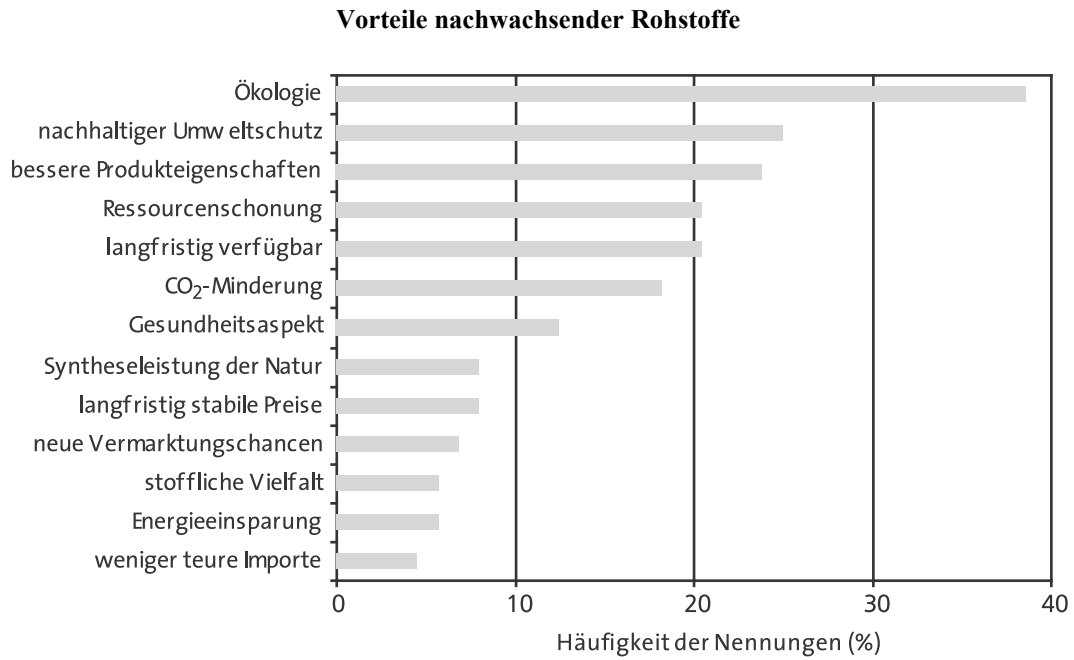
Auch bei der Frage nach Hemmnissen in der stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe (Abbildung 61) wird der Preis als entscheidend angesehen, wobei die geringe Akzeptanz in der Bevölkerung sowie erhöhte Produkti-

onskosten (im Vergleich zu Produkten aus fossilen Rohstoffen) auf den Plätzen 2 bzw. 4 rangieren. Interessant ist auch der Bereich der „ungeklärten rechtlichen Rahmenbedingungen“: Größtenteils wurde von den Befragten bemängelt, dass keine klaren rechtlichen Rahmenbedingungen vorherrschen. Teilweise wurden auch verschiedene Gesetze oder Verordnungen der jeweiligen Branche als Hemmnis genannt (z. B. die „Verpackungsverordnung“ und die „Bundes-Immissionsschutzverordnung“). Auch eine unterschiedliche Gesetzgebung in den einzelnen Bundesländern wurde als Hemmnis aufgeführt (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

Zur Beseitigung von Hemmnissen sehen die Akteure als wichtigstes Aktionsfeld die rechtlichen Rahmenbedingungen für die stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Darunter verstehen die Befragten oftmals die „Änderung der rechtlichen Rahmenbedingungen“ oder „Schaffung von klaren rechtlichen Rahmenbedingungen“. Als Maßnahmen zur Beseitigung der Hemmnisse wurden konkret z. B. „Gesetzgebung für die Entsorgung von biologisch abbaubaren Werkstoffen“ oder „Genauere Gesetze für Bioschmierstoffe“ benannt (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

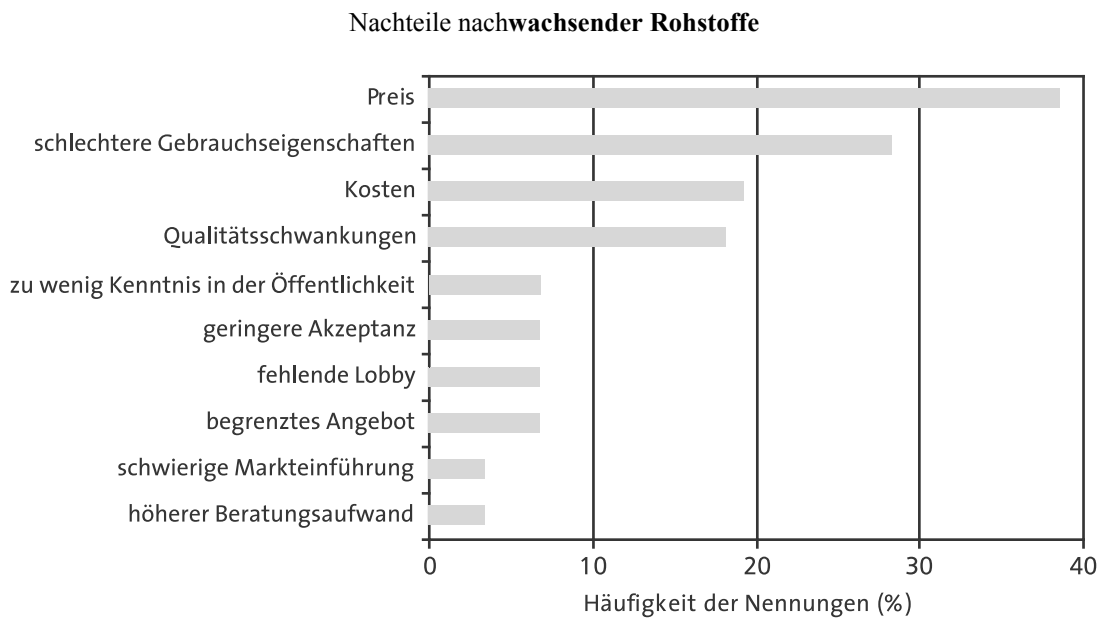
Neben der Verbesserung oder Schaffung von gesetzlichen Rahmenbedingungen wünschen sich die Akteure mehr Förderung. In diese Richtung zielt die Forderung nach Markteinführungsprogrammen. Auch durch höhere Kosten für die Petrochemie, z. B. durch höhere Steuern, könnte der Staat die Unternehmen unterstützen. PR-Maßnahmen zielen vor allem auf eine umfassendere Information der Verbraucher und Nutzer von Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen ab (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006).

Abbildung 59



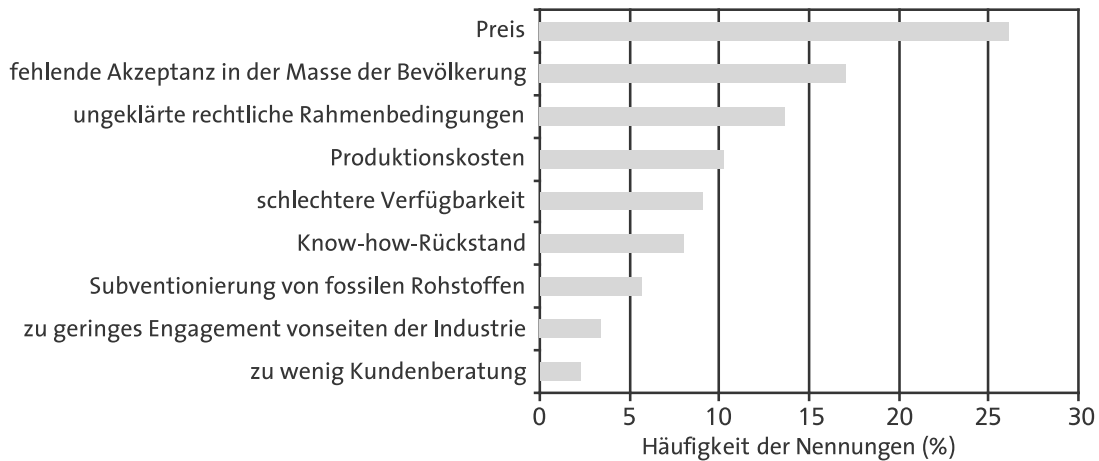
Quelle: FHW/C.A.R.M.E.N. 2006

Abbildung 60



Quelle: FHW/C.A.R.M.E.N. 2006

Abbildung 61

Hemmnisse in der stofflichen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen

Quelle: FHW/C.A.R.M.E.N 2006

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die befragten Akteure überraschend optimistisch in die Zukunft blicken (FHW/C.A.R.M.E.N 2006). Zwar gilt dies nicht für alle Bereiche, doch viele Unternehmen, Einrichtungen oder Organisationen arbeiten meist auf verschiedenen Gebieten und haben damit meist mehrere wirtschaftliche Standbeine, sodass eine kurzfristige Verschlechterung der wirtschaftlichen Lage in einem Einsatzfeld oftmals durch gegenläufige Entwicklungen in anderen Feldern zumindest teilweise ausgeglichen werden kann. Um die Zukunftsaussichten der Branche zu verbessern, müssen nach Meinung der Akteure folgende Aspekte verändert werden, um Kostendegressionseffekte durch höheren Absatz und Stückpreissenkung für Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen zu erreichen (nach FHW/C.A.R.M.E.N 2006):

- Schaffung klarer und verlässlicher rechtlicher Rahmenbedingungen für die stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen.
- Verstärkte Information und Kommunikation sowie zielgerichtetes öffentliches Marketing: Die Verbraucher bzw. Nutzer von nachwachsenden Rohstoffen sollten über die qualitativen und ökologischen Vorteile von natürlichen Rohstoffen und den darauf basierenden Produkten besser informiert werden, um zum einen Hemmnisse beim Kauf abzubauen und zum anderen eine höherer Zahlungsbereitschaft zu erreichen.
- Forcierte Maßnahmen im Bereich Forschung und Entwicklung: Dadurch sollen zum Beispiel Qualitätsschwankungen bei den Rohstoffen vermindert werden. Des Weiteren sollen neue Einsatzfelder (neue Märkte) für die stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen erschlossen werden. Auch eine Verminderung der Produktionskosten durch neue Sorten oder nutzbare Pflanzenarten sowie verfahrenstechnische Fort-

schritte sollen mithilfe verstärkter Forschung erreicht werden.

- Verstärkte Subventionierung: Die Politik sollte zum einen verschiedene Markteinführungsprogramme starten und zum anderen die stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe finanziell fördern.

3. Verbrauchererwartungen

Zu den Verbrauchererwartungen lässt sich aus verfügbaren Umfragen und Marktversuchen ein erstes Bild zeichnen. Aufgeführt sind im Folgenden die drei exemplarischen Felder Bioschmierstoffe, Biokunststoffe sowie Bau- und Dämmstoffe.

Bioschmierstoffe

Im Bereich der Schmierstoffe spielt vor allem deren Qualität eine herausragende Rolle (IFAS 2004). Die Nutzer erwarten von Bioschmierstoffen mindestens die gleiche Qualität wie von synthetischen Ölen oder Fetten. Eigenschaften wie Langlebigkeit oder Schmiereigenschaften sind entscheidend beim Kauf. Während sich synthetische Schmierstoffe aus technischer Sicht schon seit Jahrzehnten bewährt haben, ist dies bei Bioschmierstoffen noch nicht der Fall, da hier Langzeiterfahrungen fehlen (FHW/C.A.R.M.E.N 2006).

Daneben spielen auch Umweltgesichtspunkte eine immer wichtigere Rolle (Kooperationsstelle Hamburg 1996): Während sich synthetische Schmierstoffe innerhalb von drei Wochen um 10 bis 20 Prozent abgebaut haben, sind dies bei Bioschmierstoffen 90 Prozent, was mit einer geringeren Umweltgefährdung im Falle des Eintrags (in die Umwelt) einhergeht. Auch gesundheitliche Aspekte werden aus Verbrauchersicht benannt, da z. B. eine „Biokettenschmierung“ für Motorsägen im Gegensatz zur synthe-

tischen Kettenschmierung keine toxischen Stoffe für den Menschen mehr enthält (FHW/C.A.R.M.E.N 2006).

Die untergeordnete Bedeutung von Bioschmierstoffen gegenüber mineralischen Produkten ist vor allem durch den höheren Preis und die bislang ungenügenden Produktkenntnisse und Akzeptanz vonseiten der Verbraucher bedingt. Dem potenziellen Nutzer von Bioschmierstoffen fehlen oft Kenntnisse über deren technische Vorteile und Nutzbarkeit. Auch schlechte Erfahrungen mit technisch noch nicht ausgereiften Produkten oder Probleme bei Umstellungsmaßnahmen wirken sich hemmend aus. Um zukünftig den Markteintritt zu erleichtern, sollte der Verbraucher über die Vorteile gegenüber konventionellen Mineralölen sowie über Fördermöglichkeiten des Markteinführungsprogramms für Bioöle informiert und beraten werden. In Einsatzbereichen, die bisher nur wenig mit biogenen Produkten in Berührung gekommen sind, wie z. B. bei den Motor- und Getriebeölen, ist eine Neukundenberatung erforderlich. Auch consequentes Marketing und Vertrieb seitens der Unternehmen ist unabdinglich (Festel/Kölle 2005).

Biologisch abbaubare Werkstoffe (BAW)

Hierzu gab es regional begrenzte Modellversuche in Remscheid (Winter 1998/1999) und in Kassel (Mai 2001 bis Ende 2002).

In Remscheid wurde der Einfluss einer Bereitstellung von BAW-Abfallbeuteln hinsichtlich der Akzeptanz der Bioabfallsammlung untersucht. Für die Verbraucher spielte vor allem die Funktionalität der Abfallbeutel eine große Rolle. Vonseiten der Verbraucher bestand eine höhere Akzeptanz der Biotonne bei Einsatz von BAW-Abfallbeuteln (Turk/Idelmann 2000): Die Bioabfallsammlung wird dann als weniger aufwendig empfunden als vorher, was eine bessere Abfalltrennung zur Folge hat. Daraus ergeben sich wiederum steigende Bioabfallmengen (FHW/C.A.R.M.E.N 2006).

In Kassel wurde auch die Akzeptanz kompostierbarer Verpackung getestet. Dazu vertrieben Einzelhandelsgeschäfte ein Sortiment an kompostierbaren Verpackungen aus BAW. Während des Versuchs fanden Kundenbefragungen statt: Fast 90 Prozent befürworten den Ersatz von konventionellen Kunststoffverpackungen durch kompostierbare. 75 Prozent würden für BAW-Verpackungen auch Mehrkosten in Kauf nehmen. Hohes Interesse erfuhren tütenähnliche Produkte wie Tragetaschen und Abreißbeutel in der Obst- und Gemüseabteilung, die einen möglichen Zweitnutzen (z. B. als Sammelgefäß für organische Küchenabfälle) abwarfen. Weiterhin wichtig für Verbraucher sind Umweltaspekte (Schonung fossiler Ressourcen etc.), wobei die Produktion der benötigten Rohstoffe nicht zu Umweltbelastungen durch verstärkten Mais- oder Kartoffelanbau führen sollte. Verbraucher sehen hier die Gefahr der Monokultur und der Belastung des Bodens beispielsweise durch Überdüngung. Darüber hinaus spielen Informationen über das Produkt bei der Kaufentscheidung eine wichtige Rolle. Des Weiteren sollten BAW-Produkte eindeutig gekennzeichnet sein, damit die biolo-

gische Abbaubarkeit auf den ersten Blick erkennbar ist. Zudem erwarten Verbraucher, dass BAW-Produkte im Handel weitverbreitet und z. B. in den gängigen Einkaufsstätten verfügbar sind (Modellprojekt Kassel 2003; www.modellprojekt-kassel.de).

Bau- und Dämmstoffe

Im Bereich Bau- und Dämmstoffe sind nach Behring et al. (1999) fast 42 Prozent der privaten Bauherren in Deutschland bereit, mehr für ökologische Baustoffe zu zahlen. Gründe dafür liegen in Umweltvorteilen prinzipieller Art als auch in Spezifika der genutzten Materialien (als direkt wahrnehmbarer Vorteil). Bei den Naturdämmstoffen spielen vor allem gesundheitliche Aspekte eine tragende Rolle bei der Kaufentscheidung (TNS Emnid 2003).

Mit dem Baustoff Holz verbinden 80 Prozent der Deutschen ein angenehmes Raumklima, gute wärmedämmende und feuchtigkeitsregulierende Eigenschaften. Bei der Holzbauweise spielen vor allem emotionale Faktoren (Lebens- und Wohnqualität) für Eigentümer eine oft größere Rolle als physikalische und technische Gesichtspunkte (TNS Emnid 2003). Daneben sind preisliche Aspekte und Bauzeiten von Bedeutung.

Insgesamt betrachtet tauchen folgende Anforderungen an Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen immer wieder auf (FHW/C.A.R.M.E.N 2006):

- vergleichbare Preise bzw. Kosten für Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen zu konventionellen Fabriken; höhere Preise werden am ehesten bei besserer Qualität oder einem Zusatznutzen akzeptiert;
- vergleichbare funktionale Eigenschaften und Qualität wie herkömmliche Produkte. Ist dies gegeben, entscheidet oft ein Zusatznutzen (z. B. BAW-Tragetaschen auch als Biomüllbeutel verwendbar);
- ausreichende Produktvielfalt, um zwischen verschiedenen Ausführungen wählen zu können, was ein entsprechend großes Sortiment an NaWaRo-Produkten voraussetzt;
- Umweltaspekte spielten zwar eine wichtige Rolle, lösen jedoch nur in wenigen Fällen eine Kaufentscheidung bei einem erhöhten Preis aus bzw. rechtfertigen diesen langfristig;
- Information über das Produkt – leicht verständlich und vollständig (Begründung für den höheren Preis, Sichtbarmachen der Verpackung [Label]);
- Verfügbarkeit der Produkte in direkter Verbrauchernähe (Supermärkte), für den Verbraucher mit geringem Aufwand verbunden;
- Gesundheitsaspekte werden i. d. R. positiv assoziiert mit Produkten, was bei bestimmten Verbraucherschichten für den Kauf ausschlaggebend sein kann;
- emotionaler Aspekt/ästhetische Werte kommen besonders bei Baustoffen zum Tragen.

4. Makroökonomische Aspekte

Bislang liegen nur vereinzelte Erkenntnisse zu makroökonomischen Effekten der Nutzung nachwachsender Rohstoffe in Deutschland vor. Für die stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen konnte keine Studie identifiziert werden. Im Auftrag der FNR untersucht seit 2006 das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe, in Zusammenarbeit mit dem Institut für Betriebslehre der Agrar- und Ernährungswirtschaft der Justus-Liebig-Universität Gießen volkswirtschaftliche Effekte von nachwachsenden Rohstoffen (FHW/C.A.R.M.E.N 2006). Ergebnisse sind noch nicht öffentlich verfügbar.

Um dennoch eine Einordnung volkswirtschaftlicher Effekte der Nutzung nachwachsender Rohstoffe zu ermöglichen, werden nachfolgend die Ergebnisse identifizierter Studien zur energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe mit Relevanz für Deutschland wiedergegeben. Es werden dabei volkswirtschaftliche Effekte erneuerbarer Energieträger insgesamt betrachtet, wobei Biomasse als deren integrierter Bestandteil angesehen wird. Soweit separat ausgewiesen, wird dies aufgeführt. Die nachfolgende Betrachtung soll einen Rahmen aufzeigen, wobei die stoffliche Nutzung derzeit noch geringere Effekte haben dürfte. Allerdings mangelt es auch im Bereich der energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe bislang an einer umfassenden Analyse der volkswirtschaftlichen Effekte.

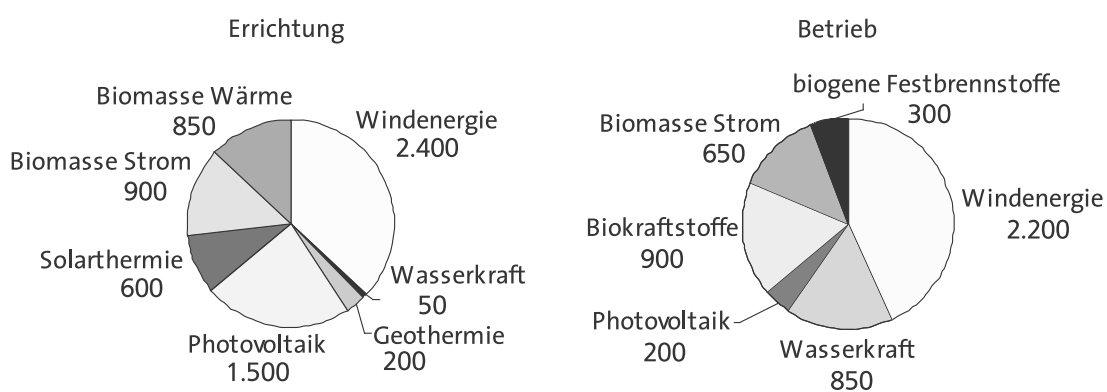
4.1 Volkswirtschaftliche Effekte der Nutzung erneuerbarer Energieträger

Die volkswirtschaftliche Wertschöpfung aus erneuerbaren Energien ergibt sich zum einen aus den Investitionen in neue Anlagen, zum anderen aus dem Betrieb bereits errichteter Anlagen. Für das Jahr 2004 wurde der Umsatz für die Errichtung von Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien auf ca. 6,5 Mrd. Euro geschätzt (BMU 2005). Davon entfielen etwa 37 Prozent auf neue oder abgeänderte Anlagen zur Windenergienutzung, 23 Prozent auf Photovoltaikanlagen sowie jeweils etwa 13 bis 14 Prozent auf Anlagen zur Strom- bzw. Wärmegewinnung aus Biomasse. Mit dem Betrieb von Anlagen für erneuerbare Energieträger wurden ca. 5,1 Mrd. Euro umgesetzt (BMU 2005). Dabei hat die Windenergie mit 44 Prozent einen hohen Anteil, gefolgt von Biokraftstoffen (18 Prozent), Wasserkraft (17 Prozent) und der Stromgewinnung aus Biomasse (13 Prozent) (Abbildung 63). Der Gesamtumsatz mit erneuerbaren Energien belief sich in Deutschland demnach auf 11,6 Mrd. Euro. Davon hatte wiederum die Windenergie mit fast 40 Prozent einen sehr hohen Anteil, gefolgt von den verschiedenen Formen der Biomassenutzung (31 Prozent) und der Solarenergie (20 Prozent), wohingegen Wasserkraft und Geothermie Umsätze von weniger als 1 Mrd. Euro auf sich vereinigten (FHW/C.A.R.M.E.N 2006, S. 140).

Hinsichtlich der Beschäftigungswirkungen wurden für das Jahr 2002 etwa 120 000 Erwerbstätige im Bereich der erneuerbaren Energien insgesamt ermittelt. Für das Jahr 2004 werden etwa 130 000 Erwerbstätige geschätzt (BMU 2005; Bundesregierung 2004b).

Abbildung 62

Umsätze aus der Errichtung und dem Betrieb von Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Jahr 2004 (in Mio. Euro)



Quelle: BMU 2005

4.1.1 Beschäftigungswirkungen

Bislang existiert noch keine amtliche Statistik zu Beschäftigungszahlen im Bereich erneuerbarer Energien bzw. der energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Entsprechende Daten über Beschäftigungswirkungen werden von Verbänden erhoben oder im Rahmen wissenschaftlicher Studien auf der Basis von Modellrechnungen abgeschätzt (FHW/C.A.R.M.E.N 2006). Die Ergebnisse solcher Studien differieren teilweise erheblich, nicht zuletzt auch deshalb, da oft unterschiedliche methodische Ansätze, betrachtete Teilbereiche und Zeitrahmen gewählt werden. Daher sind Studien hinsichtlich der Beschäftigungswirkungen der energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe nur eingeschränkt vergleichbar.⁹⁷

Kurzfristige Beschäftigungswirkungen

Pfaffenberger et al. (2003) haben Beschäftigungswirkungen bei erneuerbaren Energien durch Unternehmensbefragungen für 2003 untersucht. Für Biomasse bzw. Biogas wurden dabei ca. 5 100 Arbeitsplätze in Deutschland ermittelt, von denen 1 100 unmittelbar mit Umsätzen bei erneuerbaren Energien in Verbindung gebracht werden konnten (FHW/C.A.R.M.E.N 2006, S. 142).

Aufgrund der seit Ende der 1990er Jahre intensivierten Nutzung erneuerbarer Energien sind auch die Bruttobeschäftigungseffekte in diesem Feld deutlich gestiegen. Nach 66 600 Personen im Jahr 1998 konnten diesem Bereich im Jahr 2002 etwa 118 700 Arbeitsplätze zugerechnet werden (entspricht einem Anstieg von fast 80 Prozent in vier Jahren). Insbesondere durch Investitionen und Betrieb von Windkraftträdern wurde eine deutliche Beschäftigungswirkung mit einem Zuwachs von mehr als 37 000 Arbeitsplätzen induziert. Demgegenüber waren bei der Nutzung von Biomasse zu Energiezwecken in dem betrachteten Zeitraum nur geringe Beschäftigungszuwächse zu verzeichnen (von 25 400 im Jahr 1998 auf 29 000 Beschäftigte im Jahr 2002) (Edler et al. 2004; Sprenger et al. 2003). Insgesamt ist bei den aufgeführten Beschäftigungszahlen zu beachten, dass zwar sowohl die direkten als auch indirekten Beschäftigungsimpulse durch eine stärkere Nutzung erneuerbarer Energien berücksichtigt wurden, dass jedoch die dämpfenden Effekte, z. B. durch höhere Einspeisevergütungen von „Ökostrom“, die Finanzierung von Subventionen in diesem Feld durch staatliche Mittel oder der Verlust an Arbeitsplätzen in der „konventionellen“ Stromerzeugung und Energienutzung, nicht erfasst wurden (FHW/C.A.R.M.E.N 2006, S. 142).

Längerfristige Beschäftigungseffekte

Die Bundesregierung strebt bis zum Jahr 2010 eine Verdopplung des Anteils regenerativer Energien am Primärenergie- sowie Stromverbrauch an. Neben der Erreichung umweltpolitischer Ziele sollen auch zusätzliche Arbeitsplätze im Bereich der regenerativen Energieerzeugung

und bei der Herstellung der dafür notwendigen Anlagen geschaffen werden. Diesen sind jedoch Arbeitsplatzverluste durch einen Rückgang der Produktion von Strom aus fossilen Energieträgern sowie durch erhöhte Strompreise oder Steuern zur Finanzierung von Subventionierungszahlungen bei der regenerativen Energiebereitstellung gegenzurechnen (Hentrich et al. 2004). Letztgenannter Aspekt wirkt sich hemmend auf den Konsum in der Bevölkerung aus, da vor allem durch die erhöhten Strompreise ein verringertes Budget für den Konsum anderer Produkte und Dienstleistungen zur Verfügung steht. Durch die verringerten Konsumausgaben gehen Arbeitsplätze in konsumnahen Wirtschaftszweigen und deren vorgelagerten industriellen Sektoren verloren (sog. „Budgeteffekt“) (FHW/C.A.R.M.E.N 2006, S. 143).

In Pfaffenberger et al. (2003) wurden die direkten und indirekten Beschäftigungswirkungen verschiedener Formen und Technologien erneuerbarer Energien mittels Simulationsberechnungen für Deutschland analysiert. Dabei ergaben sich für alle Formen (Windkraft, Photovoltaik, Solarthermie, Biomasse, Biogas, Geothermie) positive Beschäftigungswirkungen aus der Investition und dem Betrieb der Anlagen sowie negative Beschäftigungseffekte durch hohe Einspeisevergütungen für erneuerbare Energien, die über einen längeren Zeitraum zu einem partiellen Konsumverzicht der Verbraucher aufgrund höherer Energiepreise führten. In der Gesamtbilanz dieser Berechnungen waren die Beschäftigungseffekte bei Biogas negativ, wohingegen bei Biomasse leicht positive Beschäftigungswirkungen festgestellt wurden. Bezogen auf die Volkswirtschaft kamen Pfaffenberger et al. (2003) für das Jahr 2002 auf einen positiven Beschäftigungseffekt von rund 60 000 Arbeitsplätzen durch die Nutzung erneuerbarer Energien, der sich innerhalb von 20 Jahren in ein Minus von rund 4 000 Arbeitsplätzen umwandeln und auch auf diesem Niveau bleiben soll (FHW/C.A.R.M.E.N 2006, S. 143).

Hentrich et al. (2004) kamen zu dem Ergebnis, dass – bei Berücksichtigung von positiven Beschäftigungsimpulsen im Bereich der regenerativen Energien sowie der gegenläufigen Beschäftigungswirkungen – in der Summe auf mittlere Sicht keine zusätzliche Beschäftigung aus einem verstärkten Ausbau regenerativer Energien in Deutschland zu erwarten ist. Berücksichtigt man zusätzlich, dass es durch die Finanzierung der Investitionen in eine verstärkte Nutzung regenerativer Energien und der mit diesen verbundenen höheren Betriebskosten auch im privaten Sektor zu einer Verdrängung von Investitionen und Konsum in anderen Feldern kommt, so sinkt die positive Beschäftigungswirkung weiter. Nach Hentrich et al. (2004) beträgt diese 2010 nur noch 7 000 Personen und ist damit im gesamtwirtschaftlichen Kontext fast zu vernachlässigen. Leichte Beschäftigungsgewinne haben demnach Anlagenhersteller und das Baugewerbe zu erwarten, wohingegen das Verkehrsgewerbe und der Handel eher mit Beschäftigungsverlusten zu rechnen haben, falls der Anteil regenerativer Energien deutlich ausgedehnt wird (Hentrich et al. 2004; nach FHW/C.A.R.M.E.N 2006).

⁹⁷ Zu diesem Schluss kam auch die Antwort der Bundesregierung auf eine Kleine Anfrage (Bundesregierung 2004a) zu den Beschäftigungseffekten durch den Ausbau erneuerbarer Energien.

In Schulz et al. (2004) wurden sektorale und gesamtwirtschaftliche Wirkungen eines weiteren Ausbaus erneuerbarer Energien in Deutschland bis zum Jahr 2010 analysiert. Durch den Ausbau erneuerbarer Energiezweige werden zunächst positive Produktions- und Beschäftigungseffekte vor allem im Investitionsgüter- und Baugewerbe ausgelöst, wohingegen die höheren Einspeisevergütungen regenerativer Energieträger vor allem stromintensive Produktionszweige und den privaten Konsum mittel- und längerfristig belasten. Gemäß dieser Studie wurden in Deutschland bei einer Verdopplung des Anteils erneuerbarer Energien von 2004 bis 2010 Investitionen in diesem Feld von 2,6 Mrd. Euro im Jahr 2004 erwartet, die dann bis 2010 auf etwa 1,4 Mrd. Euro abnehmen. Diese Investitionen betrafen in hohem Maße die Windkraft, wohingegen für Biogas- und Biomasseanlagen nur vergleichsweise geringe Investitionen angenommen wurden (FHW/C.A.R.M.E.N 2006, S. 145).

Fasst man die Ergebnisse der Untersuchung von Schulz et al. (2004) zusammen, so wird ersichtlich, dass in den ersten Jahren der Nachfrageimpuls eines Ausbaus erneuerbarer Energien in Deutschland dominiert, in den Folgejahren der Kostenimpuls. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass sich in den späteren Jahren bis 2010 das Investitionsvolumen für diesen Zweck verringert und gleichzeitig die Zusatzkosten, die mit der Erzeugung von Energie aus regenerativen Energiequellen verbunden sind (aufgrund der über einen Zeitraum von oftmals 20 Jahren garantierten Einspeisevergütungen), ansteigen. Diese Zusatzkosten sind auch dann kostenwirksam, wenn die positiven Produktions- und Beschäftigungseffekte der Investitionen in erneuerbare Energiequellen längst ausgeklungen sind. Das hat zur Folge, dass die zu Beginn positive Beschäftigungsbilanz nach wenigen Jahren bereits ausgeglichen ist und im Jahr 2010 negativ wird. Diese Tendenz wird auch von den beiden anderen Studien mit ähnlichem Untersuchungsaufbau (Hentrich et al. 2004; Pfaffenberger et al. 2003) bestätigt, sodass man daraus folgern kann, dass bei der derzeitigen Ausgestaltung der Förderung regenerativer Energien (v. a. durch hohe, über einen langen Zeitraum garantierte Einspeisevergütungen) bei längerfristiger Betrachtung und unter Berücksichtigung der Konsumeffekte v. a. durch höhere Strompreise kein nennenswerter Beschäftigungsbeitrag zu erwarten ist (FHW/C.A.R.M.E.N 2006, S. 145).

Auch das gesamte Wirtschaftsgeschehen und der private Verbrauch profitieren zunächst durch den Ausbau erneuerbarer Energien, doch verliert sich der positive Effekt nach wenigen Jahren und kehrt sich am Ende in eine zwar geringfügige, aber negative Wirkung um (Schulz et al. 2004). Die staatlichen Steuereinnahmen folgen dem Verlauf der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung und schaffen in den Jahren 2004 bis 2006 eine leichte Erholung des Staatsbudgets, reichen im Jahr 2010 allerdings nur noch dazu aus, die wieder steigenden Sozialtransfers auszugleichen (Schulz et al. 2004, nach FHW/C.A.R.M.E.N 2006).

4.1.2 Weitere volkswirtschaftliche Auswirkungen

Agrarsektor

Um den angestrebten Biodieselanteil von 5,75 Prozent bis 2010 zu erreichen, kann es nach Einschätzung von Frondel/Peters (2005a) zu vermehrtem Wettbewerb um Ackerland in Deutschland kommen, da der Rapsanbau erheblich ausgeweitet werden müsste. Bereits im Jahr 2005 wurde auf mehr als 300 000 ha Raps für die Non-Food-Produktion außerhalb der Stilllegungsfläche in Deutschland angebaut (UFOP 2005). Nach einer Studie des Joint Research Centre der EU aus dem Jahr 2003 wird die Verfügbarkeit von Ackerland in der EU als eine wesentliche Restriktion für eine deutliche Ausdehnung der Biotreibstoffherzeugung in der EU gesehen (IES/JRC et al. 2003). Eine weitere Ausdehnung des Rapsanbaus für Non-Food-Produkte könnte zu höheren Preisen für landwirtschaftlich erzeugte Nahrungsmittel, insbesondere Raps und daraus hergestellte Nahrungs- und Futtermittel, führen mit der Folge eines Wohlfahrtsverlustes für die Konsumenten. Aus ökonomischer Sicht hemmt diese Subventionierung zudem den notwendigen Strukturwandel im Agrarsektor (Frondel/Peters 2005a u. b, nach FHW/C.A.R.M.E.N 2006, S. 148).

In Henke (2005a u. b) wurden 2005 die volkswirtschaftlichen Effekte von Biokraftstoffen qualitativ beurteilt. Im Hinblick auf die Agrarpolitik wurde in einer Aufrechterhaltung des Außenschutzes für die Landwirtschaft – mit den in der Tendenz höheren inländischen Preisen im Vergleich zum Weltmarktniveau – eine Ursache für die relativ hohen Kosten der Biokraftstoffproduktion aus heimischen Rohstoffen gesehen. Eine Verringerung oder Aufhebung des Außenschutzes für das Agrarergewerbe begünstige zwar die Verwendung von Biokraftstoffen, allerdings vermindere sich dann vermutlich auch der Absatz aus heimischer Produktion und Rohstoffen, da diese in der Tendenz weniger wettbewerbsfähig sind als z. B. die Biokraftstoffproduktion in Brasilien oder USA (Schmitz 2003). Außerdem sieht Henke (2005b) eine erhebliche Konkurrenz in der Flächennutzung nicht nur zwischen der Nahrungs- und Futtermittelproduktion sowie der Erzeugung von nachwachsenden Rohstoffen, sondern auch mit anderen außerlandwirtschaftlichen Nutzungsformen. Da daher die bereits heute angebauten Rohstoffmengen nur begrenzt erhöht werden können, sind auch eher Umverteilungseffekte innerhalb des Agrarsektors als hohe zusätzliche Einkommens- oder Beschäftigungseffekte zu erwarten (FHW/C. A.R. M.E.N 2006, S. 148).

Effiziente Verminderung von Treibhausgasemissionen

Im Hinblick auf das Ziel einer effizienten Vermeidung von Treibhausgasemissionen können durch den Einsatz von Biokraftstoffen deutliche Energie- und Treibhausgaseinsparungen realisiert werden, doch sind zur Erreichung dieses Zieles in Deutschland andere Optionen kosteneffizienter (Henke 2005b). Als Vergleichsmaßstab gelten in diesem Zusammenhang in der Regel die Kosten 1 t CO₂ im europäischen Emissionshandelssystem, die im

Jahr 2005 bei maximal einem Sechstel der Vermeidungskosten von Biodiesel bzw. Bioethanol lagen (FHW/C.A.R.M.E.N 2006, S. 146).

Henke (2005b) plädierte im Hinblick auf eine kosteneffiziente Reduktion von Treibhausgasemissionen für einen internationalen Handel und die Schaffung globaler Märkte für Biokraftstoffe. Allerdings sind im Moment alle Politikmaßnahmen in diesem Feld auf nationale Produktion und Verwendung konzentriert und oftmals stark durch energie- und agrarpolitische Zielsetzungen geprägt. Daher nutzen die bestehenden Förderprogramme für Biokraftstoffe die Chancen einer internationalen Arbeitsteilung nur marginal (Henke 2005b). Die heute oftmals noch bestehende mangelnde Wettbewerbsfähigkeit einer Biokraftstoffproduktion z. B. in der EU, eine fehlende international durchgängige Standardisierung von Biokraftstoffen bzw. uneinheitliche Kraftstoffnormen, Qualitätsunterschiede zwischen Biokraftstoffen, unterschiedliche Auffassungen über technische Fragen im Zusammenhang mit Biokraftstoffen und Kraftstoffgemischen sowie eine differierende Einschätzung über deren Potenzial zur Treibhausgasverringerung erschweren den Aufbau globaler Märkte für Biokraftstoffe und lassen diese in der näheren Zukunft auch nicht als realistische Option erscheinen (FHW/C.A.R.M.E.N 2006, S. 149).

Stromkosten und -preise

In seiner Stellungnahme zur Förderung erneuerbarer Energien konstatierte der Wissenschaftliche Beirat beim Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit im Jahr 2004, dass durch die hohen Einspeisevergütungen des EEG ein starker Anstieg der Stromproduktion aus erneuerbaren Energien in den vergangenen Jahren festzustellen war, der sich mit hoher Wahrscheinlichkeit auch bis zum Jahr 2010 fortsetzen dürfte. Die Grenzkosten der Stromerzeugung bei erneuerbaren Energien liegen um etwa den Faktor 4 höher als die Grenzkosten der konventionellen Stromproduktion (von Weizsäcker 2004, nach FHW/C.A.R.M.E.N 2006, S. 149).

Kontrovers wird auch der Effekt erhöhter Einspeisevergütungen⁹⁸ für die regenerative Stromerzeugung auf die generelle Strompreisentwicklung für Haushalte, Gewerbe und Industrie diskutiert. Lt. Verband der Netzbetreiber (VDN) (vertritt im Wesentlichen die Interessen der konventionellen Elektrizitätsunternehmen) wurden 2004 3,6 Mrd. Euro an Vergütungen für Einspeisungen nach

dem Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG) fällig (Agrar-Europe 2005). Zwei Drittel davon entfielen auf Windkraft, während Biomasse Einspeisevergütungen von insgesamt 508 Mio. Euro auf sich vereinigen konnte, womit gegenüber dem Jahr 2000 diese Summe fast um den Faktor 7 höher lag. Für die kommenden Jahre rechnet der Verband der Elektrizitätswirtschaft (VDEW) mit steigenden Vergütungen nach dem EEG (FHW/C.A.R.M.E.N 2006, S. 150).

Daneben ist bei der Diskussion um die volkswirtschaftlichen Effekte erneuerbarer Energien zu berücksichtigen, dass nur Strom aus Speicherwasserkraftwerken, aus Geothermie und in eingeschränktem Maße auch aus Biomasse bedarfsgerecht produziert werden kann, während z. B. Strom aus Wind- und Photovoltaikkraftwerken witterungsabhängig zur Verfügung steht. Um dies auszugleichen, müssen Stromunternehmen zusätzliche Spitzenlastkapazität schaffen oder Strom überregional von anderen Unternehmen beziehen. Beides verursacht zusätzliche Kosten, genauso wie ein weiterer Ausbau des Stromverteilnetzes, um die oft verbrauchsfernen Standorte insbesondere von Wind- und Solarkraftwerken an das Versorgungsnetz anzuschließen (von Weizsäcker 2004, nach FHW/C.A.R.M.E.N 2006, S. 150). Erwähnt sei an dieser Stelle, dass auch die adäquate Ermittlung von CO₂-Vermeidungskosten (Klobasa/Ragwitz 2005) sowie die externen Kosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Vergleich zur Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern (Krewitt/Schlomann 2006) eine nicht zu vernachlässigende Rolle bei der kostenseitigen Beurteilung regenerativer und fossiler Energieträger spielen.

4.2 Überlegungen zu einer Analyse der volkswirtschaftlichen Effekte der stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe

Als Fazit der durchgeführten Recherchen und Analyse zeigt sich, dass es auf Basis der vorliegenden wissenschaftlichen Ergebnisse bislang kaum möglich ist, die volkswirtschaftlichen Effekte der energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe in Deutschland zuverlässig und umfassend zu bewerten. Noch unbefriedigender ist die Situation hinsichtlich der volkswirtschaftlichen Effekte der stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe, wo weder für Deutschland noch für andere europäische Länder entsprechende Studien identifiziert werden konnten. Daher besteht in diesem Feld noch ein erhebliches Informationsdefizit.

Im Folgenden sind Grundzüge einer potenziellen Analyse volkswirtschaftlicher Effekte für die stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffen aufgeführt. Die Ausführungen stützen sich wesentlich auf FHW/C.A.R.M.E.N (2006, S. 151 f.):

- Da auch bei der stofflichen Nutzung unterschiedliche Einsatzfelder mit spezifischen Marktgegebenheiten, Konkurrenzsituationen oder Akteurskonstellationen tangiert sind, sollte sich ein Vorhaben, das die volkswirtschaftlichen Effekte der stofflichen Nutzung nach-

⁹⁸ In einer Antwort auf eine Große Anfrage gibt die Bundesregierung keine Prognose zur langfristigen Entwicklung des Vergütungsvolumens nach dem EEG sowie der daraus resultierenden Nettobelastungen ab (Bundesregierung 2004b). Die Effekte zur Entwicklung von EEG-Vergütungen unterscheiden sich erheblich, da oft divergierende Annahmen den Berechnungen zugrunde liegen, z. B. hinsichtlich des erwarteten Umfangs und der Geschwindigkeit des künftigen Ausbaus erneuerbarer Energien, der zukünftigen Kostensenkungspotenziale in diesem Feld, der mittel- und langfristigen Preisentwicklung in der konventionellen Stromerzeugung, der Berücksichtigung von Einsparungen bei Netzdurchleitungskosten oder der Berücksichtigung von Kosten des zukünftigen Netzausbaus.

- wachsender Rohstoffe analysieren will, methodisch an den Wertschöpfungsketten orientieren, die mit dem Einsatz nachwachsender Rohstoffe in diesem Bereich verbunden sind. Damit soll gewährleistet werden, dass alle relevanten Wirtschaftsaktivitäten, die an der Bereitstellung und Nutzung beteiligt sind, einbezogen werden.
- Für die Abschätzung der Arbeitsplatzeffekte sollte ein auf die einzelnen Einsatzbereiche maßgeschneidertes Untersuchungskonzept eingesetzt werden, bei dem zunächst die direkten Effekte in der Produktion und Verarbeitung der stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe auf Basis statistischer Daten, Verbandsangaben, Expertenschätzungen oder ähnlicher Informationsquellen analysiert werden. Falls die zukünftigen Beschäftigungseffekte der stofflichen Nutzung auch integriert werden sollen, dann sind dafür Potenzialabschätzungen und Szenarienanalysen geeignet.
 - Bei den Szenarienanalysen ist es notwendig, Angaben zu dem zukünftigen Einsatz der stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe in den einzelnen Verwendungsbereichen zu generieren. Eine wichtige Einflussgröße ist dabei das Angebotspotenzial an nachwachsenden Rohstoffen, da die Menge an substituierten fossilen Rohstoffen nicht unabhängig vom Preis und der Verfügbarkeit nachwachsender Rohstoffe ist. Zusätzlich ist es erforderlich, Angaben zum Substitutionspotenzial in den einzelnen Verwendungsbereichen der stofflichen Nutzung zu treffen. In den Szenarien sollen günstige und weniger günstige Rahmenbedingungen für eine stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe simuliert werden, um Hinweise für die mögliche Bandbreite des Ausmaßes der stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe in Deutschland zu erhalten.
 - Eine alleinige Betrachtung der direkten Effekte würde zu einer massiven Unterschätzung der Beschäftigungswirkungen der stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe führen. Daher ist es erforderlich, auch die indirekten Folgewirkungen bei der Verarbeitung von nachwachsenden Rohstoffen zu berücksichtigen. Zusätzlich sollten daher auch die Wirkungen in vorgelagerten Branchen einbezogen werden, was in der Regel durch ein Input-Output-Modell⁹⁹ erfolgt.
- ⁹⁹ Mit gängigen Input-Output-Modellen können die Auswirkungen der stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe auf die Bruttowertschöpfung sowie Beschäftigungs-, Außenhandels- und Produktionseffekte simuliert werden. Hierbei können neben den Bruttobeschäftigungswirkungen auch die Nettowirkungen berücksichtigt werden, d. h. es werden nicht nur die durch die Verarbeitung nachwachsender Rohstoffe betroffenen oder neu entstehenden Arbeitsplätze berücksichtigt, sondern es werden die Arbeitsplätze gegengerechnet, die durch die Substitution der bisher verwendeten Rohstoffe oder -materialien wegfallen können. Durch Sensitivitätsanalysen kann zudem die Robustheit der Ergebnisse gegenüber alternativen Annahmen und Entwicklungspfaden untersucht werden. Dies ist insbesondere bei langfristig angelegten Szenarien oder einer hohen Unsicherheit möglicher zukünftiger Entwicklungen zu empfehlen (FHW/C.A.R.M.E.N. 2006, S. 153).
- Sollen auch die zukünftigen makroökonomischen Wirkungen des stofflichen Einsatzes nachwachsender Rohstoffe untersucht werden, dann sollten die Berechnungen mittels eines Input-Output-Modells durch Szenarien ergänzt werden, in denen mögliche zukünftige Situationen und deren Entwicklungspfade abgebildet werden. Als Ausgangspunkte dazu dienen in der Regel das Angebotspotenzial an nachwachsenden Rohstoffen, deren Marktpotenzial bei den einzelnen Verwendungsarten sowie die allgemeinen Rahmenannahmen für ihren Einsatz. Die Szenarienergebnisse bzw. die hieraus abgeleiteten ökonomischen Impulse, d. h. die wertmäßigen Veränderungen in den Nachfrageströmen, dienen dann als Input in die Wirkungsanalyse mithilfe eines Input-Output-Modells. Wesentlich ist dabei die Ermittlung der sich aus den Szenariennahmen ergebenden Nachfrageveränderungen. Hierbei müssen auch sich ändernde Kostenstrukturen abgebildet werden, die sich entweder auf die Endnachfrage oder die Vorleistungsbeziehungen auswirken und deren Kenntnis im Hinblick auf die Quantifizierung der Nachfrageimpulse erforderlich ist.
 - Der Einsatz nachwachsender Rohstoffe betrifft auch einige Sektoren der Volkswirtschaft, die in der Grundstruktur eines Input-Output-Modells, wie es in der Regel von den Statistischen Ämtern zur Verfügung gestellt wird, nicht disaggregiert vorliegen, sondern nur als Teilbereich einer einzelnen Branche erfasst sind. Sie können durch die Bildung neuer Input-Output-Sektoren und deren Integration in das Modell in eine fallspezifisch angepasste Analyse einbezogen werden. Dazu ist die Vorleistungsstruktur dieser Sektoren zu definieren, und sie müssen über die entsprechenden Koeffizienten in das Input-Output-Modell eingefügt werden. Die Vorleistungsstrukturen von nicht disaggregiert in deutschen Input-Output-Modellen enthaltenen Sektoren lassen sich durch Vergleich und gegebenenfalls durch Übertragung entsprechender Daten aus Input-Output-Modellen des Auslandes eruieren. Eine andere Möglichkeit stellt die separate Erhebung dieser Daten bei Unternehmen der betreffenden Branchen oder mithilfe von Experteninterviews dar.
 - Neben den Beschäftigungs- und Produktionswirkungen werden im Rahmen einer volkswirtschaftlichen Wirkungsanalyse in der Regel weitere Fragestellungen integriert. Dies betrifft insbesondere auch fiskalische Effekte, die auch bei der Wirkungsanalyse der stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe einbezogen werden können. Dazu müssen die Einnahmen- und Ausgabenseite der Staatsfinanzen unterschieden werden. Auf der Einnahmenseite konzentriert man sich in der Regel auf die Analyse der Steuereinnahmen. Hierbei ist insbesondere die Lohnsteuer zu betrachten, wenn es zu positiven Beschäftigungseffekten durch die stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe kommen sollte. Hierdurch erfahren zusätzlich auch die Sozialabgaben einen positiven Impuls. Zusätzlich kann es erforderlich sein, andere relevante Steuerarten (z. B. Umsatzsteuer, Mineralölsteuer) zu berücksichtigen.

gen. Den Veränderungen auf der Einnahmenseite stehen auf der Ausgabenseite die Subventionsausgaben entgegen, die zusätzliche Anreize für den verstärkten Anbau, Verarbeitung und Nutzung nachwachsender Rohstoffe setzen sollen. Hierbei ist jedoch davon auszugehen, dass diese langfristig tendenziell abgebaut werden.

- Weitere Fragestellungen im Rahmen einer volkswirtschaftlichen Analyse der stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe könnten z. B. die Auswirkungen auf die Struktur und Einkommenssituation in der Landwirtschaft und im Agrargewerbe bzw. ländlichen Raum, deren Beitrag zu einer effizienten Reduzierung von Treibhausgasemissionen oder anderen ökologischen Belastungen, der Einfluss auf die Preisbildung lebensnotwendiger Güter, die Versorgungssicherheit oder die Entwicklung von Exportmöglichkeiten darstellen. In der Regel sind dafür spezifische Simulations- oder Modellrechnungen erforderlich, die teilweise auch in eine Input-Output-Analyse integriert werden können.

Zusammenfassend sind die volkswirtschaftlichen Auswirkungen der stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe ein komplexes Untersuchungsfeld, das angesichts des weitgehenden Fehlens von Vorarbeiten wahrscheinlich nur schrittweise erhellt werden kann (FHW/C.A.R.M.E.N 2006).

VIII. Handlungsfelder und FUE-Bedarf

Zunächst werden ausgewählte Aktivitäten zur Förderung der stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe kurz und ohne Anspruch auf Vollständigkeit umrissen. Anschließend werden potenzielle Handlungsfelder und FuE-Bedarf zur Diskussion gestellt.

1. Aspekte der aktuellen Forschungsförderung der stofflichen Nutzung

Ausgewiesene Forschungs- und Förderaktivitäten zur stofflichen Nutzung als auch zum Aufbau von Bioraffinerieanlagen gab es bisher wenige. Diese sind zumeist in FuE-Aktivitäten zur energetischen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen eingebettet. Exemplarisch hervorzuheben sind folgende Aktivitäten:

Deutschland

In Deutschland ist das Förderprogramm „Nachwachsende Rohstoffe“ des BMELV (2003) zu benennen. Dieses umfasst grob FuE- sowie Demonstrationsvorhaben, die zumindest mittelfristig eine Markteinführung von Produkten aus heimischen nachwachsenden Rohstoffen erwarten lassen (Anhang 12). Als Projektträger des BMELV unterstützt die FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe) die Umsetzung dieses Programms. Eine vergleichbare Auflistung von Forschungsförderprogrammen, wie diese für den energetischen Bereich in Anhang 9 aufgeführt ist, ist für die stoffliche Nutzung nicht möglich.

EU

Im Rahmen der EU beziehen sich z. B. festgeschriebene Aktivitäten im Weiß- und Grünbuch (EC 1998, EP 2002) oder auch in der EU-Direktive „On the promotion of the use of biofuels“ 2003/30/EG (EP 2003) auf die energetische Verwertung von Biomasse (und entsprechende Zielvorgaben zur Steigerung der jeweiligen Anteile). Auf dem Gebiet der stofflichen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen gibt es bisher weder in der Europäischen Union noch in der Bundesrepublik Deutschland abgestimmte Handlungsebenen (z. B. Richtlinien) (Biorefinery 2006b). Ein Ansatzpunkt ist im „Aktionsplan für Biomasse“ zu finden, der sich zwar im Wesentlichen auf die energetische Nutzung der Biomasse (Wärme- und Stromerzeugung, Biokraftstoffe) bezieht, jedoch unter der Rubrik „Querschnittsthemen“ Forschungsbedarf im Bereich der „Bioraffineriekonzepte zur optimalen Nutzung aller Pflanzenteile“ ausführt (EC 2005, S. 17).

Die EU förderte FuE mit Biomassebezug mit 75 Mio. Euro in sechs Jahren (6. Rahmenprogramm der EU). Im 7. Rahmenprogramm der EU (2007 bis 2013) soll der Etat für die Nutzung von Biomasse deutlich erhöht werden (Raldow 2005). Dort ist die Erarbeitung eines Bioraffineriekonzepts eingebaut sowie Schwerpunkte, in welchen das Themenfeld Bioraffinerie als förderfähig eingestuft ist. Das sind zum einen die Schwerpunkte FP7-2 „Food, Agriculture and Biotechnology“ und FP7-6 „Energy“. Zum anderen ist u. a. eine Verknüpfung zur Technologieplattform „Sustainable Chemistry“ (SusChem) vorgesehen (Raldow 2005, nach Biorefinery 2006b).

Platform for Sustainable Chemistry (SusChem)

Die von den europäischen Chemie- und Bioindustrieverbänden CEFIC (European Chemical Industry Council, www.cefic.be) und EuropaBio (European Association for Bioindustries, www.europabio.org) initiierte und von der EU-Kommission geförderte „European Platform for Sustainable Chemistry (SusChem)“, an der sich auch die GDCh (Gesellschaft Deutscher Chemiker, www.gdch.de) aktiv beteiligt, hat in ihrer Strategic Research Agenda (SRA) die Etablierung von industriellen Bioprozessen festgelegt. Bioraffinerien werden u. a. als neue Raffinerien zur effizienten Nutzung von Biomasse thematisiert (Biorefinery 2006b, S. 8; www.suschem.org).

In einer Vision der European Technology Platform for Sustainable Chemistry (Industrial Biotechnology Section) von 2005 wird davon ausgegangen, dass der Anteil nachwachsender Rohstoffe bis zu 30 Prozent an der Rohstoffbasis der chemischen Industrie bis zum Jahr 2025 betragen könnte (Biorefinery 2006a). In Kapitel 5 der Strategic Research Agenda (SRA) „Industrial Biotechnology“ ist der Beitrag der Industriellen Biotechnologie für eine nachhaltige Entwicklung dargestellt, in Kapitel 7 „Process and Industrial Design“ sind Fortschritte in der Prozess-technik beschrieben (Biorefinery 2006b, S. 9).

USA

Eine Vorreiterrolle auf internationaler Ebene nehmen die USA und Kanada ein, die im Themenfeld „Biobased Products and Biorefineries“ klar strukturierte Ziele und Förderrichtlinien aufgestellt haben. In anderen Ländern wird die stoffliche Verwertung häufig – sofern explizit mit aufgeführt – innerhalb übergeordneter Kategorien wie „Renewable Energy“ oder „Green House Gas Emission Reduction“ (GHG) geführt (nach Biorefinery 2006b).

In den USA erwartet der National Research Council (NRC), dass bis 2020 etwa 25 Prozent der derzeit auf fossilen Rohstoffen basierenden organischen Grundstoffe (Basiswert 1994) und 10 Prozent der Öle und Kraftstoffe auf eine biologische Rohstoffbasis umgestellt und vorrangig mittels Bioraffinerietechnologien produziert werden könnten (Biorefinery 2006b). Angenommen wird, dass damit zukünftig der nationale Eigenbedarf der USA an organischen Grundstoffen zu 90 Prozent und an organischen Ölen und Kraftstoffen zu 50 Prozent gedeckt werden kann (NRC et al. 2000, nach Biorefinery 2006b). Die Ziele sind ambitioniert, da sich Bioraffinerien noch in einem frühen Forschungs- und Entwicklungsstadium befinden.

Das industriegeführte „Biomass Technical Advisory Committee“ (BTAC) hat Umsetzungsziele für die Bereiche Bioenergie, Biokraftstoffe und Bioprodukte in einem Stufenplan bis zum Jahre 2030 konkretisiert (Tabelle 17).

Seit etwa 2000 wird die Nutzung von Biomasse durch die US-Regierung stärker gefördert. Aufgeteilt auf zwei Bundesministerien (Department of Energy und Department of Agriculture) verausgabten die USA allein im Jahr 2004 ca. 360 Mio. US-Dollar zur Förderung der stofflichen und energetischen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen (2003: ca. 420 Mio. US-Dollar; 2005: ca. 310 Mio. US-Dollar) (Kaempff 2005). Eine Übersicht über Aktivitäten zur Nutzung nachwachsender Rohstoffe in den USA findet sich auf der Homepage der regierungsamtlichen „Biomass Research and Development Initiative“ (www.brdi-solution.com).

Das „Office of the Biomass Program (OBP)¹⁰⁰“, hat ein „Biomass Programm“ (DOE/EERE 2004) herausgebracht, in welchem die Zucker-Plattform, die thermochemische Plattform (Syngas-Plattform) sowie letztlich integrierte Bioraffinerien (zur Herstellung von Kraftstoffen, Chemikalien, Werkstoffen, Strom und Wärme) einen zentralen Bestandteil bilden. Auch im „Multi Year Plan 2007–2012“ des OBP finden sich Ausführungen zu integrierten Bioraffinerien (OBP et al. 2005). Zu den Aktivitäten gehört auch eine „Roadmap for Biomass Technologies in the United States“ in welcher integrierte Bioraffineriesysteme perspektivisch diskutiert werden (DOE/EERE 2002). Eine Übersicht über amerikanische Aktivitäten findet sich unter www1.eere.energy.gov/biomass/publications.html oder auch unter www.nrel.gov/biomass/Biorefinery.html.

Für eine zukünftige industrielle Nutzung von Basischemikalien aus nachwachsenden Rohstoffen geht eine erste Bewertung im Rahmen einer Studie des U.S.-Department of Energy von ca. 300 biobasierten Chemikalien aus. Mittels Screening wurde daraus eine Liste von zwölf biobasierten Stammbaumchemikalien erstellt, die sowohl durch biotechnologische als auch chemische Konversion aus Biomasse zugänglich sind (Kap. IV.1) (Busch et al. 2005 u. Werpy/Peterson 2004, nach Biorefinery 2006b, S. 3).

Auf einem „International Biorefinery Workshop“ der DOE und der EU wurden in 2005 weitere Forschungsaspekte herausgestellt (DOE 2005; Guggolz 2005; Kamm/Kamm 2005b): Verbesserung der Prozesseffizienz (Prozesse, die Biomasse verarbeiten, nutzen heute etwa 59 Prozent des Rohstoffs aus; angestrebt sind die bei Prozessen mit Erdöl erreichbaren 80 Prozent), Entwicklung von Lignocellulose-Feedstock-Bioraffinerien, bessere Koordination der Biomasseförderung. Darüber hinaus sollen die Umwandlung von Lignocellulose in Zucker

¹⁰⁰ Das OBP gehört zum U. S. Department of Energy (DOE), Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE).

Tabelle 17

Nationale Ziele der USA bei Biomasse

	2002	2010	2020	2030
Energie aus Biomasse	2,8 %	4 %	5 %	5 %
Biomasseanteil bei Elektrizität und Wärme	(2,8x10 ¹⁸ kJ)	(3,4x10 ¹⁸ kJ)	(4,2x10 ¹⁸ kJ)	(5,3x10 ¹⁸ kJ)
Biokraftstoffe	0,5 %	4 %	10 %	20 %
Biomasseanteil bei Kraftstoffen	(0,16 x10 ¹⁸ kJ)	(1,4x10 ¹⁸ kJ)	(4,2x10 ¹⁸ kJ)	(10x10 ¹⁸ kJ)
biobasierte Produkte				
Anteil an biobasierten Chemikalien	5 %	12 %	18 %	25 %

Quelle: BTAC 2002a und b, nach Biorefinery 2006b

und die Integration von zuckerbasierten chemischen und biotechnischen Produktlinien (Zucker-Plattform) sowie die thermochemische Konversion (Syngas-Plattform) verstärkt gefördert werden (Biorefinery 2006b). Dazu gehören auch ein Wissenschaffleraustausch und eine Zusammenarbeit bei der Standardisierung von biobasierten Massenprodukten (z. B. Kraftstoffe, flüssige Kohlenwasserstoffe).

Die amerikanische Regierung beabsichtigt, über das Energiesicherungsgesetz die Biomassewirtschaft als Stützpfeiler der US-Ökonomie zu verankern. Die US-Regierung setzt auf Biomasse als ein Rohstoff der Zukunft: 20 Prozent der Kraftstoffe und 25 Prozent der Chemikalien sollen bis 2030 in den USA auf Basis von Biomasse produziert werden. Ziel ist es, die Abhängigkeit der US-Wirtschaft von fossilen Rohstoffen und die Emission von Klimagasen zu verringern (Guggolz 2005).

2. Handlungsfelder und FUE-Bedarf

Festlegung Konkreter Zielsetzungen

Für die stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe ist ein zunehmender Stellenwert in der Forschungsförderung zwar erkennbar, dennoch fehlen konkrete, übergeordnete Zielvorgaben. Daher wäre z. B. eine „Roadmap für die stoffliche Nutzung“ erforderlich, um diese Ziele klarer zu definieren und entsprechende Schwerpunkte, z. B. in Form von Forschungsstrategien, zu formulieren.

Verbesserung der technischen Möglichkeiten

Die technischen Möglichkeiten, nachwachsende Rohstoffe stofflich zu nutzen, sind derzeit noch nicht ausgeschöpft. Hier besteht eine Diskrepanz in der Entwicklung von Produkten, die grundsätzlich auf Basis nachwachsender Rohstoffe herstellbar wären, und denjenigen, die heute bereits realisiert sind bzw. sich kurz davor befinden. Forschung, Entwicklung und Demonstration sollten angesichts der spezifischen Unreife der Entwicklung in ausgewählten Bereichen vorangetrieben werden.

Schlüsselbaustein Bioraffineriekonzepte weiterentwickeln

Für eine zukünftige Nutzung nachwachsender Rohstoffe sehen heute bekannte Bioraffineriekonzepte vor, diese in einer integrierten Produktion zu einer umfangreichen Produktpalette von Nahrungs- und Futtermitteln über biogene Werkstoffe und Kraftstoffe bis hin zu Chemikalien umzuwandeln. Für alle in diesem Bericht vorgestellten Bioraffineriesysteme besteht jedoch aus heutiger Sicht noch enormer Entwicklungsbedarf in jeglicher Hinsicht (Basiskonzepte, technische Umsetzungsmöglichkeiten, Demonstrationsanlagen):

- Forschungsbedarf besteht etwa bei der Entwicklung innovativer Syntheserouten. Dazu gehören auch die entsprechende Aufbereitung der Ausgangsstoffe sowie die Entwicklung von Produktionskonzepten, die Prozess- und Syntheseketten effektiv miteinander vernet-

zen (z. B. Verknüpfung von biologischen und chemischen Synthesen und Verfahren). Eine wesentliche Rolle spielt dabei die Katalysatorentwicklung. Eine Option besteht darin, wichtige Grundchemikalien, die zukünftig auf Basis nachwachsender Rohstoffe hergestellt werden können, entsprechend der wichtigsten Wertschöpfungsketten zu separieren. Zu untersuchen wären dabei auch Überlappungen verschiedener, stofflich möglicher Herstellungswege (Fermentation, petrochemische Herstellung etc.).

- In einem weiteren Schritt stünde die Errichtung und Inbetriebnahme von Demonstrationsanlagen an. Hierfür fehlen belastbare Machbarkeitsstudien sowie die Etablierung von Pilotanlagen, auf deren Erfahrung aufgebaut werden kann. In Bezug auf die verschiedenen Bioraffineriekonzepte werden international derzeit eher Lignocellulose-Feedstock(LCF)- und Zwei-Plattformen-Raffinerien verstärkt diskutiert.
- Bei der LCF- als auch bei der Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerie spielt die zukünftige Nutzung von Lignin eine wesentliche Rolle. Für eine abschließende Beurteilung beider Konzepte sollte daher die technische Herstellung und Nutzung von Ligninmaterialien verstärkt erforscht bzw. weiterentwickelt werden. In LCF-Bioraffinerien besteht zudem noch FuE-Bedarf bei der technischen Separation von Hemicellulose, Cellulose und Lignin.
- Die für diesen Bericht erstellten Übersichtsökobilanzen ergeben erste Aussagen, die als Basis für weiterführende, detaillierte Analysen genutzt werden können (z. B. Verifikation getroffener Aussagen, Integration weiterer Aspekte wie alternative Nutzungsmöglichkeiten, weitere Produkte etc.).
- Die integrierte Arbeitsweise einer Bioraffinerie sollte sich auch in der Vernetzung von entsprechenden Arbeitsgruppen widerspiegeln, die sich derzeit eher entweder auf die energetische oder die stoffliche Seite konzentrieren.
- Zudem wäre auf Ebene von Forschung und Lehre eine bessere Positionierung bzw. auch die Etablierung eines Fachgebietes „Stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe“, „Bioraffineriesysteme“ für ein besseres Verständnis der Bedeutung des Themas wünschenswert.

Verfahren der energetischen Nutzung weiterentwickeln

Bei einigen Konversionsverfahren besteht noch Entwicklungsbedarf.

- Beispielsweise sind bei der Herstellung von Ethanol aus Lignocellulose zur Aufspaltung von Cellulose und Hemicellulose in Zucker als auch bei der Fermentierung noch Probleme zu lösen.
- Im Bereich der BTL-Kraftstoffproduktion besteht z. B. FuE-Bedarf bei der Synthesegaserzeugung (geforderter Reinheitsgrad zur Einspeisung in die

Fischer-Tropsch-Synthese). Betreffende Verfahren sind noch relativ weit von einer kommerziellen Nutzung entfernt.

- Eine Möglichkeit, sauberere Rohgase zu erzeugen und Stoffe, die die Synthesegaserzeugung stören, aus den Vergasern fernzuhalten, liegt in der Nutzung mehrstufiger Verfahren (z. B. Carbo-V[®]-Verfahren von Choren, der „Blaue Turm[®]“ von D.M.2, bioliq-Verfahren). Hier besteht noch Forschungsbedarf.
- Bei der eigentlichen Fischer-Tropsch-Synthese sind – allerdings auf bereits hohem Niveau – Ausbeuten und Selektivität noch weiter optimierungsfähig.
- Die Verbrennung von Stroh ist noch nicht etabliert, wobei hohe Chlor- und Aschegehalte und niedrige Schlackeschmelztemperaturen weiterhin problematisch sind und im Vergleich zu Holz zusätzliche Maßnahmen notwendig machen.
- Auch im Bereich der Biogaserzeugung besteht hinsichtlich Prozesssicherheit und Effizienz bei kleinen Anlagen noch Optimierungsbedarf. Hauptproblem ist eine Brenngasqualität, die den Anforderungen der nachgeschalteten Anlagen – Turbine oder Brennstoffzelle – entspricht.
- Die direkte energetische Nutzung von Getreide (Stroh, minderwertiges Getreide) würde das energetisch nutzbare Biomassepotenzial weiter erhöhen. Hier besteht technischer Optimierungsbedarf z. B. bei der Einhaltung von Grenzwerten.

Eine bisher offene Frage ist die der Einsetzbarkeit des erzeugten Synthesegases (sowie der vorhandenen Vergasungsanlagen) für die stoffliche Weiterverarbeitung. Hierzu sollten Vor- und Nachteile des Synthesegaseinsatzes entweder zur energetischen oder/und stofflichen Weiterkonversion vergleichend herausgearbeitet werden.

Trotz der besseren Untersuchungslage bei Bioenergieträgern im Vergleich zur stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe variieren die Ergebnisse von Nachhaltigkeitsbewertungen zu Biokraftstoffen teilweise deutlich. Für innovative Konversionstechniken (z. B. Ethanol aus Lignocellulose) fehlen noch belastbare Ökobilanzen. Auch sind noch mögliche Verknüpfungen zu einer potenziellen stofflichen Nutzung, wie etwa der von Ethanol als Plattformchemikalie, offen.

Anbau und züchterische Anpassungen

Bei der Züchtung von Pflanzen wird für die stoffliche Nutzung heute bereits auf die Ausbildung bestimmter Strukturen geachtet (z. B. Anteile der beiden Stärkeformen Amylose und Amylopektin). Hier wäre weiterhin die Ausbildung spezieller Inhaltsstoffe (z. B. bestimmte Fettsäuren) mit Blick auf eine stoffliche Nutzung zu untersuchen, um eine differenzierte Nutzung der „Vorleistung der Natur“ zu berücksichtigen).

Für den energetischen Bereich ist die Optimierung von Energiepflanzen (anbauseitige- und züchterische Anpassungen) ein Thema. Auch wenn bei Praktikabilität und

Prozesssicherheit Anbau und Ernte der meisten etablierten Biomassearten als ausgereift gelten, sind doch Ertragssteigerungen wünschenswert, um bei zukünftig stärkeren Flächenkonkurrenzen relevante Beiträge zu Energieversorgung und Klimaschutz durch Bioenergieträger zu realisieren. Zur Ausschöpfung der Potenziale von Anbaubiomasse sind noch umfassende Anbauversuche notwendig, bei denen klimatisch unterschiedliche Standorte, Böden verschiedener Qualität und verschiedene Fruchtfolgen untersucht werden. Verbesserungsoptionen bei Kreuzungen bestehen beim Energiepflanzenanbau zur Erhöhung der Ertragsmasse u. a. bei der Robustheit der Pflanzen gegenüber klimatischen Bedingungen sowie bei der Schädlingsresistenz.

Verbesserung der statistisch erfassten Datenbasis

Für die Erfassung von Produktionsmengen von Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen liegen zumeist keine statistisch geführten Angaben vor. Um die weitere Entwicklung der (industriellen) stofflichen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen nachvollziehbar verfolgen zu können, wäre ein Augenmerk auf eine industriennahe Informations- bzw. Datenerfassung zu legen.

Etablierung einer Begleitforschung

Die Etablierung einer Begleitforschung wie etwa die Durchführung von entsprechend ausgelegten Öko- und Folgenanalysen könnte helfen, den Stellenwert der industriellen stofflichen Nutzung präziser zu bestimmen und eine Prioritätensetzung bei FuE-Förderung gezielter vorzubereiten. Dazu gehören folgende Aspekte:

- Da die stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe nicht per se mit Umweltvorteilen verbunden, sondern von der konkreten Umsetzung abhängig ist, könnte eine Realisierung von potenziellen Vorteilen durch eine FuE-begleitende Erstellung von Produktökobilanzen unterstützt werden (Ecodesign). Umsetzen ließe sich dies etwa durch eine umweltwissenschaftliche Begleitforschung, in die Akteure wie Unternehmen und Verbände eingebunden wären (u. a. zur Ermittlung realistischer Basisvarianten, Systemgrenzen und Pendants).
- Zudem wäre es für die Realisierung potenzieller Vorteile und die Minimierung von Nachteilen sinnvoll, sämtliche Einzelprozesse des Gesamtlebensweges individuell zu optimieren. Dazu gehört auch die landwirtschaftliche Produktion (z. B. Stickstoffdüngereinsatz zur Reduktion der NH₃- und N₂O-Emissionen).
- Da sich aus den Einzelergebnissen der Ökobilanzen keine objektiv-wissenschaftlich begründbaren Entscheidungen für oder gegen den Einsatz einzelner Produkte ableiten lassen, müssten zusätzliche Kriterien für eine zusammenfassende Gesamtbewertung entwickelt werden. Ein möglicher Bewertungsansatz bestünde darin, Prioritäten zu setzen (z. B. das Weltklima höher zu gewichten als z. B. regional begrenzte

Auswirkungen durch sauren Regen). Hierbei wäre ein Kriterienset wünschenswert, der eine solche Abstufung nachvollziehbar macht.

- Zur Erstellung eines fundierten Gesamtbilds würde ferner gehören, ein übergeordnetes methodisches Konzept zu entwickeln, mit welchem eine umfassende (nachvollziehbare) Vergleichbarkeit verschiedener Produkte auf Basis nachwachsender Rohstoffe möglich ist. Dazu bietet es sich an, neben vorhandenen Methoden (z. B. Produktökobilanzen) auch neue methodische Ansätze zu entwickeln (z. B. monetäre Aspekte zu integrieren). Relevant ist dabei auch die Berücksichtigung der stofflich-energetischen Kaskadennutzung.
- Angesichts zukünftig absehbarer zunehmender Flächenknappheit und unterschiedlicher Flächeneffizienzen der verschiedenen nachwachsenden Rohstoffe stellt letztere ein wesentliches Bewertungskriterium dar. Dazu wären übergreifende Ökobilanzstudien für mehrere Produktgruppen sinnvoll, um optimale Produktlinien – auch unter dem Aspekt der Flächennutzung – zu identifizieren und damit Fehlallokationen sowohl von Flächen als auch von Fördermitteln zur Produktentwicklung aus nachwachsenden Rohstoffen zu vermeiden.

Etablierung einer Markt- und Akzeptanzforschung

Zur stofflichen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen liegen diesbezüglich bisher nur einzelne Modellversuche vor. Ein Haupthemmnis für die breitere Markteinführung von Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen ist zwar ihr deutlich höherer Preis gegenüber herkömmlichen (auf fossiler Basis hergestellten) Produkten. Jedoch stellt fehlende Information ein weiteres wesentliches Hemmnis bei den Verbrauchern (industriell und privat) etwa über die Vorteile und die aktuellen Ausführungen von Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen dar. Wichtig wäre daher, eine zielgerichtete öffentliche Kommunikation über die qualitativen und ökologischen Vorteile von entsprechenden Produkten, um Verbraucher bzw. Nutzer besser zu informieren. Von Herstellerseite wird zudem gefordert, klare und verlässliche Rahmenbedingungen für die Produktion und Vermarktung von Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen zu definieren und darüber hinaus eine weitere Förderung der stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe z. B. über Markteinführungsprogramme vorzunehmen.

Flächen- und Nutzungskonkurrenzen vorausschauend analysieren

Entsprechende Studien kommen zu dem Schluss, dass Flächen- und Nutzungskonkurrenzen auftreten können. Da die stoffliche Nutzung in diesen Studien bisher nur eine untergeordnete Rolle gespielt hat (Annahme von moderaten Ausbauraten bis 2030, ohne Berücksichtigung von Bioraffinerien etc.), besteht Forschungsbedarf in wei-

ter führenden Analysen u. a. darin, verschiedene Ausbauszenarien (die u. a. abhängig von konkreten politischen Zielsetzungen sind) zu berücksichtigen und die Ergebnisse in eine strategische Ausrichtung zu integrieren.

Eine wesentliche Rolle spielen dabei Flächenqualitäten, die bisher nur qualitativ berücksichtigt wurden. Mit Blick auf einen nachhaltigen Anbau und zukünftig nutzbare Mengen sollten Flächenqualitäten bei der Potenzialdiskussion berücksichtigt werden (Verfeinerung von Potenzialaussagen).

Für den Anbau nachwachsender Rohstoffe und Energieträger im Kontext einer künftigen Agrarpolitik sind abgestimmte Vorstellungen (z. B. Richtlinien) einer nachhaltigen Flächennutzung für den Beitrag, den die Landwirtschaft in Deutschland und Europa künftig auf diesem Gebiet leisten kann, entscheidend. Mit Blick auf mögliche Engpässe sollten

- Rahmenbedingungen so gesetzt werden, dass vielfältige Rohstoffe und Energieträger angebaut werden. Damit könnte regionalen Rahmenbedingungen und Flächenqualitäten Rechnung getragen werden, sodass Monokulturen vermieden würden;
- die Etablierung von mehrjährigen Lignocellulosepflanzen weiterhin unterstützt werden (FuE-Bedarf bei vorteilhaften Anbaukulturen und Standorten, Ernte-technologien, Akzeptanzfragen etc.);
- auch für den Kraftstoffbereich – auf europäischer als auch auf nationaler Ebene – mittelfristig Ziele festgelegt werden, um die künftige Bedeutung von Importen von nachwachsenden Rohstoffen und Energieträgern insgesamt ableiten zu können. Ziel wäre hier, die Verfügbarkeit der nachwachsenden Rohstoffbasis durch geeignete Rahmenbedingungen zu sichern.

Bereitstellungsbedingungen importierter nachwachsender Rohstoffe beachten

Trotz einer bevorzugten Nutzung heimischer nachwachsender Rohstoffe wird ein wesentlicher Anteil importiert (z. B. Palm-, Soja-, Kokosöl, Zellstoff, Baumwolle) bzw. kann bei der Herstellung vor Ort auf andere Ausgangspflanzen zurückgegriffen werden (z. B. Ethanol aus Zuckerrohr). In eine weiter führende Betrachtung sollten die Produktionsbedingungen dieser nachwachsenden Rohstoffe umfassend miteinbezogen werden, um Verlagerungs- bzw. externe Effekte klar herauszustellen. Beispiele für sekundäre Effekte des internationalen Anbaus von nachwachsenden Rohstoffen sind die Rodung von Regenwäldern für den Ölpalmenanbau, Emissionen bei der Palmölgewinnung, Missachtung von Umwelt- und Sozialstandards beim Zuckerrohranbau bzw. Palmölherzeugung oder auch die sog. „Tortilla-Krise“ in Mexiko. Eine rein ökonomische Betrachtung würde hier zu kurz greifen. Für etwaige Importe sollten geeignete ökologische und soziale Standards entwickelt werden.

Verbesserung der Datenbasis für makroökonomische Effekte

Auf Ebene der makroökonomischen Effekte ist das Fazit der vorliegenden Recherchen und Analysen, dass es selbst auf deren Basis bislang kaum möglich ist, die volkswirtschaftlichen Effekte der energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe in Deutschland umfassend zu bewerten. Für die stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe – die statistisch derzeit nicht offiziell erfasst wird – sind keine Aussagen möglich. Forschungsbedarf besteht damit in beiden Fällen – bei der Untersuchung der volkswirtschaftlichen Effekte der stofflichen und der energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe, um sich letztlich ein belastbares Gesamtbild machen zu können.

Einbeziehung zusätzlicher Indikatoren und Bereiche

Ein Indikator für die Effektivität von Maßnahmen zur CO₂-Minderung (z. B. Umstellung der Rohstoffbasis) sind CO₂-Vermeidungskosten. Für eine umfassende Bewertung wäre es sinnvoll, als Bilanzgröße die „CO₂-

Vermeidungskosten“ für ausgewählte Produktpfade (Biotkunststoffe, Schmierstoffe etc.) zu integrieren. Untersuchungswürdig sind auch Bereiche und Stoffgruppen, die derzeit eine geringe wirtschaftliche Bedeutung aufweisen, bei denen jedoch ein vergleichsweise hohes Marktwachstum erwartet wird (z. B. Proteine, besondere Inhaltsstoffe für die Pharma- und Kosmetikindustrie).

Leitbild „Green Chemistry“ technisch umsetzen

Der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen in der chemischen Industrie gehört mit zum sogenannten Leitbild der „green chemistry“. Zu diesem zählen darüber hinaus auch die Vermeidung von Abfällen, schlanke Analysewege, die limitierte Verwendung von Hilfsstoffen, die Nutzung von Reaktionen die bei niedrigen Temperaturen (idealerweise bei Raumtemperatur) ablaufen etc. Für alle diese Elemente sind noch viele Probleme der technischen Umsetzung zu lösen (z. B. Übertragung und Nutzung von Katalysatoren, die etwa für die Petrochemie entwickelt wurden, aber auch bei Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen einsetzbar sind).

Literatur

1. In Auftrag gegebene Gutachten

Biorefinery (biorefinery.de GmbH) (2006a): Stoffliche Nutzung Nachwachsender Rohstoffe. Themenfeld 1: Die stoffliche industrielle Nutzung nachwachsender Rohstoffe (Autoren: Kamm, M., Schönicke, P., Kamm, B. [biopos, Teltow]), Potsdam

Biorefinery (biorefinery.de GmbH) (2006b): Stoffliche Nutzung Nachwachsender Rohstoffe. Themenfeld 5: Stand der stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe in anderen Ländern (Autoren: Kamm, M., Schönicke, P., Kamm, B. [biopos, Teltow]), Potsdam

FHW/C.A.R.M.E.N (Fachhochschule Weihenstephan, C.A.R.M.E.N. e. V.) (2006): Industrielle stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Themenfeld 4: Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen – Markt, makroökonomische Effekte und Verbraucherakzeptanz (Autoren: Menrad, K., Decker, T., Gabriel, A., Kilburg, S., Langer, E., Schmidt, B., Zerhoch, M.), Straubing

IE (Institut für Energetik und Umwelt gGmbH) (2005a): Industrielle Stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Themenfeld 3: Flächen- und Nutzungskonkurrenz in der nachwachsenden Rohstoffbasis (Autoren: Thrän, D., Daniel, J., Weber, M., Fröhlich, N.), Leipzig

IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH) (2005a): Ökologische Bewertung von nachwachsenden Rohstoffen: Bewertungsrahmen und Ergebnisse (Autoren: Reinhardt, G., Gärtner, S., Patyk, A.), Heidelberg

IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH) (2005b): Industrielle stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Energetische Nutzung (Autoren: Reinhardt, G., Gärtner, S., Patyk, A.), Heidelberg

2. Weitere Literatur

ADNR (Arbeitsgemeinschaft für Dämmstoffe aus Nachwachsenden Rohstoffen e. V.) (2005): Marktdaten. www.adnr.info

AGEB (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen) (2005): Primärenergieverbrauch in der Bundesrepublik Deutschland. www.ag-energiebilanzen.de, Stand: 01/2005, abgerufen 10/2005

Agenda (Agenda 21) (2004): Environmentally sound management of toxic chemicals, including prevention of illegal international traffic in toxic and dangerous products. Kapitel 19.11, www.un.org/esa/sustdev/documents/agenda21/english/agenda21chap19.htm

Agra-Europe (2005): 9,29 Cent pro Kilowattstunde EEG-Strom. In: Agra-Europe 45/05, Länderberichte 4, Bonn

Baitz, M., Binder, M., Degen, W., Deimling, S., Krinke, S., Rudloff, M. (2004): Vergleichende Ökobilanz von Sun-Diesel (Choren-Verfahren) und konventionellem Dieseldieselkraftstoff. Im Auftrag von Volkswagen AG und DaimlerChrysler AG, Leinfelden-Echterdingen

Becker, K. (2005): Rezente Rohstoffe als Basis für eine nachhaltige Chemie – noch Vision oder schon Realität? In: Perspektiven der Biomassenutzung. Ökologische Stoffverwertung. Berichte der Fördergemeinschaft Ökologische Stoffverwertung e. V., Halle/Saale, S. 11–22

Behring, H., Jäger, Ch., Murphy, D. P. (1999) Möglichkeiten und Chancen von heimischen nachwachsenden Rohstoffen zur Nutzung als Dämmaterial. In: Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 203, S. 219–221

Bensmann, M. (2006): Kein Abschied vom Öl. In: Neue Energie 8(06), S. 47–51

Biertümpfel, A., Stolte, H., Wenig, B. (2004): Färbepflanzen. Gülzow

Biopos (Forschungsinstitut Bioaktive Polymersysteme e. V.) (2005a): Persönliche Mitteilungen von P. Schönicke an das IFEU, August bis September 2005

Biopos (Forschungsinstitut Bioaktive Polymersysteme e. V.) (2005b): Persönliche Mitteilung von Frau Dr. Kamm an das Institut für Energetik (Leipzig), Oktober 2005

BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2006): Pflanzen sind Rohstofflieferant und Biofabrik der Zukunft. BMBF fördert Pflanzenforschung mit 50 Millionen Euro, Pressemeldung 101/2006 vom 9. Juni 2006

BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz) (2003): Nachwachsende Rohstoffe. Programm des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft zur Förderung von Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsvorhaben, Bonn

BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz), (Hg.) (2004): Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland. Münster

BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz) (Hg.) (2005a): Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland. Münster

BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz) (2005b): Anbau nachwachsender Rohstoffe in Deutschland. Angaben des Referates 535, Berlin

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (Hg.) (2005): Erneuerbare Energien in Zahlen. Nationale und internationale Entwicklung, Berlin

BMWA (2005): Internet-Förderdatenbank des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit. <http://db.bmwa.bund.de>, abgerufen in 10/2005

Borken, J., Patyk, A., Reinhardt, G. A. (1999): Basisdaten für ökologische Bilanzierungen. Einsatz von Nutzfahrzeugen in Transport, Landwirtschaft und Bergbau, Braunschweig/Wiesbaden

Brandhorst, J., Spritzendorfer, J., Gildorn, K. (2006): Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen. FNR (Hg.), Gülzow

- Breitschuh, G. (2001): Vorwort. In: FNR (Hg.): Forum Färberpflanzen 2001. Gülzower Fachgespräche Bd. 18, Gülzow, S. 5
- BTAC (Biomass Research and Development Technical Advisory Committee) (2002a): Vision for Bioenergy & Bio-based Products in the United States. www.bioproducts-bioenergy.gov/default.asp, Washington D. C.
- BTAC (Biomass Research and Development Technical Advisory Committee) (2002b): Roadmap for Biomass Technologies in the United States. www.bioproducts-bioenergy.gov/default.asp, Washington D. C.
- Buchholz, St. (2006): Science to Business Center Bio-Zentrum für „Weiße Biotechnologie“ der Degussa AG. Vortrag auf der Tagung „auf Bio-raffiniert III“, 2. bis 3. Februar 2006, Vortragsfolien, Gelsenkirchen
- Bundesregierung (2004a): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Fraktion der CDU/CSU – Beschäftigungseffekte durch den Ausbau der erneuerbaren Energien. Deutscher Bundestag, Drucksache 15/3666, Berlin
- Bundesregierung (2004b): Antwort der Bundesregierung auf die Große Anfrage der Abgeordneten Dr. Peter Paziorek, Doris Meyer (Tapfheim), Horst Seehofer, weiterer Abgeordneter und Fraktion der CDU/CSU – Erneuerbare Energien in Deutschland. Deutscher Bundestag, Drucksache 15/4014, Berlin
- Bundesregierung (2005a): Wegweiser Nachhaltigkeit 2005 – Bilanz und Perspektiven. Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, Berlin
- Bundesregierung (2005b): Unterrichtung durch die Bundesregierung: Bericht zur Steuerbegünstigung für Biokraft- und Bioheizstoffe. Deutscher Bundestag, Drucksache 15/5816, Berlin
- Bundesregierung (2006a): Unterrichtung durch die Bundesregierung: Agrarpolitischer Bericht 2006 der Bundesregierung. Deutscher Bundestag, Drucksache 16/640, Berlin
- Bundesregierung (2006b): Gesetz zur Neuregelung der Besteuerung von Energieerzeugnissen und zur Änderung des Stromsteuergesetzes vom 15. Juli 2006 (BGBl. I Nr. 33 vom 19. Juli 2006, Bonn, S. 1534–1561
- Bundesregierung (2006c): Entwurf eines Gesetzes zur Einführung einer Biokraftstoffquote durch Änderung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes und zur Änderung energie- und stromsteuerrechtlicher Vorschriften (Biokraftstoffquotengesetz – BioKraftQuG). Berlin
- Busch, R. (2003): Nutzung nachwachsender Rohstoffe in der chemischen Industrie. Aus der Sicht der Dow Chemical Company, In: Oberhausener UMSICHT-Tage „Bio-raffiniert! Neue Wege in der Nutzung biogener Rohstoffe“ vom 16. bis 17. Juli 2003, www.umsicht.fhg.de/veranstaltungen/download/_bilder/03_umsicht_tage_chem_ind_busch.pdf, Oberhausen
- Busch, R. (2005): Potenzial von Nachwachsenden Rohstoffen bei der Stoffumwandlung in der chemischen Industrie. Vortrag auf den „3. Reisensburger Umwelt-Biotechnologie-Tagen“ am 29. Juni 2005, Vortragsfolien, Reisensburg
- Busch, R., Hirth, Th., Kamm, B., Kamm, M., Thoen, J. (2005): Wie aus „Bio“ Chemie wird. In: Nachrichten aus der Chemie 2/2005, S. 130–134
- C.A.R.M.E.N. (Centrales Agrar-Rohstoff-Marketing- und Entwicklungs-Netzwerk e. V.) (2002): Jahrbuch 2002 Nachwachsende Rohstoffe – Wirtschaftsfaktor Biomasse. Straubing
- C.A.R.M.E.N. (Centrales Agrar-Rohstoff-Marketing- und Entwicklungs-Netzwerk e. V.) (2005): Nachwachsende Rohstoffe. Jahrbuch 2004/2005, Straubing
- C.A.R.M.E.N. (Centrales Agrar-Rohstoff-Marketing- und Entwicklungs-Netzwerk e. V.) (2006): Persönliche Kommunikation mit dem TAB vom 25. August 2006
- CIDE (Comisión Intersindical des Déhydrateurs Européen) (2005): Production of dry-crop in Europe 2004/2005. Brussels
- Dahmen, N., Dinjus, E., Henrich, E. (2006): BTL-Kraftstoffe mittels dezentraler Schnellpyrolyse – das biolig-Verfahren des Forschungszentrums Karlsruhe. Vortrag auf dem 4. Internationalen Fachkongress für Biokraftstoffe des BBE und der UFOP „Kraftstoffe der Zukunft 2006“, 27. bis 28. November 2006, Berlin
- DBV (Deutscher Bauernverband) (2006): Rapsanbau in Deutschland wird in 2007 weiter steigen. www.nachwachsende-rohstoffe.de, Meldung vom 24.08.2006, abgerufen am 28.8.2006
- Deggau, M. (2006): Nutzung der Bodenfläche. Flächenerhebung 2004 nach Art der tatsächlichen Nutzung, Auszug aus Wirtschaft und Statistik, Wiesbaden
- Dinkel, F., Pohl, C., Ros, M., Waldeck, B. (1996): Ökobilanz stärkehaltiger Kunststoffe. Fa. Carbotech im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt und Landschaft (BUWAL), Bern
- DLR, IFEU, WI (Institut für Technische Thermodynamik, Institut für Energie- und Umweltforschung, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie) (2004): Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland (Autoren: Nitsch, J., Krewitt, W., Nast, M., Vierbahn, P. [DLR], Gärtner, S., Pehnt, M., Reinhardt, G., Schmidt, R., Uihlein, A. [IFEU], unter Mitarbeit von Scheurlen, K. [IUS Potsdam], Barthel, C., Fishedick, M., Merten, F. [WI]). Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hg.), Langfassung, Berlin u. a. O.
- DOE (U. S. Department of Energy) (ed.) (2005): Program, Abstracts, Lectures and Reports. 1st International Biorefinery Workshop, July 20 and 21, 2005, www.Biorefineryworkshop.com, Washington D. C.

- DOE, EERE (U. S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy) (eds.) (2004): Biomass Program – Multi-year Technical plan. Draft for Review, www1.eere.energy.gov/biomass/pdfs/mytp.pdf, abgerufen am 29.08.2006, Washington D.C.
- DOE, EERE (U. S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy) (2002): Roadmap for Biomass Technologies in the United States. www.biomass.govtools.us/pdfs/FinalBiomassRoadmap.pdf
- EC (European Commission) (1998): Energie für die Zukunft: Erneuerbare Energieträger, Weißbuch für eine Gemeinschaftsstrategie und Aktionsplan. Brüssel
- EC (European Commission) (2005): Mitteilung der Kommission: Aktionsplan für Biomasse. KOM(2005) 628 endgültig vom 07.12.2005, Brüssel
- Edler, D., Blazejczak, J., Nathani, C., Ilse, S. (2004): Aktualisierung der Schätzung der Beschäftigungszahlen im Umweltschutz. Gutachten des Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin
- EP (European Parliament and Council) (2002): Towards a European strategy for the security of energy supply. Green Paper, KOM2002/321 vom 26.06.2002, Strassbourg
- EP (European Parliament and Council) (2003): Directive 2003/30/EC on the promotion of the use of biofuels or other renewable fuels for transport. Official Journal of the European Union L123/42, 17.05.2003, Brussels
- EPFL (Ecole Polytechnique Federale de Lausanne) (2005): Bilan environnemental des lilières végétales pour la chimie, les matériaux et l'énergie. Im Auftrag von ADEME, Paris
- European Bioplastics (ehemals IBAW) (2002): Pressemitteilung, www.ibaw.org, abgerufen im September 2005
- European Bioplastics (2005): Produktionskapazitäten. www.ibaw.org, abgerufen im September 2005
- Eyerer, P., Reinhardt, H.-W. (2000): Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden. Wege zu einer ganzheitlichen Bilanzierung, Basel
- Fachverband Biogas (Hg.) (2004): Mit Visionen die Landwirtschaft der Zukunft gestalten. 12. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e. V. in Zusammenarbeit mit dem Verein für Bioenergie e. V. vom 04.–06. Februar 2003, Borken
- Fachverband der Stärke-Industrie (2005): Zahlen und Fakten zur Stärke-Industrie. Bonn
- Festel, G., Kölle, S. (2005): Marktstudie zu den Potenzialen nachwachsender Rohstoffe. Festel Capital, Hünenberg, Schweiz
- FhG-ISI (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung) (2005): Energy scientific and technological Indicators and references (Autoren: Ragitz, M., Durstewitz, M. [FhG-ISI]; Hendriks, C. [Ecofys]). Im Auftrag der EU-Kommission, Luxemburg
- Fischedick, M., Nitsch, J. (2002): Langfristszenarien für eine nachhaltige Energienutzung in Deutschland. Umweltbundesamt (Hg.), Berlin
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.) (Hg.) (2002): Energie aus Biomasse. Ein Lehrmaterial, Gülzow
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.) (2003): Nachwachsende Rohstoffe: Verwendung pflanzlicher Öle und Fette. www.fnr-server.de/cms35/Pflanzenoele.271.0.html
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.) (Hg.) (2004): Broschüre Bioschmierstoffe in Kommunen, Gülzow
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.) (Hg.) (2005a): Leitfaden Bioenergie. Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen, Gülzow
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.) (2005b): Nachwachsende Rohstoffe: Stärke- und Zuckerpflanzen – Bedeutung. www.fnr.de, abgerufen 2005
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.) (Hg.) (2005c): Pflanzen für die Industrie. Gülzow
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.) (Hg.) (2005d): Basisdaten Bioenergie. Gülzow
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.) (2006a): Internetseiten zu diversen Schwerpunkten nachwachsender Rohstoffe. www.fnr.de, abgerufen im Mai 2006
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.) (Hg.) (2006b): Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe. Gülzow
- Fritsche, U. R., Dehoust, G., Jenseit, W., Hünecke, K., Rausch, L., Schüler, D., Wiegmann, K., Hienz, A., Hiebel, M., Ising, M., Kabasci, St., Unger, Ch., Thrän, D., Fröhlich, N., Scholwin, F., Reinhardt, G., Gärtner, S., Patyk, A., Baur, F., Benmann, U., Groß, B., Heib, M., Ziegler, C., Flake, M., Schmehl, M. Simon, S. (2004): Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse. Verbundprojekt gefördert vom BMU im Rahmen des ZIP, Projektträger: FZ Jülich, Endbericht, Darmstadt u. a. O.
- Fritsche, U. R., Wiegmann, K. (2005): Potenziale und Szenarien für die zukünftige Biomassenutzung. In: *Natur & Landschaft* 80(9/10), S. 396–399
- Frondel, M., Peters, J. (2005a): Biodiesel: A new oil-dorado? Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung, Diskussionspapier Nr. 36, Essen
- Frondel, M., Peters, J. (2005b): Biodiesel: Nicht nur eitel Sonnenschein. Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung, Positionspapier 4.2 vom 12.12.2005, Essen
- Gärtner, S. O., Reinhardt, G. A. (2005): Biodiesel initiatives in Germany. Studie im Auftrag von VITO (Vlaamse instelling voor technologisch onderzoek, Belgium) für das EU-Projekt PREMIA, Heidelberg
- Gerngross, T. U., Slater, S. (2000): How Green are Green Plastics? In: *Scientific American* 8/2000, S. 37–41

- Guggolz, E. (2005): Biomasse statt Erdöl – USA bauen Biomassewirtschaft aus und verstärken die Zusammenarbeit mit der EU. www.innovations-report.de/html/berichte/energie_elektrotechnik/bericht-50836.html, Meldung vom 26.10.2005, abgerufen am 29.8.2006
- Hemme-Seifert, K. (2003): Regional differenzierte Modellanalyse der Erzeugung von Biomasse zur energetischen Nutzung in Deutschland. Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig
- Henke, J. M. (2005a): Biokraftstoffe. Eine weltwirtschaftliche Perspektive, Institut für Weltwirtschaft, Kieler Arbeitspapier Nr. 1236, Kiel
- Henke, J. M. (2005b): Volkswirtschaftliche Bewertung des Einsatzes von Biokraftstoffen. In: C.A.R.M.E.N. e. V. (Hg.): Biogene Kraftstoffe – Möglichkeiten und Grenzen. Tagungsband vom 5. Dezember 2005, Straubing, S. 57–68
- Hentrich, S., Wiemers, J., Ragnitz, J. (2004): Beschäftigungseffekte durch den Ausbau erneuerbarer Energien. Institut für Wirtschaftsforschung Halle (IWH), Sonderheft Nr. 1/2004, Halle
- HeRo (Kompetenzzentrum Hessen Rohstoffe HeRo e. V.) (2006): Internetseiten zu Bio-Rohstoffen. www.uni-giessen.de/nawaro/bioroh.html, abgerufen im Juni 2006
- Heyde, M. (1998): Ecological considerations on the use and production of biosynthetic and synthetic biodegradable polymers. In: Polym. Degrad. STabelle 59(1-3), S. 3–6
- Hof, M. (2005): New Concepts and Products Based On Renewable Raw Materials. In: FNR (Hg.): Nachwachsende Rohstoffe für die Chemie – 9. Symposium 2005 and 4th International Green-Tech Conference, Tagungsband, Potsdam, S. 144–164
- Hüsing, B., Angerer, G., Gaisser, S., Marscheider-Weidemann, F. (2002): Biotechnologische Herstellung von Wertstoffen unter besonderer Berücksichtigung von Energieträgern und Biopolymeren aus Reststoffen. Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung Karlsruhe, im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin
- IBO (Zentrum für Bauen und Umwelt) (Hg.) (2000): Ökologie der Dämmstoffe (Autoren: Mötzel, H., Zelger, Th.). Wien
- IE (Institut für Energetik und Umwelt gGmbH) (2005b): Persönliche Kommunikation zwischen IE und meó Consulting Team sowie C.A.R.M.E.N. e. V.
- IE (Institut für Energetik und Umwelt gGmbH) (2005c): Monitoring zur Wirkung des novellierten Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse. 1. Zwischenbericht (in Kooperation mit Fichtner GmbH & Co.KG, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaftsbau und Klinski, St., Berlin), www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/zwischenbericht_eeg_monitoring.pdf, Leipzig u. a. O.
- IE (Institut für Energetik und Umwelt gGmbH) (2006a): Persönliche Kommunikation mit dem TAB vom 7.9.2006
- IE (Institut für Energetik und Umwelt gGmbH) (2006b): Persönliche Kommunikation mit dem TAB vom 28.12.2006
- IFAS (Institut für fluidtechnische Antriebe und Steuerungen) (2004): Befragung von Anwendern zu Biohydraulikölen. www.ifas.rwth-aachen.de
- IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH) (2003): Erweiterung der Ökobilanz für RME (Autoren: Gärtner, S. O., Reinhardt, G. A.). Gutachten im Auftrag der Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e. V., Heidelberg
- IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH) (2004a): CO₂-neutrale Wege zukünftiger Mobilität durch Biokraftstoffe: Eine Bestandsaufnahme (Autoren: Quirin, M., Gärtner, S. O., Pehnt, M., Reinhardt, G. A.). Endbericht im Auftrag der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen, Frankfurt a. M.
- IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH) (2004b): Nachhaltige Biomassenutzungsstrategien im europäischen Kontext. Analyse im Spannungsfeld nationaler Vorgaben und der Konkurrenz zwischen festen, flüssigen und gasförmigen Bioenergieträgern, 2. Zwischenbericht, Heidelberg
- IFEU Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (2005c): Eigene Berechnungen und Abschätzungen von IFEU, Heidelberg
- IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH) (2007): Persönliche Mitteilung von Herrn Gärtner ans TAB vom 29.1.2007 und 8.8.2007
- ISSUS (Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg Institut für Schiffsbetrieb, Seeverkehr und Simulation) (2005): Information zum EU-Projekt LLINCWA (Loss(and) lost) Lubricants in INland and Coastal Water Activities). www.haw-hamburg.de/~watter/llincwa_web/index.html
- IES/JRC, EUCAR, CONCAWE (Institute for Environment and Sustainability of the EU Commission's Joint Research Centre, European Council for Automotive R&D, Oil Companies European Organization for Environment Health and Safety) (eds.) (2003): Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context, Version 1, www.senternovem.nl/mm-files/114335_tcm24-124322.pdf, Brussels
- Kaeb, H. (2005): Telefonisches Interview von Harald Kaeb durch C.A.R.M.E.N. zur Marktentwicklung von Biokunststoffen vom 04.10.2005. Berlin/Straubing
- Kaeb, H. (2006): Biokunststoffe & Bioverpackungen. Informationspapier vom Verband „European Bioplastics“ (ehem. IBAW), Berlin
- Kaempf, D. (2005): Program, Abstracts, Lectures and Reports. In: U. S. Department of Energy (ed.): 1st International Biorefinery Workshop, July 20 and 21, 2005, www.biorefineryworkshop.com, Washington D. C.
- Kaltschmitt, M., Hartmann, H. (Hg.) (2001): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren, Berlin/Heidelberg

- Kaltschmitt, M., Wiese, A., Streicher, W. (Hg.) (2003): Erneuerbare Energien – Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. Berlin/Heidelberg
- Kamm, B. (2006): Internationale Bioraffinerie-Systeme. Vortrag auf dem 605. DECHEMA-Kolloquium am 2. März 2006, Frankfurt a. M.
- Kamm, B., Kamm, M. (2001): Biobasierte Industrielle Produkte und Bioraffinerie-Systeme – Ein Weg in die industrielle Zukunft des 21. Jahrhunderts? www.umweltchemie_gdch.de/PDF/bioraf.pdf, abgerufen im August 2005
- Kamm, B., Kamm, M. (2005a): Internationale Bioraffinerie-Systeme. Verknüpfung von Technologien der Agrarwirtschaft und einer biobasierten Stoff- und Energiewirtschaft, Vortrag auf den „3. Reissburger Umwelt-Biotechnologie-Tagen“ am 29. Juni 2005, Vortragsfolien, Reissburg
- Kamm, B., Kamm, M. (2005b): Bioraffinerien – USA und Europa gehen gemeinsame Wege. In: Nachrichten aus der Chemie 53(10), S. 1016–1019
- Kamm, B., Kamm, M., Schmidt, M., Hirth, T., Schulze, M. (2005): Lignocellulose-based Chemical Products and Product Family Trees. In: Kamm, B., Gruber, P., Kamm, M., (eds.), Biorefineries – Industrial Processes and Products. Status Quo and Future Directions, Weinheim, S. 97–138
- Karus, M. (nova-Institut GmbH) (2005): Persönliche Kommunikation mit dem TAB, E-Mail vom 18.10.2005, Hürth
- KATALYSE (Institut für angewandte Umweltforschung) (2006): Nachwachsende Rohstoffe. www.umweltlexikon-online.de/fp/archiv/RUBlandwirtsrohstoffe/NachwachsendeRohstoffe.php, abgerufen am 28.08.2006, Köln
- Kaup, M. (2002): Entwicklungs- und Erfolgsfaktoren für Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen in Deutschland und der EU im Spannungsfeld zwischen Ökonomie und Ökologie. Kölner Forschungen zur Wirtschafts- und Sozialdemographie Bd. 52, Köln
- Klobasa, M., Ragwitz, M. (2005): Gutachten zur CO₂-Minderung im Stromsektor durch den Einsatz erneuerbarer Energien. Fraunhofer-ISI im Auftrag der AG Erneuerbare Energien Statistik (AGEE-Stat) sowie des Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), Karlsruhe
- Kooperationsstelle Hamburg (1996): Pflanzenölester als Alternative zu organischen Lösungsmitteln. Projekt VOFAPRO (Oils and their Fatty Acid Esters as Substitutes for Organic Solvents in Industrial Processes), Hamburg
- Krewitt, W., Schlomann, B. (2006): Externe Kosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Vergleich zur Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern. Gutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Stuttgart/Karlsruhe
- KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V.) (2005a): Erfassung und Analyse von Defiziten an landwirtschaftlichen Biogasanlagen. im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV), Darmstadt, laufend
- KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V.) (2005b): Faustzahlen für 2004. In: Betriebsplanung Landwirtschaft 05/2004. Darmstadt, S. 547 ff.
- Lancaster, M. (2002): The Syngas Economy. In: Lancaster, M. (ed.): Green Chemistry. An Introductory Text, Cambridge (UK), S. 205 f.
- Leible, L., Kälber, St., Nieke, E. (2001): Nachwachsende Rohstoffe – eine Zwischenbilanz. In: Grunwald, A. (Hg.): Jahrbuch des Institutes für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) 1999/2000, Forschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe, S. 25–41
- Mandl, M., Graf, N., Thaller, A., Böchzelt, H., Schnitzer, H., Steinwender, M., Wachlhofer, R., Fink, R., Kromus, S., Ringhofer, J., Leitner, E., Zentek, J., Novalin, S., Mihalyi, B., Marini, I., Neureiter, M., Narodoslawsky, M. (2006): Grüne Bioraffinerie – Aufbereitung und Verwertung der Grasfaserfraktion. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Österreich) (Hg.), Berichte aus der Energie- und Umweltforschung Nr. 67/2006, Wien
- Matlack, A. S. (2001): The Use of Synthesis Gas from Biomass. In: Matlack A. S., Dekker, M.: Introduction to Green Chemistry, New York, S. 369 ff.
- McManus, M. C., Hammond, G. P., Burrows, C. R. (2003): Life cycle assessment of mineral and rapeseed oil in mobile hydraulic systems. In: Journal of Industrial Ecology 7(3-4), S. 164–177
- meó (meó Consulting Team) (2005): Persönliche Mitteilung von Dr. Norbert Schmitz an das TABELLE Köln
- Meyer, B., Krzack, S., Radig, W. (2004): Stand der Entwicklung der Synthesegasproduktion aus Biomasse. TU Bergakademie Freiberg. In: BMELV, FNR, Daimler-Chrysler AG, Volkswagen AG (Hg.): 2. Internationaler BtL-Kongress „Synthetische Biokraftstoffe“ vom 3.–4. November 2004. Proceedings, www.fnr-server.de/cms35/fileadmin/allgemein/pdf/veranstaltungen/btl2004/Meyer.ppt#256,1,Folie 1, Wolfsburg
- Müller-Sämann, K. M., Reinhardt, G., Vetter, R., Gärtner, S. (2003): Nachwachsende Rohstoffe in Baden-Württemberg: Identifizierung vorteilhafter Produktlinien zur stofflichen Nutzung unter besonderer Berücksichtigung umweltgerechter Anbauverfahren. Institut für umweltgerechte Landbewirtschaftung, Mühlheim (IfuL), Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH, Heidelberg (IFEU), Gefördert im Rahmen des Programms BW-PLUS durch das Land Baden-Württemberg. Forschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe
- MWV (Mineralölwirtschaftsverband e. V.) (2003): Mineralöl und Raffinerien. www.mwv.de/download/oe_l_raff.pdf, Hamburg

- MWV (Mineralölwirtschaftsverband e. V.) (2005a): Jahresbericht Mineralöl-Zahlen 2005. www.mwv.de/download/jb.pdf, Hamburg
- MWV (Mineralölwirtschaftsverband e. V.) (2005b): MWV-Prognose 2020 für die Bundesrepublik Deutschland. Hamburg
- NatureWorks LLC (2005): Ingeo products. www.ingefibers.com, abgerufen im September 2005
- nova (nova-Institut GmbH) (2006): Naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK). Hürth u. a. O., www.nova-institut.de/pdf/Road-Show-Broschuere.pdf
- NRC, Committee on Biobased Industrial Products, Board on Biology, Commission on Life Sciences (National Research Council) (2000): Biobased Industrial Products. Priorities for Research and Commercialization, Washington D. C.
- OBP, EERE, DOE (Office of the Biomass Program, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, U. S. Department of Energy) (2005): Multi Year Program Plan 2007–2012. Washington D. C., www1.eere.energy.gov/biomass/pdfs/mypp.pdf, abgerufen am 29.8.2006
- Okkerse, C., van Bekkum, H. (1999): From fossil to green. In: *Green Chemistry 1*, S. 107–114
- Öko-Institut (Öko-Institut e. V.) (2005): Perspektiven eines CO₂- und emissionsarmen Verkehrs – Arbeitsteil: Kraftstoffe und Infrastruktur (Autoren: Zimmer, W., Hochfeld, C., Fritsche, U. R., Jenseit, W., Schmied, M.). Gutachten im Auftrag des Deutschen Bundestages, Berlin
- Patel, M. (1999): Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen – Polyhydroxybutyrat und Stärke Kunststoffe. Abschätzung zum kumulierten Energieaufwand und zu CO₂-Emissionen, Fraunhofer-ISI, Karlsruhe
- Patel, M., Bastioli, C., Marini, L., Würdinger, E. (2003): Environmental assessment of bio-based polymers and natural fibres. In: Hofrichter, M., Steinbüchel, A. (eds.): *Biopolymers: Lignin, Humic Substances and Coal*, Volume 10: General Aspects and Special Applications, Weinheim, www.chem.uu.nl/nws/www/general/personal/Biopoly.pdf
- Peters, D. (2006): *Nachwachsende Rohstoffe in der Industrie*. FNR, Gülzow
- Pfaffenberger, W., Nguyen, K., Gabriel, J. (2003): Ermittlung der Arbeitsplätze und Beschäftigungswirkungen im Bereich Erneuerbarer Energien. Bremer Energie Institut, Bremen, www.bei.uni-bremen.de/download/gutacht_0144.pdf
- PlasticsEurope (Assoziation of Plastics Manufacturers) (ed.) (2004): *An analysis of plastics consumption, demand and recovery in Europe 2002&2003*. www.plasticseurope.org, abgerufen im Oktober 2005
- PlasticsEurope Deutschland e. V. (ehem. Verband Kunststoffherzeugende Industrie e. V.) (2005): *Kunststoffherzeugung in Deutschland*. <http://www.vke.de>, abgerufen in 1/2006
- Pröbster, A. (1990): *Praktische Erfahrungen mit Miscanthus sinensis Giganteus in Bayern*. Arbeitspapier der KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. Nr.158, In: *Miscanthus sinensis* (1990), S. 42–49
- Ragwitz, M., Schleich, J., Huber, C., Resch, G., Faber, T., Voogt, M., Ruijgrok, W., Bodo, P. (2005): *FORRES 2020 – Analysis of the EU renewable energy's evolution up to 2020*. Final report of the project FORRES 2020 – on behalf of DG TREN, coordinated by FhG-ISI with contributions from EEG, Ecofys, Kema and REC, Karlsruhe
- Raldow, W. (2005): *Program, Abstracts, Lectures and Reports*. In: U. S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, European Commission (eds.): *1st International Biorefinery Workshop*, July 20 and 21, 2005, www.biorefineryworkshop.com/pdfs/Program_Book_Web-2.pdf, Washington D. C.
- Reinhardt, G. A., Gärtner, S. O. (2005): *BioFuels for Transportation: Technical Potentials and Sustainability*. In: Bartz, W. J. (Hg.): *Fuels 2005. Proceedings, 5th International Colloquium*, 12.–13. Januar 2005, Esslingen, S. 15–20
- Reinhardt, G. A., Gärtner, S. O., Patyk, A. (2006): *Ökobilanz zu BTL – eine ökologische Gesamteinschätzung*. Im Auftrag der FNR, noch nicht veröffentlicht
- Reinhardt, G. A., Zemanek, G. (2000): *Ökobilanz Bioenergieträger*. Basisdaten, Ergebnisse, Bewertungen, Berlin
- Richter, I., Wiegmann, K., Fritsche, U. R. (2006): *Nachhaltige aquatische Biomasse: Überblick zur rohstofflichen Verwendungen und Überlegungen zu Möglichkeiten und Grenzen der energetischen Nutzung*. Arbeitspapier, Öko-Institut e. V., Darmstadt (in Vorbereitung)
- Ringpfeil, M. (2002): *Biobased Industrial Products and Biorefinery Systems – Industrielle Zukunft des 21. Jahrhunderts? Anforderungen an Europa*, In: *biorefinaria 2001. International Symposium „Green BioRefinery“*, 10.–11. Oktober 2001, Teltow-Seehof
- Röper H. (2001): *Perspektiven der industriellen Nutzung nachwachsender Rohstoffe, insbesondere von Stärke und Zucker*. In: *Mitteilung der Fachgruppe Umweltchemie und Ökotoxikologie der Gesellschaft Deutscher Chemiker 7(2)*, S. 6–12
- Rösch, Ch. (2006): *Persönliche Kommunikation mit dem TAB vom 31.7.2006*
- Rösch, Ch., Stelzer, V., Raab, K. (2006): *Energie aus dem Grünland – eine nachhaltige Entwicklung? Projekt in der Bearbeitung*, www.itas.fzk.de/deu/projekt/roes0343.htm, abgerufen am 18.7.2006
- Rothermel, J. (2006): *Persönliche Kommunikation zwischen Dr. Rothermel (VCI, Verband der Chemischen Industrie) und biorefinery.de GmbH, Potsdam*
- Schidler, S., Adensam, H., Hofmann, R., Kromus, St., Will, M. (2003): *Technikfolgenabschätzung der Grünen Bioraffinerie*. Band I (Endbericht) und Band II (Materialiensammlung), Wien

- Schmidt, W., Landbeck, M. (2004): Züchterische Ansätze zur Steigerung der Energieleistung bei Mais. Vortrag auf der 7. GPZ-(Gesellschaft für Pflanzenzüchtung-)Tagung am 03.–05. März 2004, Halle
- Schmitz, N. (2006): Biokraftstoffe – eine vergleichende Analyse. FNR (Hg.), im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV), Gülzow, www.fnr-server.de/pdf/literatur/pdf_236biokraftstoffvergleich_2006.pdf
- Schmitz, N. (Hg.) (2003): Bioethanol in Deutschland. Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“ Band 21, Münster
- Schmitz, N. (Hg.) (2005): Innovationen bei der Bioethanolherzeugung und Ihre Auswirkungen auf Energie und Treibhausgasbilanzen. Neue Verfahren, Optimierungspotenziale, internationale Erfahrungen und Marktentwicklung, Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“ Band 26, Münster
- Schnabel, R., Anton, W. (2001): Untersuchungsergebnisse zur Modifizierung und Verarbeitung von nachwachsenden Rohstoffen. Vortrag auf dem 3. Intern. Symposium „Werkstoffe aus Nachwachsenden Rohstoffen“ vom 05.–06. September 2001 in Erfurt, http://mluww-sgi4.iw.uni-halle.de/~wwwrheo/Biopolymere_Vortrag.htm, abgerufen am 10.7.2006
- Schulz, W., Gatzen, Ch., Peek, M. (2004): Gesamtwirtschaftliche, sektorale und ökologische Auswirkungen des Erneuerbare Energien Gesetzes (EEG). Gutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA), Gemeinschaftsprojekt des Energiewirtschaftlichen Instituts an der Universität zu Köln (EWI), des Institut für Energetik und Umwelt gGmbH (IE) und des Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (RWI), Bonn/Berlin
- Sprenger, R.-U., Rave, T., Wackerbauer, J., Edler, D., Nathani, C., Walz, R. (2003): Beschäftigungspotenziale einer dauerhaft umweltgerechten Entwicklung. Forschungsbericht 200 14 152 des Umweltbundesamtes, Texte Nr. 39/2003, Berlin
- StaBu (Statistisches Bundesamt Deutschland) (2006): Landwirtschaftlich genutzte Fläche nach Hauptnutzungsarten. www.destatis.de/basis/d/forst/forsttab2.php, abgerufen am 28.9.2006
- Staiß, F., Linkohr, C., Zimmer, U. (2005): Erneuerbare Energien in Zahlen. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hg.), Berlin
- Stelter, W. (2004): Markteinführung von biogenen Schmierstoffen – Ergebnisse aus dem Förderprogramm des BMVEL. Vortrag in der „Seminarreihe Bioschmierstoffe“ am 02.02.2004, Ulm
- TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (1999): Einsatz nachwachsender Rohstoffe im Wohnungsbau (Autorin: Rösch, Ch.). TAB-Arbeitsbericht Nr. 61, Berlin
- TFZ (Technologie und Förderzentrum für Nachwachsende Rohstoffe) (2005): Daten und Fakten zur dezentralen Ölgewinnung in Deutschland. Berichte aus dem TFZ Nr. 3, Straubing
- Thoen, J. A. (2003): Chemicals from biomass. Dow Europe NL, Vortrag auf der Konferenz des Paul Scherrer Instituts „ETSF 4 – Energy Technologies for a Sustainable Future“, „Fuels and Electricity from Biomass: Integration of Technical Systems into a Natural Carbon Cycle“ December 5, 2003, Villingen
- Thrän, D. (2005): Biomasseherkunft und -anwendung. Vortrag auf der VVEW-Fachtagung „Biomassennutzung in Heizkraftwerken und landwirtschaftlichen Biogasanlagen“ am 14. September 2005, Kassel
- Thrän, D., Kaltschmitt, M. (2004): Status quo und Potenziale der energetischen Biomassennutzung in Deutschland. Wozu sollen welche Biomassepotenziale genutzt werden? In: Bundesverbandes BioEnergie e. V. (BBE), Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (Hg.): Ausbau der Bioenergie – im Einklang mit dem Natur- und Umweltschutz?! Eine Standortbestimmung. Perspektivforum des BBE und der FNR, Tagungsband vom 10. Februar 2004, Berlin, S. 45–66
- Thrän, D., Scheuermann, A., Falkenberg, D., Weber, M., Schneider, S., Witt, J., Bohnenschäfer, W., Zeddies, J., Henze, A., Thoroe, C., Schneider, M., Schweinle, J., Jenseit, W., Fritsche, U. R. (2005a): Nachhaltige Biomassennutzungsstrategien im europäischen Kontext. Institut für Energetik und Umwelt, Universität Hohenheim/Institut für Landwirtschaftliche Betriebslehre, Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (BFH)/Institut für Ökonomie, Öko-Institut, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hg.), Leipzig u. a. O.
- Thrän, D., Vogel, A., Weber, M. (2005b): Biogene Kraftstoffe in Deutschland, Techniken und Potenziale. In: Müll und Abfall 37(11), Leipzig, S. 552–559
- TNS Emnid (2003): Wohngesundheit durch Holz. Repräsentative Bevölkerungsbefragung. Studie im Auftrag des Holzabsatzfonds, Bonn
- Tosques, A. (o. J.): Ökodruckfarben. www.hdm-stuttgart.de, abgerufen im September 2005
- Türk, Th., Idelmann, M. (2000): Bewertung des Einsatzes biologisch abbaubarer Abfallbeutel im Rahmen der Bioabfallsammlung und Kompostierung. In: Süddeutsches Kunststoff-Zentrum (Hg.): 7. Fachtagung Biologisch abbaubare Werkstoffe 2000, S. E1–19
- UFOP (Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e. V.) (2005): Marktinformationen Ölsaaten und Biokraftstoffe. Ausgabe Mai 2005, Berlin
- UFOP (Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e. V.) (2004): Bericht 2003/2004. Bonn

- UFOP (Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e. V.) (2006): Rohstoffpotenziale für die Produktion von Biodiesel. www.ufop.de/downloads/Rohstoffpotenziale_021006.pdf
- van Dam, J. E. G., Bos, H. L. (2004a): The environmental impact of fibre crops in industrial applications. Hintergrundpapier zu van Dam/Bos 2004b, http://library.wur.nl/wasp/bestanden/LUWPUBRD_00350295_A502_001.pdf
- van Dam, J. E. G., Bos, H. L. (2004b): Consultation on natural fibres: the environmental impact of hard fibres and jute in not-textile industrial applications. In: ESC-Fibres Consultation no 04/4, Rome, 15–16 December 2004, www.fao.org/es/esc/common/ecg/51423_en_esc_4.pdf
- van Dyne, D. L., Kaylen, M. S., Blase, M. G. (1999a): Estimating the Economic Feasibility of Converting Ligno-Cellulosic Feedstocks to Ethanol and Higher Value Chemicals under the Refinery Concept. A Phase II Study, University of Missouri, Columbia
- van Dyne, D. L., Kaylen, M. S., Blase, M. G. (1999b): The Economic Feasibility of Converting Ligno-Cellulosic Feedstocks to Ethanol and Higher Value Chemicals. A Report to the Consortium for Plant Biotechnology Research, Inc., St. Simons, Island
- VCI (Verband der Chemischen Industrie e. V.) (2005): Chemie 2005. Jahresbericht, Frankfurt a.M., www.vci.de/template_downloads/tmp_0/vci_gb_internet.pdf?DokNr=116087&p=101
- VCI (Verband der Chemischen Industrie e. V.) (2006): Chemiewirtschaft in Zahlen 2006. Frankfurt a.M., www.vci.de/template_downloads/tmp_0/CHIZ_2006~DokNr~81447~p~101.pdf
- Vink, E. (2002): Persönliche Kommunikation zwischen IFEU und Cargill Dow (NL)
- VKE (Verband Kunststoffherstellende Industrie e. V.) (2006a): Kunststoff global. www.vke.de/de/markt/kunststoffglobal/index.php?PHPSESSID=b1eb3478172db956255eb401b30663f4, abgerufen am 15.12.2006
- VKE (Verband Kunststoffherstellende Industrie e. V.) (2006b): Kunststoffherzeugung in Deutschland 2005. 9 Grafiken, veröffentlicht am 5. Mai 2006, www.vke.de/download/pdf/Charts2005.pdf?PHPSESSID=b1eb3478172db956255eb401b30663f4, abgerufen am 15.12.2006
- Vogelsang, W. (2005): Märkte für nachwachsende Rohstoffe und ökonomische Perspektiven. Agravis Raiffeisen AG, Vortrag auf dem „Pflanzenölseminar 2005“ am 30.06.2005, Greetsiel, www.biokraftstoff-portal.info/data/PoelVortrag_Vogelsang.pdf
- Vogt, D., Karus, M., Ortman, S., Schmidt, Ch., Gahle, Ch. (2006): Wood-Plastic-Composites (WPC)). Märkte in Nordamerika, Japan und Europa mit Schwerpunkt Deutschland, nova-Institut GmbH, Hürth, www.nova-institut.de/pdf/06-01_WPC-Studie.pdf
- von Weizsäcker, C. Ch., Breyer, F., Hax, H., Sievert, O. (Hg.) (2004): Zur Förderung erneuerbarer Energien. Stellungnahme des Wissenschaftlichen Beirats beim Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Köln
- Wachter, B., Mandl, M., Böchzelt, H., Schnitzer, H. (2003): Grüne Bioraffinerie – Verwertung der Grasfaserfraktion. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Österreich) (Hg.), Berichte aus der Energie- und Umweltforschung Nr. 20/2003, Wien
- Wähling, A. (2001): Aktueller Stand der Farbstoffgewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen. In: Gülzower Fachgespräche, Forum Färberpflanzen 2001, S. 146–161
- WEC (World Energy Council) (Hg.) (2002): Energie für Deutschland. Essen, worldenergy.de/org/wec-geis/global/downloads/edc/EFD2002.pdf
- Werpy, T., Petersen, G. (eds.) (2004): Top Value Added Chemicals from biomass. Volume I: Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas, U. S. Department of Energy, Office of scientific and technical information, Oak Ridge/Springfield, www1.eere.energy.gov/biomass/pdfs/35523.pdf
- Wötzel, K. (1999): Ökobilanz einer PKW-Seitenverkleidung aus einem Hanffaserverbundwerkstoff und Vergleich mit einem Referenzprodukt aus ABS-Kunststoff. Diplomarbeit an der TU Braunschweig, Braunschweig
- Würdinger, E., Peche, R., Roth, U., Wegner, A., Reinhardt, G. A., Detzel, A., Giegrich, J., Borken, J., Fehrenbach, H., Möhler, S., Patyk, A., Vogt, R., Mühlberger, D., Wante, J. (2002): Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen – Vergleichende Ökobilanz für Loose-fill-Packmittel aus Stärke bzw. aus Polystyrol. Bayrisches Institut für Abfallforschung, IFEU GmbH, Floh-Pak GmbH, gefördert von der DBU, Augsburg/Heidelberg
- ZMP (Zentrale Markt- und Preisberichtsstelle) (2005): ZMP-Newsletter. Ausgabe 25/2005, Bonn

Anhang

1. Details zur Übersichtsökobilanz zum Konzept der grünen Bioraffinerie

Die folgenden Ausführungen in Anhang 1 zur Übersichtsökobilanz GBR entsprechen in weiten Teilen denen des Gutachtens IFEU (2006a).

Interner Aufbau der analysierten grünen Bioraffinerie

Der betrachtete interne Aufbau der grünen Bioraffinerie ist in vereinfachter Form in Abbildung 63 dargestellt, wobei die Masseninputs und -outputs beispielhaft für die Herstellung des Fermentationsprodukts Milchsäure angegeben sind. Für das Fermentationsprodukt Lysin, welches alternativ zur Milchsäure betrachtet wird, ist der Raffinerieaufbau identisch (es ändern sich nur leicht die Massenflüsse).

In dem betrachteten Fall wurde der Bau einer neuen Anlage mit einem Trockenwerk angenommen, welches anstelle von Kohle mit Erdgas (als zurzeit „bestem“ fossilem Rohstoff) beheizt wird. In Abbildung 64 ist bereits zu erkennen, dass relativ viel Energie für das Trockenwerk aufgewendet werden müsste. Hauptprodukte sind Grüngutpellets (aus der Verarbeitung des Presskuchens nach

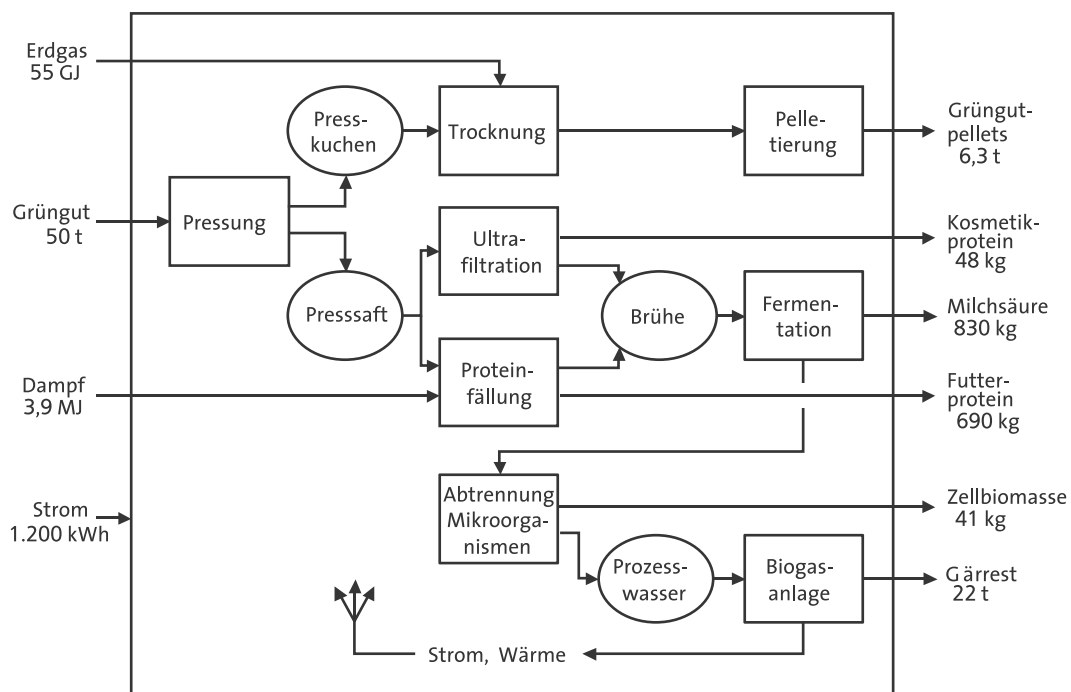
der Trocknung) und Proteine, Milchsäure sowie Lysin (aus dem Verarbeitungsprozess des Presssaftes). Es fallen auch nicht unerhebliche Mengen an Gärresten an.

Der Lebensweg von der Bereitstellung des Grünguts über die Produktion in der grünen Bioraffinerie bis hin zum Verbrauch der Produkte ist in Abbildung 64 schematisch dargestellt.

Dies sind gleichzeitig die für die Übersichtsökobilanz betrachteten Verfahrensschritte: Das Grüngut wird in der grünen Bioraffinerie mithilfe fossiler Energien (Erdgas, Dampf und Strom) umgesetzt zu Grüngutpellets, Futterprotein, Zellbiomasse, Kosmetikprotein, einem Fermentationsprodukt (Milchsäure oder Lysin) und Biogasgärrest. Die ersten drei, die als eiweißreiches Futtermittel eingesetzt werden, ersetzen das Eiweißfuttermittel Sojasechrot auf der Basis ihres Proteingehalts. Kosmetikprotein substituiert fossil produzierte Acrylate und Tenside zu jeweils gleichen Teilen nach Masse. Milchsäure bzw. Lysin ersetzen jeweils das gleiche auf konventionellem mikrobiologischem Weg hergestellte Produkt. Schließlich wird der Gärrest der anlageninternen Biogasproduktion als Düngemittel auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht und ersetzt Mineraldünger nach Nährstoffanteilen (IFEU 2005a).

Abbildung 63

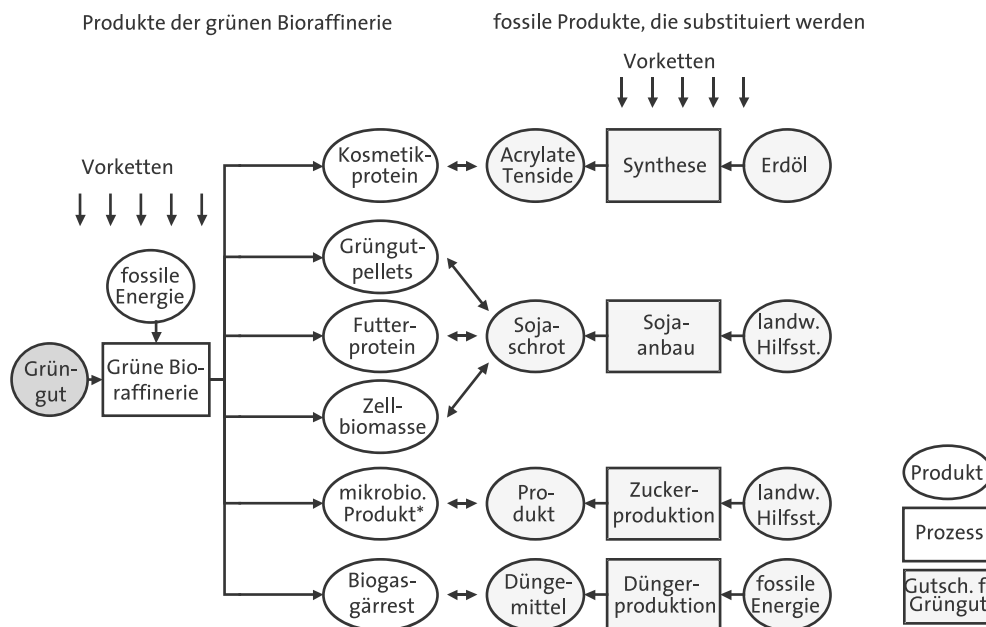
Darstellung des internen Aufbaus einer grünen Bioraffinerie



Dargestellt sind die Massenflüsse pro ha und Jahr Grüngut mit dem Fermentationsprodukt Milchsäure. Quelle: IFEU 2005a

Abbildung 64

Analysierte Produktpfade der grünen Bioraffinerie



* Als mikrobiologisches Produkt werden Milchsäure bzw. Lysin untersucht.
Quelle: IFEU 2005a, ergänzt

Exemplarische Ergebnisauflistung zum Einsatz fossiler Energien (KEA)

Exemplarisch ist in Abbildung 65 der Einsatz fossiler Energien für die einzelnen Aufwendungen der grünen Bioraffinerie und die Gutschriften der ersetzten konventionellen Produkte sowie die sich daraus ergebenden Differenzen (Ergebnissalden) dargestellt.

Dabei zeigte sich, dass in Bezug auf den Einsatz fossiler Energien die Aufwendungen für die grüne Bioraffinerie insgesamt höher sind als die Gutschriften durch die ersetzten Produkte. Grund hierfür ist insbesondere der relativ hohe Energiebedarf¹⁰¹ für die Trocknung des Grünguts zu Pellets gegenüber der weniger aufwendigen Herstellung von Sojaschrot. Ferner spielt eine Rolle, dass die Produkte der grünen Bioraffinerie überwiegend andere nachwachsende Rohstoffe ersetzen, die ihrerseits oft

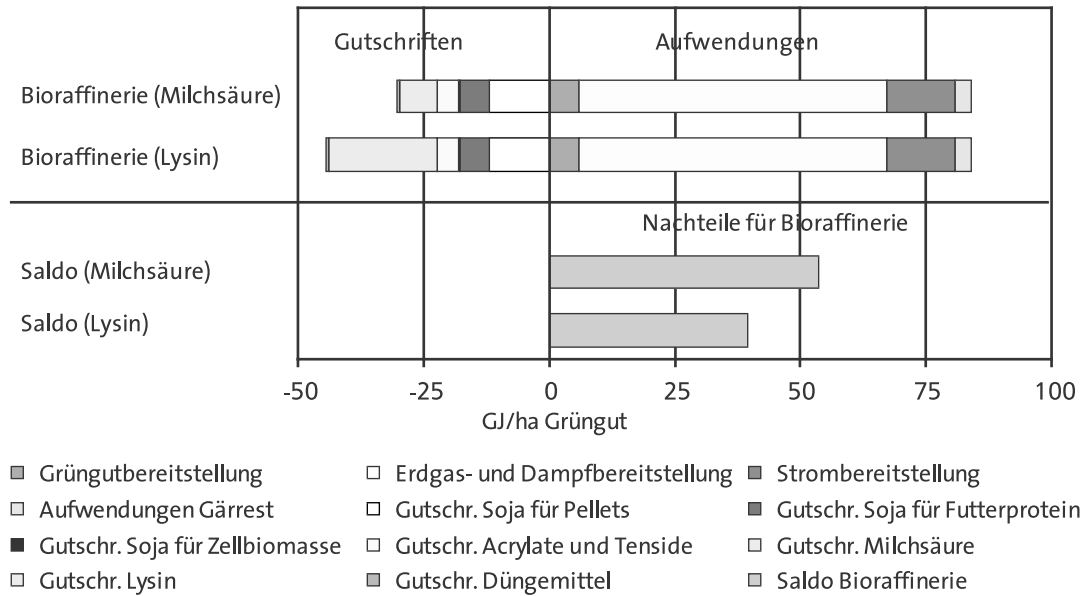
einen relativ geringen Einsatz fossiler Energien und an Treibhausgasausstoß haben (IFEU 2005a). Im Einzelnen ergeben sich folgende Aussagen (IFEU 2005a):

- Die Wärmebereitstellung (Erdgas und Dampf) stellt die größte Aufwendung für die Bioraffinerie (im betrachteten Konzept) dar. Die Strombereitstellung spielt demgegenüber keine so große Rolle, die anderen Aufwendungen sind noch unbedeutender.
- Größere Gutschriften bringen die Einsparung von Sojaschrot durch die Grüngutpellet- und die Futterproteinproduktion mit sich.
- Weiterhin von Bedeutung sind neben der Gutschrift für die Acrylate und Tenside, die durch das Kosmetikprotein ersetzt werden können, besonders die für die konventionell hergestellte Fermentationsprodukte Milchsäure bzw. Lysin.
- Die Differenz zwischen den Gutschriften der Milchsäure und des Lysins zeigt, dass je nach ersetztem konventionellem Produkt die Bilanz durchaus unterschiedlich ausfallen kann. Erzeugt die grüne Bioraffinerie andere Produkte, so könnte sich durchaus ein anderes Ergebnis zeigen.

¹⁰¹ Wenn anstelle von Erdgas und (fossilem) Dampf regenerative Energieträger zum Einsatz kämen, würde dies erst die Ökobilanz verändern, wenn die gesamte Energieversorgung regenerativ wäre. Ein punktueller regenerativer Energieeinsatz „nur für die Bioraffinerien“ steht dem Ökobilanzkonzept entgegen, da diese dann auch prinzipiell woanders eingesetzt werden könnten.

Abbildung 65

Aufwendungen, Gutschriften und Ergebnissalden zum Einsatz fossiler Energien für das untersuchte Konzept der grünen Bioraffinerie



Quelle: IFEU 2005a

2. Alternative Nutzungsmöglichkeiten des Grüngutes

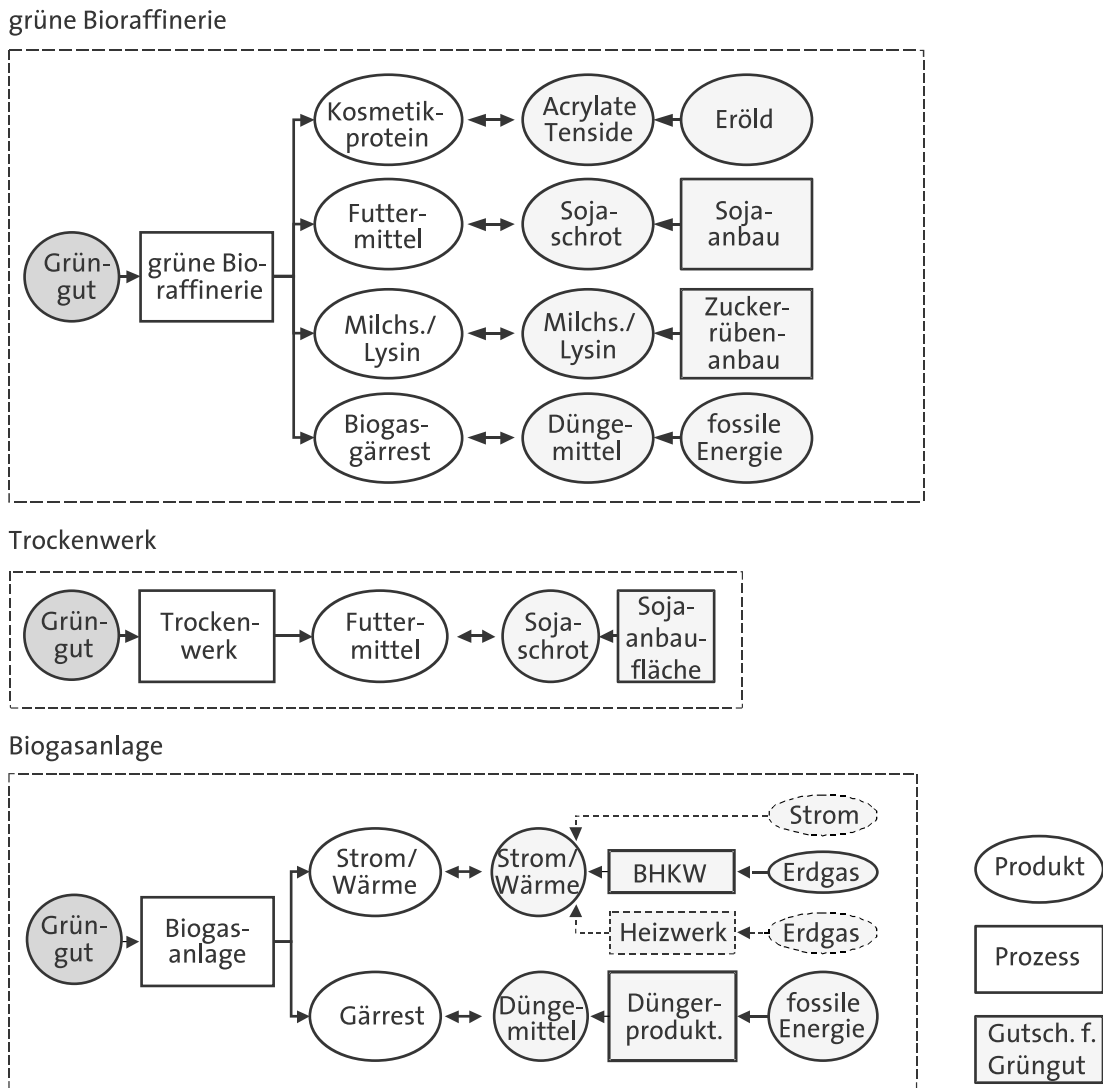
Als alternative Verwendungsmöglichkeiten des Rohstoffs Grüngut wurde ein Einsatz in einem Trockenwerk als auch in einer Biogasanlage berücksichtigt (Abbildung 66). Das System der grünen Bioraffinerie ist in Kapitel IV.2.1 beschrieben. Im Trockenwerk wird das Grüngut üblicherweise unter Einsatz fossiler Energien getrocknet und zu Pellets gepresst. Als eiweißreiches Futtermittel ersetzt es dann Sojaschrot. In der Biogasanlage wird das Grüngut vergoren, wobei mit dem entstehenden Biogas ein Motorblockheizkraftwerk (BHKW) betrieben werden kann, welches wiederum Strom in das öffentliche Netz einspeist

und Nahwärme bereitstellt. Der Gärrest wird auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht und ersetzt Mineraldünger (IFEU 2005a, S. 37f.).

Die folgenden Ausführungen in Anhang 2 zur Übersichtsökobilanz GBR entsprechen in weiten Teilen denen des Gutachtens IFEU (2006a). Wird der Rohstoff Grüngut als gegeben betrachtet, der in allen Systemen in gleicher Menge zur Verfügung steht, so kann seine Nutzung in den Systemen „grüne Bioraffinerie“ und „Trockenwerk“ landwirtschaftliche Flächennutzung einsparen, nämlich die Anbaufläche des sonst nötigen Sojaschrots sowie in geringerem Maß die für die Milchsäure- bzw. Lysinproduktion benötigte Fläche für den Zuckerrübenanbau.

Abbildung 66

Lebenswegvergleiche für die drei betrachteten Optionen für die Nutzung von Grüngut



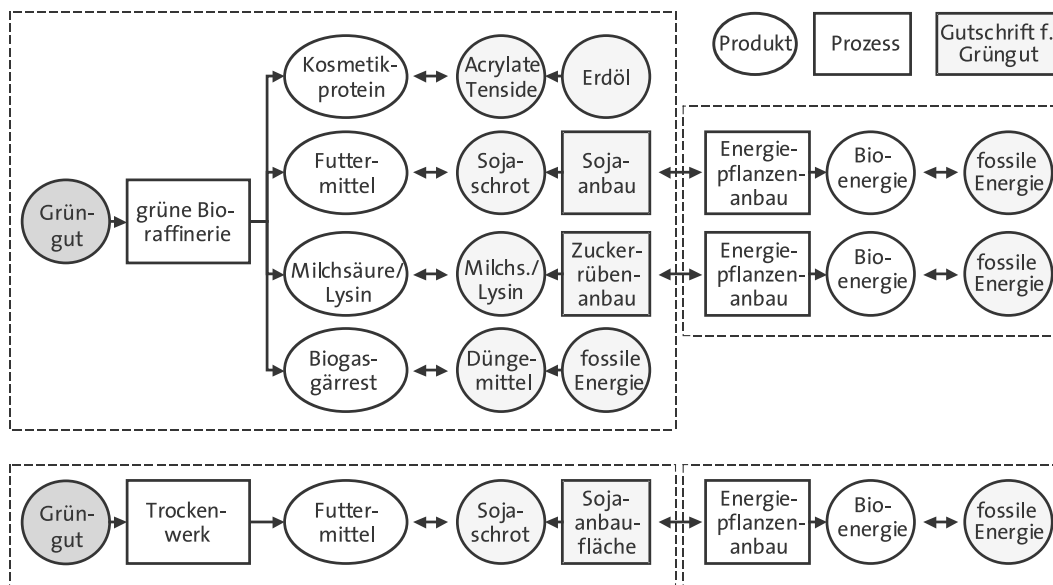
Quelle: IFEU 2005a

Da die in Deutschland und ganz Europa zur Verfügung stehenden Flächen begrenzt sind und eine starke Nutzungskonkurrenz zwischen Nahrungs- und Futtermittelproduktion, Naturschutz und dem Anbau von Energiepflanzen und stofflich genutzten nachwachsenden Rohstoffen herrscht, wird ein „erweitertes Szenario“ analysiert (Abbildung 67), das davon ausgeht, dass die freiwerdenden Flächen nicht mehr für Nahrungs- und Futtermittelproduktion oder den Naturschutz benötigt werden und somit für den Energiepflanzenanbau genutzt werden können (IFEU 2005a, S. 36).

Unter Berücksichtigung alternativer Flächennutzung wird in der Bioraffinerie Grüngut zu Kosmetikprotein, Biogasgärrest, verschiedenen Futtermitteln und einem Fermentationsprodukt umgesetzt. Kosmetikprotein und der Gärrest ersetzen auf Basis fossiler Energie erzeugte Produkte. Im Trockenwerk wird Grüngut zu Futtermittelpellets gepresst. Die Futtermittel und das Fermentationsprodukt ersetzen Produkte, deren Rohstoffe landwirtschaftlich erzeugt werden. Auf den dadurch freiwerdenden Flächen werden Energiepflanzen angebaut, die energetisch genutzt werden und fossile Energieträger ersetzen. Die Nutzung von Grüngut in der Biogasanlage hat keine Einsparung von Landwirtschaftsflächen zur Folge (IFEU 2005a).

Abbildung 67

Lebenswegvergleiche für die Nutzung von Grüngut unter Berücksichtigung alternativer Flächennutzung



Quelle: IFEU 2005a

3. Details zur Übersichtsökobilanz zum Konzept der Lignocellulose-Feedstock-Bioraffinerie

Die folgenden Ausführungen in Anhang 3 zur ökologischen Bewertung und Einordnung einer LCF-Bioraffinerie entsprechen in weiten Teilen denen des Gutachtens IFEU (2006a).

Interner Aufbau der analysierten LCF-Bioraffinerie

Der betrachtete interne Aufbau und die entsprechenden Massenströme der LCF-Bioraffinerie sind in vereinfachter Form in Abbildung 68 dargestellt. Hauptprodukte sind Tetrahydrofuran (THF), Ethanol und Lignin. Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Produkten einer Bioraffinerie und denen einer Erdölraffinerie zu ermöglichen, wurde die Weiterverarbeitung des Furfurals zum Tetrahydrofuran (THF) berechnet.

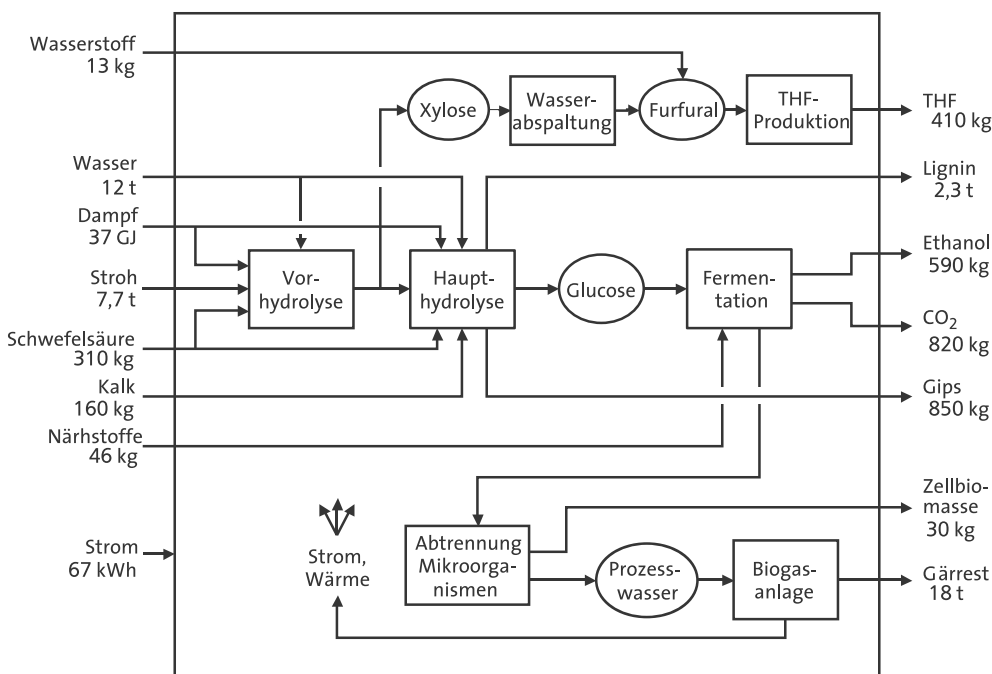
Furfural wird benötigt als Comonomer, als selektives Lösungsmittel, zur Herstellung verschiedener Derivate, z. B. Tetrahydrofuran (u. a. Zwischenprodukt zur Nylonherstellung). Im Gegensatz zu früheren einstufigen Verfahren der Furfuralherstellung, wo nur etwa ein Drittel des Ausgangsstoffs stofflich genutzt werden konnte (nur der

Pentoseanteil), würde in einer LCF-Raffinerie in einem zweistufigen Prozess auch der Celluloseanteil verwertet werden (van Dyne 1999a u. b, nach Biorefinery 2006a).

Der typische Lebensweg von der Bereitstellung des Getreidestrohs über die Produktion in der LCF-Bioraffinerie bis hin zur Nutzung der Produkte ist in Abbildung 69 schematisch dargestellt. Dies sind gleichzeitig die für die Ökobilanz betrachteten Verfahrensschritte: Das Stroh wird in der LCF-Bioraffinerie mithilfe fossiler Energien (Erdgas, Dampf und Strom), konzentrierter Schwefelsäure, gebranntem Kalk, Wasser, Wasserstoff und Nährstoffen umgesetzt zu einer größeren Anzahl verschiedener Produkte: Tetrahydrofuran (THF, ein chemischer Grundstoff), Ethanol, Kohlendioxid (CO₂) und Gips ersetzen auf konventionelle Art produzierte Waren in jeweils gleicher Masse. Lignin substituiert Kunststoffe wie Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymerisat (ABS) oder Kunstharze, Zellbiomasse aus dem Fermentationsprozess ersetzt als Futtermittel Sojaschrot auf Proteinbasis und der Gärrest der anlageninternen Biogasproduktion wird als Düngemittel auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht und ersetzt Mineraldünger nach Nährstoffanteilen (IFEU 2005a).

Abbildung 68

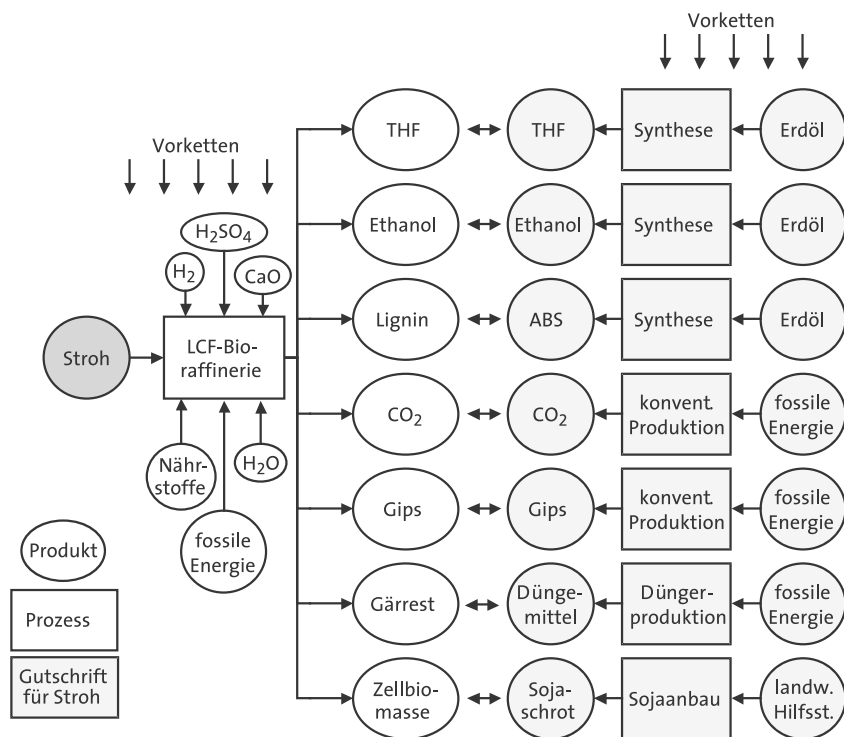
Interner Aufbau und Massenströme pro ha Stroh der analysierten LCF-Bioraffinerie



Quelle: IFEU 2005a

Abbildung 69

Analytierte Produktfaden der LCF-Bioraffinerie



THF = Tetrahydrofuran; ABS = Acrylnitril-Butadien-Styrol; H₂SO₄ = Schwefelsäure; H₂ = Wasserstoff; CaO = Kalk; H₂O = Wasser; LCF = Ligno-cellulose Feedstock; CO₂ = Kohlendioxid
 Quelle: IFEU 2005a

Exemplarische Ergebnisauflistung: Aufwand an fossiler Energie (KEA)

Exemplarisch ist in Abbildung 70 der Einsatz fossiler Energien für die einzelnen Aufwendungen der LCF-Bioraffinerie und die Gutschriften der ersetzten konventionellen Produkte sowie die sich daraus ergebende Differenz (Ergebnissaldo) dargestellt.

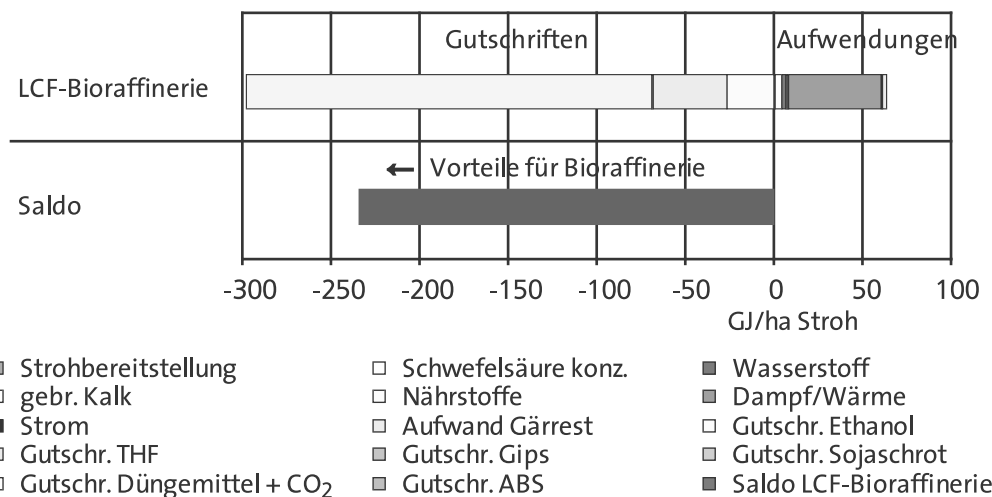
Im Ergebnis lässt sich in Bezug auf den Einsatz fossiler Energien in einer LCF-Bioraffinerie Folgendes festhalten (IFEU 2005a):

- Insgesamt bringen die Gutschriften für Ethanol, THF und insbesondere ABS der LCF-Bioraffinerie ein eindeutiges Einsparpotenzial fossiler Energie.
- Ähnlich der grünen Bioraffinerie stellt die Wärmebereitstellung (Erdgas und Dampf) die größte Aufwendung für die LCF-Bioraffinerie dar. Die anderen Aufwendungen spielen demgegenüber keine so große Rolle.

- Eine größere Gutschrift ergibt sich aus der Einsparung von ABS durch die Produktion von Lignin. Diese fällt hoch aus, weil relativ große Mengen an Lignin anfallen und somit die Gutschrift für ABS die Vorteile massiv mitbestimmt.
- Ferner ist neben der Gutschrift für das aus fossilen Quellen produzierte Ethanol besonders die Gutschrift für das konventionelle THF von Bedeutung.
- Werden andere Kunststoffe und -harze ersetzt, so können sich quantitativ durchaus andere Werte ergeben, die qualitative Aussage, dass sich Vorteile für die LCF-Bioraffinerie beim Einsatz fossiler Energien ergeben, wird davon aber nicht beeinflusst. Selbst in der ungünstigsten Variante, der energetischen Nutzung des Lignins, hat die LCF-Bioraffinerie aber noch Vorteile. Selbst für den ungünstigen Fall, dass das Lignin als Brennstoff genutzt wird, ist die LCF-Bioraffinerie mit ihren Produkten vorteilhaft gegenüber den ersetzten konventionellen Produkten.

Abbildung 70

Aufwendungen, Gutschriften und Ergebnissalden fossiler Energien für die LCF-Bioraffinerie



THF = Tetrahydrofuran; CO₂ = Kohlendioxid; ABS = Acrylnitril-Butadien-Styrol; LCF = Lignocellulose Feedstock
 Quelle: IFEU 2005a

4. Details zur Übersichtsökobilanz zum Konzept der Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerie

Die folgenden Ausführungen in Anhang 4 zur ökologischen Bewertung und Einordnung einer Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerie entsprechen in weiten Teilen denen des Gutachtens IFEU (2006a).

Interner Aufbau der analysierten Getreidebioraffinerie

Für die Übersichtsökobilanz wurde die Getreide-Ganzpflanzen-Bioraffinerie als eine spezielle Form der LCF-Bioraffinerie dargestellt (Berücksichtigung des Trockenmahlverfahrens). In den Berechnungen wurde zunächst davon ausgegangen, dass nur das Stroh verarbeitet wird. Ein zusätzlicher Einsatz von Getreide wäre theoretisch ohne größeren Aufwand möglich. Der zweistufige Strohaufschluss erfolgt wie in der LCF-Bioraffinerie, jedoch werden in diesem Szenario neben der Cellulose auch die Pentosen zu Ethanol und CO₂ vergoren.

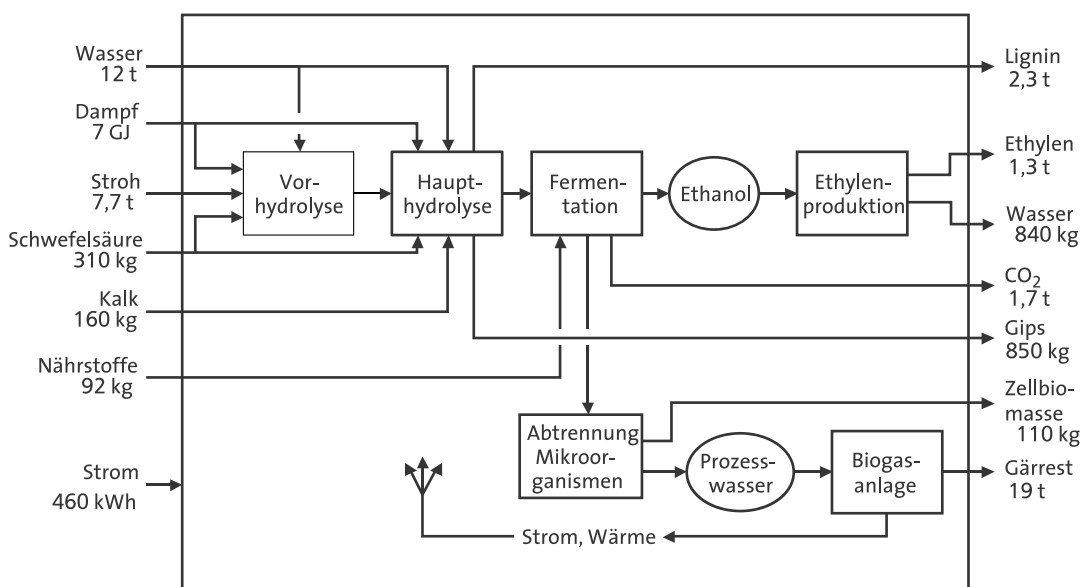
Der für die Übersichtsökobilanz betrachtete interne Aufbau und die betrachteten Massenströme der Getreidebioraffinerie sind in vereinfachter Form in Abbildung 71 dargestellt. In der analysierten Getreidebioraffinerie wird das Getreidekorn unabhängig vom Stroh für Nahrungs- und

Futtermittelzwecke weiter auf herkömmliche Art verarbeitet. Der Strohanteil durchläuft die in der Abbildung dargestellten Prozesse. Hauptprodukte sind Ethylen und Lignin.

Der typische Lebensweg von der Bereitstellung des Getreidestrohs über die Produktion in der Getreidebioraffinerie bis hin zur Nutzung der Produkte ist in Abbildung 72 schematisch dargestellt. Dabei ist berücksichtigt, dass das Getreidestroh im Gegensatz zu einer reinen Kornverarbeitung ebenfalls – wie im Fall der LCF-Bioraffinerie – vom Feld zur Bioraffinerie transportiert werden muss. In der Ökobilanz werden die folgenden Verfahrensschritte betrachtet: Das Stroh wird in der Getreidebioraffinerie mithilfe fossiler Energien (Erdgas, Dampf und Strom), konzentrierter Schwefelsäure, Kalk, Wasser und Nährstoffen umgesetzt zu einer größeren Anzahl verschiedener Produkte: Ethylen, Kohlendioxid (CO₂) und Gips ersetzen auf konventionelle Art produzierte Waren in jeweils gleicher Masse. Lignin substituiert Kunststoffe wie Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)-Copolymerisat oder Kunstharze, Zellbiomasse aus dem Fermentationsprozess ersetzt als Futtermittel Sojaschrot auf Proteinbasis und der Gärrest der anlageninternen Biogasproduktion wird als Düngemittel auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht und ersetzt Mineraldünger nach Nährstoffanteilen (IFEU 2005a).

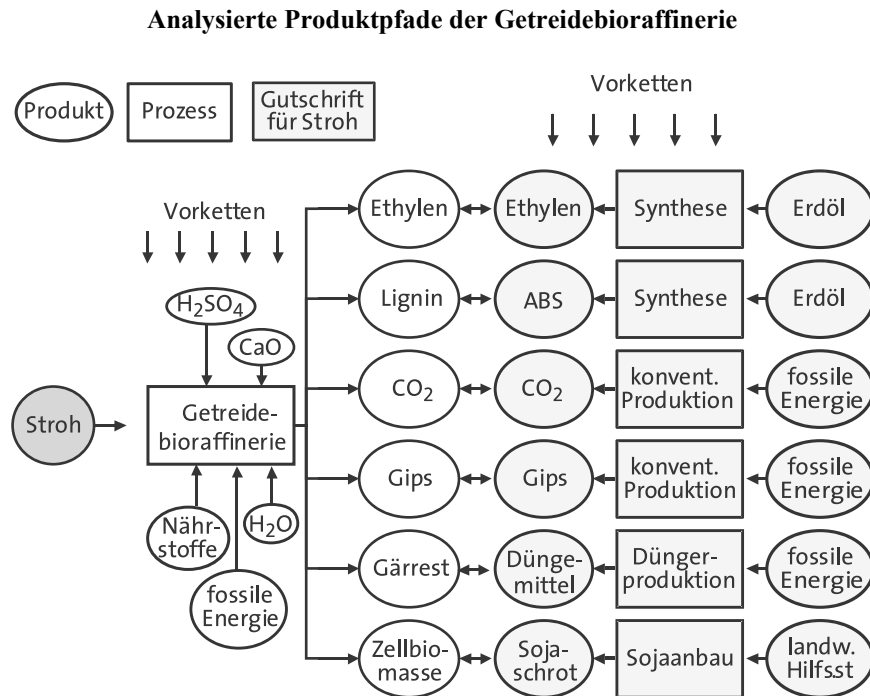
Abbildung 71

Exemplarische Darstellung des internen Aufbaus und der Massenflüsse/ha Getreide der Getreidebioraffinerie



Quelle: IFEU 2005a

Abbildung 72



Quelle: IFEU 2005a

Exemplarische Ergebnisauflistung: Aufwand an fossiler Energie (KEA)

Exemplarisch ist in Abbildung 73 der Einsatz fossiler Energien für die einzelnen Aufwendungen der Getreidebioraffinerie und die Gutschriften der ersetzten konventionellen Produkte sowie die sich daraus ergebende Differenz (Ergebnissaldo) dargestellt.

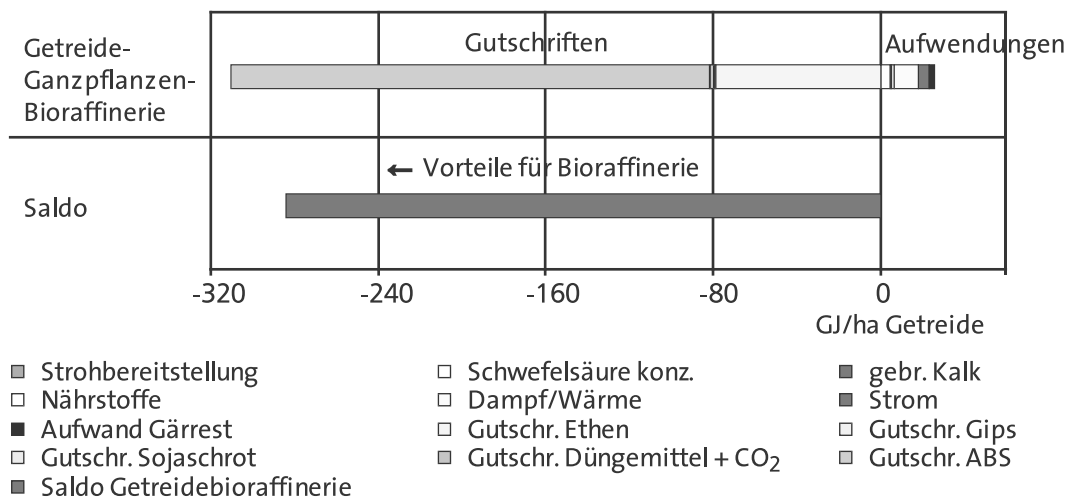
Im Ergebnis lässt sich in Bezug auf den Einsatz fossiler Energien in einer Getreidebioraffinerie Folgendes festhalten (IFEU 2005a):

- Insgesamt bringen die Gutschriften für Ethylen und besonders ABS der Getreidebioraffinerie ein eindeutiges Einsparpotenzial fossiler Energie.

- Die Wärmebereitstellung (Erdgas und Dampf) ist eine der größten Aufwendungen für die Getreidebioraffinerie. Die anderen Aufwendungen sind dagegen unbedeutender.
- Eine größere Gutschrift ergibt sich aus der Einsparung von ABS durch die Produktion von Lignin.
- Werden andere Kunststoffe und -harze ersetzt, so können sich quantitativ durchaus andere Werte ergeben. Die qualitative Aussage, dass sich Vorteile für die Getreidebioraffinerie beim Einsatz fossiler Energien ergeben, wird davon aber nicht beeinflusst. Selbst in der ungünstigsten Variante, der energetischen Nutzung des Lignins, hat die Bioraffinerie aber noch Vorteile.

Abbildung 73

Aufwendungen, Gutschriften und Ergebnissalden fossiler Energien für die Getreidebioraffinerie



Quelle: IFEU 2005a

5. Berücksichtigung alternativer Nutzungsmöglichkeiten des Strohs

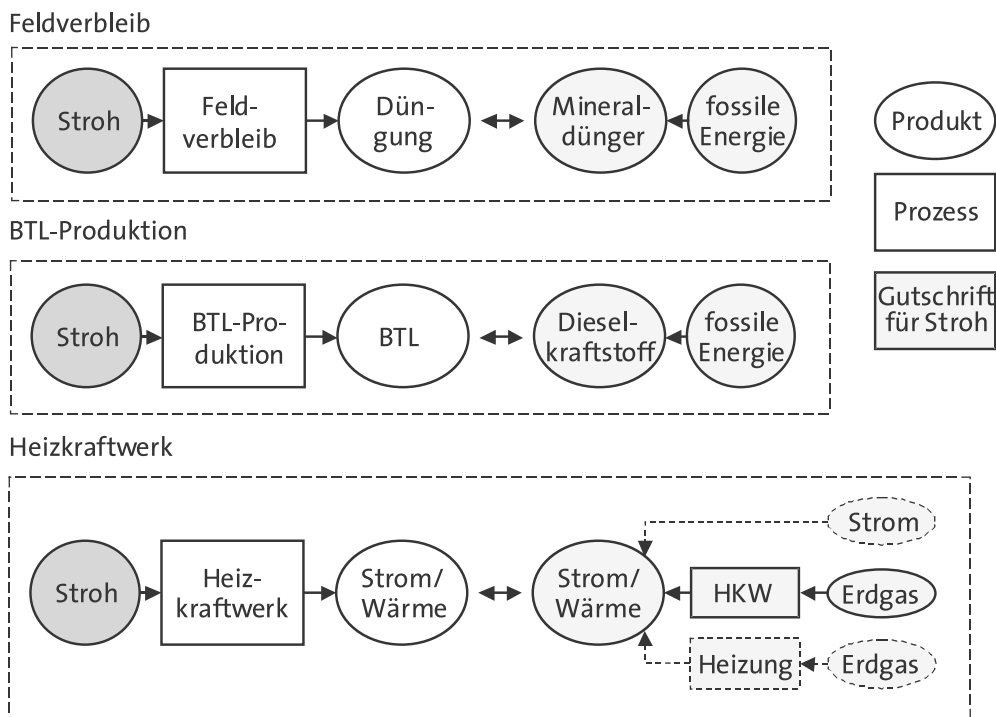
Um die Übersichtsökobilanzen zur LCF- und zur Getreidebioraffinerie unter der gegebenen Fragestellung zu vervollständigen, muss auch der alternative Nutzen des Rohstoffs Stroh berücksichtigt werden, das heißt der Nutzen, den das Stroh hat, wenn es nicht in der Bioraffinerie verarbeitet wird. Die Nutzung in der Bioraffinerie muss da-

her den alternativen Nutzungsmöglichkeiten gegenübergestellt werden (Abbildung 74).

Im Heizkraftwerk wird das Getreidestroh zur Strom- und Wärmeerzeugung verbrannt, wobei der Strom ins öffentliche Netz eingespeist, während die Wärme für Verbraucher im Nahbereich bereitgestellt wird. Strom aus dem öffentlichen Netz und die Wärmeproduktion von Heizungen oder die Strom-/Wärmeproduktion eines erdgasbetriebenen Heizkraftwerks (HKW) werden ersetzt (IFEU 2005a).

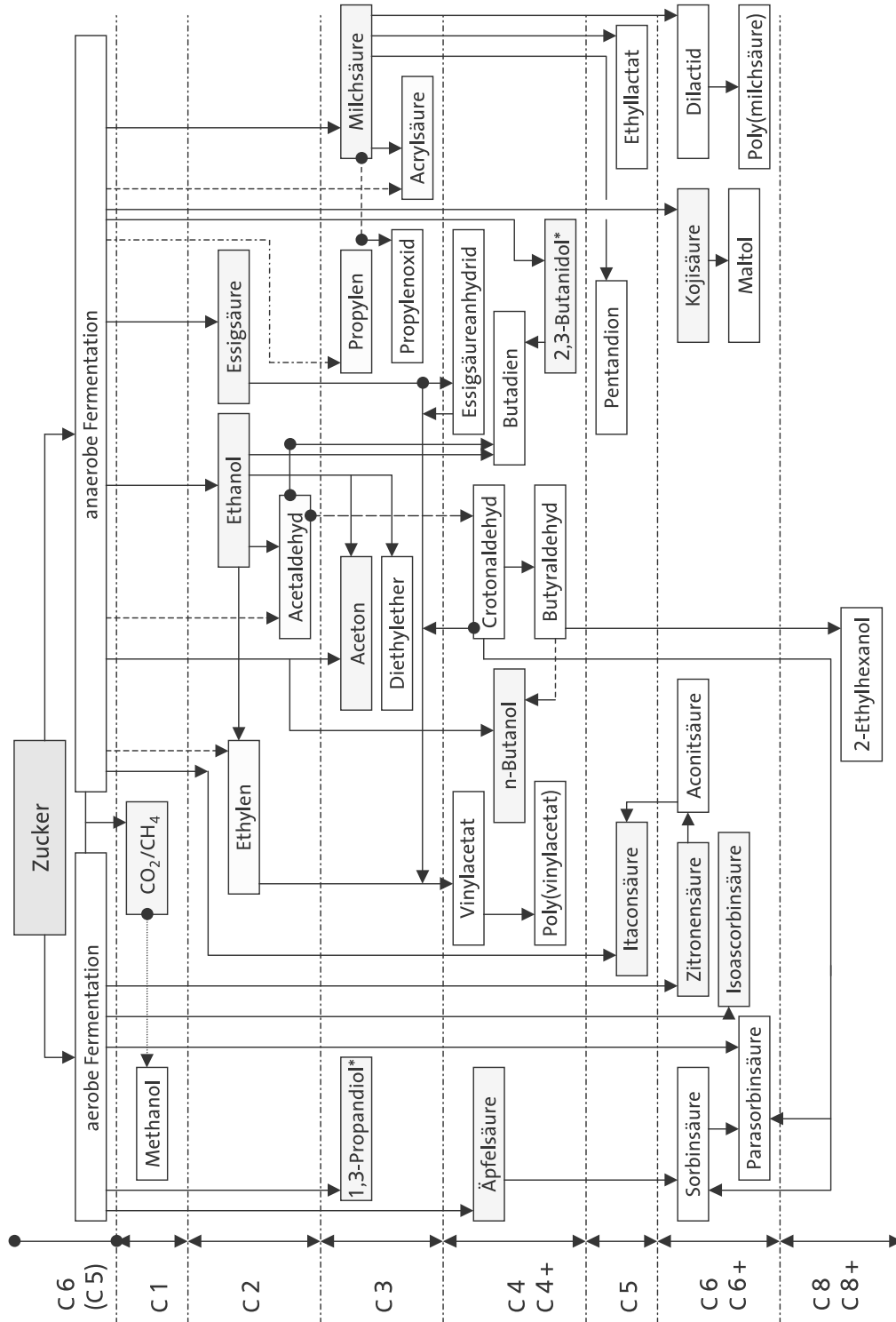
Abbildung 74

Lebenswegvergleiche der drei betrachteten Optionen für die Nutzung von Getreidestroh



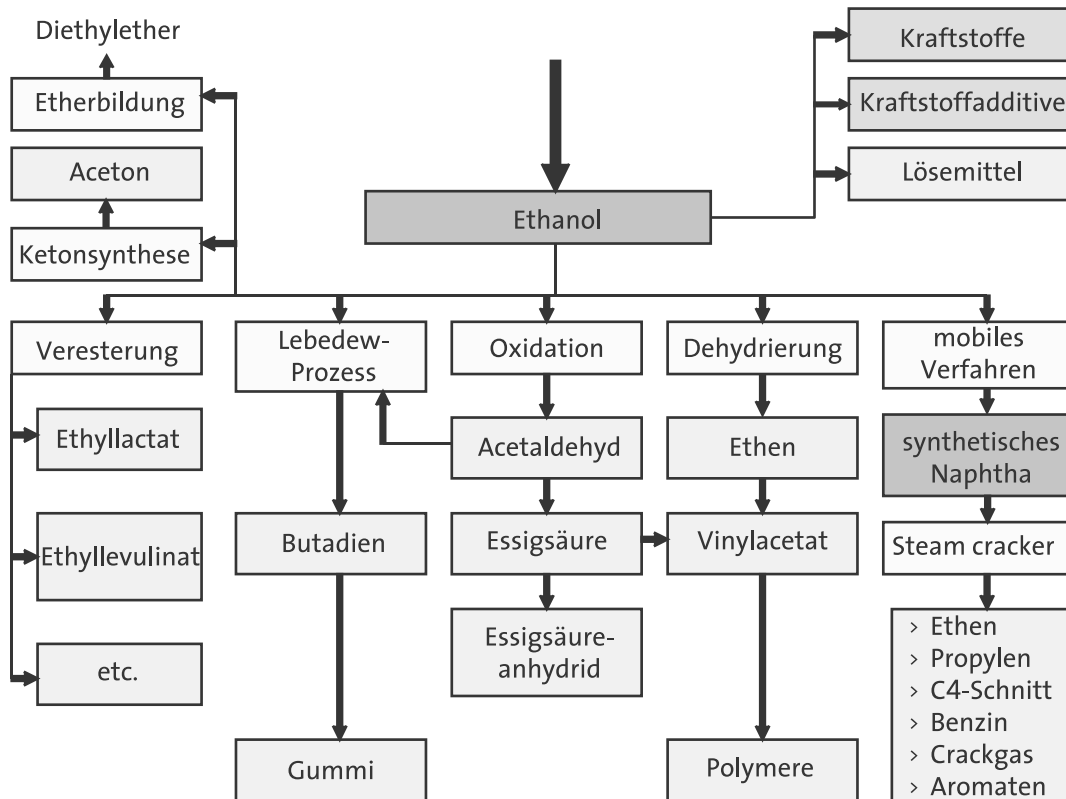
Quelle: IFEU 2005a

6. Biotechnisch-chemischer „Zucker“-Produktstammbaum (Auswahl)



Quelle: Kamm/Kamm 2005a

7. Ethanol als Plattformchemikalie



Quelle: Kamm 2006, geändert

8. Vergleich der Ergebnisse dreier Potenzialstudien zur energetischen Nutzung von Biomasse

Tabelle 18

Vergleich der Potenziale der einzelnen Biomassefraktionen 2000 und 2010

	Öko: Biomasse 2000	IE (jeweils höchstes Potenzial*)	DLR: Basis 2000	Öko: Umwelt 2010	DLR: Naturschutz Plus 2010
	(PJ/Jahr)	(PJ/Jahr)	(PJ/Jahr)	(PJ/Jahr)	(PJ/Jahr)
Festbrennstoffe					
Stroh	110	130	130	52	52
Wald- und Schwachholz	226	292	226	149	149
zusätzl. erschließbares Waldholz	–	132	140	–	–
Mittelwald	–	–	–	–	–
Waldsaumentwicklung	–	–	–	–	11
Landschaftspflegegut i. w. S.	–	15–26	45	–	–
Offenland	–	–	22	–	22
Industrierestholz	55	58	55	55	55

noch Tabelle 18

	Öko: Biomasse 2000	IE (jeweils höchstes Potenzial*)	DLR: Basis 2000	Öko: Umwelt 2010	DLR: Naturschutz Plus 2010
	(PJ/Jahr)	(PJ/Jahr)	(PJ/Jahr)	(PJ/Jahr)	(PJ/Jahr)
Holz im Hausmüll	20	–	20	21	21
Altholz	78	78	78	69	69
Klärschlamm	11	–	11	16	16
Zoomasse	15	–	15	14	14
Grünschnitt: Kompensationsflächen	–	–	–	–	5
Biotopverbund – Acker	–	–	–	–	18
extensives Grünland	–	37–56	–	–	6
Energiepflanzen – Erosionsflächen	–	–	–	–	94
Zwischensumme	515	741–770	742	376	538
Biogas					
tierische Exkrememente und Einstreu	94	96,5	94	87	87
Ernterückstände der Landwirtschaft	18	9,1–18,3	18	9	9
Abfälle aus Gewerbe und Industrie	12	6,4–12,2	12	6	6
organ. Siedlungsabfälle	12	12,5	12	16	16
Biogas – Grünschnitt	–	–	–	4	–
Klärgas	4	19,5	4	16	16
Deponiegas	22	15–21	22	11	11
Zwischensumme	162	159–180	162	148	145
Gesamtsumme (ohne Energiepflanzen)	677	900–950	904	525	677
	(Mio. ha)	(Mio. ha)	(Mio. ha)	(Mio. ha)	(Mio. ha)
Energiepflanzen (Anbaufläche)		2	–	0,82	0,15
	(PJ/Jahr)	(PJ/Jahr)	(PJ/Jahr)	(PJ/Jahr)	(PJ/Jahr)
Energiepflanzen	12	365	–	165	13/26**
Gesamtsumme	689	1265–1315	904	690	690/703**

* Wo das Energiepotenzial sowohl für die thermochemische als auch die biochemische Umwandlung angegeben ist, wird das jeweils größere Potenzial zugrunde gelegt.

** Biokraftstoffe/feste Bioenergieträger

Einzelne Unterschiede zwischen vergleichbaren Szenarien sind fett gedruckt. Die Bezeichnung der Kategorien orientiert sich an DLR et al. (2004)

Quelle: IFEU 2005b, nach Fritsche et al. 2004 = (ÖKO); DLR et al. 2004 = (DLR); Thrän/ Kaltschmitt 2004 = (IE)

Tabelle 19

Vergleich der Potenziale der einzelnen Biomassefraktionen 2030

	Öko: Biomasse 2030	DLR: Basis 2030	Öko: Umwelt 2030	DLR: Naturschutz Plus 2030	Öko: Referenz 2030
	(PJ/Jahr)	(PJ/Jahr)	(PJ/Jahr)	(PJ/Jahr)	(PJ/Jahr)
Festbrennstoffe					
Stroh	71	84	51	51	58
Wald- und Schwachholz	220	220	158	158	164
zusätzlich erschließbares Waldholz	–	140	–	–	–
Mittelwald	–	–	–	11	–
Waldsaumentwicklung	–	–	–	–	–
Landschaftspflegegut i.w.S.	–	45	–	–	–
Offenland	–	22	–	22	–
Industrierestholz	55	55	55	55	55
Holz im Hausmüll	20	20	20	20	20
Altholz	78	78	69	69	69
Klärschlamm	25	25	19	19	22
Zoomasse	14	14	14	14	14
Grünschnitt: Kompensationsflächen	–	8	–	8	–
Biotopverbund – Acker	–	–	–	18	–
extensives Grünland	–	37	–	27	–
Energiepflanzen – Erosionsflächen	–	–	–	94	–
Zwischensumme	482	748	385	576	403
Biogas					
tierische Exkremente und Einstreu	94	94	87	87	83
Ernterückstände der Landwirtschaft	12	12	8	8	8
Abfälle aus Gewerbe und Industrie	12	12	6	6	6
organ. Siedlungsabfälle	23	23	19	19	14
Biogas – Grünschnitt	26	–	19	–	30
Klärgas	8	8	20	20	6
Deponiegas	1	1	1	1	1
Zwischensumme	176	150	159	141	149
Gesamtsumme (ohne Energiepflanzen)	658	898	545	705	552
	(Mio. ha)	(Mio. ha)	(Mio. ha)	(Mio. ha)	(Mio. ha)
<i>Energiepflanzen (Anbaufläche)</i>	4,44	4,3	3,01	2,0	3,48
	(PJ/Jahr)	(PJ/Jahr)	(PJ/Jahr)	(PJ/Jahr)	(PJ/Jahr)
Energiepflanzen	823	375/731*	354	170/332*	73
Gesamtsumme	1.481	1.273/1.629*	899	875/1.037*	625

* Biokraftstoffe/feste Bioenergieträger

Einzelne Unterschiede zwischen vergleichbaren Szenarien sind fett gedruckt. Die Bezeichnung der Kategorien orientiert sich an DLR et al. 2004.

Quelle: IFEU 2005b, nach Fritsche et al. 2004 = (ÖKO); DLR et al. 2004 = (DLR)

9. Auswahl einiger Förderprogramme zur Bioenergienutzung

Tabelle 20

Förderprogramme für Bioenergie

Fördergebiet	Programm	fördernde Stelle
Bund	Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA)
Bund	ERP-Umwelt- und –Energiesparprogramm	KfW Förderbank
Bund	Innovation und neue Energietechnologien (5. Energieforschungsprogramm)	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR)
Bund	KfW-CO ₂ -Gebäudesanierungsprogramm	KfW Förderbank
Bund	KfW-Umweltprogramm	KfW Förderbank
Bund	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWK)	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA)
Bund	Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien (Marktanreizprogramm)	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA); KfW Förderbank
Bund	Nachwachsende Rohstoffe	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR)
Bund	Ökologisch Bauen	KfW Förderbank
Bund	Solarthermie2000plus	Projektträger Jülich (PTJ)
Bund	Wohnraum Modernisieren	KfW Förderbank
Baden-Württemberg	Klimaschutz-Plus – Allgemeiner Programmteil	KEA Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH
Bayern	Bayerisches Modernisierungsprogramm (BayModR)	Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie
Berlin	Berliner Energiespargesetz	Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin
Brandenburg	Gemeinschaftsaufgabe „Verbesserung der regionalen Wirtschaftsstruktur“ – Förderung der gewerblichen Wirtschaft (GA-G)	InvestitionsBank des Landes Brandenburg (ILB)
Brandenburg	Rationelle Energieverwendung und erneuerbare Energiequellen (REN-Programm)	InvestitionsBank des Landes Brandenburg (ILB)
Bremen	Sparsame und rationelle Energienutzung und -umwandlung in Industrie und Gewerbe (REN-Richtlinie)	Senator für Bau, Umwelt und Verkehr
Hessen	Förderung der ländlichen Entwicklung – Bio- rohstoffe aus der Land- und Forstwirtschaft	Landestreuhandstelle Hessen (LTH); Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz
Hessen	Richtlinien zum Hessischen Energiegesetz	Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz
Mecklenburg-Vorpommern	Klimaschutz	Umweltministerium Mecklenburg-Vorpommern; Staatliche Ämter für Umwelt und Naturschutz (StÄUN)
Niedersachsen	Niedersächsisches Innovationsförderprogramm	Investitions- und Förderbank Niedersachsen GmbH (NBank)

noch Tabelle 20

Fördergebiet	Programm	fördernde Stelle
Nordrhein-Westfalen	Modernisierung von Wohnraum in NRW (ModR 2004)	Ministerium für Bauen und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen
Nordrhein-Westfalen	Rationelle Energieverwendung und Nutzung unerschöpflicher Energiequellen (REN) – Programmbereich Breitenförderung –	Bezirksregierung Arnsberg; NRW.BANK
Rheinland-Pfalz	Förderung erneuerbarer Energien	Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Landwirtschaft und Weinbau Rheinland-Pfalz
Rheinland-Pfalz	Förderung von Maßnahmen im Technologie- und Energiebereich	Investitions- und Strukturbank Rheinland-Pfalz (ISB) GmbH
Saarland	Förderung von Maßnahmen im „Zukunftsenergieprogramm plus (ZEPP)“	Ministerium für Umwelt; ARGE „Solar“ e. V.
Saarland	Förderung von Maßnahmen im „Zukunftsenergieprogramm plus (ZEPP) – Kommunen und öffentliche Körperschaften“	Ministerium für Umwelt
Sachsen	Förderung des Immissions- und Klimaschutzes einschließlich der Nutzung erneuerbarer Energien	Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Sachsen	Förderung von Maßnahmen der Abfallwirtschaft	Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft
Schleswig-Holstein	e-Region Schleswig-Holstein plus – Wissenschaft und Wirtschaft	Innovationsstiftung Schleswig Holstein (ISH)
Schleswig-Holstein	Energetische Nutzung von Biomasse im ländlichen Raum	Investitionsbank Schleswig-Holstein
Thüringen	Gemeinschaftsinitiative für die Entwicklung des ländlichen Raumes LEADER+	zuständiges Landwirtschaftsamt
Thüringen	Rationelle und umweltfreundliche Energieverwendung/erneuerbare Energien	Thüringer Aufbaubank (TAB); Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Technologie und Arbeit
Europäische Union	Darlehen der Europäischen Investitionsbank (EIB)	Europäische Investitionsbank
Europäische Union	Energie für die Zukunft: Erneuerbare Energieträger	Europäische Kommission
Europäische Union	Von der gemeinsamen Forschungsstelle durch direkte Aktionen durchzuführendes spezifisches Programm für Forschung, technologische Entwicklung und Demonstration (2002–2006)	Europäische Kommission

Quelle: BMWA 2005, nach IFEU 2005b

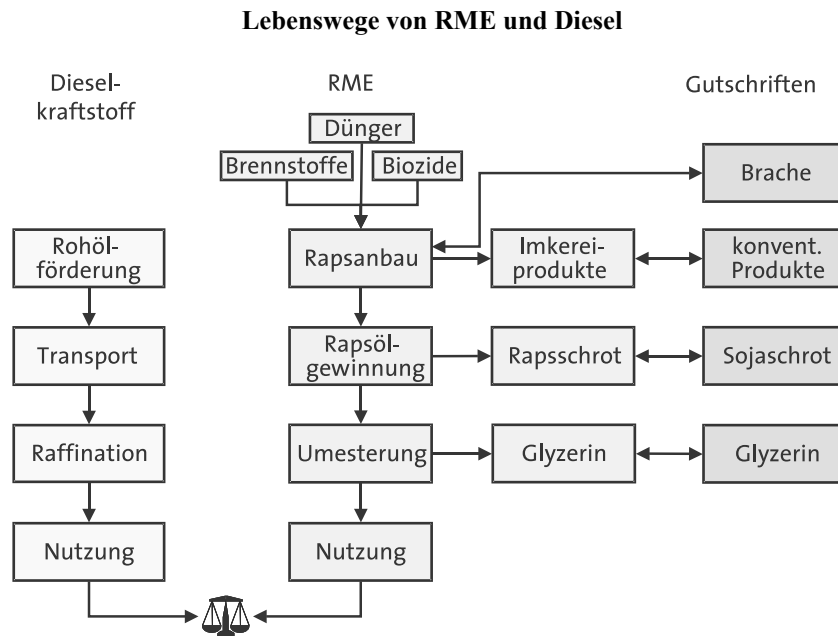
10. Details zur Ökobilanz von Rapsmethylester (RME)

Verglichen wird für die Ökobilanz RME- mit Dieseldieselkraftstoff. Die Ausführungen basieren auf (IFEU 2005b). Die vollständigen Lebenswege von RME und Diesel sind in Abbildung 75 dargestellt. Insbesondere aufseiten des biogenen Kraftstoffs fallen Kuppelprodukte an, die die entsprechenden Produkte aus anderen Produktlinien ersetz-

ten können. Daher werden Gutschriften für die Kuppelprodukte erteilt, die den vermiedenen Aufwendungen der ersetzten Produkte entsprechen.

Die Ergebnisse für die Wirkungskategorien Verbrauch nichterneuerbarer Energieträger, Treibhauseffekt und Ozonabbau – differenziert nach einzelnen Prozessen bzw. Lebenswegabschnitten für RME und Diesel sowie die Salden – sind in Abbildung 76 aufgeführt.

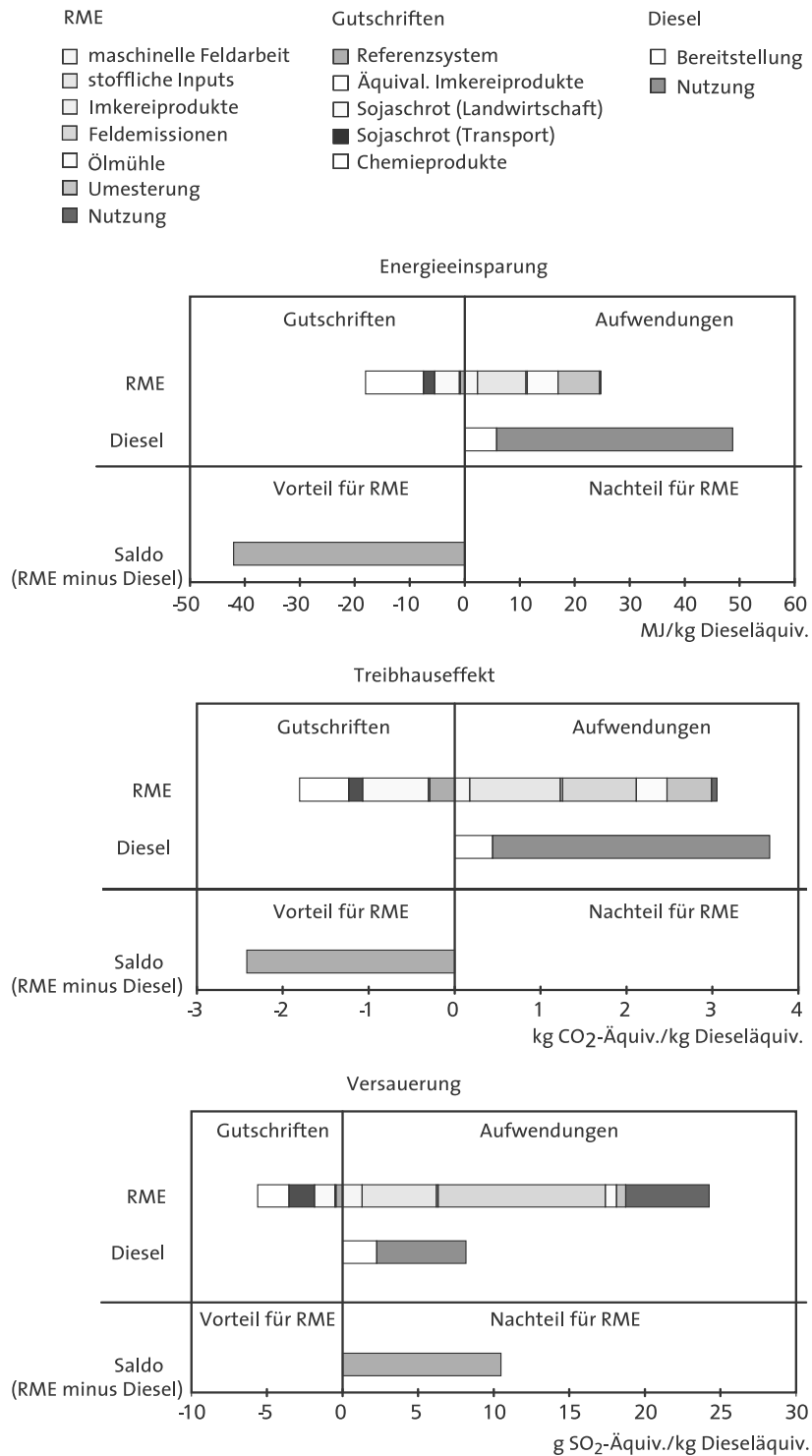
Abbildung 75



Quelle: IFEU 2005b

Abbildung 76

Vergleich RME-Diesel: Verbrauch nichterneuerbarer Energieträger, Treibhauseffekt und Ozonabbau differenziert nach Prozessen bzw. Lebenswegabschnitten

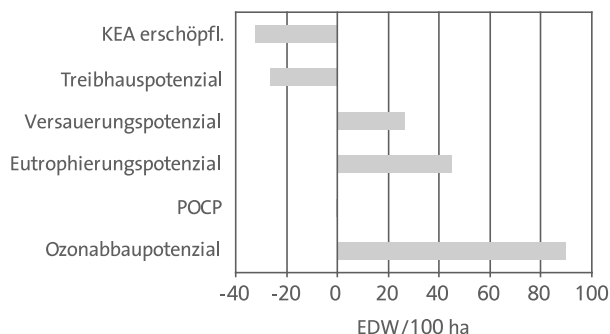


Quelle: IFEU 2007

Die zuverlässig quantifizierbaren Wirkungskategorien sind in Abbildung 77 zusammenfassend dargestellt. Vor allem das Kuppelprodukt Glycerin trägt wesentlich zu den Vorteilen von RME bei Energieverbrauch und Treibhauseffekt bei. Das nachteilige Ergebnis beim Ozonabbau wird durch N_2O -Emissionen aus der N-Düngerproduktion und aus dem Boden bestimmt, die durch den Einsatz von N-Dünger entstehen. Ebenfalls Nachteile ergeben sich in den Wirkungskategorien Versauerung und Eutrophierung (insbesondere NH_3 -Emissionen durch den N-Düngereinsatz) (IFEU 2005b).

Abbildung 77

**Umwelteigenschaften von RME: Differenzen
„RME – Dieselkraftstoff“ (in Einwohnerwerten
pro 100 ha Anbaufläche) für ausgewählte
Umweltwirkungen und Emissionen**



Lesebeispiel für den ersten Balken: Durch die Nutzung von RME anstelle von Dieselkraftstoff werden pro 100 ha angebautem Raps im Saldo so viele nichterneuerbare Energieeressourcen eingespart, wie sie von etwa 33 Bundesbürgern jährlich im Durchschnitt verbraucht werden.

Quelle: IFEU 2003

11. Potenzialbegriff

Zur Beschreibung der Biomassepotenziale kann zwischen theoretischen, technischen, wirtschaftlichen und erschließbaren Potenzialen unterschieden werden (Kaltschmitt et al. 2003):

Das theoretische Potenzial regenerativer Energien ergibt sich aus dem physikalischen Angebot der erneuerbaren Rohstoffe und Energieträger (sämtliche Phyto- und Zoomezze) und stellt damit eine theoretische Obergrenze des verfügbaren Energieangebots dar. Wegen grundsätzlich unüberwindbarer technischer, ökologischer, struktureller und administrativer Schranken kann es zumeist nur zu sehr geringen Anteilen erschlossen werden und ist deshalb zur Beurteilung der tatsächlichen Nutzbarkeit des erneuerbaren Energieangebots im Allgemeinen nicht relevant.

Das technische Potenzial beschreibt demgegenüber den Anteil des theoretischen Potenzials, der unter Berücksichtigung der derzeitigen technischen Möglichkeiten nutzbar ist. Im Einzelnen werden bei der Berechnung die verfügbaren Nutzungstechniken, ihre Wirkungsgrade, die Verfüg-

barkeit von Standorten auch im Hinblick auf konkurrierende Nutzungen sowie „unüberwindbare“ strukturelle, ökologische (z. B. Naturschutzgebiete) und weitere nicht-technische Beschränkungen berücksichtigt.

Unter dem wirtschaftlichen Potenzial wird der Anteil des technischen Potenzials verstanden, der im Kontext der gegebenen Rahmenbedingungen wirtschaftlich genutzt werden kann. Um die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit beurteilen zu können, sind die innerhalb der jeweiligen Einsatzbereiche konkurrierenden Produkte bzw. Energiebereitstellungssysteme zu definieren. Das wirtschaftliche Potenzial zur Nutzung regenerativer Energien wird damit sowohl von den konventionellen Energiesystemen als auch den Energieträgerpreisen beeinflusst und entsprechend den Schwankungen dieser Systeme unterworfen.

Das erschließbare Potenzial beschreibt den zu erwartenden tatsächlichen Beitrag einer Option zur Nutzung nachwachsender Rohstoffe und Energieträger. Es ist in der Regel zumindest zeitweise geringer als das wirtschaftliche Potenzial, da dieses im Allgemeinen nicht sofort und vollständig nur sehr langfristig (z. B. wegen begrenzter Herstellkapazitäten oder mangelnder Information) erschließbar ist. Das erschließbare Potenzial kann aber auch größer als das wirtschaftliche sein, wenn beispielsweise die betreffende Option subventioniert wird (z. B. Markteinführungsprogramm). Damit ist auch diese Betrachtung starken Schwankungen unterworfen.

12. Forschungsförderung stoffliche Nutzung seitens der Bundesministerien (Auswahl)

In Deutschland ist in erster Linie das „Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsprogramm nachwachsende Rohstoffe (FuE-Programm)“ des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV 2003) zu benennen, welches Fördermittel zu FuE- sowie zu Demonstrationsvorhaben bereitstellt, die zumindest mittelfristig die Markteinführung von Produkten aus heimischen nachwachsenden Rohstoffen erwarten lassen. Die Zielsetzung lautet „einen Beitrag für eine nachhaltige Rohstoff- und Energiebereitstellung zu leisten, die Umwelt durch Ressourcenschutz, besonders umweltverträgliche Produkte und CO_2 -Emissionsverminderung zu entlasten sowie die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Land- und Forstwirtschaft sowie der vor- und nachgelagerten Bereiche zu stärken (Bundesregierung 2006a). Zu den Förderschwerpunkten gehören:

- Prozessoptimierungen bei der Biogaserzeugung im Bereich Prozessregelung und Mikrobiologie,
- Synthese und Nutzung von Spezial- und Feinchemikalien aus nachwachsenden Rohstoffen,
- technische Kunststoffe und Spezialpolymere aus nachwachsenden Rohstoffen sowie
- Konstruktionswerkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen.

Die Fördermittel können verwendet werden für den Aufbau von Produktlinien von der Erzeugung bis zur Ver-

wendung nachwachsender Rohstoffe, die Durchführung von Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsvorhaben zur Erschließung weiterer Verwendungsmöglichkeiten im Nichtnahrungsmittelsektor, die Informationsvermittlung und Beratung – vor allem für Produzenten, Verarbeiter und Anwender nachwachsender Rohstoffe – sowie für das Marketing und die Öffentlichkeitsarbeit (Bundesregierung 2006a).

Die vonseiten der Bundesregierung aufgebrachtten Fördermittel im Programm zur Förderung von Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsvorhaben sowie Markteinführung im Bereich nachwachsende Rohstoffe verteilten sich Ende 2005 auf ca. 300 FuE- sowie Demonstrationsvorhaben in verschiedenen Produktlinien sowie auf die Markteinführung und Verbraucherinformation (Bundesregierung 2006a). Die Aufteilung dieser Fördermittel ist in Abbildung 78 dargestellt.

Für den gesamten Bereich nachwachsender Rohstoffe hat das BMELV – basierend auf o. g. „Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsprogramm nachwachsende Rohstoffe“ und einem „Markteinführungsprogramm nachwachsende Rohstoffe (MEP)“ – die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) als Projektträger beauftragt. Seit dem Jahre 2000 unterstützt die FNR die Nutzung von Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen. Auf Basis des MEP betrifft dies biogene Schmierstoffe (www.bioschmierstoffe.info), Bio-

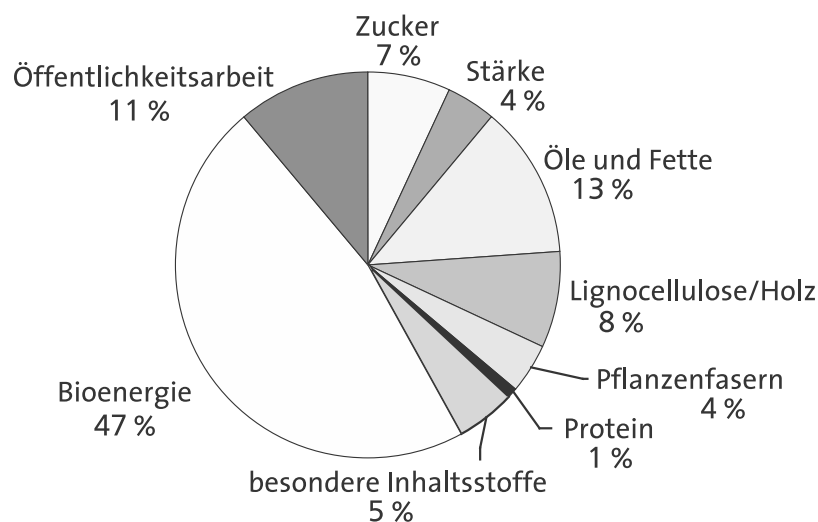
kraftstoffe (www.bio-kraftstoffe.info) sowie Dämmstoffe¹⁰² (www.naturdaemmstoffe.info).

Daneben ist noch ein weiteres bundesweites Forschungsprogramm zu nennen, welches sich mit einer stofflichen Nutzung von Pflanzen beschäftigt, jedoch vom Grundsatz her eher auf die Optimierung der Pflanze als Rohstofflieferant zielt. Im Programm „Pflanzen sind Rohstofflieferant und Biofabrik der Zukunft“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF 2006) wird die Pflanzenforschung im Rahmen einer neuen Ausschreibung mit weiteren 50 Mio. Euro gefördert (für die nächsten drei Jahre). Diese Förderung ist im Rahmen der Forschungs- und Förderinitiative GABI-FUTURE (Genomanalyse im biologischen System Pflanze) angesiedelt, wobei Pflanzen durch Züchtung oder genetische Veränderung optimiert werden sollen (www.bmbf.de/de/6214.php). Neben einer Verwendung als gesundes Lebensmittel stehen Pflanzen u. a. als Produktionsplattform für spezielle Biomoleküle (z. B. als Grundstoffe für die chemische oder pharmazeutische Industrie) und zur Entwicklung pflanzenbasierter Systeme (zwecks erneuerbarer Energieerzeugung) im Programm. Die Koordination erfolgt durch den Projektträger FZ Jülich.

¹⁰² Das Förderprogramm „Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen“ lief Ende 2006 aus.

Abbildung 78

Verteilung der Fördermittel auf die Projekte nach Produktlinien (2005)



Quelle: Bundesregierung 2006a, S. 52

13. Tabellenverzeichnis

	Seite	
Tabelle 1	Einsatz nachwachsender Rohstoffe in Deutschland unter besonderer Berücksichtigung der chemischen Industrie.	21
Tabelle 2	Bandbreite stofflicher Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen.	21
Tabelle 3	Bezeichnung und Vorkommen von Ölen und Fetten	23
Tabelle 4	Weltproduktion von Ölen und Fetten (2003)	23
Tabelle 5	Verarbeitung von Stärkepflanzen in Deutschland (2004) und in der EU-15 (2003)	26
Tabelle 6	Übersicht Pflanzenfasern	27
Tabelle 7	Derzeit international gehandelte Produkte aus Biokunststoffen	30
Tabelle 8	Untersuchte Bioenergieträger, Biomassearten, Konversions- bzw. Nutzungsarten und fossile Pendant	75
Tabelle 9	Ergebnisübersicht Produktökobilanzen von Bioenergieträgern aus Anbaubiomasse	76
Tabelle 10	Mögliche Entwicklung der Flächenfreisetzung und des Grünlandanteils in Deutschland (in ha)	82
Tabelle 11	Anbau nachwachsender Rohstoffe in Deutschland (stofflich und energetisch, in ha)	82
Tabelle 12	Anbau nachwachsender Rohstoffe für die stoffliche Nutzung in Deutschland (2004)	83
Tabelle 13	Nachfrage nachwachsender Rohstoffe für den Einsatz in Bioraffinerien	83
Tabelle 14	Gesamtüberblick über Potenziale und Nachfrage energetischer und stofflicher Nutzung nachwachsender Rohstoffe (in PJ/Jahr)	87
Tabelle 15	Nutzung von Bioschmierstoffen und -ölen in Deutschland (2005)	95
Tabelle 16	Preisspannen der verschiedenen Schmierstoffe	95
Tabelle 17	Nationale Ziele der USA bei Biomasse	114
Tabelle 18	Vergleich der Potenziale der einzelnen Biomassefraktionen 2000 und 2010	138
Tabelle 19	Vergleich der Potenziale der einzelnen Biomassefraktionen 2030	140
Tabelle 20	Förderprogramme für Bioenergie	141

14. Abbildungsverzeichnis

	Seite	
Abbildung 1	Übersicht zu wesentlichen Nutzungs- bzw. Stoffgruppen von nachwachsenden Rohstoffen im Nichtnahrungsmittelbereich	18
Abbildung 2	Aufteilung der Anbaufläche zur stofflichen Nutzung in Deutschland	19
Abbildung 3	Stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen in Deutschland (2005)	20
Abbildung 4	Aufteilung der in Deutschland verfügbaren pflanzlichen Öle 2003	24
Abbildung 5	Verwendung von Rapsöl in Deutschland	25
Abbildung 6	Bedarf an Rapsöl bei Non-Food-Verwendungen	25
Abbildung 7	Betrachtete Lebenswege von Raps- und fossilem Hydrauliköl	33
Abbildung 8	Differenzen ausgewählter Umweltwirkungen von „Rapshydrauliköl – Mineralöl“	34
Abbildung 9	Umwelteigenschaften von Rapshydrauliköl – relative Bandbreiten	35
Abbildung 10	Hydraulik- und Schmieröle: Bandbreiten der KEA-Differenzen*	35
Abbildung 11	Lebenswege von Mais-PLA- und PE-Verpackungen	37
Abbildung 12	Umwelteigenschaften von Verpackungen aus Mais-PLA-Differenzen „Mais-PLA-Verpackung – PE-Verpackung“ für ausgewählte Umweltwirkungen und Emissionen	38
Abbildung 13	Umwelteigenschaften von Stärke-Loose-fill-Verpackungen: relative Bandbreiten der Differenzen „NaWaRo – fossil“	38
Abbildung 14	Bandbreiten der KEA-Differenzen „NaWaRo – fossil“ (in MJ/kg)	39
Abbildung 15	Lebenswege von Autoinnenverkleidungsteilen aus Hanffaserverbundwerkstoff und ABS	40
Abbildung 16	Umwelteigenschaften von Hanffaserverbundteilen	41
Abbildung 17	Umwelteigenschaften von Dämmstoffen – relative Bandbreiten der Differenzen „NaWaRo-Dämmstoffe – konventionelle Dämmstoffe“	41
Abbildung 18	Bandbreiten der KEA-Differenzen aus „NaWaRo-Faserprodukt – konventionelles Produkt“ (in MJ/kg)	42
Abbildung 19	KEA (nichterneuerbare) von verschiedenen Produkten	43
Abbildung 20	Bioraffineriegrobschema für präkursorenhaltige Biomasse unter Bevorzugung der Kohlenhydratlinie	46
Abbildung 21	Schematische Darstellung der möglichen Produktströme einer grünen Bioraffinerie	47
Abbildung 22	Schematische Darstellung der möglichen Produktströme einer LCF-Bioraffinerie	48
Abbildung 23	Schematische Darstellung der möglichen Produktströme einer Getreide-Ganzpflanzen-Bioraffinerie (Trockenmahlverfahren)	50
Abbildung 24	Das Zwei-Plattformen-Konzept (Zucker- und Syngas-Plattform)	51
Abbildung 25	Beispiel eines industriellen biotechnisch-chemischen Produktstammbaums auf Basis von Cellulosezucker	52
Abbildung 26	Synthesegas(Syngas)basierter Produktstammbaum	53
Abbildung 27	Die wichtigsten Produktlinien der heutigen Petrochemie	54

	Seite
Abbildung 28 Biomasseethanol angedockt an eine erdölbasierte Chemieproduktlinie	55
Abbildung 29 Umweltwirkungen der grünen Bioraffinerie	56
Abbildung 30 Ergebnisse für die Nutzung von Grüngut in der grünen Bioraffinerie im Vergleich zum Trockenwerk und zur Biogasanlage (ohne Berücksichtigung alternativer Flächennutzung)	58
Abbildung 31 Ergebnisse für die Nutzung von Grüngut in der GBR im Vergleich zum Trockenwerk und zur Biogasanlage unter Berücksichtigung alternativer Flächennutzung (erweitertes Szenario)	59
Abbildung 32 Ergebnisse der Umweltwirkungen für die LCF-Bioraffinerie	60
Abbildung 33 Ergebnisse der Umweltwirkungen für die Getreide-(Ganzpflanzen)-Bioraffinerie	61
Abbildung 34 Ergebnisse für alternative Nutzungsarten von Getreidestroh ..	63
Abbildung 35 Ergebnisse der Übersichtsökobilanzen für die LCF- und die Getreide-(Ganzpflanzen-)Bioraffinerie (Zusammenführung)	63
Abbildung 36 Vergleich „Bioraffinerie gegenüber energetischer Nutzung der jeweiligen Biomasse“ (Vergärung für Grüngut, Verbrennung für Stroh)	65
Abbildung 37 Möglichkeiten einer Energiebereitstellung aus Biomasse ..	67
Abbildung 38 Entwicklung der Energiebereitstellung aus Biomasse und anderen erneuerbaren Energien (in TWh Endenergie)	68
Abbildung 39 Anteile der Energiebereitstellung aus Biomasse 2004 (in PJ Primärenergie)	68
Abbildung 40 Primärenergieverbrauch in Deutschland 2004 (in PJ)	69
Abbildung 41 Entwicklung der Bioenergieträger in den Szenarien Referenz, Umwelt und Biomasse 2000 bis 2030	70
Abbildung 42 Biomassepotenziale „Basis“ und „NaturschutzPlus“ 2010 bis 2030 nach Einzelkategorien (ohne Energiepflanzen von Anbauflächen)	71
Abbildung 43 Primärenergiebedarf in den einzelnen Szenarien bis 2030	73
Abbildung 44 Zwei Pfade einer möglichen stationären und mobilen Nutzung der ermittelten Biomassepotenziale in den Szenarien Basis und NaturschutzPlus bis 2050	74
Abbildung 45 Biokraftstoffe: Bandbreiten der Differenzen „biogen – fossil“ des Verbrauchs nichterneuerbarer Energieträger und des Treibhauseffekts	78
Abbildung 46 Zusammensetzung des gegenwärtigen technischen Biomassepotenzials in Deutschland 2004	84
Abbildung 47 Einsatzmöglichkeiten des gegenwärtigen technischen Brennstoffpotenzials im Energiesystem	85
Abbildung 48 Technisches Brennstoff- und Biokraftstoffpotenzial verschiedener Biokraftstoffe (flächenbezogen) für Deutschland	85
Abbildung 49 Technisches Brennstoff- und Biokraftstoffpotenzial verschiedener Biokraftstoffe für Deutschland	86
Abbildung 50 Nutzungs- und Flächenkonkurrenz für das Basisszenario 2015	89
Abbildung 51 Nutzungs- und Flächenkonkurrenz für das Nachhaltigkeitsszenario 2015	90
Abbildung 52 Technisches Potenzial und Bedarf (in Brennstoff-äquivalenten) für das Basisszenario 2030	91

	Seite
Abbildung 53 Potenzial und Bedarf in Brennstoffäquivalenten für das Nachhaltigkeitsszenario 2030	91
Abbildung 54 Angebot und Nachfrage nach Bioenergie in der EU-25 2000 bis 2020	93
Abbildung 55 Marktpreisentwicklung der letzten Jahre von Massenkunststoffen und Biokunststoffen	97
Abbildung 56 Preisvergleich zwischen einem Bio- (Stärkeblend) und einem herkömmlichen Kunststoff (LDPE) inkl. Entsorgungskosten	98
Abbildung 57 Anteile des Rohölpreises bei heutigen Massenkunststoffen (in Prozent)	98
Abbildung 58 Grenzkosten biogener Energieträger	104
Abbildung 59 Vorteile nachwachsender Rohstoffe	105
Abbildung 60 Nachteile nachwachsender Rohstoffe	105
Abbildung 61 Hemmnisse in der stofflichen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen	106
Abbildung 62 Umsätze aus der Errichtung und dem Betrieb von Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Jahr 2004 (in Mio. Euro)	108
Abbildung 63 Darstellung des internen Aufbaus einer grünen Bioraffinerie	127
Abbildung 64 Analytierte Produktpfade der grünen Bioraffinerie	128
Abbildung 65 Aufwendungen, Gutschriften und Ergebnissalden zum Einsatz fossiler Energien für das untersuchte Konzept der grünen Bioraffinerie	129
Abbildung 66 Lebenswegvergleiche für die drei betrachteten Optionen für die Nutzung von Grüngut	130
Abbildung 67 Lebenswegvergleiche für die Nutzung von Grüngut unter Berücksichtigung alternativer Flächennutzung	131
Abbildung 68 Interner Aufbau und Massenströme pro ha Stroh der analysierten LCF-Bioraffinerie	132
Abbildung 69 Analytierte Produktpfade der LCF-Bioraffinerie	132
Abbildung 70 Aufwendungen, Gutschriften und Ergebnissalden fossiler Energien für die LCF-Bioraffinerie	133
Abbildung 71 Exemplarische Darstellung des internen Aufbaus und der Massenflüsse/ha Getreide der Getreidebioraffinerie ...	134
Abbildung 72 Analytierte Produktpfade der Getreidebioraffinerie	135
Abbildung 73 Aufwendungen, Gutschriften und Ergebnissalden fossiler Energien für die Getreidebioraffinerie	136
Abbildung 74 Lebenswegvergleiche der drei betrachteten Optionen für die Nutzung von Getreidestroh	136
Abbildung 75 Lebenswege von RME und Diesel	143
Abbildung 76 Vergleich RME-Diesel: Verbrauch nichterneuerbarer Energieträger, Treibhauseffekt und Ozonabbau differenziert nach Prozessen bzw. Lebenswegabschnitten	144
Abbildung 77 Umwelteigenschaften von RME: Differenzen „RME – Dielektrikstoff“ (in Einwohnerwerten pro 100 ha Anbaufläche) für ausgewählte Umweltwirkungen und Emissionen	145
Abbildung 78 Verteilung der Fördermittel auf die Projekte nach Produktlinien (2005)	146

