

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Wirtschaftslehre des Landbaues

**Ökonomisch-ökologische Bewertung des energetischen Biomasse-Einsatzes  
anhand eines ökobilanziellen Modells**

Stefan Berenz

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Agrarwissenschaften

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Univ.-Prof. Dr. M. Faulstich

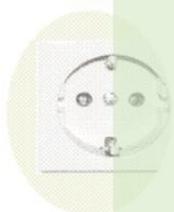
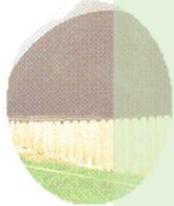
Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. Dr. h.c. A. Heißenhuber
2. Univ.-Prof. Dr. K.-J. Hülsbergen

Die Dissertation wurde am 29. 05. 2012 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 08. 02. 2013 angenommen.



# Ökonomisch-ökologische Bewertung des energetischen Biomasse-Einsatzes anhand eines ökobilanziellen Modells



Stefan Berenz



# Inhalt

Inhalt.....	V
Tabellenverzeichnis .....	VII
Abbildungsverzeichnis .....	IX
Abkürzungen .....	XIII
Vorwort.....	XVII
1 Einleitung .....	1
1.1 Problemstellung und Abgrenzung .....	3
1.2 Zielsetzung .....	9
1.3 Vorgehensweise.....	10
2 Material und Methoden.....	13
2.1 Stand des Wissens .....	14
2.1.1 Nutzungspfade der energetischen Biomasseverwendung.....	14
2.1.1.1 Die Bereitstellung von Biomasse .....	18
2.1.1.2 Erzeugung von Bioenergieträgern aus Biomasse.....	24
2.1.2 Rahmenbedingungen der erneuerbaren Energien.....	48
2.2 Herangezogene Methoden .....	55
2.2.1 Ökobilanzierung .....	55
2.2.1.1 Umweltbewertungsinstrumente.....	56
2.2.1.2 Ökobilanz .....	57
2.2.1.3 Exkurs: Lachgasemissionen .....	68
2.2.2 Lineare Programmierung.....	75
2.3 Entwicklung des „RegEnOpt“ .....	79
2.3.1 Festlegen der Optimierungsziele und des Untersuchungsrahmens .....	80
2.3.2 Energetische Verwendungsmöglichkeiten von Biomasse - Sachbilanz.....	84
2.3.2.1 Bereitstellung der Biomasse-Rohstoffe.....	85
2.3.2.2 Biomasseverarbeitung zu Endenergieträgern.....	97
2.3.2.3 Sachbilanzen zu einzelnen Biomasseendenergieträgern.....	100
2.3.2.4 Fossile Energieträger als Input-Faktoren und Referenzsystem.....	105

---

---

2.3.2.5	Ökobilanzielle Kennzahlen zu Betriebsmitteln, Werkstoffen und Substituten von Koppelprodukten .....	107
2.3.3	Berechnete Zielgrößen - Wirkungsabschätzung .....	109
2.3.3.1	Die Wirkungsabschätzung .....	109
2.3.3.2	Das Referenzsystem zur Ableitung der Netto-Effekte .....	110
2.3.4	Definition der Restriktionen zum Ergebnisraum .....	113
2.4	Anwendung des „RegEnOpt“ auf die Region Deutschland .....	115
3	Ergebnisse.....	117
3.1	Die einzelnen Biomasse-Verwertungspfade .....	117
3.1.1	Die Biomasse-Rohstoffe .....	118
3.1.2	Transportverfahren .....	124
3.1.3	Lagerungsverfahren .....	126
3.1.4	Endenergieträger aus Biomasse-Rohstoffen .....	127
3.1.4.1	Wärme.....	127
3.1.4.2	Elektrischer Strom .....	132
3.1.4.3	Biokraftstoffe .....	136
3.1.5	Vergleich Wärme, elektrischer Strom und Biokraftstoffe .....	139
3.1.6	Validierung der Ergebnisse zu den Umwandlungspfaden .....	141
3.2	Optimaler Biomasse-Mix zu den einzelnen Zielen.....	144
3.3	Ausblick .....	150
4	Diskussion .....	153
4.1	Diskussion des Modellansatzes des „RegEnOpt“ .....	153
4.2	Diskussion der Datengrundlage der vorliegenden Ergebnisse.....	155
4.3	Diskussion der Ergebnisse .....	157
5	Zusammenfassung .....	159
6	Summary.....	163
7	Epilog .....	167
8	Literatur .....	173
9	Anhang .....	197

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Täglicher Primärenergieverbrauch pro Person im Jahr 2009.....	2
Tabelle 2-1: Landwirtschaftliche Nutzpflanzen und deren spezifischen Produkte .....	15
Tabelle 2-2: Ausgewählte spezifische Rohstoffansprüche zur Erzeugung konsumfähiger Endenergieträger .....	18
Tabelle 2-3: Trenderträge des Jahres 2005 sowie Ansprüche an Saatgut und Nährstoffe von Winterweizen .....	21
Tabelle 2-4: Verfahren zur Biogasaufbereitung zu Erdgasqualität .....	38
Tabelle 2-5: Rahmenbedingungen und politische Instrumente im Bereich der erneuerbaren Energien .....	49
Tabelle 2-6: Mindestanteile von Biokraftstoffen an den in den Verkehr gebrachten Diesel- und Ottokraftstoffen in Deutschland .....	52
Tabelle 2-7: Input- und Outputströme einer Ökobilanz .....	59
Tabelle 2-8: Methoden zur Bewertung von Kuppelprodukten im Rahmen einer Ökobilanz.....	61
Tabelle 2-9: Schutzgüter und deren gesellschaftliche Werte .....	62
Tabelle 2-10: Ökobilanzielle Wirkungskategorien zur Bestimmung der Umweltauswirkungen, ursprüngliche und erneuerte Struktur der Wirkungskategorien.....	63
Tabelle 2-11: Entwicklung der Angaben zum GWP <sub>100</sub> der wichtigsten Treibhausgase .....	64
Tabelle 2-12: Kulturspezifische direkte Lachgas-Emissionsfunktionen.....	71
Tabelle 2-13: Kulturspezifische Faktoren zur N <sub>2</sub> O-Funktion nach BOUWMAN (1996) zum mittleren Ertragsniveau in Deutschland.....	74
Tabelle 2-14: Kennzahlen der Optimierungsziele im <i>RegEnOpt</i> .....	81
Tabelle 2-15: Zielgrößen der Sachbilanz sowie die Methoden der Ermittlung der Zielgrößen.....	83
Tabelle 2-16: Die einzelnen Positionen der Input – Output – Tabellen .....	85
Tabelle 2-17: Nährstoffbilanz der deutschen Landwirtschaft .....	89
Tabelle 2-18: Ableitung der spezifischen Wirkstoffmasse je aufgewendetem Euro für Pflanzenschutzmittel.....	90
Tabelle 2-19: Ableitung der spezifischen Pflanzenschutzmittel-Wirkstoffmengen exemplarisch für Winterweizen bei Wirkstoffkosten von 40 €/kg.....	90
Tabelle 2-20: Dieserverbrauch von Traktoren bei den verschiedenen Arbeitsgängen.....	91
Tabelle 2-21: Input-Output-Tabelle zu ausgewählten Biomasse-Nutzungs-Pfaden .....	101

---

Tabelle 2-22: Spezifische Investitionsvolumina sowie ergänzende Informationen zu den einzelnen Arten der Biomasse-Verwertungsanlagen.....	102
Tabelle 2-23: Heizwerte und Treibhausgasemissionen direkt aus der Verbrennung von verschiedenen Brennstoffen .....	105
Tabelle 3-1: Lagerungskosten, kumulierter Energieaufwand sowie Treibhausgasemissionen von Lagerungssystemen zur Lagerung von verschiedenen Biomasse-Rohstoffen .....	126
Tabelle 3-2: „RegEnOpt“-Zielwerte der LP-Optimierung .....	147
Tabelle 3-3: Stärken und Schwächen der verschiedenen Energieformen aus Biomasse .....	149

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Entwicklung des Energiebedarfs.....	2
Abbildung 1-2: Struktur des Primärenergieverbrauchs der Welt und Deutschlands 2008 .....	4
Abbildung 1-3: Energieverluste im Energienutzungssystem in Deutschland .....	5
Abbildung 1-4: Schnittstelle Energiesektor und Sektor Landwirtschaft .....	8
Abbildung 2-1: Die drei Stufen der Energieumwandlungspfade im „RegEnOpt“ .....	13
Abbildung 2-2: Energetische Verwertungsmöglichkeiten von Biomasse .....	15
Abbildung 2-3: Zeitliche Entwicklung der Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien seit 1990 in Deutschland .....	16
Abbildung 2-4: Exemplarischer Ablauf des Anbaues von einjährigen Ackerkulturen .....	19
Abbildung 2-5: Ableitung des Stroh- bzw. GPS-Ertrages aus dem Kornertrag .....	21
Abbildung 2-6: Verfahren der dezentralen und zentralen Pflanzenölgewinnung .....	26
Abbildung 2-7: Verfahren der Biodieselerzeugung aus Pflanzenöl .....	28
Abbildung 2-8: Verfahren der Ethanolerzeugung aus stärke- bzw. zuckerhaltiger Biomasse .....	33
Abbildung 2-9: Verfahren der biologischen Biomethanererzeugung und Verwendung aus Biomasse .....	36
Abbildung 2-10: Verfahren der Erzeugung synthetischer Kraftstoffe aus (trockener) Biomasse .....	40
Abbildung 2-11: Übersicht über ökologische Untersuchungs- und Bewertungsinstrumente .....	56
Abbildung 2-12: Rahmen einer Ökobilanz nach DIN ISO 14040.....	58
Abbildung 2-13: Schema zur Lebensweganalyse der Bereitstellung von Energie.....	60
Abbildung 2-14: Vorgehensweise zur Ableitung der direkten kultur- und standortspezifischen Lachgasemissionen von landwirtschaftlich genutzten Böden .....	72
Abbildung 2-15: Kulturspezifische Faktoren zur N <sub>2</sub> O-Funktion nach BOUWMAN (1996) in Abhängigkeit von der Höhe des Stickstoffeintrages .....	73
Abbildung 2-16: Vergleichende Lebenszyklusanalysen von fossilen und biogenen Energieträgern.....	80
Abbildung 2-17: Ableitung der gesellschaftlichen Kosten bei Nutzung von erneuerbaren Energiequellen am Beispiel des elektrischen Stroms .....	84
Abbildung 2-18: Ableitung der spezifischen Aufwendungen zur Saatgutherstellung .....	86
Abbildung 2-19: Energie- und Stoffflüsse bzw. Nährstoffkreisläufe.....	88

---

Abbildung 2-20: Monetäre Abschreibung und Verzinsung des eingesetzten Kapitals .....	92
Abbildung 2-21: Ableitung des spezifischen Mechanisierungsaufwandes einzelner Arbeitsgänge und Produktionsverfahren zur Pflanzenproduktion .....	93
Abbildung 2-22: Ableitung der mittleren anlagenspezifischen Transportentfernung für Biomasserohstoffe .....	94
Abbildung 2-23: Modellierung der Einzeltransportstrecken anhand verschiedener Weg- und Straßenklassen zur Ableitung der durchschnittlichen Transportgeschwindigkeit für die gesamte Transportentfernung.....	95
Abbildung 2-24: Ableitung des Bau- bzw. Werkstoffbedarfs zur Erstellung spezifischer Gebäudetypen anhand volumetrischer Abschätzung .....	98
Abbildung 2-25: Kumulierter Energieaufwand (KEA) sowie Treibhausgasemissionen der Bereitstellung des fossilen elektrischen Strommixes in Deutschland 2005 .....	106
Abbildung 2-26: Schema zur Wirkungsabschätzung der Endenergieträger .....	110
Abbildung 2-27: Vorgehensweise zur Ableitung der Fruchtfolgerestriktionen für die Energiebiomassekulturen schematisiert .....	114
Abbildung 3-1: Vergleich der Bereitstellungskosten, des kumulierten Energieaufwandes sowie der Treibhausgasemissionen verschiedener Weizenszenarien.....	118
Abbildung 3-2: Auswirkungen gestiegener Preise von Düngern, PSM und Diesel um + 100 % auf die Bereitstellungskosten von Winterweizen .....	119
Abbildung 3-3: Vergleich der Bereitstellungskosten, des kumulierten Energieaufwandes sowie der Treibhausgasemissionen verschiedener Biomasserohstoffe zur thermischen Verwertung .....	120
Abbildung 3-4: Vergleich der Bereitstellungskosten, des kumulierten Energieaufwandes sowie der Treibhausgasemissionen verschiedener Biomasserohstoffe zur Stromerzeugung aus Biogas.....	121
Abbildung 3-5: Vergleich der Bereitstellungskosten, des kumulierten Energieaufwandes sowie der Treibhausgasemissionen verschiedener Biomasserohstoffe zur Produktion von Biokraftstoffen .....	123
Abbildung 3-6: Vergleich der Transportkosten, des kumulierten Energieaufwandes sowie der Treibhausgasemissionen zweier Transportsysteme zum Transport von Getreidekorn in Abhängigkeit von der Transportentfernung .....	124
Abbildung 3-7: Auswirkungen gestiegener Dieselpreise um + 100 % auf die Transportkosten von Getreidekorn.....	125
Abbildung 3-8: Ergebnisse zu Energie- und Treibhausgasbilanz zum Biomasse- Umwandlungspfad Pappel-Hackschnitzel zur Wärmeengewinnung in einer 15 kW <sub>th</sub> -Heizanlage.....	128
Abbildung 3-9: Ergebnisse zu Treibhausgas-Vermeidungskosten zum Biomasse- Umwandlungspfad Pappel-Hackschnitzel zur Wärmeengewinnung in einer 15 kW <sub>th</sub> -, 50 kW <sub>th</sub> -, 100 kW <sub>th</sub> - und 250 kW <sub>th</sub> - Heizanlage .....	129
Abbildung 3-10: Ergebnisse zu Beschäftigungs- und Einkommenseffekte zum Biomasse-Umwandlungspfad Pappel-Hackschnitzel zur	

---

Wärmegegewinnung in einer 15 kW <sub>th</sub> -, 50 kW <sub>th</sub> -, 100 kW <sub>th</sub> - und 250 kW <sub>th</sub> - Heizanlage .....	130
Abbildung 3-11: Ergebnisse zu Energie- und Treibhausgasbilanz zu den Biomasse- Umwandlungspfaden Pappel-Hackschnitzel bzw. Silomais via Biogas zur Erzeugung von elektrischem Strom (Vergleich mit bzw. ohne Wärmenutzung) .....	132
Abbildung 3-12: Ergebnisse zum Beschäftigungs- und Einkommenseffekt zu den Biomasse-Umwandlungspfaden Pappel-Hackschnitzel bzw. Silomais via Biogas zur Erzeugung von elektrischem Strom.....	135
Abbildung 3-13: Vergleich der Zusammenhänge zwischen Einsparung fossiler Energie und Treibhausgasemissionseinsparung zwischen Wärme, elektrischem Strom und Biokraftstoffen aus Biomasse .....	139
Abbildung 3-14: Vergleich der Zusammenhänge zwischen Treibhausgasemissionseinsparung und Treibhausgasvermeidungskosten zwischen Wärme, elektrischem Strom und Biokraftstoffen aus Biomasse .....	140
Abbildung 3-15: Vergleich der Zusammenhänge zwischen Treibhausgasemissionseinsparung und Treibhausgasvermeidungskosten zwischen Wärme, elektrischem Strom und Biokraftstoffen aus Biomasse .....	141
Abbildung 3-16: Vergleich „RegEnOpt“-Ergebnis zum Anbau Winterweizen mit auf „RegnOpt“-Ertragsniveau normierten Ergebnissen aus Literaturstellen bezüglich Nettoenergieertrag und korrespondierenden Treibhausgasemissionen .....	142
Abbildung 3-17: Vergleich „RegEnOpt“-Ergebnisse zum Anbau verschiedener Kulturen mit auf „RegnOpt“-Ertragsniveau normierten Ergebnissen aus Literaturstellen bezüglich Nettoenergieertrag und korrespondierenden Treibhausgasemissionen .....	143
Abbildung 3-18: Ergebnisse der Linearen Optimierung für die einzelnen fünf Optimierungs-Zielen, Szenario: 100 Prozent der Fläche für Biomasseanbau .....	145



## Abkürzungen

a	lateinisch annus = Jahr	DDGS	Distillers Dried Grain with Solubles
AEP	Aquatic Ecotoxicity Potential = aquatisches Ökotoxizitätspotenzial	DIN	Deutsches Institut für Normung
AER	Absorption Enhanced Reforming	DME	Dimethylether
AfA	Absetzung für Abnutzung	DoS	Direktverflüssigung organischer Substanz
AKh	Arbeitskraftstunde	DVGW	Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V.
AP	Acidification Potential	DVO	Düngeverordnung
atro	absolut trocken	DWW	Druckwasserwäsche
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle	EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
BCM	Biogas in CO <sub>2</sub> und Methan (drucklose Aminwäsche)	el	elektrisch
BE	Bezugseinheit	EMAS	Eco-Management and Audit Scheme = System für das Umweltmanagement und die Umweltbetriebsprüfung
BF	Basisfläche = landwirtschaftlich genutzte Fläche	EN	Europäische Norm
BG	Biogas(anlage)	eS	elektrischer Strom
BHKW	Blockheizkraftwerk	et al.	lateinisch et alii = und andere
BMWA	Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit	ETBE	Ethyl-Tertiär-Butyl-Ether
BRI	Brutto-Raum-Inhalt	EtOH	Ethanol
BtL	Biomass to Liquid	EU	Europäische Union
CH <sub>4</sub>	chem. Formel für Methan	EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
chem.	chemisch	ext.	extensiv
CO	Kohlenmonoxid	FAME	Fatty Acid Methyl Ester (Fettsäuremethylester)
CO <sub>2</sub>	chem. Formel für Kohlendioxid	FBSt	Festbrennstoff
CO <sub>2</sub> eq	CO <sub>2</sub> -Äquivalente	FM	Frischmasse
CtL	Coal to Liquid	FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
d	lateinisch dies = Tag	foss	fossil
dar.	darunter		

FZK	Forschungszentrum Karlsruhe GmbH	LPG	Liquefied Petroleum Gas, Flüssiggas
GATT	General Agreement on Tariffs and Trade	LW	Landwirtschaft
ges	gesellschaftlich	MeOH	Methanol
GPS	Ganzpflanzensilage	min.	mineralisch
GtL	Gas to Liquid	MJ	Megajoule = $10^6$ Joule
GV	Großvieheinheit (500 kg Lebendgewicht)	MTBE	Methyl-Tertiär-Butyl-Ether
GWP	Global Warming Potential	N	Stickstoff
h	lateinisch hora = Stunde	N <sub>2</sub> O	Lachgas
ha	Hektar	nawaRo's	nachwachsende Rohstoffe
HNV	Haupternteprodukt-Nebenprodukt-Verhältnis	NBER	Netto-Beschäftigungseffekt Region
http	Human Toxicity Potential = Humantoxizitätspotenzial	NEE	Netto-Energieeinsparung
i. A. v.	in Abhängigkeit von	NEER	Netto-Einkommenseffekt Region
IEA	International Energy Agency	NTM	Netto-Treibhausgasemissions-Minderung
int.	intensiv	NTVK	Netto-Treibhaus-Vermeidungskosten
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	ODP	Ozone Depletion Potenzial
ISO	International Organization for Standardization	OECD	Organisation for Economic Co-Operation and Development
K	Kalium	org.	organisch
k. A.	keine Angabe	P	Phosphor
K <sub>2</sub> O	Kali	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Phosphat
KDV	Katalytische Drucklose Verölung	PJ	Petajoule = $10^{15}$ Joule
KEA	Kumulierter Energieaufwand	PLA	Produktlinienanalyse
KfW	Kreditsanstalt für Wiederaufbau	PME	Pflanzenölmethylester
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V.	POCP	Photochemical Ozone Creation Potenzial = Ozonbildungspotenzials
kWh	Kilowattstunde	PSA	Pressure Swing Adsorption = Druckwechseladsorption
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung	PSM	Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmittel
LCA	Life Cycle Assessment = Lebensweganalyse	Reg	Region
LP	Lineare Programmierung	„RegEnOpt“	Regenerative Energien Optimierung

---

RME	Rapsölmethylester
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
SKE	Steinkohleeinheit (1 kg SKE = 29,308 MJ)
SL	Stilllegung
SNG	substitute natural gas, Erdgas Substitut, Methanersatzgas
SO <sub>2</sub>	chem. Formel für Schwefeldioxid
t	Tonne
T	Tausend
TEP	Terrestrial Ecotoxicity Potential = terrestrisches Ökotoxizitätspotenzial
th	thermisch
TM	Trockenmasse
TS	Trockensubstanz
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VOC	volatile organic compound = flüchtige organische Verbindungen
W	Wärme
WCED	World Commission on Environment and Development
WBGU	Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderung
WMO	World Meteorological Organization
WS	Wirkstoff
WTO	World Trade Organisation
ZA	Zinsaufwand
z. B.	zum Beispiel

---



## Vorwort

*„Nicht das, was wir beginnen, zählt, sondern das, was wir fertig bringen.“*

Dieses Zitat von EMIL OESCH, einem Schweizer Schriftsteller und Verleger (1894 – 1974), zierte über drei Jahre die Wand über meinem Schreibtisch am Lehrstuhl für Wirtschaftslehre des Landbaues und motivierte mich, doch gelegentlich auf interessante Nebenprojekte zu verzichten, um das nun vorliegende Werk fertig zu stellen.

Wesentliche Motivation und Antriebskraft konnte ich in meinem Freundeskreis tanken. Viele meiner Freunde waren mir mentale Stütze, vor allem in den Stoßzeiten. Sie mussten vielmals auf meine Anwesenheit bei gesellschaftlichen bzw. geselligen Ereignissen verzichten.

Das wissenschaftliche Kollegium mit Professor Dr. Dr. h.c. Alois Heißenhuber und Dr. Hubert Pahl als direkte Ansprechpartner in allen fachlichen Fragen boten mir große Freiräume zur persönlichen Entfaltung. Darüber hinaus durfte ich mich auch genügend Herausforderungen neben dem eigentlichen Hauptprojekt stellen. Nicht nur bei zahlreichen Alltagsaufgaben sondern vor allem bei fachlichen Problemstellungen konnte ich mich stets auf die tatkräftige Unterstützung der mich gewisse Abschnitte bei der Projektbearbeitung begleitenden studentischen Hilfskräfte Martin Strobl, Stefan Kilian, Stefan Rauh, Christiane Kugler und Georg Friedl verlassen. Ihre stets engagierte und kritische Auseinandersetzung mit den aufgetragenen Aufgaben ermöglichte eine fruchtbare und ertragreiche Zusammenarbeit.

Überhaupt erst ermöglicht haben diese Arbeit Ministerialdirigent a. D. Peter Wackerl (Leiter der Abteilung „Markt und Ernährungswirtschaft“ im Bayerischen Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten), Ministerialrat Dr. Rupert Schäfer (Leiter des Referates „Agrarforschung und Nachwachsende Rohstoffe“) sowie Regierungsdirektor Dr.-Ing. Werner Ortinger mit dem uns in Auftrag gegebenen Forschungsprojekt mit dem Titel „Potenzial der Biomasse für Energieerzeugung und landwirtschaftliche Einkommen nach der EU-Osterweiterung“. Bei den Treffen im Bayerischen Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten zu verbalen Zwischenberichten und zur Abstimmung der weiteren Vorgehensweise begegneten uns Peter Wackerl sowie seit April 2007 sein Nachfolger Ministerialrat Eckbert Dauer, Rupert Schäfer und Werner Ortinger stets in angenehmer Atmosphäre mit offenem Ohr. Ihre kritische Auseinandersetzung mit dem von uns Vorgetragenen führte zu konkreten Vorstellungen und mündete letztendlich in entsprechenden neuen Arbeitsaufträgen.

---

Mein Interesse an erneuerbaren Energien überhaupt wurde über mein Diplomarbeitsthema zum Spannungsfeld der Biogaserzeugung in klein dimensionierter Größenordnung Bayerns gegenüber den industriellen Großanlagen Dänemarks geweckt. Schon bei der Bearbeitung und Erstellung der Diplomarbeit im Jahr 2003 erfolgte eine intensive Auseinandersetzung mit den erneuerbaren Energien, woraus die Fragestellung nach einer optimalen Nutzungsstruktur der Biomasseenergieträger entstand. Ausführliche Potenzialanalysen bezüglich frei werdender Flächen für die Energiebiomasse mit abschließenden pauschalen Nutzungsstrukturen erschienen mir damals schon hinterfragenswert. Mit Herrn Professor Heißenhuber war sofort ein Projektinitiator gefunden, der mich bei der Antragstellung unterstützte und die Umsetzung des Projektes mit dem Bearbeitungsstart im November 2003 übernahm. Die erste Hälfte der Bearbeitungszeit ermittelte Sonja Simon als Projektkollegin ausführliche Flächenpotenziale für die Energiebiomasse, welche ich im Weiteren mit optimalen Nutzungsstrategien versehen sollte. Die Erarbeitung dieser Nutzungsstrategien unter verschiedensten Aspekten findet sich im Folgenden wieder. Während der Bearbeitungszeit war stets die intensive Beobachtung nicht nur der erneuerbaren Energien, sondern auch insgesamt des Agrar- und des Energiesektors notwendig. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sowie resultierende Rückschlüsse gipfeln in einem eigenen Kapitel in der vorliegenden Arbeit mit subjektiven Aspekten, die in ihrer Gestalt nicht den hohen wissenschaftlichen Ansprüchen gerecht werden, aber aus der intensiven wissenschaftlichen Auseinandersetzung als Schlussfolgerungen hervorgingen.

Das für diese Arbeit eigens erstellte Modell „*RegEnOpt*“ (Regenerative Energien Optimierung) liegt am Lehrstuhl für Wirtschaftslehre des Landbaues der TU München in Weihenstephan und beim Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. in Darmstadt. Eine weitere uneingeschränkte Nutzung des Modells behalten sich der Autor, die Arbeitsgruppe „künftige Landnutzung“ am Lehrstuhl für Wirtschaftslehre des Landbaues sowie das Team des KTBL vor.

Rudolzhofen, im Mai 2012

Stefan Berenz

---

# 1 Einleitung

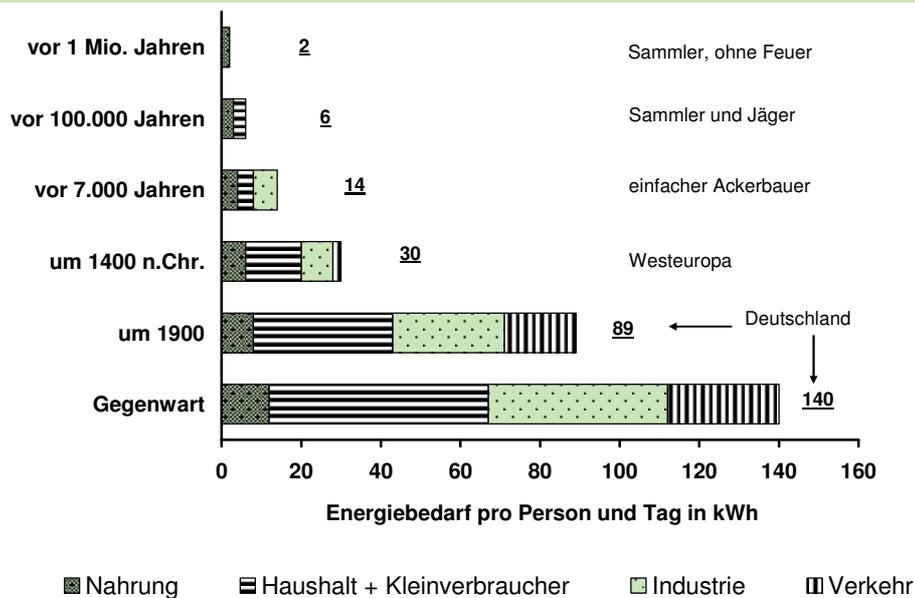
Griechische Naturphilosophen erklärten die Natur mit den drei Erscheinungsformen Geist, Kraft und Stoff. Die moderne Naturwissenschaft spricht in der Gegenwart von Information, Energie und Materie (KOPETZ 1991, S. 9). Der Begriff Energie wird in der Physik definiert mit der Fähigkeit eines Systems, Arbeit zu leisten. Energie ist vielmehr die Lebensgrundlage allen irdischen Seins. Pflanzen beziehen ihre Energie von der Sonne. Durch die Photosynthese wird diese eingestrahlte Energie eingefangen und durch den Einbau von Kohlendioxid aus der Atmosphäre gespeichert für die Lebenserhaltung zu Zeiten ohne Sonneneinstrahlung. Organismen ohne Fähigkeit der Photosynthese bedienen sich der gespeicherten Energie der Pflanzen, um zu wachsen und sich zu vermehren. Es wird pflanzliche und tierische Biomasse erzeugt. Abgestorbene Organismen bestehen selbst noch aus hochwertigen, energiereichen Molekülen, welche wiederum letztendlich von Destruenten zersetzt, also genutzt werden. Über Jahrmillionen konnte sich abgestorbene und nicht zersetzte Phyto- und Zoomasse anreichern und wurde u. a. durch Einwirkung von Druck in die heute von der Menschheit im Übermaß genutzten fossilen Energieträger umgewandelt. Generell wird bei der energetischen Nutzung von Stoffen die Bindungsenergie von hochwertigen Molekülen genutzt. Die Energie wird freigesetzt durch Zerlegung der Moleküle hin zu Kohlendioxid, Wasser und weiteren einfachen Verbindungen. Bei der Nutzung von gerade gewachsener Biomasse schließt sich der Kreislauf. Es wird wieder eben die Menge an Kohlendioxid an die Atmosphäre abgegeben, die vorher zur Biomasseentstehung entnommen wurde. Die seit jüngster Vergangenheit übermäßige Nutzung fossiler Energieträger führt zu Emissionen von Kohlendioxid, welches vor Jahrmillionen gebunden wurde. Das derzeitige Gleichgewicht der Zusammensetzung der Atmosphäre wird gestört.

Im Lauf der Entwicklung der Menschheit stieg mit zunehmendem Komfort und Wohlstand der individuelle Energieverbrauch. Wie Abbildung 1-1 illustriert, steigerte sich der Energieverbrauch des Sammlers, dessen einziger Energiebedarf die Nahrung war, von rund 2.000 Kilokalorien pro Tag vor einer Million Jahre bis heute auf das 70-fache. Der Anteil der in der Nahrung enthaltenen Energie wurde im Vergleich zum übrigen Energieverbrauch mit zunehmender Technisierung verschwindend klein. Die Industrialisierung war erst durch den Einsatz fossiler Energieträger zu realisieren. Heute beträgt der tägliche Primärenergiebedarf pro Per-

---

son in Deutschland rund 140 Kilowattstunden (HEINLOTH 1993, S. 15). Neben dem absolut gestiegenen Bedarf an Energie hat sich die Bedarfsstruktur von Brennstoffen zur Wärmege-  
winnung hin zu hochwertigen Energieformen wie elektrischen Strom bzw. normierten Treib-  
stoffen entwickelt.

**Abbildung 1-1: Entwicklung des Energiebedarfs**



Quelle: nach HEINLOTH 1993, S. 15

Die einzelnen Entwicklungsstufen des Energiebedarfs erfolgten in den westlichen Industrieländern, wie in Abbildung 1-1 dargestellt. In vielen Entwicklungsländern herrschen derzeit Energienutzungssysteme vor, wie Europa sie vor 1.000 Jahren kannte. Holz und andere Biomasse sind die wesentlichen Energieträger, die zur Nahrungszubereitung bzw. Erzeugung von Raumwärme genutzt werden (IEA und OECD 2003). Folgende Tabelle 1-1 zeigt exemplarisch den täglichen Primärenergieverbrauch pro Person in verschiedenen Regionen der Erde.

**Tabelle 1-1: Täglicher Primärenergieverbrauch pro Person im Jahr 2009**

Land/Kontinent	täglicher Energiebedarf pro Person	Tendenz der letzten zehn Jahre
	[kWh/d]	
Deutschland	124	sinkend
USA	225	stagnierend/sinkend
China	54	stark steigend
Afrika	21	steigend

Quelle: nach BMWA 2005, BMWi 2011

Gerade die Länder der bevölkerungsreichsten Region der Erde, nämlich Asien, wandeln sich zu Industrienationen. Entsprechend steigt deren Nachfrage nach Energie und Rohstoffen rasant an. Mit dem Einzug des Wohlstandes verändern sich die Lebensstile. Die Ansprüche der modernen Konsumgesellschaft beinhalten u. a. die individuelle Mobilität zur Selbstverwirklichung. In den aufstrebenden Ländern gilt noch der Zusammenhang eines wachsenden Energieeinsatzes mit wachsendem Wohlstand, wie er bis vor wenigen Jahrzehnten noch in den westlichen Industrienationen galt (MEADOWS, et al. 1972, S. 58, WBGU 2003b, S. 15 ff.). Schon in den 70er Jahren des 20sten Jahrhunderts wies der Club of Rome darauf hin, dass sich der Umgang des Menschen mit seiner Umwelt grundsätzlich zu ändern habe, um auch künftigen Generationen ein lebenswertes Leben auf dem Planeten Erde zu ermöglichen. Es wurde erkannt, dass ein Weiterführen des vorherrschenden Lebensstils der wohlhabenden Bevölkerungsteile der Erde auf Kosten der armen Bevölkerung und auf Kosten der künftigen Generationen zum Kollabieren des Ökosystems Erde sowie zum Auseinanderbrechen der sozialen Strukturen bis zu kriegerischen Auseinandersetzungen führen wird (MEADOWS, et al. 1972). Diese Prognosen wurden zu Beginn der 90er Jahre nochmals überarbeitet und die bereits erfolgten Schritte in Richtung einer Ökologisierung des Lebensstils der wohlhabenden Nationen eingearbeitet. Die Zeithorizonte des Zusammenbruchs des aktuellen Weltsystems verschoben sich etwas in die Zukunft. Bestehen blieb die Forderung nach einer grundsätzlichen Änderung des Verhaltes der Menschheit (MEADOWS, et al. 1992, MEADOWS, et al. 2006).

Diese grundsätzlichen Zusammenhänge führen zur Problemstellung dieser Arbeit, woraus Ziele für Lösungsansätze formuliert und die Vorgehensweise der Lösungsansätze dokumentiert werden.

## 1.1 Problemstellung und Abgrenzung

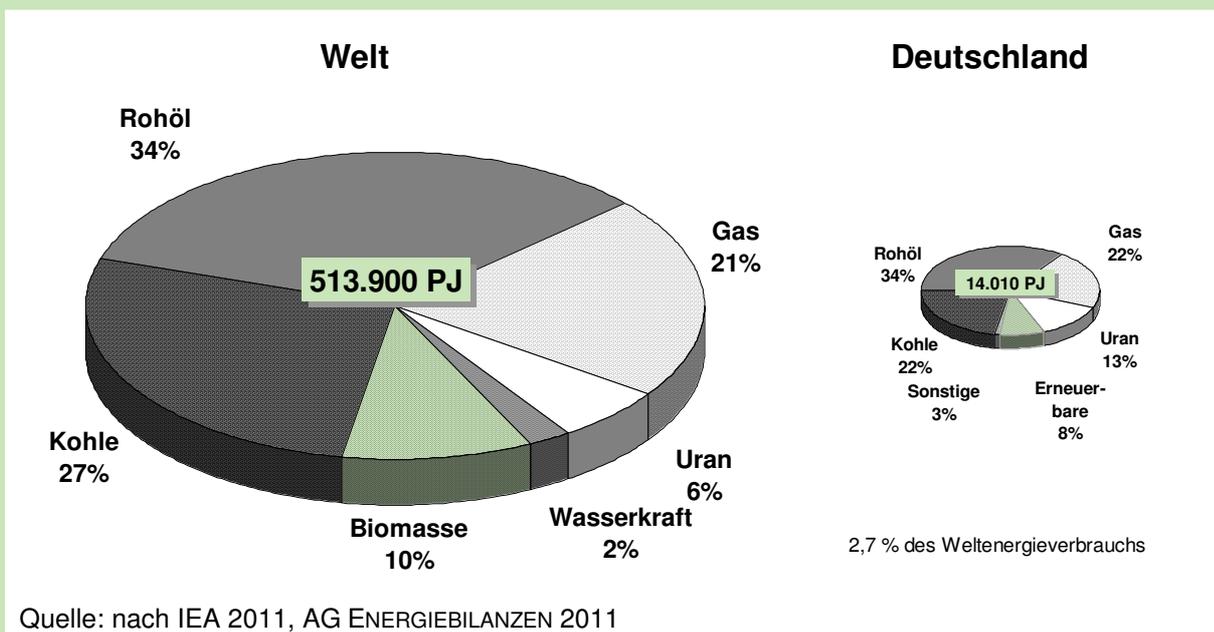
Nicht nur in Fachkreisen ist die Tatsache der Endlichkeit der fossilen Energieträger anerkannt. Diskutiert wird lediglich die Reichweite der noch vorhandenen Bodenschätze (UNDP, et al. 2000, S. 135 ff., WBGU 2003, S. 49). Je nach Einschätzung dieser Reichweiten wird eine Verhaltensänderung schon heute postuliert bzw. in die Zukunft verschoben. Bei Betrachtung der Struktur des Energieverbrauchs weltweit wird die Dominanz der fossilen Energieträger deutlich. Abbildung 1-2 zeigt die Strukturen des Primärenergieverbrauchs der Welt und Deutschlands schematisch. Knapp 90 Prozent der derzeit genutzten Energieträger weltweit stammen aus fossilen Quellen. Unter dem Aspekt der Erschöpfbarkeit dieser Quellen ist ein Zuwenden zu erneuerbaren Energiequellen unvermeidbar. Der Biomasse-Anteil am Primärenergieverbrauch weltweit umfasst im Wesentlichen Festbrennstoffe wie Holz und Stroh sowie Müll. Diese Brennstoffe bilden vor allem die Basis der Energieversorgung in Entwicklungsländern, wobei deren Verwendung häufig nicht einer nachhaltigen Nutzung der Ressourcen entspricht (WBGU 2003b, S. 16 f., S. 26 u. S. 66 f., IEA und OECD 2003, S. 6 ff.). Darüber hinaus besitzen diese genannten Energieträger aus Biomasse nicht die in Industrieländern

---

geforderten Eigenschaften hochwertiger Energieformen. Eine nennenswerte energetische Nutzung von Biomasse nach westlichen Standards existiert weltweit noch nicht.

Die große Abhängigkeit von fossilen Energieträgern führt unausweichlich zu drei weiteren wesentlichen Problemfeldern. Zum einen, gegeben durch die lokale Konzentration der Energiequellen, steigt mit zunehmender Verknappung das Risiko kriegerischer Auseinandersetzungen um das kostbare Gut Energie (KOPETZ 2000, S. 35 ff., KOPETZ 2002, S. 19 ff., WBGU 2003b, S. 33 ff.).

**Abbildung 1-2: Struktur des Primärenergieverbrauchs der Welt und Deutschlands 2008**



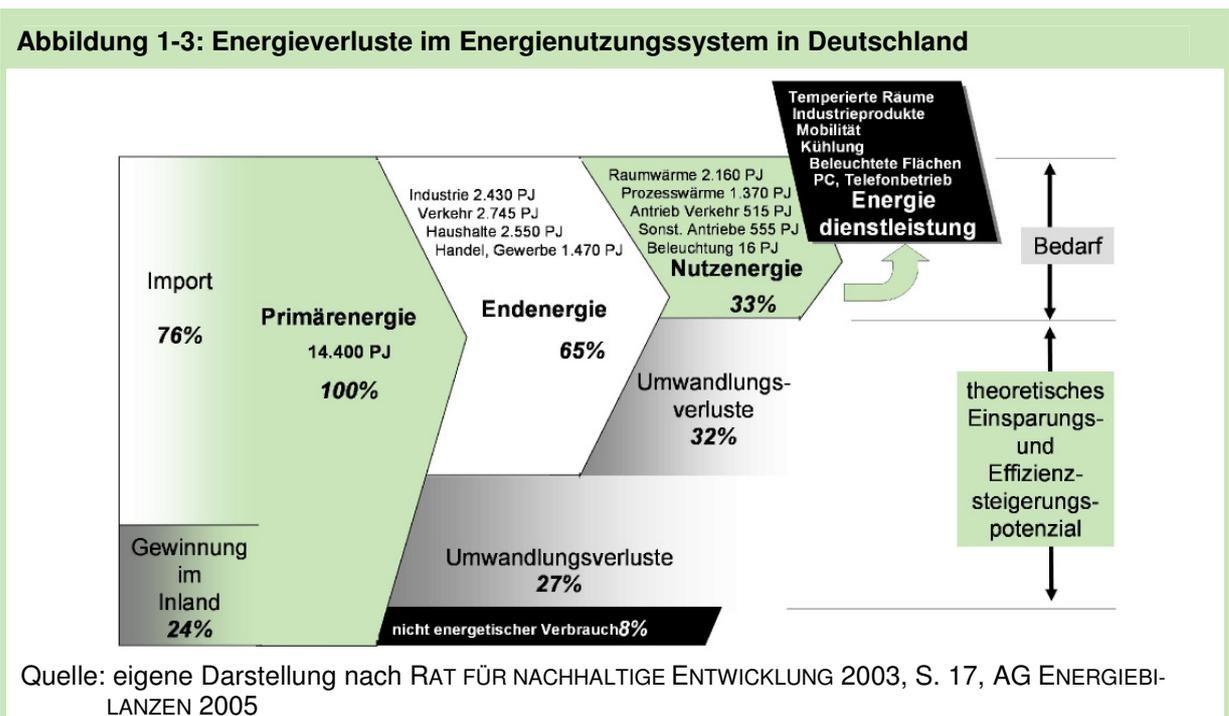
Zum Zweiten führt eine Verknappung bei steigender Nachfrage unumgänglich nach den Gesetzen freier Märkte zu steigenden Preisen. Liegen die Kosten der Energie jedoch über einer kritischen Marke, so lähmt dies wirtschaftliches Handeln und Wachstum (WCED 1987, S. 196 ff., MEADOWS et al. 2006, S. 37 ff. und S. 150 ff.).

Ein dritter, wesentlich aktuellerer Aspekt, welcher eng verbunden ist mit der Verbrennung fossiler Energieträger, ist der weltweite Klimawandel. Der Ausstoß der bei der Verbrennung auftretenden klimarelevanten Schadgase wie Kohlendioxid, Methan und Lachgas stieg mit der Ausdehnung der Nutzung fossiler Energieträger (IPCC 1999, S. 4). Daraus resultierend wird ein stetiger Temperaturanstieg als Folge des Treibhauseffekts beobachtet (IPCC 2001a, S. 101 ff., IPCC 2001b). Dieser Temperaturanstieg wird zum stetigen Anstieg des Meeresspiegels führen. Darüber hinaus erscheinen extreme Wetterbedingungen: Veränderungen bei den Niederschlägen führten zu Dürreperioden bzw. zu irreversibler Desertifikation. Andernorts ließen schwere Stürme und Überschwemmungen ganze Landstriche nahezu unbewohnbar werden. Sekundär resultieren aus diesen klimatischen Veränderungen somit soziale Probleme. Not und Armut in betroffenen Gebieten können sich zu Flüchtlingsströmen bzw. Migrations-

bewegungen entwickeln (BRAUCH 2002, S. 11 ff.). Daraus entsteht ein Konfliktpotenzial internationaler Art, welches durch eine aktive Klimaschutzpolitik reduziert werden könnte. Als Nebeneffekt der Klimaschutzmaßnahmen im Energiesektor führen die Einsparungsmaßnahmen zu größerer Unabhängigkeit von den internationalen Energiemärkten, was ebenfalls internationales Konfliktpotenzial lindern helfen kann (OBERTHÜR, et al. 2002, S. 111 ff.).

Aus den Beobachtungen dessen entstanden schon in den 70er Jahren des 20sten Jahrhunderts Aktivitäten, um diesem Trend entgegenzuwirken. 1979 fand in Genf mit der Weltklimakonferenz der Auftakt zum internationalen Klimaschutz statt. 1994 trat die Klimaschutzkonvention der Vereinten Nationen in Kraft, worauf jährliche Zusammenkünfte der Vertragsstaaten folgen. Im Jahr 1997 wurde mit der Verabschiedung des Kyoto-Protokolls die Grundlage für eine international verbindliche Emissionsreduktionspolitik geschaffen (BMU 2000). Nach weiteren internationalen Verhandlungen in Bali (2007), Kopenhagen (2009) und Cancun (2010) wurde ein so genannte „zwei Grad Obergrenze“ vereinbart. In Cancun wurde ein „Klimafond“ eingerichtet. Die Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls endet im Jahr 2012. Die Nachfolge des Kyoto-Protokolls sowie die rechtliche Form einer zweiten Klimaschutzkonvention sind derzeit noch offen (BMU 2011b).

Der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung „Globale Umweltveränderungen“ prognostiziert in einem Szenario eine Vervierfachung des weltweiten Energieverbrauchs bis zum Jahr 2100. In diesem Szenario wurde schon eine Effizienzsteigerung der Energienutzung unterstellt, ohne die mit einer Versechsfachung des weltweiten Energieverbrauchs gerechnet werden müsste (WBGU 2003b, S. 137 ff.). Zur Verdeutlichung der Effizienz der Energienutzung in einem fortschrittlichen Land wie Deutschland folgt Abbildung 1-3.



Neben der hohen Abhängigkeit von den internationalen Energiemärkten fällt der hohe Betrag der Konversionsverluste zur Bereitstellung der Nutzenergie auf. Schon 1987 forderte die Brundtland Kommission im Bericht „Our Common Future“ (WCED 1987) eine drastische Veränderung der Energienutzung u. a. durch politisch forcierte Effizienzsteigerungen. So sollte der Bedarf von Nutzenergie mit nur mehr zwei Drittel bzw. noch besser nur mit der Hälfte des bestehenden Primärenergiebedarfs gedeckt werden können (WCED 1987, S. 14). Eine wesentliche Rolle zur Steigerung der Energieeffizienz spielt die Preispolitik. Energiepreise sollten alle Kosten der Bereitstellung enthalten, also auch die so genannten externen Kosten, denn hohe Preise fördern eine möglichst effiziente Energienutzung (WCED 1987, S. 196 ff.). Im Gutachten „Welt im Wandel – Energiewende zur Nachhaltigkeit“ (WBGU 2003b) fordert der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen analog zur Brundtland Kommission eine Effizienzsteigerung im Energienutzungssystem. Der Primärenergiebedarf je Energiedienstleistung könne um mehr als 80 Prozent des derzeitigen Energiebedarfs gesenkt werden (WBGU 2003b, S. 90). Dies solle geschehen durch einen Ausbau der gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung, der Erhöhung der elektrischen Wirkungsgrade der Kraftwerke, Steigerung der Energieeffizienz der Heiz- und Kühlsysteme sowie durch Substitution bzw. Recycling energieintensiver Werkstoffe (WBGU 2003b, S. 90 ff.). Der Schweizer Bundesrat empfiehlt in einer Strategie zur nachhaltigen Entwicklung, die Energie- und Klimapolitik der Schweiz in einem Zeitraum von 50 Jahren am Ziel einer 2.000 Watt-Gesellschaft und einem Pro-Kopf-Ausstoß von einer Tonne Kohlendioxid pro Jahr auszurichten (BERG, et al. 2003). Gemessen am derzeitigen Pro-Kopf-Energiebedarf von etwa 5.000 Watt erfordert dies eine Reduktion des Primärenergiebedarfs um den Faktor 2,5. Bei gleichzeitig angenommenem Wirtschaftswachstum sowie der Entwicklung eines angemessenen Lebensstandards während der nächsten 50 Jahre wird eine Effizienzsteigerung um das Vierfache notwendig. Studien jedoch belegen, dass dieses hoch gegriffene Ziel erreichbar sei (MARECHAL, et al. 2005).

Neben dem Energiesektor und seinen oben geschilderten Herausforderungen in der Zukunft gerät gerade in Europa ein zweiter Sektor, der Sektor Landwirtschaft, immer mehr unter Druck. Der in der Nachkriegszeit eingeschlagene Pfad der Agrarpolitik u. a. mit den im Landwirtschaftsgesetz 1955 und im EWG-Vertrag 1957 formulierten Zielen der Versorgungssicherheit der Bevölkerung mit Nahrungsmitteln führte in der Folgezeit zu einer Abschottung des Binnenmarktes mittels der Marktordnungen (HENRICHSMEYER und WITZKE 1994, S. 33 ff., WÖHLKEN 1991, S. 142 ff.). Der Sektor Landwirtschaft konnte sich ohne den internationalen Konkurrenzdruck entwickeln und verzeichnete gerade bei den durch Marktordnungen gestützten Produkten in den 70er Jahren des 20sten Jahrhunderts Nettoüberschüsse, welche schließlich die Marktordnungskosten nahezu explodieren ließen (WÖHLKEN 1991, S. 68 ff.). Neben der wachsenden Überproduktion am Binnenmarkt erhöhte sich der internationale Druck wegen dem verbilligten Absatz der Überschüsse auf den Weltmärkten sowie dem fehlenden Marktzugang zum europäischen Binnenmarkt. Bei den GATT-Verhandlungen in

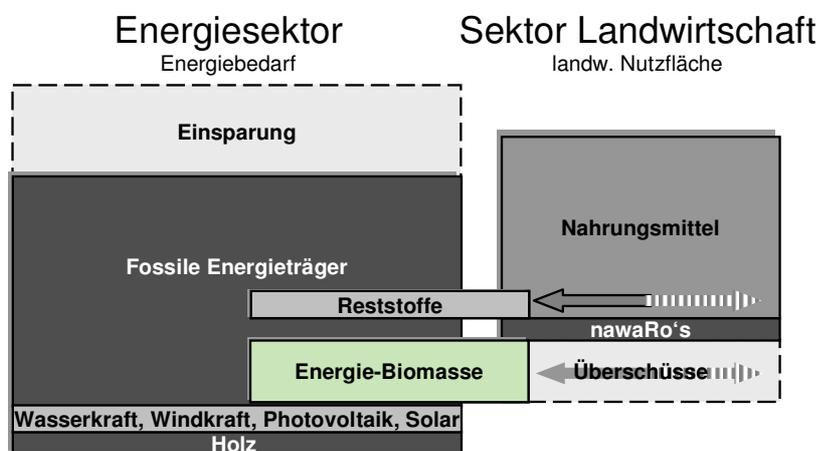
der Uruguay-Runde (1986 bis 1994) wurde eine umfassende Liberalisierung im Handel mit Agrarerzeugnissen beschlossen. Beim Abschluss der Uruguay-Runde in Marrakesch wurde die Welthandelsorganisation WTO gegründet. Ein deklariertes Ziel der WTO ist die Liberalisierung des internationalen Handels (AID 1997, S. 11 ff., S. 22 f.). Dies machte eine grundlegende Reform der europäischen Agrarpolitik unumgänglich. 1992 hat der Agrarministerrat die Reform der gemeinsamen Agrarpolitik verabschiedet. Die bisher gewährte Einkommensstützung durch hohe Interventionspreise wurde ersetzt durch flächen- und tierbezogene Ausgleichszahlungen (AID 1997, S. 22). Die Agenda 2000 soll die Agrarreform für die Jahre 2000 bis 2006 weiterführen durch weitere Interventionspreisabsenkungen und Kompensation durch ansteigende flächen- und tierbezogene Direktzahlungen (BMVEL 2001, S. 51). Im Juni 2002 legte die Europäische Kommission dem Europäischen Rat eine Halbzeitbewertung zur Agenda 2000 vor mit dem Vorschlag, die Flächen- und Tierprämien durch ein System betriebsbezogener Prämien zu ersetzen. Gleichzeitig sollen die Direktzahlungen an die Einhaltung von Umwelt-, Tierschutz-, Lebensmittel- und Betriebs sicherheitsvorschriften geknüpft werden (Cross Compliance). Eine Kürzung der Direktzahlungen um steigende Prozentsätze soll als Umlage zur Förderung des ländlichen Raums verwendet werden (dynamische Modulation) (BMVEL 2003, S. 83). In der im Juni 2003 und April 2004 auf europäischer Ebene beschlossenen Reform der Gemeinsamen Agrarpolitik wurde durch die Neuausrichtung der Gemeinsamen Agrarpolitik ein Systemwechsel eingeleitet. Diese trat zum 1. Januar 2005 in Kraft. Die Direktzahlungen sind nun weitgehend von der Produktion entkoppelt, die Zahlungen sind an Mindeststandards der Bewirtschaftung gebunden und durch die Modulation kann der ländliche Raum zusätzlich gefördert werden. Durch die Umsetzung der Beschlüsse soll die Handlungsfähigkeit der erweiterten Union auch unter den wachsenden Anforderungen der WTO hinsichtlich der Handelsliberalisierung bestehen bleiben (BMVEL 2004, S. 19, BMVEL 2005a, S. 7, S. 66 ff., BMVEL 2005b). Die Aktivitäten der Europäischen Union für die Gemeinsame Agrarpolitik nach dem Jahr 2013 zielen auf eine „rentable Nahrungsmittelerzeugung“, die „nachhaltige Bewirtschaftung der natürlichen Ressourcen und Klimamaßnahmen“ sowie eine „ausgewogene räumliche Entwicklung“. Damit tritt die reine Erzeugung von Nahrungsmitteln weiter in den Hintergrund. Die Erzeugung begleitende Maßnahmen zur Förderung des Umwelt- und Klimaschutzes sowie die Förderung der ländlichen Räume allgemein treten mehr in den Vordergrund. Das Mindestniveau von Umwelt- und Klimaschutzmaßnahmen wird angehoben. Damit sinken die von der Produktion unabhängigen Ausgleichszahlungen je Flächeneinheit bei gleichem Produktionsstandard. Die volle Höhe der Ausgleichszahlungen kann nur durch die Erfüllung der Anforderungen der Ökologisierungskomponente („Greening“) erzielt werden (WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT FÜR AGRARPOLITIK 2010; EUROPÄISCHE KOMMISSION 2010). Dieses so genannte „Greening“ reduziert allgemein das Flächenpotenzial für intensiven Anbau.

Gleichzeitig mit der beabsichtigten Ökologisierung der Landwirtschaft ruft die Bundesregierung den Biomasseaktionsplan auf den Plan. Damit soll der Rahmen gespannt werden für eine weitere umweltverträgliche Energieversorgung u. a. durch Biomasse (BMELV 2009ab).

Damit steht neben dem Energiesektor auch der Sektor Landwirtschaft vor neuen großen Herausforderungen in einer Zeit, in der global energie- und klimapolitischer Handlungsbedarf besteht. Die Herausforderungen stellen jedoch auch Chancen dar. Generell gilt es, den Bedarf an fossilen Energieträgern langfristig weitestgehend zu reduzieren. Zum einen wegen der Endlichkeit der Verfügbarkeit, zum anderen, um dem Treibhauseffekt entgegenzuwirken. Einen kurzfristigen Lösungsansatz stellt z. B. die Reduktion von Kohlendioxidemissionen durch Substitution von Kohle durch Erdgas dar (BMWi 2001). Darüber hinaus wird derzeit geforscht, das bei der Verbrennung freigesetzte Kohlendioxid aufzufangen, um es dann dauerhaft im Boden oder in der Tiefsee zu speichern (Sequestration) (WBGU 2003b S. 94 ff., S. 110, RÜGGERBERG 2004, S. 9 f.). Ein weitaus effektiverer Ansatz, dem anthropogen induzierten Klimawandel entgegenzuwirken, ist, fossile Energieträger durch erneuerbare Energiequellen zu ersetzen. Wasser und Wind werden seit Jahrhunderten als Kraftquelle genutzt. Die Photovoltaik dient nicht nur für Insellösungen als Stromerzeuger. Solaranlagen können effizient den Heizölbedarf nicht nur in Haushalten reduzieren. Die eben genannten erneuerbaren Energiequellen sind jedoch nur bedingt speicherbar. Ihre Verfügbarkeit hängt von den Witterungsverhältnissen ab. Dem gegenüber bietet die Biomasse gespeicherte Sonnenenergie, welche in vielfältiger Art und Weise genutzt werden kann. Nutzbare Biomasse wächst in großen Mengen auf Forstflächen und landwirtschaftlich genutzten Flächen.

Der teilweise von Produktionsüberschüssen geprägte Sektor Landwirtschaft kann einen Teil der landwirtschaftlichen Nutzfläche zur Energieproduktion zur Verfügung stellen. Damit sinkt im Energiesektor der Bedarf an fossilen Energieträgern. Schematisch stellt diesen Zusammenhang Abbildung 1-4 dar.

**Abbildung 1-4: Schnittstelle Energiesektor und Sektor Landwirtschaft**



Quelle: eigene Darstellung

Die Umwidmung eines Teils der landwirtschaftlichen Nutzfläche in Richtung Energieproduktion ist reversibel. Die Flächen bleiben in der Bewirtschaftung und können im Bedarfsfall wieder zur Nahrungsmittelerzeugung herangezogen werden. Damit Biomasse jedoch einen relevanten Anteil am gesamten Energiebedarf gewinnen kann, gilt es schon vorab, den absoluten Bedarf an Energie möglichst drastisch zu reduzieren.

Nicht nur hinsichtlich der Biomasseproduktion stellt die Fläche den am stärksten begrenzenden Faktor dar. Die Photosyntheseleistung je Flächeneinheit ist im engeren Sinne gegeben durch Witterungs- und Standortbedingungen und im weiteren durch die Kulturart. Somit ergibt sich daraus die Frage, welche Biomasse bzw. Biomassezusammensetzung kann einen möglichst großen Beitrag hinsichtlich Verdrängung fossiler Energieträger bzw. Erreichung anderer Ziele auf limitiert vorhandener Fläche leisten.

## 1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist, aufbauend auf eine Vielzahl von Studien zu möglichen energetischen Nutzungsalternativen von Biomasse unter Berücksichtigung von Flächenpotenzialen zur Biomasseerzeugung, nach verschiedenen Optimierungszielen den jeweiligen optimalen Biomasse-Energie-Mix abzuleiten.

In vielen Studien zur speziellen energetischen Nutzung von Biomasse wird das Potenzial des betrachteten Energieträgers ermittelt und dargestellt. Diese jeweils isolierten Potenzialabschätzungen unterstellen jedoch keine Flächenkonkurrenz zu anderen Produktionsverfahren auf dieser Fläche. So wird zum Beispiel die gesamte Stilllegungsfläche zum möglichen Anbau einer Kulturart bzw. der Rohstoffe für den betrachteten Endenergieträger aus Biomasse herangezogen (z.B. KALTSCHMITT 1992, SCHARMER 2001, IGELSPACHER 2003, S. 22, LEIBLE et al. 2005, JAENISCH und SOMMERFELD 2005, S. 156 f., THRÄN et al. 2007). Andere Studien, welche Flächenpotenzialabschätzungen für den Biomasseanbau über die Stilllegungsfläche hinaus vornehmen, belegen diese ermittelten Flächen mit einem fixen Biomasse-Energie-Mix (z.B. FRITSCH, et al. 2004, BMU 2004b, S. 159 ff., ERICSSON und NILSSON 2006, ZEDDIES 2006, SIMON 2007).

Der Ansatzpunkt dieser Arbeit liegt in der Annahme, dass eben die landwirtschaftliche Nutzfläche, in welcher Höhe sie nun im ersten Moment auch immer für die Energiebiomasse genutzt werden kann, begrenzt ist. Daraus resultiert die zweite Annahme, welche jedem formulierten Ziel für die Optimierung unter Berücksichtigung von Restriktionen einen spezifischen optimalen Mix als Ergebnis unterstellt. Diesen für jedes formulierte Ziel abgeleiteten Energie-Biomasse-Mix gilt es zu ermitteln. Dabei werden als Grenzen, die den möglichen Ergebnisraum eingrenzen, die Bedarfsstruktur nach festen, flüssigen und gasförmigen Energieträgern sowie eine in der Realität umsetzbare Gesamtfruchtfolge aus Nahrungsmittel- und Biomasseproduktion eingesetzt. Ausgehend vom jeweiligen abgeleiteten optimalen Biomasse-Mix können schließlich Potenziale der Biomasse für die Energieversorgung aufgezeigt werden.

Der Beobachtungsraum soll sich auf die Bundesrepublik Deutschland begrenzen. Als zeitlicher Horizont in die Zukunft wird das Jahr 2015 als Eckpunkt festgelegt.

Die groben Schritte zur Realisierung einer Optimierung und Integration eines optimierten Biomasse-Energie-Mix in das bestehende Energieversorgungssystem sowie in die aktuelle Nutzung landwirtschaftlicher Nutzflächen werden im Folgenden dargestellt.

### 1.3 Vorgehensweise

Die breite Palette der Fachliteratur zu einzelnen Energieträgern aus Biomasse sowie deren Verwendungsmöglichkeiten bilden die Basis zur vorliegenden Studie. Die Fachliteratur liefert Aussagen zur Bereitstellung der Rohstoffe, zur Verfahrenstechnik, zur Wirtschaftlichkeit sowie zu Umwelteffekten. Einer zweiten Gruppe der Basisliteratur für diese Studie werden mögliche Flächenpotenziale zur Energiebiomasseproduktion sowie Reststoffpotenziale aus der Nahrungsmittelproduktion entnommen. Die Frage einer optimalen Kombination der Verwendungsmöglichkeiten von Flächen und Reststoffen zur Energiebereitstellung wird mittels linearer Programmierung gelöst. Hierfür gilt es zunächst, die Vielfalt an energetischen Verwertungsmöglichkeiten von Biomasse zu parametrisieren, also an ein standardisiertes Schema anzupassen. Der Rahmen für den Ergebnisraum der linearen Optimierung wird begrenzt von einer Reihe von Restriktionen. Die Struktur des Energiebedarfs der Betrachtungsregion gibt Obergrenzen für die verschiedenen Energieträger aus Biomasse. Institutionelle Rahmenbedingungen, wie etwa die Biotreibstoffrichtlinie der EU, geben Untergrenzen für eine minimale Ausdehnung bestimmter Energieträger vor. Hinsichtlich der Flächennutzung muss sich der anzubauende Biomasse-Mix in die bestehende Fruchtfolge der Nahrungsmittelerzeugung einpassen. Weiterhin soll die Ausdehnung der einzelnen Kulturen hinsichtlich klimatischer und standortspezifischer Aspekte eingegrenzt werden. Gesellschaftspolitische Wünsche können gewisse Kulturen ebenfalls in ihrer potenziellen Ausdehnung begrenzen.

Die Optimierung soll nach verschiedenen Zielen erfolgen. Ein nahe liegendes Ziel ist die Maximierung der Nettoenergieproduktion aus den vorhandenen Ressourcen. Weitere Ziele, wie etwa die Minimierung der Kosten zur Minderung von Treibhausgasemissionen oder die Maximierung des Anteils der Wertschöpfung im Sektor Landwirtschaft führen jeweils zu einem anderen optimalen Biomasse-Mix. Für den Schritt der Optimierung nach diesen Zielen sind weitere Kennzahlen, z. B. zum fossilen Energiesektor, notwendig. Für die Ableitung dieser Kennzahlen wird sich der allgemein gültigen Regeln der Ökobilanzierung bedient. Damit können vorhandene Kennzahlen genutzt und noch nicht vorhandene nach vergleichbarem Rechenschema abgeleitet werden.

Insgesamt wird die gesamte Theorie zur Ableitung eines optimalen Biomasse-Energie-Mix im Modell „*RegEnOpt*“ (Regenerative Energien Optimierung) dargestellt. Das Modell soll einen Rahmen bilden, der für verschiedenste Regionen mit deren spezifischen Kennzahlen angefüllt werden kann.

---

In der Anwendung für diese Studie wird als Region die Bundesrepublik Deutschland definiert. Die Kennzahlen zu den einzelnen Energieträgern mit ihren Nutzungsalternativen werden aus der Vergangenheit in die Zukunft projiziert. Ebenfalls soll der technischen Entwicklung und der Einführung von Innovationen im Energiesektor Rechnung getragen werden, indem momentan noch nicht in der Praxis angewandte Verfahren bei zukünftigen Optimierungszeitpunkten ihre Berücksichtigung finden. Momentan schon in der Praxis vertretene Verfahren sollen, soweit möglich, durch Verwendung von Lernfaktoren, sich in die Zukunft hinsichtlich Wirkungsgrade, Kosten etc. entwickeln dürfen.

Die Arbeit gliedert sich somit in zwei Schwerpunkte. Während der erste Schwerpunkt sich der Entwicklung des Modells „*RegEnOpt*“ widmet, werden im zweiten Schwerpunkt die nach verschiedenen Zielen optimierten Ergebnisse dargestellt und bewertet.

---

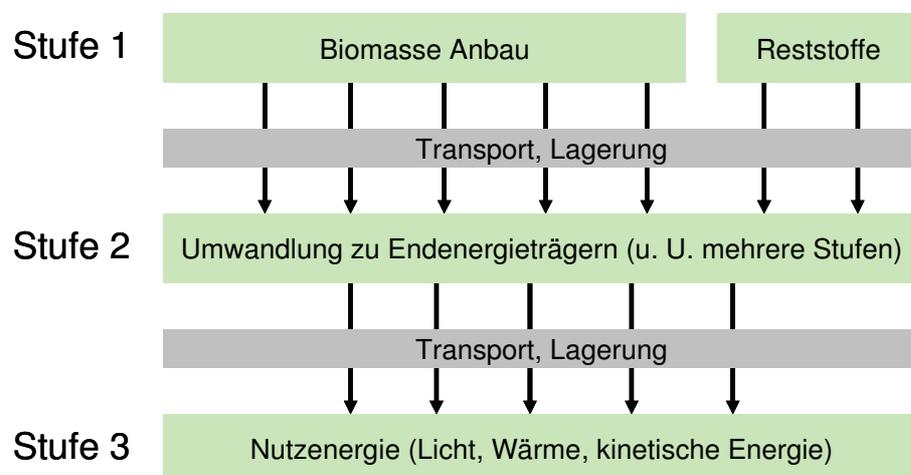


## 2 Material und Methoden

Ausgehend von der Hypothese, dass die landwirtschaftliche Nutzfläche den am stärksten limitierten Produktionsfaktor neben den weiteren Faktoren Kapital und Arbeit darstellt, gilt es, diesen Produktionsfaktor möglichst effizient einzusetzen. Der Pool der landwirtschaftlichen Nutzfläche, welcher für die Bioenergiebereitstellung zur Verfügung steht, ohne die klassische Nahrungsmittelerzeugung zu beeinträchtigen, kann je nach Nutzungsart einen mehr oder weniger großen Beitrag zum Erreichen eines oder mehrerer Ziele leisten. Zur Durchführung einer Optimierung des Nutzungsprogramms der Fläche sind eine Reihe vorbereitender Arbeitsschritte notwendig. Die gesamten Arbeitsschritte bis zur Darstellung der optimierten Produktionsprogramme werden im eigens zu diesem Zweck erstellten Modell „*RegEnOpt*“ (Regenerative Energien Optimierung) dargestellt.

Zunächst wird eine Vielzahl verschiedenster Biomasse-Rohstoffe, die auf landwirtschaftlichen Nutzflächen angebaut werden kann, sowie deren energetische Verwendungsmöglichkeiten erfasst. Dabei erfolgt die Darstellung anhand von Energieumwandlungspfaden in drei wesentlichen Stufen (Abbildung 2-1).

**Abbildung 2-1: Die drei Stufen der Energieumwandlungspfade im „*RegEnOpt*“**



Quelle: eigene Darstellung

Neben den eigens angebauten Ackerkulturen fließen auch die Erntegüter von Grünlandflächen und die Reststoffe aus der landwirtschaftlichen Urproduktion in den Pool der Rohstoffe mit ein. Somit stellt die Bereitstellung von Ackerkulturen, des Grünlandaufwuchses und von Reststoffen, wie z. B. Gülle, die Stufe 1 der Umwandlungspfade dar. Dieser Stufe 1 folgt nach spezifischen Transport- und Lageraktivitäten die Stufe 2. Hier werden die Rohstoffe zu Endenergieträgern umgewandelt, welche konsumfertigen Produkten entsprechen. Je nach Rohstoff und Verwendungsart wird diese Stufe in mehrere Unterstufen zerlegt. Nach weiteren Transport- und Lagerungsaktivitäten erscheint in Stufe 3 die bereitgestellte Nutzenergie in Form von „Energiedienstleistung“ aus elektrischem Strom, Wärme und kinetischer Energie. Entlang dieser Umwandlungsstufen werden alle in das Modell einfließenden Rohstoffe mit ihren spezifischen Umwandlungsketten dargestellt. Auf den einzelnen Stufen werden die notwendigen Parameter eines jeden Umwandlungspfades gesammelt, welche in den Prozess der abschließenden Optimierung einfließen müssen.

## **2.1 Stand des Wissens**

Die energetische Nutzung von Biomasse existiert seit Entdeckung des Feuers. Feste Biomasse war bis zu Zeiten der Industrialisierung der meist verwendete Energieträger. Mit Entdeckung der fossilen Energieträger und deren Etablierung als Grundlage der Energieversorgung rückte die Biomasse in den Hintergrund. Der durch die zunehmende Industrialisierung immens gestiegene Energiebedarf bei geringen Ausnutzungsgraden der Energieträger in den vergangenen beiden Jahrhunderten wäre allein mit Biomasse nicht zu bewerkstelligen gewesen. Aus den seit jüngster Vergangenheit immer intensiveren Auseinandersetzungen mit künftigen Energieversorgungsszenarien resultiert die Erkenntnis, dass das fossile Energiezeitalter keine langfristige Zukunft hat. Die jüngsten Entwicklungen auf den Energiemärkten zeigen, dass Regierungen und Wirtschaften gleichermaßen auf erneuerbare Energieträger setzen. Eine Vielzahl politischer Instrumente wird geschaffen, um den Erneuerbaren Energien einen möglichst raschen Marktzugang zu ermöglichen (HEINLOTH 1993, S. 15 ff., IEA 2004, IEA 2007). Im Folgenden soll zunächst die große Bandbreite der energetischen Nutzungsmöglichkeiten der Biomasse skizziert werden. Darauf folgt ein Überblick über die derzeitigen politischen Rahmenbedingungen zur direkten und indirekten Förderung dieser Energieträger.

### **2.1.1 Nutzungspfade der energetischen Biomasseverwendung**

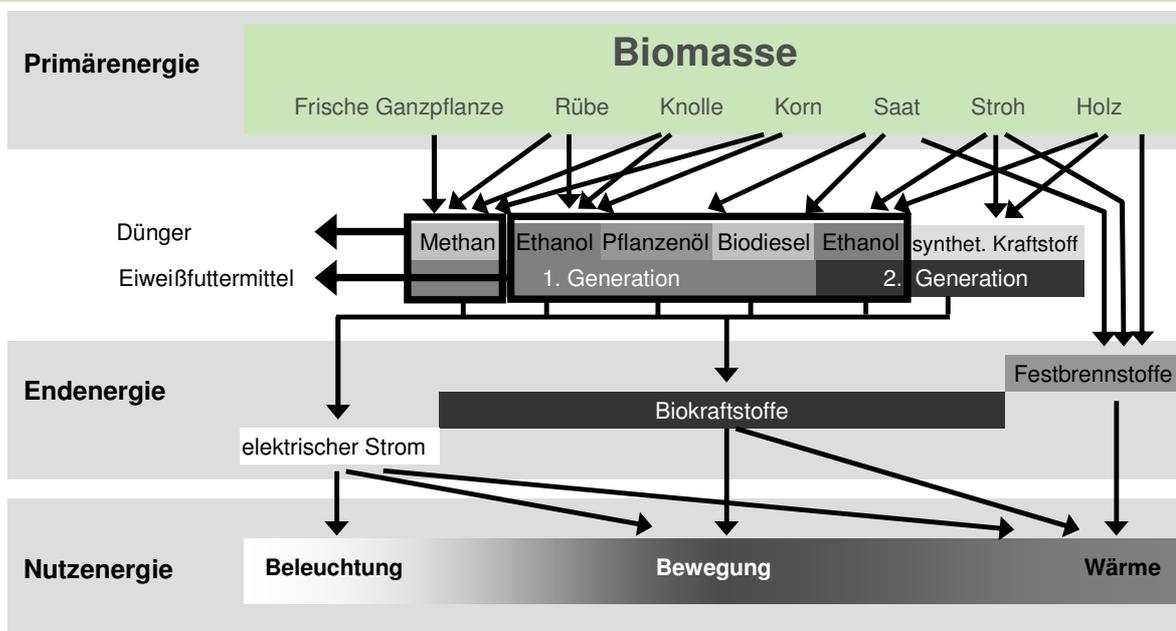
Die Art der Verwendung von Biomasse ergibt sich aus den Bedürfnissen der Menschen nach Energiedienstleistungen. Grundsätzlich werden drei wesentliche Nutzenergieformen benötigt: Licht, Wärme sowie kinetische Energie (Bewegung). Diese gefragten Nutzenergieformen können auf unterschiedlichste Art und Weise erzeugt werden. Einen Überblick über die Energienutzungspfade der Biomasse gibt Abbildung 2-2.

Biomasse stellt gespeicherte Sonnenenergie dar. Die lange Zeit nahezu ausschließliche Nutzung der Biomasse als Festbrennstoff zur Wärmeerzeugung ist derzeit wegen der wesentlich

---

komfortableren flüssigen und gasförmigen fossilen Energieträger nicht mehr zeitgemäß. Daraus ergab und ergibt sich weiterhin das Bestreben, aus der Biomasse Energieträger zu erzeugen, die den gewohnten, fossilen Energieträgern gleichen.

Abbildung 2-2: Energetische Verwertungsmöglichkeiten von Biomasse



Anmerkung: schematische Darstellung, die Balkenbreiten stehen in keinem Zusammenhang mit tatsächlichen Umfängen bzw. Bedarfs- und Leistungsstrukturen.

Quelle: eigene Darstellung

Biomasse ist nicht nur ein Kohlenwasserstoffgerüst, das mit Stickstoff und anderen Mineralstoffen durchsetzt ist. Vielmehr erzeugt die Natur in der Biomasse eine große Vielfalt verschiedenster Stoffgruppen (Tabelle 2-1), die sich in verschiedenster Weise nicht nur für energetische Nutzungsarten eignen.

Tabelle 2-1: Landwirtschaftliche Nutzpflanzen und deren spezifischen Produkte

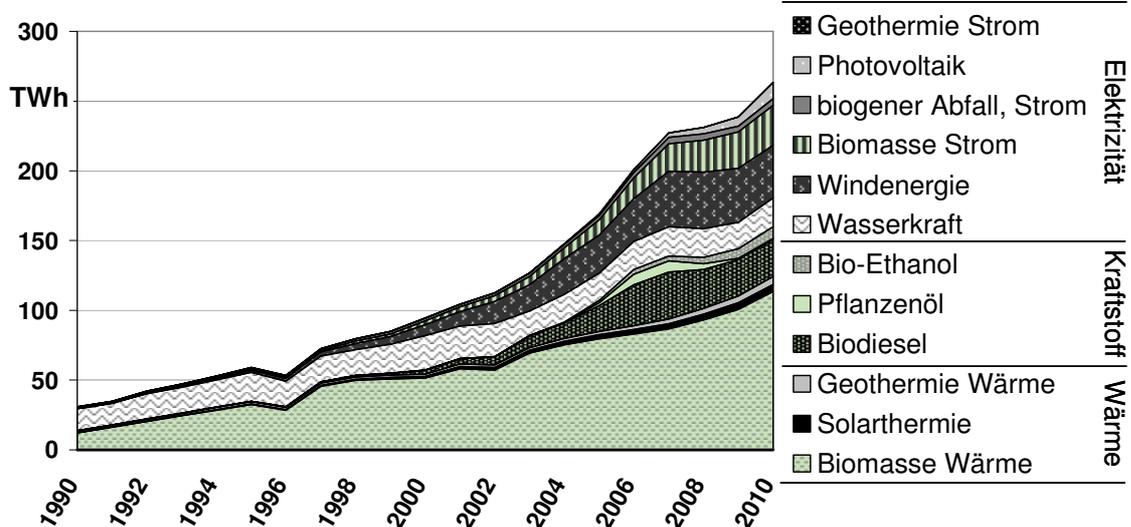
Stoffgruppe	Lignozellulose	Öl	Zucker	Stärke
Pflanzen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• schnellwachsende Baumarten</li> <li>• Miscathus</li> <li>• Rutenhirse</li> <li>• Rohrglanzgras</li> <li>• Futtergräser</li> <li>• Getreideganzpflanzen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Raps</li> <li>• Sonnenblume</li> <li>• Hanf</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zuckerrübe</li> <li>• Zuckerhirse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kartoffel</li> <li>• Topinambur</li> <li>• Getreide</li> <li>• Mais</li> </ul>

Quelle: eigene Darstellung nach KALTSCHMITT und HARTMANN 2001

Lignozellulosehaltige Pflanzen dienen derzeit ausschließlich der thermischen Nutzung. Die Verwendung lignozellulosehaltiger Rohstoffe zur Erzeugung von Bioethanol befindet sich derzeit im Entwicklungsstadium (FNR 2006b, S. 67 ff. u. S. 213 ff.). Eine weitere Entwicklung stellen verschiedene Verfahren zur Herstellung von synthetischen Biokraftstoffen dar. Auch diese Verfahren befinden sich nun schon seit Jahren im Entwicklungsstadium. Die Schwierigkeit besteht im Transfer der im Labormaßstab funktionierenden Prozesse auf industrielle Größenordnungen (FNR 2006b, S. 166 ff., CHOREN INDUSTRIES 2011). Aktuell werden zucker- und stärkehaltige Rohstoffe für die Bioethanolproduktion herangezogen. Ebenso eignen sich diese Pflanzen für die Biogaserzeugung, der Gewinnung von Methan. Ölpflanzen werden nicht biochemisch umgewandelt wie die zucker- und stärkehaltigen Pflanzen, sondern sie werden durch physikalische und chemische Prozesse zu gewünschten Energieträgern umgesetzt.

Im zeitlichen Ablauf hat Biomasse als Festbrennstoff die längste Tradition. In Mitteleuropa stellt Holz den am meisten genutzten Biomasse-Festbrennstoff dar. Einen Überblick über die Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland seit dem Jahr 1990 zeigt Abbildung 2-3.

**Abbildung 2-3: Zeitliche Entwicklung der Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien seit 1990 in Deutschland**



Quelle: eigene Darstellung nach BMU 2006, BMU 2007, BMU 2011a

Der klassische Hausbrand ist vor allem in ländlichen Gebieten weit verbreitet und genießt seit jüngster Vergangenheit steigende Beliebtheit. Eine zweite Form der erneuerbaren Energien stellt die Biogaserzeugung dar. Biogasanlagen etablierten sich vor allem als Gülleanlagen in landwirtschaftlichen Betrieben seit etwa 1950. In wenigen Anlagen bundesweit wurden viele wertvolle Erfahrungen gesammelt, die mit Einführung einer ersten Mindestvergütung für den erzeugten elektrischen Strom im Jahr 1990 einen ersten rasanten Anstieg der Biogasanlagenzahl ermöglichten (SCHULZ und EDER 2001, S. 8 ff, EDER und SCHULZ 2006, S. 10 ff.). Einen

zweiten Schub erfuhr die Biogasbranche mit Einführung des Erneuerbaren Energien Gesetzes im Jahr 2000, als die Mindestvergütungssätze für Strom, der aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen wird, erheblich angehoben wurden. Der so genannte Biogas-Boom wurde im Jahr 2004 durch die Novellierung des EEG mit Einführung des so genannten Biomasse-Bonus ausgelöst. Seit dem hält der Zubau von Biogasanlagen an. Mit der erneuten Novellierung des EEG für das Jahr 2009 wurden im Bereich energetische Nutzung von Biomasse vor allem kleinere Biogasanlagen verstärkt gefördert. Die jüngste Novellierung des EEG mit in Kraft Treten am ersten Januar 2012 setzt die besondere Förderung des Einsatzes von Reststoffen wie z. B. Gülle fort (BGBL. 2000, BGBL. 2004, BGBL. 2008a, BGBL. 2011).

Die Biotreibstoffherzeugung initiierte Brasilien zu Zeiten der Ölkrisen. Aus dem Zuckerrohr wurde und wird immer noch in großem Stil Bioethanol erzeugt und entweder als Reinkraftstoff, meist jedoch als Mischung mit fossilem Ottokraftstoff genutzt. In Deutschland begann die Biotreibstoffherzeugung Anfang der 1990er Jahre mit der Produktion von Biodiesel auf Basis von Rapsöl. Die Steuerbefreiung für reine Biokraftstoffe seit dem Jahr 1992 (BGBL. 1992) ermöglichte eine gegenüber fossilem Dieselmotorkraftstoff wettbewerbsfähige Produktion. Die Regelungen zur Steuerbefreiung wurden im Jahr 2002 dahingehend aktualisiert, dass nun derjenige Anteil von Kraftstoffen steuerbefreit ist, der biogenen Ursprungs ist (HENKE et al. 2002, S. 4, BGBL. 2002b). Mit dem Energiesteuergesetz und dem Biokraftstoffquotengesetz werden die Regelungen im Umgang mit Biokraftstoffen fortgeschrieben (BGBL. 2006ab, BGBL. 2011). Gerade diese politischen Rahmenbedingungen ermöglichten und ermöglichen neben der traditionellen thermischen Verwertung von Holz sowie der Nutzung der Wasserkraft zur Elektrizitätserzeugung die Etablierung eines breiten Spektrums erneuerbarer Energien in Deutschland.

Im Rahmen dieser Arbeit werden lediglich die auf Biomasse basierenden erneuerbaren Energieformen näher betrachtet. Wie Abbildung 2-2 verdeutlicht, existieren viele Möglichkeiten, aus Biomasserohstoffen konsumfähige Energieträger bzw. Nutzenergie zu erzeugen. Tabelle 2-2 zeigt eine Übersicht über ausgewählte spezifische Rohstoffansprüche zur Erzeugung von konsumfähigen Bioenergieträgern.

Je nach Umwandlungspfad der Biomasse zum gewünschten Energieträger treten spezifische Umwandlungsverluste auf. Entsprechend variiert der spezifische Rohstoffbedarf je Einheit Endenergieträger in Abhängigkeit vom Konversionsverfahren.

Die in Tabelle 2-2 dargestellte Energieeffizienz entspricht einer Art Bruttoenergieeffizienz ohne Berücksichtigung von Gutschriften bzw. Bewertung der Koppelprodukte. Es ist deutlich sichtbar, dass die direkte Verwertung der Biomasse als Festbrennstoff zur Wärmeabgewinnung am effizientesten ist. Bei der Konversion der Biomasse zu Kraftstoffen bzw. Biogas treten prozess- und rohstoffspezifische Verluste auf.

**Tabelle 2-2: Ausgewählte spezifische Rohstoffansprüche zur Erzeugung konsumfähiger Endenergieträger**

Kultur	Erntegut	TS-Gehalt	Rohstoff- bedarf	pro	Bezugs- einheit	Endenergie- träger	Energie- effizienz <sup>1)</sup>
Weizen	Korn	86%	2,5 kg FM	/	1 l	Ethanol	58%
Weizen	Korn	86%	1,2 kg FM	/	1 kg <sub>atro</sub>	Festbrennstoff	100%
Weizen	Korn	86%	3,2 kg FM	/	1 m <sup>3</sup>	Methan (Biogas)	77%
Weizen	Stroh	85%	1,2 kg FM	/	1 kg <sub>atro</sub>	Festbrennstoff	100%
Raps	Saat	91%	2,3 kg FM	/	1 l	Pflanzenöl	61%
Raps	Saat	91%	2,2 kg FM	/	1 l	RME	62%
Mais	Silage	32%	10,4 kg FM	/	1 m <sup>3</sup>	Methan (Biogas)	61%
Zuckerrübe	Rübe	23%	9,3 kg FM	/	1 l	Ethanol	60%
Kartoffel	Knolle	23%	12,0 kg FM	/	1 l	Ethanol	47%
Pappel	Holz	50%	7,8 kg FM	/	1 l	BTL	46%
Pappel	Holz	50%	2,0 kg FM	/	1 kg <sub>atro</sub>	Festbrennstoff	100%
Grünland int.	Silage	32%	11,7 kg FM	/	1 m <sup>3</sup>	Methan (Biogas)	58%
Grünland ext.	Heu	85%	1,2 kg FM	/	1 kg <sub>atro</sub>	Festbrennstoff	100%

<sup>1)</sup> Energiegehalt Endenergieträger / Energiegehalt Biomasserohstoff

**Abkürzungen:** int.: intensiv, ext.: extensiv bewirtschaftet; atro: absolut trocken

Quellen: eigene Darstellung nach KALTSCHMITT und HARTMANN 2001, S. 591; SCHMITZ et al. 2003, 46 ff.; DREIER und TZSCHEUTSCHLER 2000, S. 22 ff.; LEIBLE et al. 2005, S. 9; KTBL 2005, S. 15; FNR 2005c; QUIRIN et al. 2004, S. 7

Entsprechend der politischen Rahmenbedingungen werden aktuell jedoch gerade die Konversionspfade in erheblichem Umfang ausgebaut. Vor allem im Biogassektor wird das erzeugte Biogas einem weiteren Verarbeitungsschritt unterzogen und in Blockheizkraftwerken zu elektrischem Strom umgewandelt. Dieser zweite Konversionsschritt ist wiederum mit erheblichen Energieverlusten verbunden.

Im Folgenden soll nun etwas ausführlicher auf die Bereitstellung einzelner Biomasserohstoffe sowie auf die Erzeugung von Bioenergieträgern aus Biomasse eingegangen werden.

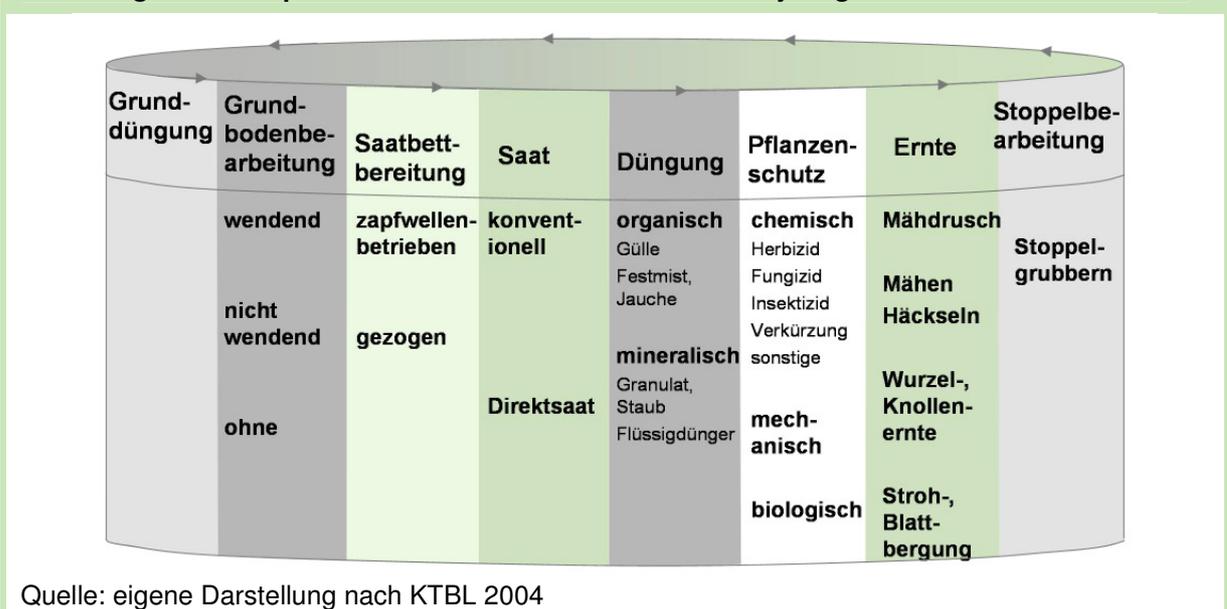
### 2.1.1.1 Die Bereitstellung von Biomasse

Die Bereitstellung bzw. der Anbau von Biomasse unterliegt dem Jahresverlauf der verschiedenen Jahreszeiten. Am weitesten verbreitet hinsichtlich des Anbauumfangs sind einjährige Kulturen. Winterkulturen werden im Herbst vor der Ernte ausgesät, überwintern im Jugendstadium um im Frühjahr möglichst schnell aus der vegetativen in die generative, sprich Samen bildende Phase zu kommen. Sommerkulturen demgegenüber sind nicht winterhart genug und werden dementsprechend erst dann ausgesät, wenn keine Kälteschädigung mehr zu erwarten ist. Der grundsätzliche Ablauf des Anbaues ist bei den einjährigen Kulturen jedoch relativ ähnlich, wie in Abbildung 2-4 skizziert.

Häufig beginnt der Start des Anbaues einer neuen Kultur mit der Grunddüngung. Kalk-, Phosphat- und Kalidünger können nach Ausbringung noch in den Boden eingearbeitet werden. Gleiches gilt vor allem für Festmist, der nur noch in wenigen landwirtschaftlichen Betrieben in der Tierhaltung anfällt. Mit der Grundbodenbearbeitung wird das von der Vorfrucht

verbliebene Pflanzenmaterial in den Boden eingearbeitet und der Boden gleichzeitig gelockert. Bei der wendenden Grundbodenbearbeitung wird der Boden mittels Pflugeinsatz tatsächlich gewendet. Gerade nicht erwünschte Begleitunkräuter werden im Boden verschüttet. Die nicht wendende Grundbodenbearbeitung erfolgt mittels Grubber und soll ebenso wie die wendende Grundbodenbearbeitung optimale Voraussetzungen für ein rasches und sicheres Keimen schaffen. Bei speziellen Anbausystemen wird gänzlich auf eine Grundbodenbearbeitung verzichtet. Mittels spezieller Sätechnik erfolgt eine so genannte Mulchsaat direkt in den Boden, wie er nach der Ernte der Vorfrucht verblieben ist. Auf die weit verbreitete Grundbodenbearbeitung folgt die Saatbettbereitung. Dabei wird der Boden mittels gezogener Geräte wie z. B. Eggen oder mit zapfwellenangetriebenen Bodenbearbeitungsgeräten zum optimalen Saatbett der Kultur vorbereitet. Das heißt, der Boden wird bis auf die gewünschte Saattiefe rückverdichtet, der Boden oberhalb des Saathorizontes eingeebnet und auf die gewünschte Krümelstruktur zerkleinert. Die Saat erfolgt je nach Kultur als Drillsaat (Getreide, Raps), Einzelkornsaat (Mais, Zuckerrübe) oder durch Auslegen von Sprosstielen (Kartoffel, Miscanthus). Gelegentlich wird der Boden durch Walzen nach der Saat zusätzlich verdichtet, um einen optimalen Bodenschluss und somit eine optimale Wasserversorgung für das Saatgut zu erreichen.

Abbildung 2-4: Exemplarischer Ablauf des Anbaues von einjährigen Ackerkulturen



Zur Nährstoffversorgung erfolgen v. a. mehrere Stickstoffgaben, da Stickstoff die Eigenschaft hat, in mineralischer Form aus dem Boden ausgewaschen und somit für die Pflanze verloren zu gehen. Landwirtschaftliche Betriebe mit Tierhaltung düngen v. a. im Frühjahr mit Gülle. Weitere Gaben erfolgen mit mineralischen Stickstoffdüngern. Zur Sicherung des Ertrages und der Qualität werden verschiedene Pflanzenschutzmaßnahmen durchgeführt. Herbizide sollen den Bestand vor zu hohem Konkurrenzdruck von so genannten Unkräutern bewahren. Fungi-

zide schützen vor Pilzbefall und sichern somit die Qualität. Insektizide verhindern Schäden durch Insekten. Mit Wachstumsreglern werden vor allem Getreidebestände im Halmwachstum gebremst, was kürzere und stabilere Halme zur Folge hat. Die Gefahr, dass hochartragreiche Bestände ins Lager gehen, kann somit reduziert werden. Im ökologischen Landbau wird auf mineralische Dünger sowie auf chemischen Pflanzenschutz gänzlich verzichtet. Ein mechanischer Pflanzenschutz, wie z. B. Striegeln, kann zumindest den Unkrautdruck etwas mindern. Qualitäts- und Ertragseinbußen durch Pilzbefall müssen hier mit weiteren Pflanzenabständen und somit insgesamt geringer Bestandesdichte vermindert werden. Insgesamt ist das Ertragsniveau im ökologischen Landbau niedriger als bei konventioneller Wirtschaftsweise. Die Ernte erfolgt voll mechanisiert mit Spezialmaschinen, die meist überbetrieblich eingesetzt werden. Je nach Kultur und Erntezeitpunkt folgt nach der Ernte noch eine flache Bodenbearbeitung um z. B. das Ausfallgetreide zum Keimen zu bringen. Damit wird verhindert, dass dieses Ausfallgetreide die Folgefrucht als Unkraut beeinträchtigt. Das meist auf der Fläche verbleibende Stroh bzw. Kraut kann u. U. ebenfalls geborgen und energetisch verwendet werden.

Bei mehrjährigen Kulturen erfolgen bei Anlage der Kultur bzw. der Plantage die Vorbereitung des Bodens sowie die Aussaat einmal für viele folgende Vegetationsperioden. In den Folgejahren gilt es, den Bestand zu pflegen und zu fördern. Je nach Kulturart kann schon im ersten Jahr oder erst nach einigen Jahren geerntet werden. Bei Energiekulturen wie Pappel-Kurzumtriebplantagen erfolgt alle drei bis fünf Jahre eine Ernte. Miscanthus als mehrjährige Energiekultur kann jährlich im Winter beerntet werden. Düngungs- und Pflanzenschutzzeitpunkte orientieren sich u. a. an der Befahrbarkeit der Bestände.

Dauergrünland stellt in diesem Zusammenhang eine Sonderform der Dauerkultur dar. Der Boden wird nicht bearbeitet. Eine regelmäßige Aussaat findet nicht statt. Lediglich lückige Bestände werden gelegentlich nachgesät. Die Ernte findet mehrmals im Jahr statt. Je nach Bewirtschaftungsintensität können zwei bis fünf Schnitte erfolgen.

Die Ansprüche der Kulturen orientieren sich am für die Region spezifischen Ertragsniveau. Niederschlagsmenge und -verteilung sowie die Jahrestemperatursumme beeinflussen neben der Bodenart und Bewirtschaftungsweise die Erträge. Um ein möglichst hohes Ertragsniveau erreichen zu können, bedarf es einer entsprechenden Saatstärke, aber vielmehr noch einer bedarfsgerechten Düngung. Hinsichtlich der in der Vergangenheit realisierten Erträge existiert sehr viel Datenmaterial zu den klassischen Agrarhandelsgütern wie Getreide, Kartoffeln etc. Weniger Datenmaterial existiert zu Futterfrüchten wie Getreideganzpflanzensilage, und kaum Datenmaterial ist zu Koppelprodukten wie Stroh, Blatt oder Kraut zu finden. Es existieren jedoch Koeffizienten zu den verschiedenen Ackerkulturen, die das Haupternteprodukt-Nebenprodukt-Verhältnis (HNV) ausdrücken. Aus den Ertragsdaten der Hauptprodukte (Körner, Rüben, Knollen) lässt sich somit der Strohertrag bzw. bei Getreide der Ganspflanzensilageertrag erschließen (Abbildung 2-5).

---

**Abbildung 2-5: Ableitung des Stroh- bzw. GPS-Ertrages aus dem Kornertrag****Strohertrag**

$$Y_{\text{Stroh}} [tFM / ha] = (Y_{\text{Korn}} \cdot HNV)$$

**Ertrag GPS**

$$Y_{\text{GPS}} [tFM / ha] = (Y_{\text{Korn}} \cdot \%TS_{\text{Korn}} + Y_{\text{Stroh}} \cdot \%TS_{\text{Stroh}}) \cdot (\%TS_{\text{GPS}})^{-1}$$

$Y$ : Ertrag

$HNV$ : Haupternteprodukt-Nebenprodukt-Verhältnis (z.B. Korn:Stroh-Verhältnis)

Quelle: eigene Darstellung

Folgende Tabelle 2-3 zeigt die mit Abbildung 2-5 geschätzten Stroh- und GPS-Erträge für Winterweizen zum Trendertrag des Jahres 2005. Eine analoge Übersicht über alle Ackerkulturen befindet sich im Anhang in der Anhangtabelle 1. Neben den spezifischen Erträgen enthält Tabelle 2-3 Information zum Trockenmassegehalt und Energiegehalt der Erntegüter sowie die Ansprüche an Saatgut sowie an die Makronährstoffe Stickstoff, Phosphor und Kali. Weitere Nährstoffe, die zur Pflanzenernährung notwendig sind, werden im Rahmen dieser Studie nicht betrachtet.

**Tabelle 2-3: Trenderträge des Jahres 2005 sowie Ansprüche an Saatgut und Nährstoffe von Winterweizen**

Kultur Erntegut	Trend- ertrag <sup>1)</sup> t FM/ha	HN <sup>2)</sup> 1 : ___	TM- Gehalt %	Energiegehalt in der TM MJ/kg TM	Saatgut/ Pflanzgut Einheiten/ha	Nährstoffzüge		
						N kg/t FM	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> kg/t FM	K <sub>2</sub> O kg/t FM
<b>Winterweizen</b>								
Korn	7,7	0,8	86%	17,0	180 kg	18,0	8,0	6,0
Stroh	6,2		85%	17,2		5,0	3,0	14,0
GPS	34		35%	17,1		5,6	2,3	4,7

<sup>1)</sup> Trenderträge nach EUROSTAT von 1991 bis 2005, Erträge von Stroh, und GPS geschätzt aus Ertrag Korn, HN<sup>2)</sup> und TM-Gehalte

<sup>2)</sup> HN<sup>2)</sup>: Haupternteprodukt-Nebenprodukt-Verhältnis

Quelle: eigene Darstellung nach EUROSTAT 2008, LFL 2006, LFL 2007, KALTSCHMITT und HARTMANN 2001, S. 264

Die klassischen Ackerkulturen wie Getreide, Mais, Raps, Kartoffeln, Zuckerrüben und Sonnenblumen werden hier nicht näher erklärt. Zumindest ein kleines Augenmerk soll den noch nicht sehr weit verbreiteten Kulturen geschenkt werden, die in so genannten Energiefruchtfolgen an Bedeutung gewinnen könnten.

**Topinambur** gehört zur Familie der Korbblütler, erreicht eine Wuchshöhe von zwei bis drei Metern und besitzt reich belaubte Stängel und eine gelbe Blüte. Das Haupternteprodukt stellen die sprossbürtigen Knollen dar, die ähnlich der Kartoffel geerntet werden (RÖHRICHT 2002). Die Knolle enthält etwa 15 Prozent des Reserve-Kohlenhydrates Inulin, ein Polysaccharid, das aus Fruktoseresten aufgebaut ist (KALTSCHMITT und HARTMANN 2001 S. 594).

Verwendung findet die bisher noch nicht weit verbreitete Kultur als Chemierohstoff zur Inulin- und Fruktosegewinnung. Möglich ist jedoch auch die Erzeugung von Bioalkohol. Die oberirdische Pflanzenmasse kann frisch als Biogassubstrat oder abgestorben als Festbrennstoff genutzt werden (RÖHRICHT 2002). Das Anbauverfahren gleicht der Kartoffel, was einen siebfähigen und steinfreien Boden erfordert. Eine gute Wasserversorgung gerade von August bis Oktober, während der Hauptwachstumsphase, ermöglicht Erträge von 250 bis 400 Dezitonnen Knollen je Hektar sowie 300 bis 380 Dezitonnen Kraut. Die Fruchtfolgeansprüche sind gering, problematisch ist eher der Durchwuchs von Topinambur in der Folgefrucht. Ein mehrjähriger Anbau von bis zu drei Jahren scheint wirtschaftlich sehr günstig (RÖHRICHT 2002).

**Miscanthus**, auch Chinaschilf genannt, ist eine ausdauernde C<sub>4</sub>-Gräserart mit einer Höhe von bis zu vier Metern, die aus tropischen bzw. subtropischen Klimaregionen des ostasiatischen Raumes stammt. In Europa werden vor allem triploide Hybridsorten angebaut, die eine extrem hohe vegetative Wuchsleistung aufweisen, jedoch nicht blühen. Die Vermehrung erfolgt somit nur vegetativ über die unterirdischen Rhizome (FNR 2005c, RÖHRICHT 2006). Die Art *Miscanthus giganteus* bildet unterirdische Horste, während die Art *Miscanthus sinensis* unterirdische Ausläufer ausbildet (RÖHRICHT 2006). Die Ansprüche an die Bodenart und Güte sind gering. *Miscanthus* ist jedoch stark auswinterungsgefährdet, weshalb ein Anbau auf frostdisponierten Lagen zu vermeiden ist. Die Pflanzung erfolgt durch Ablage der faustgroßen Rhizomstücke ähnlich der Kartoffellegetechnik, jedoch sollte der Häufelkörper durch eine Druckrolle ersetzt werden (RÖHRICHT 2006). Die mehrjährige Kultur bietet stabile Erträge ab dem dritten Jahr von 15 bis 20 Tonnen Trockenmasse je Hektar und Jahr auf mittleren bis guten Böden. Geerntet wird ausgangs des Winters, wenn die Stängel abgestorben und weitgehend entblättert sind. Die Ernte kann entweder mit dem Feldhäcksler oder mit der Ballenlinie (Schwadmäher und Ballenpresse) erfolgen (RÖHRICHT 2006). Verwertung findet die zellulosehaltige Pflanze bei der Herstellung hochwertiger Zellulose oder im energetischen Bereich als Festbrennstoff (RÖHRICHT 2006).

**Zuckerhirse** gehört zur Artengruppe der großkörnigen Hirsearten, den so genannten Sorghum-Hirsen und ist wie Mais und *Miscanthus* eine C<sub>4</sub>-Pflanze (RÖHRICHT und HERRMANN 2007b). Die Pflanze stellt geringe Ansprüche an den Boden, günstig sind jedoch Böden mit stabiler Struktur, die nicht zur Verschlammung neigen, was den Aufgang erheblich behindern kann. Die Saat erfolgt mit klassischer Drilltechnik Ende Mai bis Anfang Juni in ein feines und abgesetztes Saatbett. Durch die langsame Jugendentwicklung besteht ein hohes Verunkrautungspotenzial. Weil jedoch derzeit in Deutschland keine zugelassenen Pflanzenschutzmittel existieren, kann die Verunkrautung nur durch eine Einzelfallgenehmigung für den Herbizideinsatz gemindert werden. Die Ernte erfolgt von Anfang September bis Mitte Oktober mit dem Maishäcksler. Der genaue Termin wird vom Trockensubstanzgehalt der Pflanze bestimmt, denn eine sichere Silierung erfordert Trockensubstanzgehalte von 28 bis 35 Prozent (TLL 2007b). Die Pflanze eignet sich hervorragend als Viehfutter oder als Substrat in der

Biogasanlage, wo zum Silomais vergleichbare Biogaserträge erzielbar sein sollen. In den USA wird die Zuckerhirse als Rohstoff zur Bioethanolgewinnung genutzt (RÖHRICHT und HERRMANN 2007b, TLL 2007b).

**Sudangras** gehört wie die Zuckerhirse zu den Sorghum-Hirsen und ist ebenfalls eine C<sub>4</sub>-Pflanze. Der Anbau erfolgt wie bei der Zuckerhirse, eine Aussaat bis Mitte August ist möglich. Der Erntezeitpunkt ist optimal zu Beginn des Rispschiebens gewählt, weil ab diesem Stadium eine starke Verholzung der Pflanze einsetzt (RÖHRICHT und HERRMANN 2007a). Der Trockensubstanzgehalt der Pflanze liegt dann jedoch erst bei circa 20 Prozent, was bei der Silierung zur Sickersaftbildung führt. Sudangras ist u. a. als Zweit- oder Stoppelfrucht möglich. Je nach Witterungsbedingungen und Aussaattermin können auch mehrere Schnitte geerntet werden. Insgesamt ist die Sudangrassilage als Viehfutter oder Biogassubstrat einsetzbar, wobei der Futterwert als etwas geringer einzuschätzen ist als der von Maissilage (RÖHRICHT und HERRMANN 2007a, TLL 2007a).

Als **Schnellwachsende Baumarten** sind Pappeln und Weiden am weitesten verbreitet. Sie werden als so genannte Kurzumtriebsplantagen auf Acker- oder Grünlandflächen angelegt und stellen eine landwirtschaftliche Dauerkultur dar. Spezielle frohwüchsige Pappelklone und Weidenarten eignen sich u. a. wegen des Stockausschlagvermögens nach der Ernte sowie einer starken Jugendwüchsigkeit besonders. Die vegetative Vermehrbarkeit durch Stecklingsbewurzelung ermöglicht die Anlage der Plantage in vertretbarem Kostenumfang. Dabei werden einjährige Triebe in der Vegetationsruhe zu 20 cm langen Steckhölzern geschnitten, die dann im Frühjahr gepflanzt werden. Je nach Unkrautdruck der Fläche kann eine Totalherbizidmaßnahme vor der Pflanzung die Jugendentwicklung der Stecklinge erheblich fördern (RÖHRICHT und RUSCHER 2006, WERNER et al. 2006). Der Reihenabstand und die Bestandesdichte der Plantage bei der Anlage hängen ab vom Ernteverfahren. So dürfen die Stockdurchmesser für den Gehölmähhäcksler (selbstfahrender Feldhäcksler mit Holzerntevorsatz) maximal 12 cm betragen, was kurzen Umtriebszeiten und engere Bestandesdichten entspricht. Bei absätziger Ernte mit Fällen und gebündeltem Ablegen und anschließendem separatem Hacken können bei längerer Umtriebszeit und weiteren Bestandesdichten auch dickere Stämme verarbeitet werden. Gerade das absätzliche Ernten hat den Vorteil, dass zwischen Ernte und Hacken eine Ganzstamm-trocknung am Feldrand erfolgen kann, was letztendlich bei den Hackschnitzeln zu geringeren Masseverlusten im Lager führt (LWF 2005, HARTMANN und KALTSCHMITT 2002, S. 83 ff.). Den Erntezeitpunkt bestimmt die Befahrbarkeit des Bodens, die im Winter bei Frost am besten ist. Zu diesem Zeitpunkt ist das Schädigungspotenzial an den Baumstümpfen auch am geringsten. Das Ertragspotenzial schwankt je nach Standort und Klon erheblich. Im Mittel werden üblicherweise mit zehn Tonnen Trockenmasse pro Hektar und Jahr gerechnet (HOFFMANN 1999 und WERNER et al. 2006). Das Holz dient schon seit Jahren als Rohstoff für die Zellstoff- und die Spanplattenindustrie. Seit den jüngst gestiegenen Rohölpreisen wird der Einsatz als Festbrennstoff zunehmend interessanter. Darüber hinaus wird Holz als ein möglicher Rohstoff zur BtL-Erzeugung diskutiert (RÖHRICHT und RUSCHER

2006, LEIBLE et al. 2005). Nach der circa 20-jährigen Nutzung der Kurzumtriebsplantage muss eine Rekultivierung erfolgen. Die Wurzelstöcke müssen dabei entweder entfernt oder mit einer so genannten Rodungsfräse soweit zerkleinert werden, dass zum einen eine Folgekultur angebaut werden kann und zum anderen möglichst wenig vom Plantagenbestand wieder austreibt (HARTMANN und KALTSCHMITT 2002, S. 87).

### **2.1.1.2 Erzeugung von Bioenergieträgern aus Biomasse**

Wie in Abbildung 2-2 skizziert, besteht eine große Fülle an Möglichkeiten und Verfahren, aus dem Pflanzenartenreichtum bezüglich Rohstoffen bzw. Inhaltstoffen verschiedenste Endenergieträger und daraus wiederum die gewünschte Nutzenergie zu erzeugen.

Als erster Umwandlungsschritt erfolgt die Erzeugung von festen, flüssigen oder gasförmigen Energieträgern aus den Biomasserohstoffen, die zum einen schon zur Bereitstellung einer gewünschten Nutzenergie dienen können. Zum zweiten können sie weiter verarbeitet werden zu noch höherwertigeren Energieträgern.

#### **Festbrennstoffe**

Die einfachste Form der Energiebereitstellung aus Biomasse stellen die Festbrennstoffe dar. Es erfolgen hierbei keine chemischen oder biologischen Umwandlungen. Lediglich physikalische Bearbeitungsschritte werden meist durchgeführt. Dies kann eine Zerkleinerung und / oder eine Verdichtung sein. Scheitholz ist die einfachste Zerkleinerungsform von Brennholz. Die Bereitstellung erfolgt zwischen einer nahezu kompletten Handarbeit und der vollmechanisierten Bereitstellungskette. Der Prozess untergliedert sich in Fällen, Rücken zum Polterplatz und Sägen und Spalten auf die gewünschte Scheitgröße. Technisch aufwändiger ist die Erzeugung von Häckselgut aus Holz bzw. nicht verholzter trockener Biomasse bzw. das Verpressen von Halmgut zu Hochdruckballen. Die Hackschnitzelbereitstellungskette ist weitgehend mechanisiert, der Prozess ähnelt der vollmechanisierten Scheitholzbereitstellung. Je nach Größenordnung wird der Hacker mit der Hand oder mit einem Kran beschickt. Das Häckseln und Pressen von strohartiger Biomasse geschieht in einer vollmechanisierten Prozesskette. Noch höhere Aufwendungen technischer und energetischer Art bedarf es bei der Erzeugung von Briketts oder Pellets aus zuvor zerkleinerter Biomasse. Demgegenüber steht jedoch der Vorteil eines definierten Brennstoffs, der zudem relativ wenig Lagerraum je Energieeinheit erfordert. Die Einsatzmöglichkeiten fester Brennstoffe sind begrenzt auf den stationären Bereich zur Wärmeerzeugung oder beim Einsatz in Kraftwerken zur Stromerzeugung.

Ein Hemmnis der thermischen Verwertung nichtholzartiger Brennstoffe stellen die bestehenden Vorschriften bezüglich der Emissionen dar. Der Grund höherer Schadgasemissionen der nichtholzartigen Biomasse liegt u. a. am insgesamt höheren Aschegehalt und somit den höheren Haupt- und Spurenelementgehalten (HARTMANN et al. 2003, S. 51 ff. u. S. 123 ff.).

Hinsichtlich der Brennstoffeigenschaften und des Aschegehaltes ergeben sich weitere Probleme bei Verbrennung von nichtholzartiger Biomasse. Hohe Gehalte der Erdalkalien Calcium

---

und Magnesium erhöhen die Ascheschmelztemperatur, während hohe Gehalte der Alkalien Natrium und Kalium sowie Chloride die Ascheschmelztemperatur senken. Gerade halmgutartige Biomasse ist reich an Kalium und Chlor, weswegen hier bei der Verbrennung niedrige Brenntemperaturen realisiert werden müssen (FNR 2005c, S. 127 und HARTMANN et al. 2003, S. 54). Darüber hinaus ist die Asche v. a. wegen der Konzentration an Schwermetallen nicht in jedem Fall als Dünger zu empfehlen (HARTMANN et al. 2003, S. 112).

Im Bereich der großtechnischen Nutzung von Biomasse als Festbrennstoff ergeben sich aus Kostengründen mehr Möglichkeiten, entsprechende Filteranlagen und notwendige Vorrichtungen für eine umweltschonende Verbrennung einzusetzen. Spezielle Heizwerke versorgen meist mehrere kommunale Gebäude bzw. große Wärmeabnehmer. In klassischen Kraftwerken können meist neben der Kohle bis zu 20 Prozent Biomasse mit verfeuert werden (KARL 2004, S. 74). Darüber hinaus böte sich generell für Kraftwerke eine Kraft-Wärme-Kopplung an, um neben der Stromerzeugung auch möglichst viel der anfallenden Abwärme sinnvoll zu nutzen. Im Kleinstkraftwerkbereich stellt der ORC-Prozess (Organic Rankine Cycle) eine Alternative zur Kraft-Wärme-Kopplung dar. Dieser Prozess entspricht dem Wasser-Dampf-Prozess mit dem Unterschied des verdampften Mediums. Im ORC-Prozess wird ein organisches Arbeitsmedium verwendet, das bei niedrigeren Temperaturen und Drücken als Wasser verdampft (FNR 2005c, S. 134).

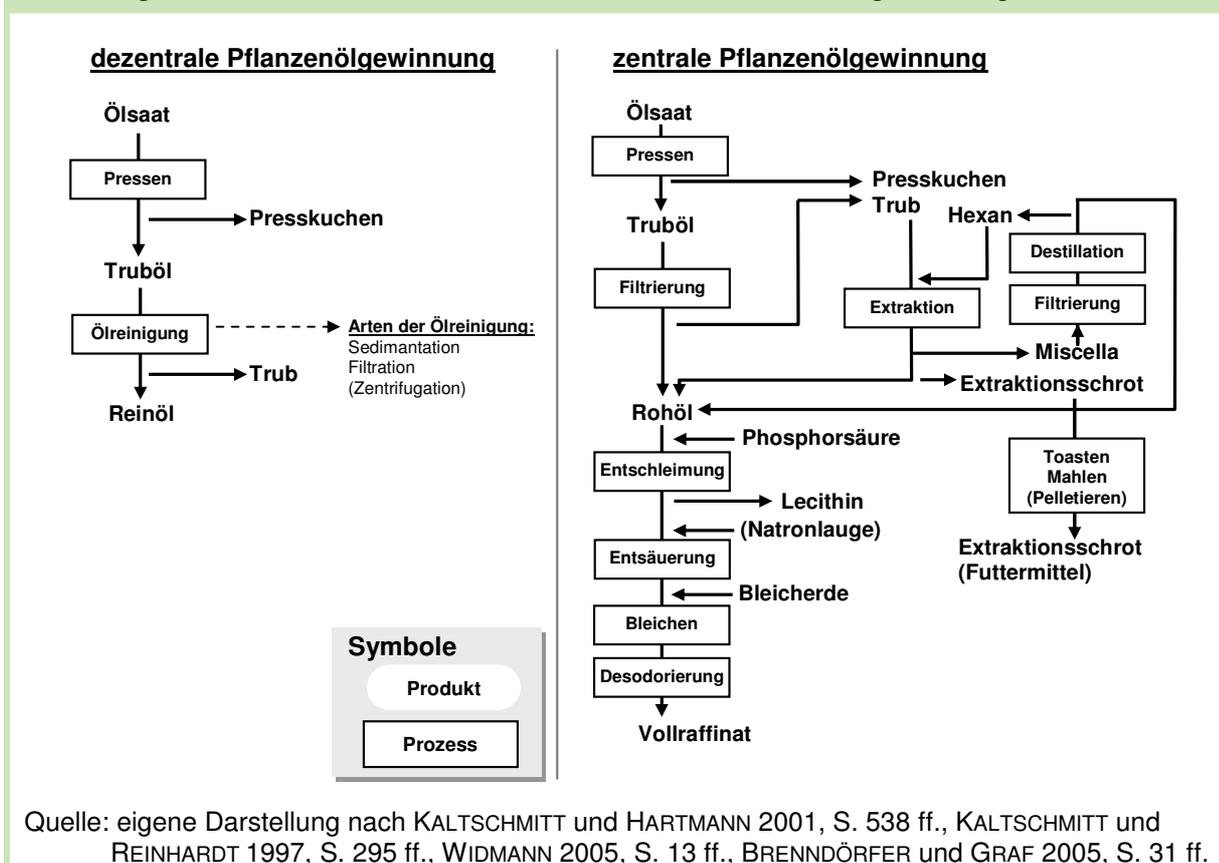
### **Biokraftstoffe**

Aufgrund der traditionellen Entwicklung der individuellen Mobilität sowie des Lastverkehrs auf Basis der Verwendung von Rohölprodukten als Energieträger werden diese Anforderungen an Kraftstoffeigenschaften momentan auch an die Energieträger aus Biomasse gestellt. Systemwechsel zu alternativen Antriebs- oder sogar Mobilitätskonzepten werden von Individualisten entwickelt, scheitern dann aber spätestens an einer breit angelegten Markteinführung am bestehenden System und der Interessen der KFZ- und Energielobby. Momentan existieren **Biokraftstoffe der ersten Generation** am Markt, die in den herkömmlichen Motoren nach kleinen Anpassungsmaßnahmen problemlos genutzt werden können. Diese Biokraftstoffe der ersten Generation sind Pflanzenöl und Biodiesel aus Ölsaaten sowie Bioethanol aus zucker- und stärkehaltigen Pflanzenbestandteilen. Als **Kraftstoffe der zweiten Generation** können Bioethanol aus cellulosehaltigen Pflanzenbestandteilen sowie die synthetischen Kraftstoffe auf Basis von thermochemisch verflüssigter Biomasse angesehen werden. Diese zweite Biokraftstoffgeneration befindet sich derzeit im Entwicklungsstadium, großtechnische Produktionsanlagen wurden noch nicht realisiert.

Im Folgenden werden nun die Prozesse der Biomasseverarbeitung zu Biokraftstoffen näher erläutert. Darin erscheint auch die Biogaserzeugung, da das gewonnene Biomethan im engeren Sinne ebenfalls einen Kraftstoff bzw. Energieträger darstellt, der nicht unbedingt nur zur Verstromung dienen kann, was derzeit aufgrund der politischen Rahmenbedingungen geschieht.

Häufig als Naturdiesel bezeichnet, stellt **Pflanzenöl** einen noch sehr naturnahen Kraftstoff dar. Die Pflanzenölgewinnung aus Ölsaaten wie Raps, Sonnenblume oder Öllein kann hinsichtlich Verarbeitungskapazität in groß- bzw. kleintechnischen Anlagen erfolgen. Bei ersteren wird von so genannten zentralen Ölmühlen mit einer Verarbeitungskapazität von 500 bis 4.000 Tonnen Saat pro Tag gesprochen. Die einfacheren und kleintechnischen Anlagen mit Verarbeitungskapazitäten von 0,5 bis zu 25 Tonnen Saat pro Tag werden auch dezentrale Anlagen genannt (WIDMANN 2005, S. 13 ff.). Die Verfahren der zentralen bzw. dezentralen Anlagen unterscheiden sich erheblich und werden im Folgenden getrennt näher erläutert (vgl. Abbildung 2-6).

Abbildung 2-6: Verfahren der dezentralen und zentralen Pflanzenölgewinnung



Die Ölgewinnung in dezentralen, sprich durchsatzschwachen Anlagen, ist ein vergleichsweise einfacher Prozess. Mit einer Schneckenpresse, die für Saatsätze von 5 bis 1.000 Kilogramm pro Stunde verfügbar sind, wird das Öl aus der Saat gepresst. Die Literaturangaben zum Restölgehalt im Presskuchen schwanken zwischen Werten von 10 bis 20 Prozent. Die Ölausbeute (Abpressgrad) liegt damit in einem Bereich zwischen 60 und 80 Prozent des in der Saat enthaltenen Pflanzenöls (KALTSCHMITT und HARTMANN 2001, S. 538, WIDMANN 2005, S. 13 ff.). Von dem abgepressten Truböl müssen nun noch die etwa 0,5 bis 6 Gewichtsprozent an Feststoffen getrennt werden. Diese Ölreinigung erfolgt in dezentralen Ölmühlen durch ein Sedimentations- oder Filtrationsverfahren, selten durch Zentrifugation. Beim Sedimentati-

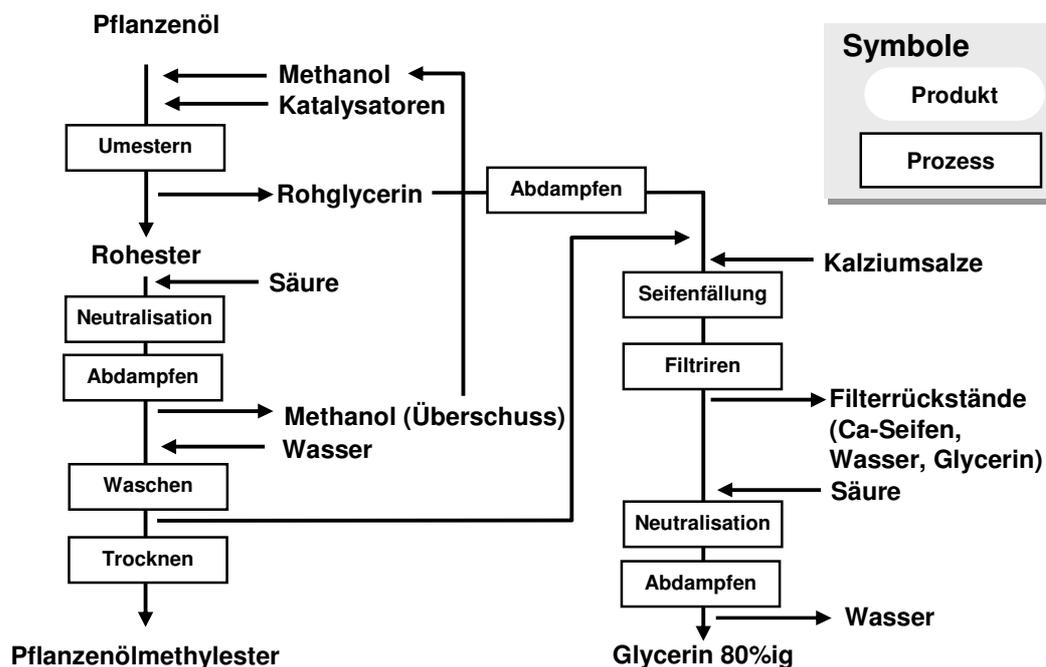
onsverfahren setzen sich die Feststoffe nach einer gewissen Verweilzeit am Boden ab, das nun nahezu reine Öl durchströmt üblicherweise zur Sicherheit jedoch noch einen Beutelfilter mit definierter Porengröße. Das Sediment kann wegen der hohen Ölgehalte nicht mit dem Presskuchen zusammen vermarktet werden, sondern bildet eine eigenständige Fraktion, die als Futtermittel oder als Biogassubstrat eingesetzt werden kann (KALTSCHMITT und HARTMANN 2001, S. 552 f.). Beim Filtrationsverfahren werden die Feststoffe des rohen Pflanzenöls, dem so genannten Trüböl, unter Wirkung eines Druckgefälles an einem porösen Filtermaterial wie z. B. Gewebe, Flies oder Metallmembranen vom reinen Pflanzenöl getrennt.

Die zentralen Ölmühlen einschließlich Raffinationsanlage zur Entfernung weiterer unerwünschter Begleitstoffe im Pflanzenöl liegen meist an großen Wasserstrassen, die eine Anlieferung der Ölsaaten per Binnenschiff ermöglichen. Auch in diesen Anlagen wird die Saat nach einem Reinigungsprozess zunächst zerkleinert und dann das Öl abgepresst. Das Trüböl wird analog zur dezentralen Anlage gefiltert. Presskuchen und Trüb werden nun in der zentralen Anlage weiter bearbeitet, um das darin verbliebene Öl noch zu gewinnen. Bei der so genannten Extraktion wird unter Zugabe des Lösungsmittels Hexan aus Presskuchen und Trüb das verbliebene Öl gelöst. Dabei entsteht zum einen der Extraktionsschrot, der etwa 25 bis 35 Prozent des Lösungsmittels enthält. Zum anderen entsteht das mit Öl angereicherte Lösungsmittel, die so genannte Miscella, die einen Ölgehalt von 20 bis 30 Prozent und einen Lösungsmittelgehalt von 70 bis 80 Prozent besitzt. Die Miscella wird zunächst filtriert, und anschließend in einem mehrstufigen Destillationsprozess das Lösungsmittel, das einen niedrigeren Siedepunkt aufweist als das Pflanzenöl, vom Öl getrennt. So kann der größte Teil des Lösungsmittels zurück gewonnen und wiederverwertet werden. Dem Extraktionsschrot wird im Toaster das Lösungsmittel entzogen. Darüber hinaus wird im Toaster der Schrot noch gekocht, um verdauungshemmende oder sonstige für die Tierernährung schädliche Stoffe zu zerstören. Insgesamt können mit dieser vergleichsweise aufwändigen Technologie Ölausbeuten von etwa 99 Prozent erzielt werden (KALTSCHMITT und HARTMANN 2001, S. 538 ff.). Abschließend wird das gewonnene Pflanzenöl noch raffiniert, also von unerwünschten Begleitstoffen befreit, die die Haltbarkeit, den Geschmack oder die technische Verwendbarkeit beeinträchtigen können (WIDMANN 2005, S. 13 ff.). Mit diesem Raffinationsprozess sind Verluste an nutzbarer Ölmasse in Höhe von vier bis acht Prozent verbunden (KALTSCHMITT und HARTMANN 2001, S. 545). In Abbildung 2-6 ist die chemische Raffination dargestellt, die sich untergliedert in eine Entschleimung (Vorreinigung), die Entsäuerung (Neutralisation), die Bleichung (Entfärbung) und die Desodorierung. Bei der Entschleimung werden die Schleimstoffe, vor allem Phospholipide, die die Haltbarkeit beeinträchtigen, entfernt. Die Entsäuerung ist für die Entfernung freier Fettsäuren verantwortlich. Der Schritt der Bleichung entfernt Farbstoffe sowie Reste von Seifen, Spurenmetallen und Schwefelverbindungen. In der abschließenden Desodorierung werden Oxidationsprodukte, die für einen unangenehmen Geruch verantwortlich sind durch Wasserdampfdestillation unter Vakuum entfernt (KALTSCHMITT und HARTMANN 2001, S. 546 ff.).

Neben der chemischen Raffination etabliert sich seit jüngster Vergangenheit die physikalische Raffination, da hierbei wesentlich weniger Prozesschemikalien benötigt werden. Die Abtrennung der Fettsäuren erfolgt hierbei durch Destillation. Vorher muss das Öl entschleimt werden, da die Phospholipide bei Hitze in nicht mehr abtrennbare Zersetzungsprodukte zerfallen. Üblicherweise sind bei der physikalischen Raffination Entschleimung und Bleichung gekoppelt, so dass insgesamt nur noch zwei Raffinationsstufen notwendig sind (KALTSCHMITT und HARTMANN 2001, S. 549).

Da Pflanzenöl in herkömmlichen Dieselmotoren nur bedingt einsetzbar ist, wird eine Anpassung des Kraftstoffs an die Motorentechnik vorgenommen. Es wird aus dem Pflanzenöl ein dieselähnlicher Kraftstoff durch die so genannte Umesterung gewonnen. Landläufig wird dieser Kraftstoff als **Biodiesel** bezeichnet. In der Fachsprache haben sich die Begriffe Rapsölmethylester (RME), Pflanzenölmethylester (PME) oder international Fatty Acid Methyl Ester (FAME) durchgesetzt. Einen Überblick über den Prozess der Biodieselerzeugung sowie den Begleitprozess zur Glycerinreinigung gibt Abbildung 2-7.

Abbildung 2-7: Verfahren der Biodieselerzeugung aus Pflanzenöl



Quelle: eigene Darstellung nach KALTSCHMITT und HARTMANN 2001, S. 557 ff., KALTSCHMITT und REINHARDT 1997, S. 50 ff. und 296 ff., DREIER und TSCHETSCHLER 2000, S. 26

Bei dem Prozess der Umesterung wird der dreiwertige Alkohol Glycerin durch drei einwertige Alkohole in einer Gleichgewichtsreaktion, die durch Katalysatoren wie Natriumhydroxid oder Kaliumhydroxid überhaupt erst ermöglicht und beschleunigt wird, verdrängt. Da mit dem Alkohol Ethanol die Umesterung häufig kinetisch gehemmt ist, wird momentan aus-

schließlich Methanol verwendet (KALTSCHMITT und REINHARDT 1997, S. 295 ff., KALTSCHMITT und HARTMANN 2001, S. 557). Nach der Umesterung müssen die eingesetzten Katalysatoren neutralisiert werden, was durch Säureeinsatz geschehen kann. Danach wird das im Rohester verbliebene Methanol abgedampft und wieder dem Veresterungsprozess zugeführt. Eine alternative Methanolabtrennung stellt das Zentrifugieren dar. Es folgt ein Reinigungsschritt, in dem durch Zufuhr von Wasser weitere unerwünschte Stoffe wie Glycerin oder inaktivierte Katalysatoren ausgewaschen werden, bevor aus dem Trocknungsprozess der reine Kraftstoff hervorgeht. Das nach der Umesterung direkt hervorgehende sowie das im Waschwasser enthaltene Glycerin muss ebenfalls noch aufbereitet werden, um letztendlich ein verkaufsfähiges Produkt zu erhalten. Insgesamt müssen während der verschiedenen Prozesse Biodieselreste, Methanolreste sowie Seifen entfernt werden. Durch das abschließende Abdampfen kann ein 88 bis 90-prozentiges Glycerin gewonnen werden. Eine folgende Destillation kann eine Aufbereitung auf bis zu 99,5-prozentiges Glycerin erreichen (KALTSCHMITT und HARTMANN 2001, S. 557 ff.).

Diese grundsätzlichen Abläufe finden sich wieder im diskontinuierlichen sowie im kontinuierlichen Produktionsverfahren. Die ersten Umesterungsanlagen wurden im diskontinuierlichen Verfahren betrieben und hatten eine Produktionskapazität von 500 bis 1.000 Tonnen Biodiesel pro Jahr. Bei diesem Verfahren wurde mit erheblichem Methanolüberschuss gearbeitet, um eine Ausbeute von über 90 Prozent zu erzielen. Die Ausbeute kann noch auf etwa 98 Prozent erhöht werden, wenn das schwerere Glycerin unten abgezogen und erneut frisches Methanol für einen zweiten Reaktionsgang zugegeben wird (KALTSCHMITT und HARTMANN 2001, S. 560 f.). Das kontinuierliche Verfahren wird in Größenordnungen ab 30.000 Tonnen Biodieselerarbeitungskapazität angewandt. Im Vordergrund stehen ein einfacher Verfahrensablauf sowie die Umesterung bei möglichst niedrigen Prozesstemperaturen. Schon wegen der anfallenden Masse wird aus ökonomischen Gründen ein reines Koppelprodukt Glycerin erzeugt. Beim kontinuierlichen Verfahren findet die Umesterung in einem vertikalen Rohr statt, in dessen Sumpf sich das Glycerin absetzen und von wo es abgezogen werden kann. Eine weitere Glycerinabscheidung erfolgt in speziellen Absetztanks sowie per Tellerseparator. Die Esterphase, also der Kraftstoff, wird nach der Entmethanolisierung noch in einem mehrstufigen Waschprozess gereinigt. Darüber hinaus existieren noch weitere Varianten hinsichtlich Prozessablauf sowie Chemikalienzuschlag in Abhängigkeit von anderen fetthaltigen Rohstoffen. So werden in speziellen Anlagen auch Altfette umgeestert oder es besteht in einer Verfahrensvariante die Möglichkeit, auch freie Fettsäuren zu verestern, was die Entsäuerung bei der Pflanzenölproduktion überflüssig macht (KALTSCHMITT und HARTMANN 2001, S. 561 f.).

Verwendung finden Pflanzenölkraftstoffe sowie Pflanzenölmethylester im Verkehrssektor sowie im stationären Bereich zur gekoppelten Strom- und Wärmeproduktion beim Betrieb eines Blockheizkraftwerkes (BHKW). In beiden Fällen ist bei Verwendung von Pflanzenöl als Kraftstoff eine Anpassung des Motors notwendig. Dazu gehören u. a. Veränderung am Kraft-

stoffkreislauf sowie der Einbau einer Kraftstofferkennung für den flexiblen Dualbetrieb von Pflanzenöl und/oder Diesel, um eine optimale und damit schadstoffarme Verbrennung zu gewährleisten (FNR 2005d, S. 14). Mit der Umesterung von Pflanzenöl findet die Anpassung des Kraftstoffes an das bestehende Konzept des Dieselmotors statt. Lediglich Leitungen und Dichtungen im Kraftstoffkreislauf müssen dem aggressiven Biokraftstoff bestehen können, um einen längeren reibungslosen Betrieb zu ermöglichen. Im stationären Bereich dienen Pflanzenöl oder Biodiesel als Kraftstoff zum Betrieb von Blockheizkraftwerken. Primär wird in einem BHKW, das aus einem Motor und einem Stromgenerator besteht, elektrischer Strom erzeugt. Parallel fällt eine ebenso hohe nutzbare Abwärmemenge an. Meist werden diese BHKW wärmegeführt betrieben. D. h. der aktuelle Wärmebedarf ist ausschlaggebend für den Betriebszustand. Die erzeugte Strommenge wird entweder bei dezentraler Strom- und Wärmeversorgung selbst genutzt oder ins öffentliche Stromnetz eingespeist und dann nach den Vorschriften des Erneuerbaren Energien Gesetzes vergütet. Damit eignet sich ein BHKW zur Erzeugung der Wärmegrundlast, um eine möglichst hohe Auslastung zu gewährleisten. Ein Spitzenlastkessel zur Abdeckung der Wärmebedarfsspitzen ist unumgänglich. (HARTMANN et al. 2003, S. 138 ff.).

Neben der physikalischen bzw. chemischen Biokraftstoffherstellung existieren Verfahren der Kraftstoffherzeugung mittels biochemischer Prozesse. Mikroorganismen wandeln also Biomasserohstoffe in gewünschte Stoffe wie z. B. Ethanol oder Methan um. Es werden also die natürlichen Stoffwechselwege spezieller Mikroorganismen für industrielle Prozesse nutzbar gemacht.

Die direkten Ausgangsstoffe für die alkoholische Gärung als Prozessteil der Erzeugung von **Bioethanol** sind die in Pflanzen verfügbaren Zucker wie z.B. Glukose, Fruktose, Saccharose. Hefen können mittels ihrer Enzyme aus einem Kilogramm Glucose 511 Gramm Ethanol und 489 Gramm Kohlendioxid unter Bildung von 867 Kilojoule Wärme erzeugen (KALTSCHMITT und HARTMANN 2001, S. 597). Lediglich in den landwirtschaftlichen Kulturen Zuckerrohr und Zuckerrübe liegen schon Zucker in ausreichender Konzentration vor. Stärke und Zellulose bestehen auch aus einzelnen Zuckermolekülen, die jedoch in schwer bis nicht löslicher Form gebunden sind. Der eigentlichen Vergärung der Zucker sind demnach gewisse verzuckernde Prozesse vorzuschalten.

Zellulose stellt eine kristalline Struktur aus Glukosemolekülen dar, die zudem meist eng assoziiert ist mit Lignin, Pektin und Hemicellulosen. Dadurch ist der Komplex sehr resistent gegenüber Hydrolyseaktivitäten. Um dennoch die in der Zellulose enthaltene Glucose für den alkoholischen Gärungsprozess verfügbar zu machen, muss diese aufgeschlossen werden. Es existieren derzeit mehrere Verfahren, um den Zelluloseaufschluss zu realisieren. Ein feines Vermahlen zerstört kristalline Struktur, eine Hydrolyse ist nun möglich. Mit dem Hochdruck-Dämpf-Verfahren wird die Zellulose auf ca. 180 bis 200°C für 5 bis 30 Minuten erwärmt. Ein danach plötzlicher Druckabfall auf Umgebungsdruck führt durch entstehende Dampfblasen

---

zum Zerplatzen der Zellstrukturen und Absprennen der Ligninhülle von den Zellulosefibrillen. Alternativ ergibt der Einsatz konzentrierter Natronlauge ein Aufquellen der Zellulosefibrillen, wodurch die Molekülstränge für die Hydrolyse zugänglich werden. Die am häufigsten angewandte Zellulose-Hydrolyse-Methode ist die Säurebehandlung mit 72-prozentiger Schwefelsäure oder 42-prozentiger Salzsäure. In beiden Säuren ist die Zellulose schon ab 45°C vollständig löslich und wird in Oligosaccharide gespalten. Die Hydrolyse zur Glukose erfolgt dann bei Erhitzung der Lösungen auf 100 bis 200°C für eine Dauer von einer bis drei Stunden. Werden nur verdünnte Säuren eingesetzt, dann werden bei der Hydrolyse nur circa 90 Prozent der potenziell in der Zellulose vorhandenen Glucose freigesetzt. Eine ökonomisch vertretbare Hydrolyse mittels Säureeinsatz kann nur dann durchgeführt werden, wenn die Säuren zurück gewonnen und recycelt werden, was bei Salzsäure leichter gelingt als bei Schwefelsäure (KALTSCHMITT und HARTMANN 2001, S. 596).

Stärkehaltige Rohstoffe werden mittels Maischprozess zum Freilegen der Stärkekörner für die alkoholische Gärung vorbereitet. Bei Weizen mit Proteingehalten über 13 Prozent können Fermentationsprobleme auftreten, die sich in mit starker Schaumbildung bei der Fermentation zeigen. Nur ein Einsatz von Antischaummitteln kann dann noch Abhilfe schaffen (KALTSCHMITT und HARTMANN 2001 S. 594). Bei Verwendung von Topinamburknollen ist eine angepasste Ethanolverarbeitung nötig. Die verschmutzten Knollen müssen zunächst gereinigt werden. Dann ist ein spezieller Abbau des Inulins zu vergärbare Fructose mittels säurebeständigen, inulinabbauenden Enzympräparaten nötig. Das saure Milieu bei einem pH-Wert von drei ist notwendig, um die Maische vor Infektionen zu schützen (KALTSCHMITT und HARTMANN 2001 S. 594). Nach der Reinigung v. a. von Kartoffeln folgt die Zerkleinerung mittels Mühlen oder Dispergiermaschinen. Zum tatsächlichen Freilegen der Stärkekörner aus den pflanzlichen Zellen gibt es mehrere Prozessmöglichkeiten mittels Druck oder drucklose sowie kontinuierliche Stärkeaufschlussverfahren, mit welchen letztendlich das gleiche Ziel verfolgt wird. Um das Polysaccharid Stärke für die alkoholische Gärung vorzubereiten bedarf es den Stärkeaufschluss zu Monosacchariden. Dazu sind zwei Gruppen von Stärke abbauenden Enzymen notwendig. Die erste Gruppe stellen die verflüssigenden  $\alpha$ -Amylasen, die zweite Gruppe die verzuckernden Glucoamylasen und  $\beta$ -Amylasen dar. Mittels unterschiedlichen  $\alpha$ -Amylase-Präparaten aus Mikroorganismen mit verschiedenen Ansprüchen an das Reaktionsmilieu hinsichtlich pH-Wert und Temperatur kann die Stärke in Oligosaccharide zerlegt werden. Diese verflüssigte Maische muss nun noch verzuckert werden. Dies geschieht meist mit einem Mix von verzuckernden Enzymen, um eine möglichst vollständige Verzuckerung gewährleisten zu können. Das traditionelle Verflüssigungs- und Verzuckerungsmittel der Alkoholindustrie ist die Vermälzung. Während dem Keimen von Gerste werden die für den Stärkeabbau notwendigen Enzyme gebildet. Dieser Malz-Enzym-Komplex ermöglicht eine sehr rasche Verzuckerung der Maische, wobei jedoch die Stärke insgesamt nur unvollständig abgebaut wird. Damit sind mit der Ethanolherzeugung aus Malz immer gewisse Ethanolverluste durch verminderte Ausbeute verbunden. Getreidearten wie Roggen und Weizen besitzen

schon im unvermälzten Zustand amylolytische Aktivitäten, die ausreichen, um die Stärke in Zucker umzuwandeln. Eine Beurteilung des Getreides hinsichtlich Autoamyolyse-Aktivität erfolgt mittels des Autoamyolytischen Quotienten (AAQ). Dieser wird aus zwei unterschiedlichen Gärversuchen im Labor bestimmt. Ein Gärversuch wird unter optimalen Verflüssigungs- und Verzuckerungsbedingungen mit entsprechendem Enzymeinsatz durchgeführt. Der zweite erfolgt unter Nutzung der Autoamyolyse des Getreides. Der Autoamyolytische Quotient gibt das Verhältnis des Resultates des Gärversuches mittels Autoamyolyse gegenüber der Alkoholausbeute des Optimal-Gärversuches wider. Liegt dieser über 95 Prozent, so kann das Getreide autoamyolytisch verarbeitet werden (KALTSCHMITT und HARTMANN 2001, S. 597 ff., SCHMITZ et al. 2003, S. 67 ff.).

Auch die zuckerhaltigen Rohstoffe bedürfen einer Vorbereitung für die Ethanolherzeugung. Die Zuckerrübe ist wenig lagerfähig und muss somit in kurzen Kampagnen zu Rübensaft verarbeitet werden, um damit eine ganzjährige Ethanolproduktion zu ermöglichen. Die Zuckerrüben werden gereinigt, zerkleinert und der Zuckerrohsaft extrahiert. Anschließend wird der Rohsaft pasteurisiert und konzentriert (IGELSPACHER 2003, S. 31). Als Koppelprodukt fallen die Pressschnitzel an.

Der Zuckersaft aus der Zuckerhirse kann entweder durch Extraktion oder durch Auspressen mittels Walzmühlen oder durch eine Kombination dieser Verfahren gewonnen werden (KALTSCHMITT und HARTMANN 2001 S. 592).

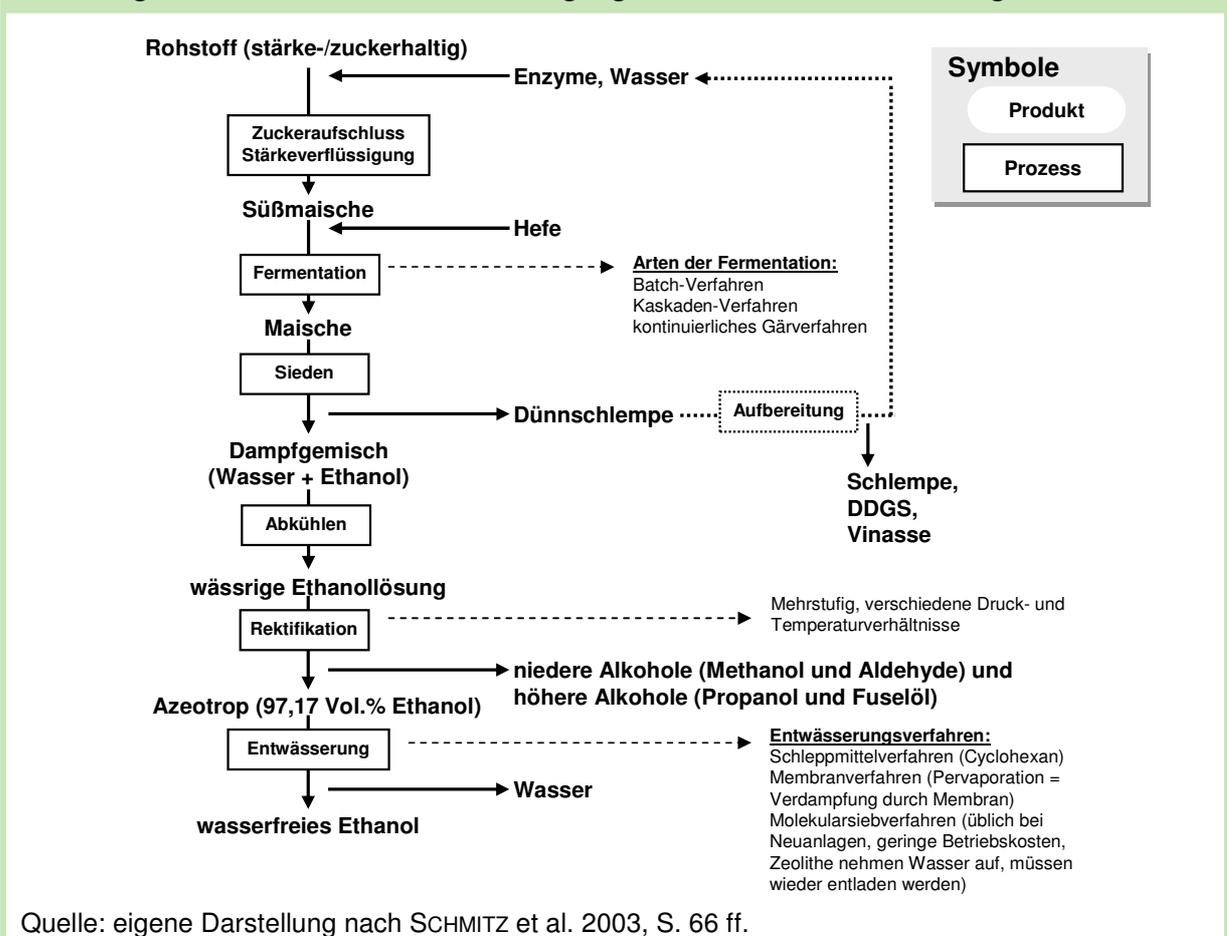
Der wesentliche Unterschied der Ethanolgewinnung aus verschiedenen Rohstoffen liegt vor allem in der Rohstoffvorbereitung für die Vergärung. Nach der Verzuckerung der Rohstoffe folgt ein relativ einheitlicher Prozess bis letztendlich wasserfreies Ethanol hervorgeht (Abbildung 2-8). Die Alkoholproduktion aus den Zuckern wird von zugegebenen Hefen vollzogen. Die für die Vergärung notwendige Hefe wird in der Regel selbst hergestellt. Für den erstmaligen Start wird selektierte Trocken-Reinzuchtheefe eingesetzt. Dann wird immer wieder ein Teil der täglich erzeugten Maische für die Hefezucht verwendet. Diese Hefefermentation unterscheidet sich hinsichtlich der Prozessbedingungen von der eigentlichen alkoholischen Gärung.

Die alkoholische Gärung im großtechnischen Stil erfolgt entweder im klassischen Batch-Verfahren, im Kaskadenverfahren oder im kontinuierlichen Verfahren. Das Batch-Verfahren ist gekennzeichnet von einem absätzigen Prozess, wodurch ein geringes Infektionsrisiko durch „wilde“ Hefen, Pilze oder Bakterien besteht. Jeder Durchgang wird isoliert bearbeitet. Das Kaskadeverfahren ist charakterisiert von mehreren hintereinander geschalteten Gärbehältern. Im ersten erfolgt unter Belüftung die Hefevermehrung, in den zweiten wird die Süßmaische eingeleitet und in den zwei bis drei folgenden Behältern unter Luftabschluss vergoren. Das kontinuierliche Verfahren erfolgt in einem Behälter. Es wird gleichzeitig Hefe gezüchtet, Süßmaische zugegeben und vergorene Maische abgezogen. Es kennzeichnet sich ähnlich wie das Kaskadenverfahren aus durch wesentlich höherer Produktivität, ausgedrückt in Gewichtseinheiten Ethanol je Zeiteinheit und Volumeneinheit Gärbehälter. Während die diskontinuier-

---

liche Vergärung zwei Gramm Ethanol je Liter Fermentationsvolumen und Stunde hervorbringt, können mit der kontinuierlichen Vergärung bis zu 30 bis 50 Gramm erzielt werden. Jedoch müssen beim kontinuierlichen Verfahren wesentlich höhere hygienische Anforderungen erfüllt werden, um einen Stillstand des Prozesses durch Infektion zu vermeiden. Es ist eine Sterilisation der Maische notwendig. Das Heferecycling erfolgt mittels Zentrifuge oder Absetzverfahren, was nur mit Verarbeitung feststofffreier Maische funktioniert. Diese feststofffreie Maische liegt nur bei Zuckerrohr oder Melassen als Rohstoffe vor. Im Batch-Verfahren ist nach 24 Stunden bei 34 bis 36°C etwa die Hälfte der vergärbaren Substanzen vergoren, und der Alkoholgehalt der Maische beträgt vier bis fünf Volumenprozent. Die gesamte Gärdauer beträgt bei Getreidemaischen 30 bis 40 Stunden, bei Maismaischen 40 bis 60 Stunden. Wird mit Maismaischen ohne Schlemperecycling gearbeitet, so dauert der Prozess drei bis vier Tage, bleibt jedoch immer unvollständig, d. h. es bleibt unvergorene Maische.

Abbildung 2-8: Verfahren der Ethanolherzeugung aus stärke- bzw. zuckerhaltiger Biomasse



Das Schlemperecycling zum Maischprozess reduziert die Prozessdauer erheblich. Bei vollständiger Vergärung können etwa 64 Liter Alkohol pro 100 Kilogramm Stärke gewonnen werden. (KALTSCHMITT und HARTMANN 2001, S. 614 ff., SCHMITZ et al. 2003, S. 72 f.). Der

Alkoholgehalt in der Maische liegt optimalerweise zwischen sieben und zehn Prozent. Unter sieben Prozent ist der Energiebedarf der Destillation zu groß, über zehn Prozent Alkohol führen zu Wachstumsstörungen der Hefe und somit zur Verringerung der Gärgeschwindigkeit (IGELSPACHER 2003, S. 32 f.).

Nach der Vergärung folgt die Isolierung des Alkohols aus der Maische durch Destillation, Rektifikation und Absolutierung. Diese Schritte können unabhängig voneinander vollzogen werden oder in einer Anlage aneinander gekoppelt sein. Zunächst wird die vergorene Maische zur Entgeistung erhitzt. Es entweicht ein Ethanol-Wasserdampfgemisch, die Schlempe bleibt. Das Alkohol-Wasser-Gemisch besitzt einen Siedepunkt, der zwischen dem von Wasser mit 100°C und Alkohol mit 78,3°C liegt. Bei destillieren einer Alkohol-Wasser-Mischung mit zehn Volumenprozent Anteil Alkohol entsteht ein Dampfgemisch mit einem Alkoholgehalt von 32,7 Volumenprozent Alkohol, das entsprechende Kondensat daraus hat den entsprechenden Alkoholgehalt. Es ist somit eine Destillation über mehrere Stufen nötig, die meist in Destillationskolonnen mit Glockenböden erfolgt. An diesen Glockenböden kondensiert der Dampf des darunter liegenden Bodens und kann wiederum verdampfen. Ein spezielles Destillieren stellt die Rektifikation dar. Hierbei werden Flüssigkeit und Dampf unter unmittelbarer Berührung im Gegenstrom geführt. Die dabei entstehende Trennwirkung ist besser als beim Destillieren. Diese Rektifikation kann entweder am abdestillierten Rohalkohol oder schon an der Maische durchgeführt werden. Über diese Prozesse kann höchstens die azeotrope Konzentration mit 97,17 Volumenprozent Alkohol und 2,83 Volumenprozent Wasser erreicht werden. In diesem Zustand hat das Gemisch einen Minimumsiedepunkt, der mit 78,15°C unter dem Siedepunkt von Ethanol liegt. Eine Herstellung eines wasserfreien Alkohols kann nur durch die Absolutierung mittels wasserbindender Chemikalien oder über eine Destillation mit Einsatz von Schleppmitteln erreicht werden. Durch das Zumischen des Schleppmittels Cyclohexan zum Alkohol-Wasser-Gemisch kann das Ethanol nach unten abgezogen werden, Wasser und Schleppmittel entmischen sich wieder in einem Dekanter in beruhigtem Zustand. Weitere Entwässerungsverfahren sind Membranverfahren oder Molekularsiebverfahren. Damit kann ein Alkohol erzeugt werden, der weniger als 0,3 Volumenprozent Wasser enthält (KALTSCHMITT und HARTMANN 2001, S. 618 ff., SCHMITZ et al. 2003, S. 73 ff. IGELSPACHER 2003, S. 32 f.). Das Produkt Alkohol kann nun entweder als Reinkraftstoff in angepassten Motoren eingesetzt werden, oder dem fossilen Benzin zugesetzt werden. Eine dritte Verwendungsmöglichkeit ergibt sich durch den Bedarf von Klopfverbesserern in Ottokraftstoffen. Aus Ethanol und Isobuten, das direkt in der Raffinerie anfällt, kann der Klopfverbesserer bzw. Oktanzahlerhöher Ethyl-Tertiär-Butyl-Ether (ETBE) erzeugt werden. Das ETBE ersetzt zunehmend den wesentlich toxischeren Klopfverbesserer Methyl-Tertiär-Butyl-Ether (MTBE) im Benzinkraftstoff (IGELSPACHER 2003, S. 46).

Das Koppelprodukt Schlempe fällt in großen Mengen an. Je erzeugtem Liter Alkohol ergeben sich entsprechend der Destillationsanlage zehn bis 15 Liter Schlempe. Vor allem Getreide- und Kartoffelschlempen sind hochwertige Eiweißfuttermittel, die jedoch leicht verderben. In

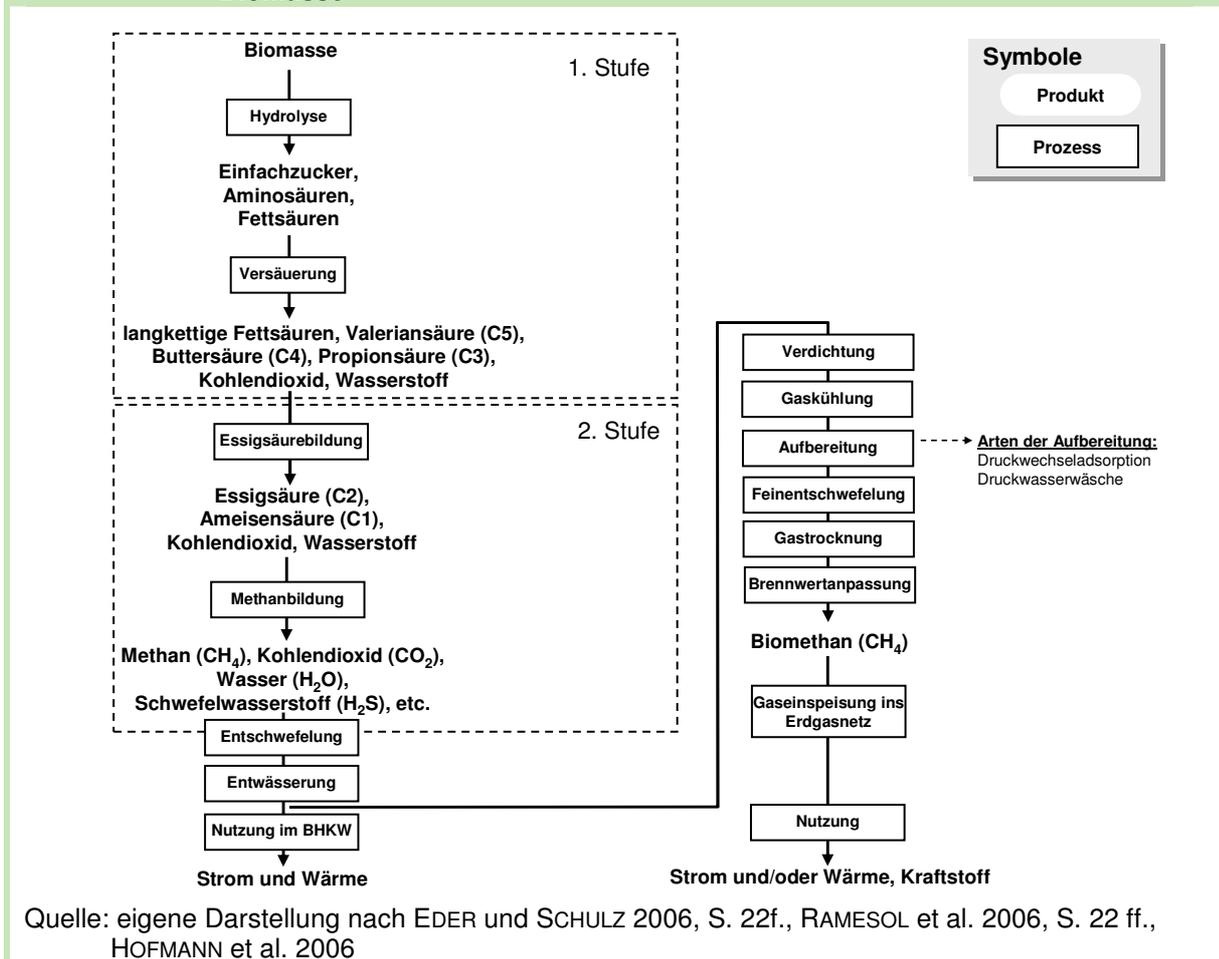
den USA werden 85 Prozent der anfallenden Schlempen getrocknet und dann als Futtermittel, dem so genannten Distillers Dried Grain with Solubles (DDGS) verwendet. Diese Aufbereitungsanlage ist technisch nahezu so aufwändig wie die Ethanolanlage und bedarf nahezu des gleichen Energieinputs. Aufgrund der enthaltenen Nährstoffe können Schlemmen auch als Düngemittel oder als Biogassubstrat eingesetzt werden. Melasse- oder Dicksaftschlemmen enthalten hohe Mineralstoffanteile. Die entzuckerte Melasse wird Vinasse genannt und kann als Futtermittel oder Düngemittel eingesetzt werden. Insgesamt verbleiben von der eingesetzten Melasse circa 35 Prozent Nachprodukt, bei Einsatz von Dicksatz können bis zu 75 Prozent weniger Vinasse anfallen als bei Melasse. Die Vinasseaufbereitung insgesamt stellt sich wesentlich einfacher und energieextensiver dar als die Getreideschlempeaufbereitung (Schmitz et al. 2003, S. 80 f.).

Ein weiteres Verfahren der Biokraftstofferzeugung mittels mikrobieller Fermentation ist die Biogaserzeugung aus feuchter Biomasse. Der wesentliche Bestandteil von **Biogas** ist Methan. Als Rohstoff kann nahezu jegliche organische Substanz dienen, wobei die Biogaserzeugung mit leicht abbaubaren Rohstoffen wie z.B. Zucker, Stärke oder Proteine wesentlich schneller erfolgt als mit schwer abbaubaren Substanzen wie z.B. Hemizellulosen, Zellulosen oder Lignin. Folgende Abbildung 2-9 zeigt schematisch den Verfahrensablauf. An der Zersetzung der Biomasse zu letztendlich Methan, Kohlendioxid, Wasser und einigen Stickstoff und Schwefel enthaltenden Spurengasen sind viele verschiedene Bakterienstämme beteiligt, die feuchtes Milieu, weitgehend Luftabschluss und Lichtabschluss bevorzugen.

In der ersten Stufe des mehrstufigen Abbauprozesses, der Hydrolysestufe bauen aerob arbeitende Bakterien die hochmolekulare Substanz wie Eiweiße, Kohlehydrate, Fette und Zellulosen bei einem pH-Wert von 4,5 bis 6,0 in niedermolekulare Verbindungen um. Der Abbau geschieht durch die von den hydrolytisch arbeitenden Bakterien ausgeschiedenen Exoenzyme wie Zellulasen, Amylasen, Proteasen und Lipasen. Aus den Polymeren werden wasserlösliche Moleküle wie Einfachzucker, Aminosäuren oder Fettsäuren. Die beteiligten Bakterien haben eine Generationsdauer von 20 Minuten bis zehn Stunden. Aus den vorliegenden, verflüssigten niedermolekularen Strukturen erzeugen nun die fakultativ anaerob arbeitenden versäuernden Bakterien mit einer Generationsdauer von einer bis 48 Stunden kurzkettige Carbonsäuren, bevorzugt bei einem pH-Wert zwischen 6,0 bis 7,5. Die längste Generationsdauer im Prozess mit zwei bis zehn Tagen besitzen die Essigsäurebakterien, die ebenso wie die folgenden Methanbildner bei einem pH-Wert zwischen 6,8 und 8,0 am effektivsten arbeiten. Die Essigsäurebildner erzeugen unter Bildung der Nebenprodukte Kohlendioxid und Wasserstoff die Essigsäure, aus welcher 70 Prozent des erzeugten Methans von den Methanbildnern produziert wird. Der Phase der Essigsäurebildung folgt die Phase der Methanbildung unter strikt anaeroben Bedingungen bei einem pH-Wert von optimalerweise 7,5, wobei der tolerierbare Schwankungsbereich von 6,6 bis 8,0 reicht. Neben der Essigsäure kann auch Wasserstoff und

Kohlendioxid zur Methanbildung herangezogen werden (WELLINGER et al. 1991, EDER und SCHULZ 2006, FNR 2005ab).

**Abbildung 2-9: Verfahren der biologischen Biomethanerzeugung und Verwendung aus Biomasse**



In vielen landwirtschaftlichen Biogasanlagen laufen alle diese Phasen parallel, ohne räumliche und zeitliche Trennung in einem Gärbehälter, dem Fermenter ab. In diesem einstufigen Verfahren muss ein Kompromiss hinsichtlich der Ansprüche der verschiedenen beteiligten Mikroorganismen geschaffen werden. Gerade bei Einsatz von Substraten, die schnell abbaubar sind und somit zu schneller Versäuerung neigen, bietet sich ein zweistufiges Verfahren an. In einem Behälter finden dann die Hydrolyse und die Versäuerung unter entsprechenden Bedingungen statt. Die Abbauprodukte können dann wohl dosiert dem Fermenter der zweiten Stufe zugeführt werden, wo Essigsäurebildung und die gewünschte Methanbildung stattfinden.

Das gewonnene Gasgemisch enthält neben dem Methan noch Kohlendioxid und störende Substanzen wie Wasser und Schwefelwasserstoff. Durch eine Gaskühlung kann der im Gas enthaltene Wasserdampf auskondensieren und das Wasser abgezogen werden. Die notwendige Entschwefelung zur Schonung korrosionsgefährdeter Anlagenbestandteile kann auf ver-

schiedene Weisen erfolgen. Eine gezielte Luft- oder Sauerstoffzufuhr in den Fermenter ermöglicht Schwefelbakterien das Ausfällen von elementarem Schwefel. Dieser biologische Entschwefelungsprozess kann auch in speziellen Biofiltern vollzogen werden. Weitere Entschwefelungsmöglichkeiten sind die Eisenzugabe zum Substrat bzw. Trockenfilter mit Eisenoxid oder eine Druckgasreinigung (KÖBERLE 1999, S. 61 f.). Dieses grob gereinigte Biogas kann nun in speziell für die Gasnutzung angepassten Motoren verbrannt und damit ein Stromgenerator angetrieben werden. Motor und Generator inklusive einer entsprechenden Steuerungseinheit stellen ein Blockheizkraftwerk dar. Die bei der Verstromung des Biogases anfallende Wärme kann zum großen Teil extern genutzt werden. Ein kleiner Teil wird benötigt, um stabile Temperaturverhältnisse in den Fermentern zu gewährleisten.

Eine weitere Verwendungsmöglichkeit des Biogases ist die Nutzung als Kraftstoff im Mobilitätsbereich oder die Verwendung als Ersatz zum fossilen Erdgas. Vor allem bei Einspeisung des Biogases in das Erdgasnetz ist eine Gasreinigung und Anpassung an die Erdgasqualität notwendig. Üblicherweise darf dann kein Sauerstoff ins Biogas gelangen, weswegen die klassische Entschwefelung ausfällt. Mit einem Biowäscher kann jedoch trotzdem eine biologische Entschwefelung durchgeführt werden. Mittels Gegenstrom und verdünnter Natronlauge wird der Schwefelwasserstoff dem Gas entzogen. Die aufgeladene Natronlauge kann dann großteils in einem Bioreaktor vom Schwefel entladen und recycelt werden. Eine chemische Entschwefelung kann u. a. mittels imprägnierter Aktivkohle bei einem Druck zwischen 0,1 und 1 bar durchgeführt werden. Die Imprägnierung der Aktivkohle wirkt als Katalysator, indem der adsorbierte Schwefelwasserstoff oxidiert. Je nach Imprägnierung kann die Aktivkohle regeneriert werden bzw. muss beladen deponiert werden. Andere Entschwefelungsverfahren funktionieren unter Einsatz von Zinkoxid oder Eisenoxiden (HOFMANN et al. 2006, S. 30 f.). Die Methananreicherung erfolgt durch Abtrennung des im Rohgas noch enthaltenen Kohlendioxides. Hierfür existieren schon einige Verfahren, die in Tabelle 2-4 zusammengefasst sind.

Druckwechseladsorptionsanlagen ermöglichen eine Methanreinheit von bis zu 98 Prozent. An den meist aus Steinkohle hergestellten Molekularsieben werden durch Druckwechsel Gasbestandteile adsorbiert bzw. wieder desorbiert. Dabei wird bei einem Betriebsdruck zwischen vier und zehn bar gearbeitet. Das Verfahren erfordert genaue Kenntnis über die Rohgaszusammensetzung für die Feinsteuerung des Prozesses (HOFMANN et al. 2006, S. 34 ff. und S. 52). Die Druckwasserwäsche ist das übliche Verfahren zur Biogasaufbereitung in Schweden. Das Biogas wird auf drei bar verdichtet und erwärmt sich dabei auf 100°C. Nach Abkühlung und Abscheiden des Kondensates erfolgt eine zweite Verdichtung auf neun bar. Nach erneuter Abkühlung durchströmt das Gas die Adsorptionskolonne von unten nach oben. Die Kolonne wird von oben nach unten von Wasser durchspült um basische und saure Bestandteile des Gases zu lösen und Stäube sowie Mikroorganismen zu entfernen (HOFMANN et al. 2006, S. 39 f.).

Tabelle 2-4: Verfahren zur Biogasaufbereitung zu Erdgasqualität

Verfahren	Investitionsbedarf	Betriebskosten	Methan-Anteil nach Abtrennung	Wartungsaufwand	Energieaufwand	Bemerkungen
Druckwechseladsorption (PSA)	niedrig	niedrig	> 95 %	gering	gering	praxiserprobt, für kleine Kapazitäten, Einsatz von Molekularsieben, auch geeignet zur Sauerstoff-, Wasserstoff- oder Stickstoffgewinnung
Druckwasserwäsche (DWW)	sehr niedrig	niedrig	> 96 %	gering	hoch	praxiserprobt, flexibles und anpassungsfähiges Verfahren, derzeit am meisten verwendet, Druck und Entspannen zum Auskondensieren, Waschen mit Wasser, abschließende Gastrocknung
Drucklose Aminwäsche (BCM)	hoch	niedrig	> 99,5%	gering	mittel	Verfahren in der Markteinführung, verschiedene Reinigungsstufen, äußerst geringer Methanschlupf (0,1 %) und höchste Methanreinheit.
Selexol-Verfahren	hoch	sehr hoch	> 96 %	gering	hoch	für große Gasvolumenströme, Reinigung mittels Lösungsmittel Selexol, v. a. in Erdgasreinigung und Klärgasreinigung eingesetzt
Membrantrennverfahren	hoch	k. A.	> 88 %	gering	hoch	nur Pilotanlage, Standzeiten der Membranen von ca. 3 Jahren, erst ab Volumenströmen von 500 m <sup>3</sup> pro Stunde wirtschaftlich
Rektifikation	sehr hoch	k. A.	> 98 %	k. A.	hoch	nur für große Gasvolumenströme, Verflüssigung des Kohlendioxides
Tiefemperaturabtrennung	sehr hoch	k. A.	> 99 %	k. A.	hoch	nur Pilotanlage, Ausfrieren des Kohlendioxids

Quellen: eigene Darstellung nach HOFMANN et al. 2006, S. 34 ff. und S. 46; MT-ENERGIE 2007ab; GÜNTHER 2006; HOFMANN, FREIER 2006, ISET 2008

Mit der drucklosen Aminwäsche lässt sich das Kohlendioxid mittels Amin-Waschlösung aus dem Methan trennen. Die mit Kohlendioxid über chemische Bindungen beladene Waschlösung wird im einer Regenerationseinheit erhitzt und damit das Kohlendioxid entfernt, die regenerierte Waschlösung kann dem Prozess wieder zugeführt werden. (MT-Energie 2007ab). Beim Selexolverfahren kommt das Lösungsmittel Selexol zum Einsatz, das Verfahren ähnelt der Druckwasserwäsche (HOFMANN et al. 2006, S. 40 f.). Verschiedene Membrantrennverfahren befinden sich derzeit noch in der Entwicklung. Sie basieren auf unterschiedlichen Diffusionsgeschwindigkeiten von Gaskomponenten durch die Membran, an der ein Druckgefälle anliegt. Das Produktgas reichert sich somit an einer Membranseite an und kann abgezogen werden (HOFMANN et al. 2006, S. 41 ff.). Die kryogenen Verfahren Rektifikation und Tieftemperaturtrennung sind für die Biogasaufbereitung noch nicht praxiserprobt. Bei dieser Gastrennung fallen jedoch die Produktgase Methan und Kohlendioxid in sehr hoher Reinheit an und sind somit kommerziell verwertbar (HOFMANN et al. 2006, S. 45).

Abschließend sind je nach Aufbereitungsverfahren eine Gastrocknung zur Vermeidung von Korrosion in den Gasleitungssystemen sowie eine Biogasfeinreinigung meist per Adsorptionsverfahren mittels Aktivkohle notwendig, um die Anforderungen der DVGW (2000) bzw. DVGW (2004) an das Gas zu erfüllen. Detaillierte und umfassende Ausführungen der Vorschriften zur Handhabung und zu den Anforderungen der Biogaseinspeisung ins Erdgasnetz

enthalten die DVGW Arbeitsblätter G 260 zur Gasbeschaffenheit, G 262 zur Nutzung von regenerativ erzeugten Gasen, G 488 über Anlagen für die Gasbeschaffenheitsmessung – Planung, Errichtung, Betrieb, G 261 zur Prüfung der Gasbeschaffenheit, G 685 zur Gasabrechnung sowie G 280, G 281 und G 213 zu Odorierung und Mischung (HOFMANN et al. 2006, S. 63; SCHULZ 2004, S. 30 ff.).

Letztendlich entscheidet die im lokalen Gasnetz vorherrschende Qualität des Grundgases über die Art der Aufbereitung und die Möglichkeiten der Einspeisung von Biogas. In Deutschland sind z. B. mindestens fünf verschiedene Gasqualitäten in den Netzen vertreten, wobei die jeweilige Erdgasherkunft entscheidend ist für die Qualitätsparameter. Darüber hinaus variieren die Qualitäten auch im zeitlichen Verlauf. Die Qualität der Gase wird bestimmt durch Methan-, Ethan-, Propan-, Butan- und weitere Kohlenwasserstoffgasbestandteile sowie Anteile von Kohlendioxid, Stickstoff, Sauerstoff oder Wasserstoff. Je nach Gaszusammensetzung ergeben sich spezifische Brennwerte sowie Wobbe-Indices, welche im jeweiligen Gasnetz konstant zu halten sind. Entsprechend der Eigenschaften des Gasnetzes sowie der Qualitätsparameter kann aufbereitetes Biogas als Austauschgas oder nur als Zusatzgas nach entsprechenden Vermischungsregeln eingespeist werden (HOFMANN et al. 2006, S. 118; ASUE 2007, S. 14). In den H-Gas-Netzen (H für high, Nennwert Wobbe-Index 15,0 kWh/m<sup>3</sup>) muss auf jeden Fall das Kohlendioxid aus dem gereinigten Biogas entfernt werden. In den H-Gas-Netzen, die mit Erdgas aus den GUS-Staaten (CH<sub>4</sub>-Gehalt bei 98,3 Prozent und Heizwert von 9,98 kWh/Nm<sup>3</sup>) versorgt werden (u. a. ganz Bayern) muss der Brennwert nicht erhöht werden. Bei Einspeisung in die H-Gas-Netze, die mit Erdgas aus der Nordsee bzw. vom Nordseeeverbund gespeist werden, hat eine Brennwerterhöhung durch Flüssiggaszugabe zu erfolgen oder ist lediglich als Zusatzgas einsetzbar. Das aufbereitete und an den Brennwert angepasste Gas kann je nach lokaler Bedarfsstruktur auch in Niederdrucknetze und ggf. in Stichelungen als Austauschgas eingespeist werden (HOFMANN et al. 2006, S. 66 ff. u. S. 119). In den L-Gas-Netzen (L für low, Nennwert Wobbe-Index 12,4 kWh/m<sup>3</sup>) ist die Nutzung als Austauschgas möglich nach Entfernung des Kohlendioxides bis auf wenige Prozentpunkte (HOFMANN et al. 2006, S. 66 ff.).

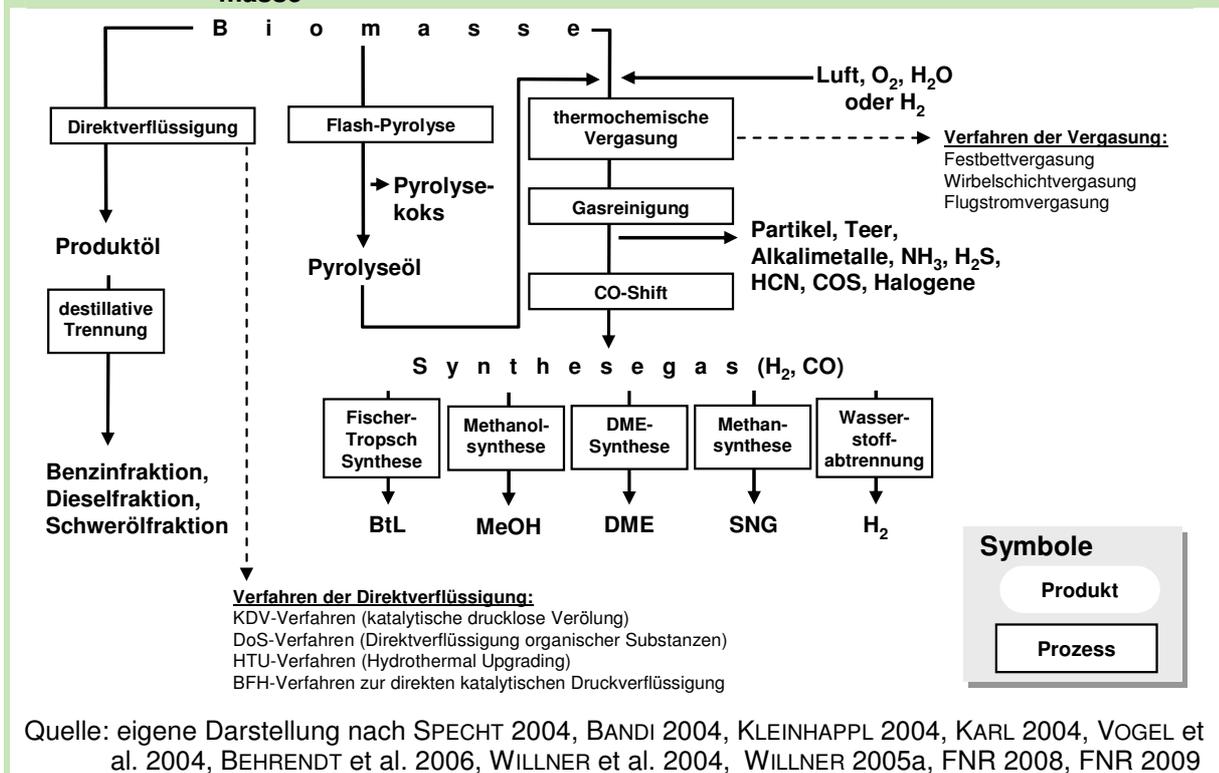
Die Kostengünstiger Herstellung von teilaufbereitetem Biogas, bei dem das Kohlendioxid nicht abgetrennt wurde, beschränkt die Einspeisung als Zusatzgas auf einen geringen Anteil des Volumenstromes in Mittel- oder Hochdruck-Erdgasleitungen, also bei höherem Druckniveau und bei größeren Grundgasmengen, um die Brennwertdifferenzen möglichst gering zu halten (HOFMANN et al. 2006, S. 113).

Die Einspeisung erfolgt schließlich über Verdichter und/oder über Druckregel- und Messanlagen. Bei der Einspeisung muss das Gas mit einem höheren Druck als der entsprechende Leitungsdruck vorliegen, wobei eine maximale Gastemperatur von 50°C einzuhalten ist (HOFMANN et al. 2006, S. 49 ff.). Die Einspeisung in Niederdrucknetze ist meist nicht praktikabel, da der Gasverbrauch über den Tages- und den Jahresverlauf stark schwankt. Mittel- und Hochdrucknetzen besitzen entsprechend größere Puffermöglichkeiten, um das eingespeis-

te Gas „zwischenlagern“ zu können (HOFMANN et al. 2006, S. 76 ff.). Abschließend hat bei der Einspeisung ins Erdgasnetz eine Odorierung mit einem Warngeruch zu erfolgen (HOFMANN et al. 2006, S. 75). Durch die Nutzung der Infrastruktur des Erdgasnetzes ist das Biogas entsprechend zentral abrufbar, wodurch eine gekoppelte Strom- und Wärmenutzung im Rahmen der EEG-Vorschriften leichter zu realisieren ist. Darüber hinaus kann das Biogas als direktes Erdgassubstitut zur Wärmeerzeugung bzw. als Kraftstoff eingesetzt werden.

Eine weitere Verwendungsmöglichkeit von Biomasse stellt die thermochemische Umwandlung, mit dem Ziel, **synthetische Biokraftstoffe** zu erzeugen, dar. Diese Verfahren befinden sich derzeit im Forschungs- und Entwicklungsstadium (VOGEL et al. 2006, S. 25). Einen Überblick über die Vielzahl der Verfahren gibt Abbildung 2-10.

**Abbildung 2-10: Verfahren der Erzeugung synthetischer Kraftstoffe aus (trockener) Biomasse**



Als mittelfristig mögliche synthetische Biokraftstoffe werden kohlenstoffbasierte Kraftstoffe wie z.B. BtL (Biomass to Liquid), Methanol, DME (Dimethylether) oder SNG (Substitute Natural Gas, Methanersatzgas) angesehen. Wasserstoff als Kraftstoff im Mobilitätsbereich erfordert große Anpassungsmaßnahmen bei der Infrastruktur für Speicherung und Transport, weswegen die Wasserstoffoption als langfristige Möglichkeit angesehen wird. Basis der Wasserstoffherzeugung können die Elektrolyse von Wasser mittels elektrischem Strom oder die thermochemische Vergasung von Biomasse, gefolgt von der Abtrennung von Restgas mittels Druckwechseladsorption sein (SPECHT et al. 2004, S. 11 ff.).

Aufgrund der momentanen Vielfalt der Prozesse zur Erzeugung von synthetischen Biokraftstoffen auf Basis thermochemischer Vergasung von Biomasse, werden im Folgenden einige mögliche Synthesewege sowie die Zielprodukte skizziert. Für die Brennstoffe Kohle und Petrol-Koks werden schon großtechnische Verfahren in der Praxis eingesetzt. Da die meisten Verfahren für den Biomasseinsatz sich derzeit noch im Entwicklungsstadium befinden und großtechnische Konzepte noch nicht realisiert sind, kann hier der derzeitige Stand wiedergegeben sowie ein Blick in die Zukunft gewagt werden (vgl. SCHÜTTE 2004, SPECHT 2004, BERGER und HEIN 2004).

Einen ersten Schritt zur Produktion von synthetischen Biokraftstoffen stellt die Vergasung der Biomasse dar. Hierfür wurden schon und werden immer noch verschiedenste Verfahren entwickelt. Die thermochemische Vergasung von Biomasse zur Erzeugung kohlenstoffbasierter Biokraftstoffe erfolgt unter Zufuhr von Luft, Sauerstoff, Wasserdampf oder Wasserstoff zu den Hauptkomponenten Wasserstoff, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Methan und Stickstoff. Es gibt hierfür autotherme Verfahren, wobei die zu vergasende Biomasse durch Verbrennung selbst die notwendige Prozesstemperatur erzeugt. Die allothermen Verfahren zeichnen sich aus durch eine externe Wärmeversorgung mittels Wärmeübertrager. Durch diese aufwändigere Prozessführung kann jedoch ein wasserstoffreicherer Produktgas erzielt werden. Aus dem Gasmisch aus Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid kann dann synthetischer Kraftstoff hergestellt werden. Eine wichtige Voraussetzung ist das bestimmte stöchiometrische Verhältnis dieser Gaskomponenten, das zum einen durch Kohlendioxidabtrennung erreicht werden kann. Weiterhin kann elektrolytisch produzierter Wasserstoff hinzu gegeben werden, was selbst bei allotherm erzeugtem Produktgas geschieht (SPECHT 2004, S. 38 ff., ZUBERBÜHLER et al. 2004, S. 176 f.).

Verfahrenstechnisch kann die Vergasung der Biomasse mittels dreier sich unterscheidenden Verfahren erfolgen, dem Festbettverfahren, dem Wirbelschichtverfahren bzw. dem Flugstromverfahren. Das Festbettverfahren ist gekennzeichnet durch eine einfache Bauweise sowie geringen Anforderungen hinsichtlich Korngröße des Brennstoffes. Beim Gleichstromverfahren verlaufen die Strömung des Festbettes sowie des strömenden Gases in gleicher Richtung. Es entsteht ein Gas mit geringen Verunreinigungen. Zum Erreichen von geringen Gasverunreinigungen bleibt bei derzeitigem Stand der Technik der Reaktor auf die Kapazität von 50 bis 250 kW<sub>el</sub> begrenzt. Demgegenüber erlaubt das Gegenstromverfahren Reaktorkapazitäten von 100 bis 5.000 kW<sub>el</sub>, wobei das erzeugte Gas aufgrund hoher Teerfrachten einer Reinigung unterzogen werden muss. Eine Nutzungsmöglichkeit des erzeugten Gases aus der Festbettvergasung stellt die Verstromung mittels angepasster Otto-Motoren, so genannte Schwachgasmotoren, dar (KLEINHAPPL 2004, S. 45 ff.). Bei großtechnischer Biomassevergasung wird auf das Wirbelschicht- oder das Flugstromverfahren zurückgegriffen. Das Wirbelschichtverfahren ist gekennzeichnet durch fluidisierende Bettmaterialien, in die die feinkörnigen Biomasseteilchen eingemischt werden. Das aufgeheizte Bettmaterial, z. B. Sand oder Keramikkugeln, wird inklusive des Brennstoffes turbulent durchmischt, wodurch es nahezu

Flüssigkeitseigenschaften hat. Die Bettmaterialien können inert oder auch katalytisch aktiv sein. In beide Alternativen dienen sie als homogene Hitzequelle bzw. Wärmeträger mit hervorragender Wärmeübertragung für eine optimale und vollständige Vergasung der Biomasse. Insgesamt ist das Wirbelschichtverfahren gekennzeichnet durch ein breites Spektrum der Brennstoffkorngrößen sowie eine großzügige Skalierbarkeit der Reaktoren (KLEINHAPPL 2004, S. 45 ff., KARL 2004, S. 71 ff.). Das Flugstromverfahren ist vergleichbar mit der Staubfeuerung. Es sind hohe Betriebstemperaturen möglich, wobei jedoch kleinste Brennstoffpartikel notwendig sind. Dabei werden sämtliche Teerbestandteile gekrackt, die Asche kann flüssig abgezogen werden. Die Technologie lässt hohe Leistungsdichten und hohe Reaktorkapazitäten zu (KLEINHAPPL 2004, S. 45 ff., VOGEL et al. 2006, S. 54).

Es befinden sich derzeit einige Verfahren zur Vergasung von Biomasse in der Erprobung und kleintechnischen Anwendung. Großindustrielle Umsetzungen der Verfahren stellen momentan noch ein Problem dar und befinden sich in der Entwicklung. Das Carbo-V Verfahren von Choren zeichnet sich durch einen dreistufigen Vergasungsprozess aus, der durch den Einsatz eines Flugstromvergaser ein teerfreies Synthesegas hervorbringt. Als Brennstoff eignen sich nach Herstellerangaben jegliche organische Stoffe (RUDLOFF 2004, S. 234 ff., ALTHAPP 2004, S. 218 ff.). Bei der Wasserdampfvergasung in der zirkulierenden Wirbelschicht der TU Wien, realisiert im Güssing-Projekt, wird die Biomasse bei ca. 850°C unter Zuführung von Wasserdampf vergast, wodurch ein stickstofffreies und teearmes Produktgas entsteht (AICHERNIG 2004, S. 225 ff.). Das Verfahren der gestuften Reformierung (DMT, Blauer Turm) besteht aus einem zweistufigen Prozess. Zunächst wird die Biomasse pyrolysiert. Das Pyrolysegas wird anschließend unter Einsatz von Wasserdampf zu einem wasserstoffreichen Produktgas umgesetzt. Der aus der ersten Stufe anfallende Pyrolysekoks wird in einer externen Feuerung genutzt (MÜHLEN und SCHMID 2004, S. 240 ff.).

Das AER-Verfahren ermöglicht hohe Wasserstoffgehalte im Produktgas. Somit setzen mit Ausnahme des Carbo-V Verfahrens alle Prozesse auf ein wasserstoffreiches Produktgas. Insgesamt sind bei der Vergasung hohe Drücke und hohe Temperaturen notwendig (BERGER und HEIN 2004). Die anschließende Gasreinigung mit nassen (Niedertemperaturverfahren) oder trockenen Verfahren (Hoch- und Niedertemperaturverfahren) ist notwendig, um die Kraftstoffsynthese störungsfrei und in kurzen Zeitintervallen realisieren zu können. Mittels Partikelfiltration werden Staubpartikel entfernt. Die zwei bis sechs Prozent Teer, die aus der Biomassevergasung entstehen, können durch thermische und katalytische Teerspaltung bzw. mittels regenerierbarer Waschlösung ausgewaschen werden. Der im Produktgas enthaltene Wasserdampf kondensiert durch Abkühlung aus. Es folgen noch trockene Niedertemperaturverfahren zur Abtrennung von Spurenstoffen wie Halogenen, Alkaliverbindungen, Schwefelverbindungen (BANDI 2004, BOLHAR-NORDENKAMPF und JÖRG 2004, S. 84 ff.).

Einige Vergasungsverfahren (AER-Verfahren oder Druckvergaser) benötigen flüssige Brennstoffe, wodurch die Pyrolyse als Vorprozess notwendig ist. Das erzeugte Pyrolyseöl, auch als Slurry oder Bio Crude Oil bezeichnet, kann u. a. als Zwischenprodukt zwischen fester Bio-

masse und dem Synthesegas angesehen werden. Die Herstellung von Pyrolyseöl erfolgt durch die Flash-Pyrolyse. Dies ist ein Mitteltemperaturprozess bei circa 475°C, in dem die auf eine Partikelgröße von zwei bis drei Millimeter zerkleinerte Biomasse unter Sauerstoffabschluss sehr schnell erhitzt wird. Die freiwerdenden Produkte kondensieren nach schneller Abkühlung zu einer rötlich-braunen Flüssigkeit. Neben dieser Flüssigkeit mit einer Masseausbeute von etwa 75 Prozent fallen etwa zehn bis 15 Prozent Holzkohle und circa 15 bis 20 Prozent Gas als wertvolle Nebenprodukte an. Holzkohle und Gas dienen der Prozessenergieerzeugung, so dass lediglich Asche als Reststoff verbleibt. Pyrolyseöle besitzen eine Dichte von etwa 1,2 Kilogramm je Kubikdezimeter. Der Wassergehalt liegt zwischen 15 und 30 Prozent, das weitere Vielstoffgemisch besteht aus organischen sauerstoffhaltigen Verbindungen wie z. B. organische Säuren, Pyrolyselignin, Aldehyden, Ketonen, Alkoholen, Phenolen. Je nach Verfahren und Ausgangsmaterial schwankt der Heizwert zwischen 15 und 20 Megajoule je Kilogramm. Pyrolyseöle dienen nicht nur als Rohstoff zur Vergasung, sondern können auch als Chemierohstoff verwendet werden. Die Kohle, bzw. auch Koks genannt, kann fein vermahlen dem Pyrolyseöl untergemischt werden kann. Diese Slurry enthält dann bis zu 90 Prozent der in der ursprünglichen Biomasse enthaltenen Energie. (MEIER 2004, SPECHT et al. 2004, S. 35, HENRICH und DINJUS 2004, S. 298 ff.; HENRICH et al. 2004, S. 302 ff.).

Das aus der Biomasse-Vergasung gewonnene Produktgas kann nach entsprechender Gasreinigung entweder direkt in einem angepassten Blockheizkraftwerk zur Strom und Wärmegewinnung genutzt werden oder weiterverarbeitet werden zu definierten synthetischen Kraftstoffen. Bei der Gasreinigung, für die schon etablierte Verfahren zur Verfügung stehen, werden Stör-gase, die die folgende Verarbeitung behindern, entfernt. Dies sind zum Beispiel Schwefel- und Stickstoffverbindungen.

Bei der Verwendung der aus der thermochemischen Vergasung hervorgehenden Synthesegase in angepassten Motoren zur Verstromung können auch in kleiner dimensionierten Kraftwerken hohen Nutzungsgrade bezüglich des Energieeinsatzes in Form von Biomasse realisiert werden. Mit dem klassischen dampfkraftbasierten Vergleichsprozess können entsprechende Nutzungsgrade nicht erreicht werden (KLEINHAPPL 2004, S. 45 ff.). Bei den Aggregaten handelt es sich um angepasste Gasmotoren oder Gasturbinen, in denen das Gas verbrannt und in mechanische Kraft umgewandelt wird. Gasturbinen besitzen den Vorteil luftgetragener Wellen, wodurch kaum Verschleiß auftritt und durch den fehlenden Schmierstoffbedarf niedrige Betriebskosten auftreten. Diesen Vorteilen stehen vor allem im Bereich der Mikrogasturbinen im Leistungsbereich von etwa 30 bis 120 Kilowatt elektrisch wesentlich höhere Investitionssummen sowie deutlich niedrigere elektrische Wirkungsgrade gegenüber. Realisieren Gasmotoren derzeit elektrische Wirkungsgrade zwischen 30 und 40 Prozent, so liegen vergleichbare Gasturbinen im Bereich zwischen 20 und 30 Prozent (VOGEL et al. 2006, S. 24 ff., S. 107 ff. und S. 111 ff.).

Bei der Weiterverarbeitung des Produktgases in einer der Vergasung folgenden Kraftstoffsynthese muss das Gasverhältnis von Wasserstoff zu Kohlenmonoxid auf zwei zu eins eingestellt

werden, da dieses nicht automatisch nach der Vergasung und Gasreinigung vorliegt. Mit Hilfe des CO-Shifts werden Wasser und Kohlenmonoxid in Wasserstoff und Kohlendioxid umgewandelt. Das Kohlendioxid wird anschließend abgetrennt.

Die Fischer-Tropsch Synthese ist ein schon lange etablierter und vielfach angewandter Polymerisationsprozess (vgl. Gas to Liquid (GtL) oder Coal to Liquid (CtL)), bei dem aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid mittels Katalysatoreinsatz unter Freisetzung von Wasser langkettige, kaum verzweigte Kohlenwasserstoffketten erzeugt werden. Das Kettenwachstum kann beeinflusst werden durch die Katalysatorwahl und die Synthesebedingungen hinsichtlich Temperatur, Druck und Synthesegaszusammensetzung. Nach der Polymerisation werden die erzeugten Kohlenwasserstoffketten mittels Verfahren, die aus der Erdölverarbeitung bekannt sind, aufbereitet.

Gegenüber dem komplett zentralen Ansatz der Firma Choren setzt das Forschungszentrum Karlsruhe auf ein absätziges Verfahren. Die wenig transportwürdige Biomasse wird in dezentralen Anlagen mittels Flashpyrolyse zu Pyrolyseöl und –koks verarbeitet. Die daraus gewonnene Slurry kann dann über weite Strecken zu zentralen Vergasungs- und Kraftstoffsynthesanlagen zur Weiterverarbeitung transportiert werden (HENRICH und DINJUS 2004, S. 298 ff., HENRICH et al. 2004, S. 302 ff.).

Wegen der hauptsächlich unverzweigten Kohlenwasserstoffketten mit hoher Cetanzahl (Cetan:  $C_{16}H_{34}$ , verantwortlich für die Zündwilligkeit des Kraftstoffs) sowie niedrigen Gehalten an Schwefel und Aromaten eignet sich das Produkt, das als BtL, Synfuel oder Sundiesel bezeichnet wird, als hochwertiger Dieselmotorkraftstoff (UNRUH et al. 2004, S. 186 ff., RUDLOFF 2004, S. 234 ff., VOGEL et al. 2004, S. 268 ff.). Mittelfristig wird diesem synthetischen Biomotorkraftstoff eine große Bedeutung beigemessen, da er analog zu den Rohölmotorkraftstoffen kohlenstoffbasiert ist und als direktes Substitut eingesetzt werden kann. Entsprechende synthetische Motorkraftstoff auf Erdgasbasis, das GTL (Gas to Liquid) oder auf Kohlebasis, das CTL (Coal to Liquid) werden bereits den Premiummotorkraftstoffen zugemischt bzw. direkt als Motorkraftstoff eingesetzt. Damit ist das BtL als Reinkraftstoff oder per Zumischung direkt nutzbar, ohne dass Veränderungen an den derzeitigen Logistiksystemen und Motorenkonzepten nötig sind. Diesen Vorteilen steht der sehr aufwändige Herstellungsprozess gegenüber (SPECHT et al. 2004, S. 32).

Neben den Fischer-Tropsch-Motorkraftstoffen stellt Methanol eine zweite Alternative als synthetischer Motorkraftstoff auf Basis thermochemischer Vergasung von Biomasse dar. Die Methanolsynthese erfolgt bei wesentlich höheren Drücken als die Fischer-Tropsch Synthese (LEIBLE et al. 2006, S. 64). Verwendung finden kann das Methanol in speziellen Brennstoffzellen oder als Beimischung von bis zu 15 Prozent zu konventionellen Otto-Motorkraftstoffen. Aufgrund der korrosiven und kanzerogenen Eigenschaften erscheint der Motorkraftstoff in der praktischen Anwendung eher problematisch. Grundsätzlich dient Methanol derzeit nur als Rohstoff zur Ummesterung von Pflanzenölen zu Biodiesel (SPECHT et al. 2004, S. 31, VOGEL et al. 2004, S. 275 f.).

---

Als dritter synthetischer Kraftstoff kann Dimethylether (DME) angesehen werden. Die Herstellung kann entweder indirekt aus Methanol oder direkt aus Synthesegas mittels speziell entwickelter Katalysatoren erfolgen. Stand der Technik ist die Erzeugung von Methanol und die anschließende katalytische Umwandlung zu DME. Der Aggregatzustand des DME entspricht den derzeit verfügbaren Flüssiggasen (LPG, Liquefied Petroleum Gas) Propan oder Butan und erfordert entsprechend druckstabile Lagerungssysteme. Als Kraftstoff ist DME nur in umgerüsteten Dieselmotoren nutzbar (SPECHT et al. 2004, S. 32, VOGEL et al. 2004, S. 276).

Ein weiterer synthetischer und gasförmiger Biokraftstoff ist das SNG (substitute (synthetic) natural gas oder Methanersatzgas). Es besitzt eine dreifach höhere volumetrische Energiedichte gegenüber Wasserstoff und wird derzeit v. a. in Schweden und in der Schweiz als Kraftstoff genutzt, wobei dort die Basis der Herstellung meist der biologische Biogasprozess der anaeroben Vergärung ist (SPECHT et al. 2004, S. 33). Eine weitere Möglichkeit der Erzeugung ist die katalytische Methanisierung von Synthesegas aus thermochemischen Verfahren (SPECHT et al. 2004, S. 35). Dabei sind derzeit mehrere Verfahren in der Entwicklung. Mit einem angepassten AER-Prozess kann der Kohlenmonoxid und Kohlendioxid-Anteil im Produktgas entsprechend eingestellt werden, um dann daraus mit dem Wasserstoff in einer anschließenden einstufigen chemischen Methanisierungsstufe ein methanreiches Gas zu erhalten, das eine ins Erdgasnetz einspeisbare Gasqualität ohne weitere Aufbereitungsprozesse erreicht (SPECHT et al. 2006, S. 148 ff.). Ein anderes Verfahren erzeugt in der ersten Stufe bei 800 bis 900°C aus der festen Biomasse hauptsächlich Wasserstoff und Kohlenmonoxid, woraus in einer zweiten Stufe bei etwa 400°C Methan entsteht. Eine direkte Umsetzung von Biomasse zu Methan und Kohlendioxid soll bei ca. 400°C in überkritischem Wasser (über 374°C und über 221 bar) als Reaktionsmedium und bei Einsatz geeigneter Katalysatoren erfolgen (STUCKI et al. 2004, S. 210 ff.).

Eine langfristige Kraftstoffstrategie beinhaltet Wasserstoff als Energieträger. Neben der elektrolytischen Wasserstofferzeugung mittels Einsatz von elektrischem Strom werden momentan Verfahren zur Wasserstofferzeugung aus Biomasse entwickelt. In der Pilotanlage namens VERENA wird in einem kontinuierlichen Prozess mittels hydrothormaler Vergasung Wasserstoff erzeugt. Dabei wird die Biomasse nach Vorkonditionierung mit überkritischem Wasser versetzt. Unter Sauerstoffabschluss wird der in der Biomasse vorhandene Kohlenstoff zu Kohlendioxid oxidiert, der Wasserstoff aus der Biomasse und aus dem Wasser wird freigesetzt in ein Produktgas, das bis zu 80 Volumenprozent Wasserstoff enthält (BOUKIS et al. 2004). Ein zweites Verfahren zur Wasserstofferzeugung aus Biomasse ist der AER-Prozess (Absorption Enhanced Reforming). Dabei zerfällt die Biomasse unter Zufuhr einer definierten Wasserdampfmenge bei 600 bis 800°C zunächst Kohlenmonoxid und Wasserstoff. Das Kohlenmonoxid reagiert mit dem noch vorhandenen Wasserdampf zu Kohlendioxid und Wasserstoff. Das Kohlendioxid wird durch zugegebenes Kalziumoxid als Karbonat ausgefällt und aus dem Gasgemisch entfernt. Das Kalziumkarbonat kann regeneriert und wieder verwendet

werden. Das gewonnene trockene Produktgas weist nach Laborversuchen im Festbettreaktor Wasserstoffgehalte von mehr als 90 Prozent auf. (ZUBERBÜHLER et al. 2004, S. 176 ff.). Mittels Druckwechseladsorption lässt sich der Wasserstoff vom Restgas (Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Wasserdampf, Stickstoff und nicht umgesetztes Edukt) abtrennen (SPECHT et al. 2004, S. 42). Wasserstoff stellt ebenso wie Methanol einen geeigneten Kraftstoff für Brennstoffzellen dar.

Eine zweite Verfahrensgruppe zur Erzeugung von synthetischen Biokraftstoffen verzichtet auf den Zwischenschritt der Vergasung und gewinnt durch entsprechende Reaktionsbedingungen direkt aus fester Biomasse flüssige Kohlenwasserstoffverbindungen. Die wissenschaftliche Basis geht über 100 Jahre zurück, wobei ein zentrales Element die Kohleverölung darstellte. Erneute Motivationsschübe zur Optimierung der Technologie ergaben sich während der Ölkrisen in den 1970er Jahren (BEHRENDT et al. 2006, S. 4 ff.). Die bisherige Vielfalt an Verfahren zur Direktverflüssigung von Biomasse beinhaltet die Verwendung von Lösungsmitteln und wird im Druckbereich zwischen einem und 240 bar sowie bei Temperaturen zwischen 150 und 420°C betrieben. Als Lösungsmittel können einfache Alkohole, Polyalkohole oder organische Säuren dienen. Metalle, Laugen oder Säuren können alternativ als Katalysatoren eingesetzt werden (BEHRENDT et al. 2006, S. 35 f.). Als wesentliches Hauptprodukt resultiert eine organische Flüssigkeit, das Produktöl, das etwa 35 bis 55 Massenprozent der eingesetzten Biomasse entspricht (BEHRENDT et al. 2006, S. 15 und S. 44). Weiterhin fallen eine wässrige Phase, Gas sowie Feststoffe an. Ein Anfang der 1980er Jahre durchgeführtes Forschungsprojekt zur Direktverflüssigung von Pappelholz erbrachte Ölausbeuten zwischen 38 und 53 Massenprozent bezogen auf die eingesetzte Biomasse, sowie Heizwerte der Produktöle zwischen 29 und 36 Megajoule je Kilogramm. Der Sauerstoffgehalt, den es möglichst gering zu erzeugen gilt, lag zwischen neun und 25 Massenprozent des Produktöles (BEHRENDT et al. 2006, S. 45). WILLNER et al. (2004, S. 235 ff.) verzeichnen bei einer einstufigen katalytische Umwandlung von Holz im Labormaßstab eine Produktölausbeute zwischen 40 und 55 Massenprozent, wobei circa 70 Prozent der in der Biomasse enthaltenen Energie in das Produktöl übergingen. Der überwiegende Anteil des Produktöles besitzt Gasöleigenschaften, geringere Anteile entsprechen den Benzineigenschaften und ein kleiner Anteil besitzt Schweröleigenschaften. Durch destillative Trennung können aus dem Produktöl Benzin- und Dieselfraktion gewonnen werden. (WILLNER 2005a). Im Folgenden werden einige in der Entwicklung befindliche Direktverflüssigungsverfahren für Biomasse dargestellt.

Das KDV-Verfahren (katalytische drucklose Verölung) der HAW Hamburg (Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg) stellt eine einstufige drucklose katalytische Direktverflüssigung von kohlenstoffhaltigen Rohstoffen unterhalb von 400°C dar. Das Verfahren wurde zunächst für die Verwertung von Altölen und kohlenwasserstoffreichen Kunststoffen entwickelt. Momentan wird das Verfahren für die Biomasseverwertung angepasst. Der zerkleinerte Rohstoff wird kontinuierlich in den Reaktor mit suspendiertem Katalysator eingetragen, die aufsteigenden Crackdämpfe verlassen den Reaktor am Kopfausgang und kondensie-

---

ren in einem wassergekühlten Kondensator wobei sich die schwerere Wasserphase unter der leichteren Kohlenwasserstoffphase, dem Produktöl, absetzt (WILLNER 2005ab).

Das DoS-Verfahren (Direktverflüssigung organischer Substanzen) ist eine einstufige hydrierende Druckbehandlung von ligninreichen Biomassen unter etwa 80 bar Druck bei 400 bis 450°C, basierend auf halbkontinuierlichen Laborversuchen der TU Hamburg-Harburg. Im Reaktor wird die getrocknete Biomasse in die Produktgruppen Öl, Wasser, Kohle und Gas zerlegt, wobei Öl und Wasser nach Verlassen des Reaktors auskondensieren und einer Mehrstufendestillation zugeführt werden. Das Gas dient als Energiequelle, Kohle und Wasserphase dienen als Wasserstoffquelle. Damit soll der Prozess nahezu energieautark ablaufen können (WILLNER 2005b, WILLNER 2006).

Mit dem HTU-Verfahren (Hydrothermal Upgrading) der Firma Shell wird seit 1982 bearbeitet. Dabei wird eine große Vielfalt auch feuchter Biomassen unter Druck zum Biocrude, einer schweren organischen Flüssigkeit, die bei 80°C fest wird, verflüssigt. Dieses Biocrude kann in weiteren Bearbeitungsschritten zu Leicht- und Schwerfraktionen zu direkten energetischen Nutzung zerlegt oder durch eine Entfernung des Sauerstoffs mit dem HDO-Verfahren (Hydro-Deoxygenation) zu Ölfractionen weiterverarbeitet werden (BEHRENDT et al. 2006, S. 57 f.).

Die Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft entwickelt seit den 1980er Jahren ein Verfahren, das BFH-Verfahren, zur direkten katalytischen Druckverflüssigung von lignozellulosehaltigen Rohstoffen zu flüssigen Produkten. Es handelt sich dabei um drei hintereinander geschaltete Autoklaven, mittels derer ein schnelles Aufheizen der wässrigen organischen Lösungsmittel sowie ein schnelles Abkühlen des Reaktionsgemisches realisiert werden kann. Einsatzstoffe neben der Biomasse sind Trägeröl, das wieder verwendet wird, Edelmetallkatalysatoren sowie Wasserstoff. Dieser Wasserstoff kann aus dem entstehenden Produktgas gewonnen und dem Prozess zugeführt werden. In der Massenbilanz wandeln sich 100 Teilen Biomasse und 4 Teile Wasserstoff zu 36 Teilen Produktöl, 25 Teilen wässrige Phase, 5 Teilen Kohle und 38 Teilen Gase (BEHRENDT et al. 2006, S. 59).

Die Direktverflüssigung von Biomasse wird von BEHRENDT et al. (2006, S. 84 f.) als noch nicht ausgereift für die großtechnische Anwendung angesehen. Es gelte, die chemischen und physikalischen Prozesse wissenschaftlich tiefer zu durchdringen, um aus diesen noch fehlenden Kenntnissen praxistaugliche sowie ökonomisch darstellbare Verfahren mit annehmbaren Chemikalien- und Energieeinsatz entwickeln zu können.

Insgesamt zeigt sich, dass sich aus der sehr großen Vielfalt der Biomasse-Rohstoffe eine ebenso große Vielfalt an Nutzungsmöglichkeiten in energetischer Sicht ergibt. Welche Nutzungsmöglichkeiten der Biomasse sich entwickeln und großtechnisch eingesetzt werden hängt von mehreren Faktoren ab. Zum einen muss ein großtechnisch führbarer Prozess realisiert sein, der zu ökonomisch vertretbaren Kosten entsprechende Produkte hervorbringt. Diese Produkte müssen zum Zweiten in etablierten Systemen nutzbar sein bzw. es gilt, entsprechende Nutzungsmöglichkeiten zu schaffen. Gerade bei Innovationen, die bewährte und etablierte Systeme beeinflussen oder verändern bzw. noch nicht ökonomisch wettbewerbsfähig sind

greift gerne die öffentliche Hand zu politischen Förderinstrumenten. Im Bereich der Entwicklung der erneuerbaren Energien können die politischen Instrumente als ausschlaggebend angesehen werden.

### 2.1.2 Rahmenbedingungen der erneuerbaren Energien

Die energetische Nutzung von Biomasse kann heute mit einigen Ausnahmen der thermischen Nutzung gegenüber fossilen Energiequellen ökonomisch nicht bestehen. Insgesamt sollten die erneuerbaren Energieformen nicht isoliert, sondern im gesamten Zusammenhang der gesamten Energieversorgung, der Ausbeutung von Ressourcen und den damit verbundenen Umweltwirkungen betrachtet werden. Diese Wechselwirkungen sind schon spätestens seit den 70er Jahren des 20sten Jahrhunderts bekannt und akzeptiert. Die daraus resultierenden Konsequenzen und Handlungsnotwendigkeiten werden jedoch nur sehr langsam in politische Instrumente bzw. neue menschliche Verhaltensmuster umgesetzt. Folgende Tabelle 2-5 zeigt eine Übersicht über die Rahmenbedingungen und politischen Instrumente auf verschiedenen politischen Ebenen bezüglich Energieeinsparung sowie der Förderung von erneuerbaren Energien der jungen Vergangenheit.

Auf der internationalen Ebene der Vereinten Nationen wirken die Appelle und Vereinbarungen voranging im Bereich der Vermeidung von Treibhausgasemissionen und somit in Richtung der Einsparung fossiler Energieträger. Im Jahr 1987 verfasste die World Commission on Environment and Development unter der Regie von Gro Harlem Brundtland den Brundtland Report mit dem Titel „Our Common Future“. Darin wurde die Forderung nach einer nachhaltigen Entwicklung der Menschheit sowie ihrer Lebensweise formuliert. Ausgangspunkt war die Erkenntnis, dass die bisherige Wirtschaftsweise sowie eine unveränderte Weiterentwicklung der Wirtschaft die Kapazitäten der Erde hinsichtlich Rohstoffquelle sowie Senke für Abfälle und Abgase weit über ein verträgliches Maß überbeanspruchen würden (WCED 1987).

Auf dem „Erdgipfel“, der Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung im Juni 1992 in Rio de Janeiro verabschiedeten mehr als 170 Staaten ein Aktionsprogramm für das 21. Jahrhundert, die Agenda 21. Diese Agenda 21 enthält detaillierte Handlungsaufträge für alle wesentlichen Politikbereiche für eine umweltverträgliche und nachhaltige Entwicklung. Für den Bereich Energie wird eine deutliche Einschränkung des Energieverbrauchs zur Reduzierung der schädlichen Auswirkungen auf die Atmosphäre gefordert (BMU 1997, S. 68 ff.). Auf diesem Erdgipfel unterzeichneten 154 Staaten die Klimarahmenkonvention zur Begrenzung des anthropogenen Klimawandels. Darin enthalten ist u. a. die Selbstverpflichtung der Industrieländer, die Emissionen bis 2000 auf dem Niveau von 1990 zu stabilisieren (BMU 2004a). Auf der 3. Klimakonferenz im japanischen Kyoto verabschiedeten die Vertragsstaaten das „Kyoto-Protokoll“, in dem sich die Industriestaaten verbindlich zur Reduzierung des Ausstoßes von Treibhausgasen im Zeitraum von 2008 bis 2012 um mindestens fünf Prozent unter das Niveau von 1990 verpflichteten (UN 1998, BANNERT 2004, S. 21, BMU 2004a).

**Tabelle 2-5: Rahmenbedingungen und politische Instrumente im Bereich der erneuerbaren Energien**

<b>Ebene</b>	<b>Einsparung, Klimaschutz</b>	<b>el. Strom</b>	<b>Kraftstoffe</b>	<b>Wärme/Kälte</b>
Vereinte Nationen	Brundtland Report (1987) Agenda 21 (1992) Kyoto Protokoll (1997) +2°C-Obergrenze von Cancun (2010)			
Europäische Union		Richtlinie 2001/77/EG (2001)	Richtlinie 2003/30/EG (2003)	
		Richtlinie 2009/28/EG (Erneuerbare-Energien-Richtlinie)		
Deutschland	Gebäude-sanierungs- und CO <sub>2</sub> -Minderungsprogramme (seit 2000) Energie-einsparungsgesetz (2005, 2009) Biomasseaktionsplan (2009)	Marktanreizprogramme (seit 1999) EEG (2000, 2004, 2009, 2012) KWK-Gesetz (2002, 2009)	Mineralöl-steuergesetz (2004), abgelöst durch: Energiesteuer-gesetz (2006, 2011) Biokraftstoff-quotengesetz (2006) Gasnetzzugangs-verordnung (2010) Gasnetzentgelt-verordnung (2005, 2010) Anreizregulierungs-verordnung (2007, 2011)	Marktanreizprogramme (seit 1999) KWK-Gesetz (2002, 2009)

Quellen: eigene Darstellung nach WCED 1987, BMU 1997, UN 1998, ABL. EG 2001a, ABL. EG 2003, ABL. EG 2009, BMU 2002, BGBl. 2005ab, BGBl. 2009, BGBl. 2000, BGBl. 2002a, BGBl. 1992, BGBl. 2006ab, BGBl. 2007, BGBl. 2008ab, BGBl. 2010ab, BGBl. 2011, BMELV 2009ab, KfW 2011, BMU 2011b, THRÄN et al. 2005

Auf den Nachfolgekongressen wurden bisher nur minimale Klimaschutzziele vereinbart. So konnte im 2010 in Cancun das Ziel einer maximalen Steigerung der Durchschnittstemperatur um 2 °C festgelegt werden. Konkrete Klimaschutzziele und Maßnahmen für die Zeit nach 2012, wenn die Gültigkeit der Kyoto-Ziele erloschen ist, stehen noch aus (BMU 2011b).

Die Europäische Union verpflichtete sich in diesem Zusammenhang, ihre Treibhausgasemissionen von 2008 bis 2012 um acht Prozent gegenüber 1990 zu senken. Deutschlands Beitrag für den Zeitraum soll eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 21 Prozent sein (BMU 2000). Das Kyoto-Protokoll ist am 16. Februar 2005 in Kraft getreten und ist somit für die Staaten, die es ratifiziert haben, verbindlich (UNFCCC 2006). Zur Durchsetzung und Realisierung der Klimaschutzziele existiert eine Reihe von Instrumenten: Zunächst sind alle Vertragsstaaten verpflichtet, jährliche Inventare für alle Treibhausgase nach den Regeln der IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) zu erstellen. Diese Inventare werden dann von internationalen Experten begutachtet. Die Verpflichtung erfordert Maßnahmen zur Emissi-

onsminderung. Dabei bestehen neben der Reduktion von Emissionen im einzelnen Betrieb bzw. in den einzelnen Vertragsstaaten verschiedene weitere Alternativen, den Reduktionszielen gerecht zu werden. Der Clean Development Mechanism (CDM) umfasst alle Maßnahmen zur Emissionsminderung von Industrieländern in Entwicklungsländern unter bestimmten Auflagen und Regeln. Mit dem Instrument Joint Implementation (JI) können Projekte zur Emissionsminderung von Industrieländern in anderen Industrieländern realisiert werden. Der Emissionshandel ermöglicht schließlich, bei Übererfüllung der Reduktionsvorschriften überschüssige Reduktionsanteile verkaufen zu können. Bei Nichterfüllen der vorgeschriebenen Ziele greift ein im Rahmen der Marrakesch-Vereinbarung 2001 getroffener Sanktionsmechanismus. Der „Enforcement Branche“, der Erfüllungskontrollausschuss, entscheidet über die Zielerfüllung bzw. ob einem Land Sanktionen auferlegt werden. Bei Verfehlen des Emissionsziels werden die zu viel emittierten Mengen vom Emissionsrechtebudget des zweiten Verpflichtungszeitraumes mit einer „Wiedergutmachungsrate“ von 1,3 reduziert. Zusätzlich muss der Sanktionierte einen Erfüllungsplan vorlegen und darf keine Emissionszertifikate verkaufen. Wird der Berichtspflicht nicht nachgekommen, so wird das Land von den flexiblen Mechanismen im Rahmen des Emissionshandels ausgeschlossen (WBGU 2003a, S. 39, WBGU 2003b, S. 73).

Das 1988 gegründete Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) entwickelte seit 1991 Vorschriften zur nationalen Treibhausgasinventarisierung, die „IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories“ (WMO und UNEP 2004). Im Jahr 1994 erschien ein erste Regelwerk, dessen überarbeitete Version schon 1996 veröffentlicht wurde (IPCC 1996abc). Nach zehn Jahren gab das IPCC erneut eine überarbeitete und aktualisierte Version der Vorschriften heraus (IPCC 2006abcde). Schon seit Jahren diskutieren die Vertragsstaaten des Kyoto-Protokolls über die Reduktionsziele für die Zeit nach dem Jahr 2012.

Auf europäischer Ebene besteht zum einen die Motivation, den vereinbarten Kyoto-Zielen gerecht zu werden. Zum anderen erscheint eine sukzessive Minderung der Abhängigkeit von den internationalen fossilen Energiemärkten sinnvoll. Die für den Strom- und Kraftstoffmarkt in Form von Richtlinien formulierten Ziele richten sich mehr in Richtung Substitution fossiler Energieträger durch erneuerbare Energiequellen als in Richtung einer grundsätzlichen Einsparung von Energie jeglicher Art. Es werden gewisse Mindestanteile von Erneuerbaren Energien in den nationalen Strom- und Kraftstoffmärkten zu bestimmten Zielzeitpunkten formuliert, deren Einhaltung es durch nationale Gesetzgebung zu realisieren gilt (ABL. EG 2001a, ABL. EG 2003a). In der „Richtlinie 2001/77/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen im Elektrizitätsbinnenmarkt“ sind für das Jahr 2010 zwei Ziele formuliert. Es gilt, in der EU bis 2010 12 Prozent des Bruttoinlandsenergieverbrauchs sowie 22,1 Prozent des gesamten Stromverbrauchs aus erneuerbaren Energiequellen bereitzustellen. Deutschland hat die Verpflichtung seinen Anteil mit 12,5 Prozent Strom aus erneuerbaren Energiequellen beizutragen. Österreich und Schweden sollen mit 78,1 und 60,0 Prozent die größten Beiträge zum Gesamt-EU-Ziel beitragen

(ABL. EG 2001a). Die „Richtlinie 2003/30/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Förderung der Verwendung von Biokraftstoffen oder anderen erneuerbaren Kraftstoffen im Verkehrssektor“ fordert einen am Energiegehalt gemessenen Biokraftstoffanteil von 5,75 Prozent aller Otto- und Dieselmotorkraftstoffe für den Verkehrssektor, die auf ihren Märkten bis Ende des Jahres 2010 in Verkehr gebracht werden (ABL. EG 2003a). Die Richtlinie des Europäischen Rates „zur Restrukturierung der gemeinschaftlichen Rahmenvorschriften zur Besteuerung von Energieerzeugnissen und elektrischem Strom“ schreibt den EU-Staaten Mindeststeuersätze für Kraftstoffe, Heizstoffe und elektrischem Strom vor (ABL. EG 2003b). Die Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG vom 5. 9. 2009 setzt die Formulierung von Zielen bis in das Jahr 2020 fort: Bis dahin sollen in der Europäischen Union 20 Prozent Anteil erneuerbare Energien am gesamten Bruttoenergieverbrauch realisiert sein. Die Beiträge der einzelnen Mitgliedstaaten unterscheiden sich. So beträgt der Beitrag Deutschlands 18 Prozent, der von Österreich 34 Prozent und der von Schweden 49 Prozent. Im Verkehrssektor sollen in allen Mitgliedsstaaten gleichermaßen je 10 Prozent Anteil an erneuerbare Energieträgern realisiert werden. Darüber hinaus wird eine Steigerung der Energieeffizienz bis 2020 um 20 Prozent gefordert und Nachhaltigkeitskriterien für Biokraftstoffe definiert. Im Anhang befindet sich eine Liste, in der die festgelegten typischen Werte und Standardwerte für die Minderung von Treibhausgasemissionen für Biokraftstoffe bei Herstellung ohne Netto-CO<sub>2</sub>-Emissionen infolge von Landnutzungsänderungen dokumentiert sind (Abl. EG 2009).

Deutschland realisiert die Erfüllung der von der EU formulierten Ziele auf zweierlei Wegen. Im Strombereich wird durch das Förderinstrument des Erneuerbaren Energien Gesetzes (EEG) (BGBL. 2000, BGBL. 2004, BGBL. 2008a, BGBL. 2011) die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen durch entsprechend garantierte Mindestvergütungssätze je erzeugter Einheit elektrischem Strom und einer Vergütungsdauer von 20 Jahren ermöglicht. Das EEG ersetzte im Jahr 2000 das Stromeinspeisungsgesetz des Jahres 1990 (BGBL. 1990), zuletzt geändert 1998 mit dem Gesetz zur Neuordnung des Energiewirtschaftsrechts (BGBL. 1998), und wirkt staatshaushaltsneutral. Der Gesetzgeber schreibt den Energieversorgungsunternehmen vor, welche individuell für jede erneuerbare Energiequelle spezifische Vergütung er dem Stromproduzenten zu bezahlen hat. Gleichzeitig darf der Energieversorger diese Mehrkosten an den Konsumenten weitergeben. Durch die Novellierungen des EEG in den Jahren 2004, 2009 und 2012 wurde und wird die Erzeugung von elektrischem Strom v. a. aus Biomasse stetig besser gestellt (BGBL. 2004, BGBL. 2008a, BGBL. 2011). Durch die Einführung und Weiterführung des Biomasse-Bonus und Gülle-Bonus können je erzeugter Kilowattstunde Strom ab 1. Januar 2012 bis zu acht Eurocent zusätzlich zur sogenannten Grundvergütung erzielt werden. Der Bonus ist jedoch gebunden an eine ausschließliche Verwendung von Biomasserohstoffen landwirtschaftlicher Herkunft wie z.B. Gülle bzw. eigens angebaute

Energiekulturen. Dies führte im Jahr 2004 zu einer Spezialisierung der meisten Biogasanlagen zu NawaRo-Anlagen sowie zu einer erheblichen Vergrößerung der neu gebauten Anlagen hinsichtlich elektrischer Leistung (FACHVERBAND BIOGAS 2007). Durch eine stärkere Differenzierung der Boni wurde in der Novellierung 2009 der Fokus auf kleinere Anlagen gesetzt. Mit der Novellierung 2012 wird ein neuer Fokus auf eine effiziente Nutzung der Abwärme der BHKW's durch die Einführung einer Mindestquote an Abwärmenutzung gesetzt. Der Anteil Mais und Getreide am Substratmix wird auf maximal 60 Prozent begrenzt. (BGBL. 2011).

Der starke Preisanstieg der Pflanzenöle auch im Bereich der Pflanzenöl-Blockheizkraftwerke führte analog zur Biodieselbranche zur verstärkten Verwendung von Soja- bzw. Palmölen, die wesentlich günstiger als heimisches Rapsöl zu beziehen sind (FNR 2006ab).

Im Bereich der individuellen Mobilität, die nahezu ausschließlich mit Mineralölprodukten realisiert wird, ging die deutsche Regierung zunächst den Weg der Steuerbefreiung von der Mineralölsteuer zur Markteinführung von Biokraftstoffen bis Ende des Jahres 2008 (BGBL. 1992). Zunächst waren nur reine Biokraftstoffe, auch Biodiesel mit dem fossilen Methanolanteil, seit 1992 von der Mineralölsteuer befreit (BGBL. 1992). Die Änderung des Mineralölsteuergesetzes im Jahr 2002 befristet die Steuerbefreiung bis Ende des Jahres 2008 für die Anteile von Biokraftstoffen, die in entsprechenden Kraftstoffen enthalten sind (BGBL. 2002b). Durch diesen hohen Fördersatz und die gleichzeitig stetig gestiegenen Rohölpreise konnte sich gerade die Biodieselbranche derart gut entwickeln, dass der deutsche Finanzminister im Jahr 2006 auf rund eine Milliarde Euro an Steuereinnahmen verzichten musste (eigene Berechnungen nach BGBL. 1992, FNR 2006a, UFOP 2005, GRUNERT 2006, vgl. SCHÖPE 2006, S. 29). Zum ersten August 2006 ist das Energiesteuergesetz in Kraft getreten und löste damit das gleichzeitig außer Kraft getretene Mineralölsteuergesetz ab. Die faktische Steuerbefreiung von Biokraftstoffen gilt nun nicht mehr grundsätzlich. Für Fettsäuremethylester und Pflanzenöle wird die Steuerentlastung sukzessive abgebaut. Besonders förderungswürdige Biokraftstoffe, wie synthetische Biokraftstoffe, Ethanol aus Lignozellulose oder Energieerzeugnisse mit Biomethangehalten von 70 bis 90 Prozent, sind bis Ende des Jahres 2015 steuerbefreit (BGBL. 2006b). Das im Dezember 2006 verabschiedete Biokraftstoffquotengesetz präzisiert das im August verabschiedete Energiesteuergesetz und legt die nationalen Mindestanteile von Biokraftstoffen für Deutschland fest (Tabelle 2-6).

**Tabelle 2-6: Mindestanteile von Biokraftstoffen an den in den Verkehr gebrachten Diesel- und Ottokraftstoffen in Deutschland**

Bezeichnung	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2020
Gesamt-Quote	-	-	6,25%	6,75%	7,00%	7,25%	7,50%	7,75%	8,00%	10,00%
Diesel-Quote					4,40%					
Benzin-Quote	1,20%	2,00%					2,80%			

Quelle: eigene Darstellung nach BGBL. 2006a, ABL. EG 2009

Da sich die Mindestanteile der Kraftstoffe auf den Energiegehalt beziehen, bedeutet dies z.B. für das Jahr 2011 eine Beimischung von zehn Volumenprozent an Biokraftstoffen.

Mit der Entwicklung der Biogasaufbereitung auf Erdgasqualität im größeren Stil entstand die politische Notwendigkeit, die gegenüber fossilem Ergas fehlende Wettbewerbskraft zu kompensieren. Analog zum Strommarkt wurden mit der Gasnetzzugangsverordnung (BGBL. 2005b, BGBL. 2010b), der Anreizregulierungsverordnung (BGBL. 2007) und der Gasnetzentgeltverordnung (BGBL. 2010a) Regularien eingerichtet, die dem Biogas vorrangigen und definierten Zugang zu den Gasnetzen ermöglichen.

Darüber hinaus existieren in Deutschland weitere politische Instrumente zur Förderung der erneuerbaren Energien. Im Jahr 1999 wurde im Rahmen der ökologischen Steuerreform das Marktanzreizprogramm für erneuerbare Energien aufgelegt und leicht verändert bis heute fortgeschrieben. Fördergegenstände waren und sind die Errichtung von Solarkollektoranlagen zur Warmwasserbereitung, die Errichtung von automatisch beschickten Anlagen zur Verfeuerung fester Biomasse zur Strom- und/oder Wärme Gewinnung, die Errichtung von Biogas-, Wasserkraft- und Photovoltaikanlagen sowie die Errichtung von Anlagen zur Nutzung von Tiefengeothermie. Die Förderung erfolgt in Form von Zuschüssen vom Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) bzw. in Form von zinsgünstigen Darlehen und z. T. Teilschuldenerlässen über die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) (KfW 2011). Eine besondere Initiative stellte das 1999 initiierte 100.000-Dächer-Solarstrom-Programm zur Förderung der Photovoltaik dar. Im Rahmen dieses Programms konnten zinsverbilligte Kredite der KfW wahrgenommen werden (BMU 2002). Die Energieeinsparung wurde ab dem Jahr 2000 mit dem KfW-CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramm mit Zinsverbilligung langfristiger Finanzierung von Investitionen zur CO<sub>2</sub>-Minderung durch Energieeinsparung unterstützt. Die Förder Voraussetzung war eine Reduzierung des Kohlendioxidausstoßes von mindestens 40 kg CO<sub>2</sub> pro Quadratmeter Wohnfläche bei Sanierung von Altbauten (KfW 2011). Das KfW-CO<sub>2</sub>-Minderungsprogramm zielte auf die langfristige zinsverbilligte Förderung für Investitionen ab, die einen Beitrag zur Energieeinsparung und CO<sub>2</sub>-Minderung leisten bzw. für die Errichtung von KfW-Energiesparhäusern (KfW 2011). Die Regelungen zu Fördergegenständen sowie Förderkonditionen änderten sich stetig seit Beginn der Förderung im Jahre 1999. Der aktuelle Stand ist jeweils abzurufen im Internet auf den Seiten der KfW sowie der BAFA. Im September 2005 verabschiedete die Bundesregierung das Energieeinsparungsgesetz. Es schreibt u. a. vor, dass Eigentümer von Gebäuden, die zur Vermietung bzw. zum Verkauf vorgesehen sind, für diese Gebäude jeweils einen Energieausweis erstellen lassen müssen. Der Energieausweis gibt Auskunft, wie hoch der spezifische Energieverbrauch beim Bewohnen des Objektes absolut sowie im Vergleich zu effizienten Objekten liegt. Die Novellierung des Gesetzes im Jahr 2009 erhöht die Anforderungen vor allem im Bereich Wärmeschutz von Gebäuden und Effizienz technischer Anlagen (BGBL. 2005a, BGBL. 2009).

Mit dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz verfolgt die Bundesregierung das Ziel, die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahre 2010 zur Basis 1998 um mindestens 20 Mio. Tonnen zu senken

(BGBL. 2002a). Das Gesetz zielt ausschließlich auf den Bereich der Energiegewinnung aus fossilen Energieträgern ab und gesteht dem Erzeuger von Strom und gleichzeitig Wärme einen Zuschlag zur üblichen Stromvergütung in dem Rahmen zu, in dem er auskoppelbare Wärme erzeugt und abgibt. Seit 2009 besteht das Ziel, den Anteil des mittels Kraft-Wärme-Kopplung erzeugten Stromes auf 25 Prozent zu erhöhen (BGBL. 2008).

Neben der direkten Förderung der erneuerbaren Energien bzw. der Einsparungsmaßnahmen von Energieträgern überhaupt müssen auch die erheblichen Beträge von Transferzahlungen an den konventionellen, sprich fossilen Energiesektor aus der Staatskasse berücksichtigt werden. So wurde zum Beispiel die Verwendung heimischer Kohle im Jahr 2005 mit circa 1,6 Mrd. Euro gesetzlich subventioniert (BGBL. 1997). NITZSCHKE (2003) recherchierte im Jahr 2003 über die staatlichen Zahlungen im Bereich der fossilen Energieversorgung. So darf die Kernenergiebranche jährlich zwei Milliarden Euro steuerfreie Rückstellungen tätigen. Für Sicherheitsanforderungen werden circa. eine Milliarde Euro verwendet. Die Nukleare Energieforschung werde jährlich mit knapp 40 Millionen Euro, die Fusionsforschung mit 185 Millionen Euro jährlich gefördert. Für die Sanierung der Tagebaustätten von Braunkohle wurden bisher über 17 Milliarde Euro verwendet (NITZSCHKE 2003). Nicht wirklich bezifferbar sind die externen Kosten, die als Folge fossiler Energieversorgung auftreten.

Genau diesem Thema der Ermittlung externer Kosten bei wirtschaftlicher Aktivität widmet sich die Europäische Kommission seit 1991 in einem breit angelegten Verbundforschungsprojekt mit dem Namen „ExternE“ (EUROPEAN COMMISSION 2006). Insgesamt werden die Auswirkungen von wirtschaftlichen Aktivitäten, wie z. B. die Energiebereitstellung, auf menschliche Gesundheit, auf Gebäude, Nutzpflanzen, Treibhauseffekt und Ökosysteme monetär bewertet. Die Methode erfasst zunächst die Quelle der Emissionen, berücksichtigt die Verteilung der emittierten Stoffe um schließlich deren Schädigungspotenzial anhand einer Dosis-Reaktions-Funktion auf die genannten Bereiche zu schätzen. Das Ausmaß der Schädigung wird schließlich monetär bewertet. Die Summe der einzelnen Schädigungskosten auf die einzelnen betrachteten Bereiche ergibt die Summe der externen Kosten der betrachteten wirtschaftlichen Aktivität (BICKEL et al. 2005, S. 2 ff., EUROPEAN COMMISSION 2006). Bei der Anwendung auf den fossilen Energiesektor ergeben sich je Kilowattstunde elektrischem Strom, erzeugt auf Basis fossiler Brennstoffe, externe Kosten, die nur den Klimawandel betreffen, in Höhe von 0,4 bis 20 Eurocent (KREWITT et al. 1997, S. 79). Die direkten Schadenskosten je Tonne Kohlendioxid beziffern BICKEL et al. (2005, S. 196 f.) mit rund neun Euro. Dabei sind jedoch die mit Fluten, Hurrikanen etc. verbundenen Folgekosten noch nicht berücksichtigt, die durch den anthropogenen Klimawandel wohl verstärkt werden.

Diese externen Kosten werden in der folgenden Arbeit nicht weiter betrachtet. Lediglich die volkswirtschaftlichen Kosten, denen tatsächliche Geldbeträge gegenüberstehen, finden sich wieder.

## 2.2 Herangezogene Methoden

Zur Umsetzung der Ableitung spezifischer Biomasse-Energie-Mixe werden zwei anerkannte Methoden im Modell „*RegEnOpt*“ vereint. Die Darstellung der Umwandlungspfade sowie die Ermittlung der benötigten Kennzahlen der Pfade für die Optimierung erfolgen analog der offiziellen Vorschriften zur Ökobilanzierung. Für die Optimierung wird der betriebliche Planungsansatz der Linearen Programmierung herangezogen. Im Folgenden werden zunächst die beiden Methoden isoliert dargestellt um sie schließlich im Modell „*RegEnOpt*“ vereinen zu können.

### 2.2.1 Ökobilanzierung

Die erste Ökobilanz soll im Auftrag der Firma Coca-Cola am Midwest Research Institute in Kansas City, USA, im Jahr 1969 erstellt worden sein. In den frühen Studien zur Ökobilanzierung wurden schon die auch heute noch betrachteten Teilbereiche Rohmaterialverbrauch, Energiebedarf, Emissionen und Abfallbeseitigung quantitativ über den gesamten Lebensweg erfasst (KLÖPFFER und RENNER 1995 S. 2 ff., REHBINDER und SCHMIHING 2000 S. 1 ff.). Die Bezeichnung „Ökobilanz“ wurde vom Schweizer Umweltamt in einer Studie über Materialien für Packstoffe im Jahr 1984 eingeführt (KLÖPFFER und RENNER 1995 S. 3). Viele Produktökobilanzen wurden im Auftrag von Unternehmen erstellt, wovon ein großer Teil jedoch nicht veröffentlicht wurde. Bis Ende der 80er Jahre des 20sten Jahrhunderts entwickelte sich die Anzahl der Ökobilanzen nur langsam. Hinsichtlich der Anzahl jährlich veröffentlichter Ökobilanzen erlebte die Ökobilanz in den Jahren um 1990 herum eine „Hochzeit“ (RUBIK 1995, S. 8 ff). Zu dieser Zeit wurde nun in einer Kooperation von Industrie, Hochschulen, Umweltämtern, Consultingfirmen und Ökoinstituten der Versuch unternommen, die Vielzahl der Methoden zu vereinheitlichen. Darüber hinaus wurden die methodischen Anforderungen zunehmend erhöht (KLÖPFFER und RENNER 1995 S. 5 f.). U. a. durch die intensiven koordinativen und inhaltlichen Bemühungen der Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) wurde ein Standardmodell für die Ökobilanz vorgeschlagen. Dieses umfasst mit der Formulierung des Bilanzierungsziels, der Sachbilanz, der Wirkungsbilanz und der Bilanzbewertung vier wesentliche Untersuchungsschritte. Diese Methode wurde dann im Jahr 1997 weitestgehend von der International Organization for Standardization (ISO) als internationale Norm beschlossen und als europäische sowie nationale Norm anerkannt. Der Titel dieser Norm lautet „Ökobilanz – Prinzipien und allgemeine Anforderungen“ (DIN EN ISO 14040). In den Jahren 1998 und 2000 folgten drei weitere ISO-Normen zur Ökobilanz, welche die allgemeinen Anforderung der ersten Norm konkretisieren (DIN EN ISO 14041, DIN EN ISO 14042, DIN EN ISO 14043).

### 2.2.1.1 Umweltbewertungsinstrumente

Neben der Produkt-Ökobilanz, welche nun seit der Norm DIN EN ISO 14040 mit Ökobilanz bzw. Life Cycle Assessment (LCA) bezeichnet wird, existieren noch weitere Umweltbewertungsinstrumente. Diese lassen sich zum einen hinsichtlich ihres Untersuchungsumfanges sowie hinsichtlich ihres Untersuchungsobjektes unterscheiden (Abbildung 2-11). Weitere Unterscheidungsmerkmale beziehen sich auf die Anwender- oder Zielgruppe des jeweiligen Instrumentes bzw. auf den Grad des Standortbezuges oder die Verbindlichkeit der Anwendung des Instrumentes (GIEGRICH, et al. 1995, S. 71 ff.).

Abbildung 2-11: Übersicht über ökologische Untersuchungs- und Bewertungsinstrumente

Untersuchungs- umfang							Unter- suchungs- objekt
Kommunikation Management			Öko- audit				
Ökonomie	Produkt- linien- analyse				Technik- folgen- abschätzung		
Soziale Aspekte							
Risiko							
Gesamtwirkung	Stoffflußanalyse	Produkt- öko- bilanz	Öko- audit	UVP			Gesetzes UVP
Ökologie	Chemi- kalien- bewertung						
Einzelwirkungen							
	Stoff	Produkt	Anlage	Technologie	Gesell. Bereiche	Gesell. Regeln	
	Material	Produktions- stätte		Technik			

Quelle: GIEGRICH, et al. 1995, S. 76

Das Untersuchungsobjekt kann einen einzelnen Stoff bis hin zu einem gesellschaftlichen Bereich darstellen. Dieses Objekt kann je nach Zielsetzung in unterschiedlichem Umfang und unterschiedlicher Tiefe hinsichtlich ökologischer, sozialer und ökonomischer Gesichtspunkte analysiert werden.

Gemäß dem für diese Studie formulierten Ziel der Ableitung eines optimierten Biomasse-Energie-Mix ergibt sich als Untersuchungsobjekt das Produkt Energie, welches gemäß verschiedener Optimierungsziele (z. B. maximale Nettoenergie), u. a. ökobilanziell zu untersuchen ist. Dabei gilt es, die gesamte Bereitstellungskette der Bioenergie inklusive der hierfür notwendigen Vorketten zu betrachten. Eben diesen Ansprüchen dient die Produkt-Ökobilanz, auch kurz nur mit Ökobilanz bezeichnet, auf die im Folgenden noch näher eingegangen wird. Zur Abgrenzung jedoch sollen die weiteren Umweltbewertungsinstrumente kurz erläutert werden.

Die **Chemikalienbewertung** umfasst das toxikologische und ökotoxikologische Gefährdungspotenzial einzelner Chemikalien. Im Vordergrund der Betrachtungen steht dabei der

Verbraucher, der durch eine Reihe von Symbolen und Kennzeichnungselementen auf mögliche Gefahren aufmerksam gemacht werden soll (BGVV 2001, BfR 2006).

Die **Stoffflussanalyse** ist eine Methodik der Bilanzierung von Prozessen und Systemen auf Güter und/oder Stoffebene (GLENCK, et al. 1997, S. 3 u. S. 112). Mittels dieser Stoffflussanalyse können alle Stoffein- und austräge im exakt definierten System bestimmt und verfolgt werden (FLAMME 2002, S. 90 f.).

Die **Produktlinienanalyse** (PLA) geht weit über eine Produktökobilanz hinaus. Zu Beginn der PLA wird eine Bedarfs und Nutzenanalyse gefordert. In die Wirkungsabschätzung sollen neben den ökologischen Auswirkungen auch soziale und ökonomische Faktoren mit aufgenommen werden (KLÖPFFER und RENNER 1995 S. 4 f.).

Das **Öko-Audit** ist ein Umweltmanagementsystem für Unternehmen auf freiwilliger Basis. Das Ziel des Öko-Audits, im Fachjargon EMAS (Eco-Management and Audit Scheme = System für das Umweltmanagement und die Umweltbetriebsprüfung) genannt, ist eine Verbesserung der Umweltleistungen europäischer Organisationen durch objektive regelmäßige Bewertung, Information der Öffentlichkeit sowie die aktive Einbeziehung der Arbeitnehmer. Die Vorgehensweise des Audits ist festgelegt in der EU-Verordnung 761/2001 und in nationales Recht umgesetzt durch das Umweltauditgesetz (WILLNOW 2004, ABL. EG 2001b, BGBl. 2002c).

Die **Umweltverträglichkeitsprüfung** (UVP) ist immer an ein konkretes Projekt mit eigenen standortspezifischen Bedingungen angelehnt. Wesentliche Bestandteile des Gutachtens der Umweltverträglichkeitsuntersuchung sind die Prognosen der Gesundheits- und Umweltrisiken. Sie dient als Entscheidungsgrundlage für die Genehmigungsbehörde, ein Projekt zu genehmigen bzw. zu verwehren (GIEGRICH, et al. 1995, S. 77 ff.).

Mittels der **Technikfolgenabschätzung**, auch als Technikbewertung bekannt, (Definition in VDI-Richtlinie 3780 von 1991) sollen der Stand einer Technik und deren Entwicklungsmöglichkeiten analysiert sowie deren unmittelbaren und mittelbaren technischen, wirtschaftlichen, gesundheitlichen, ökologischen, humanen, sozialen und anderen Folgen dieser Technik und möglicher Alternativen abgeschätzt werden (GIEGRICH, et al. 1995, S. 98 ff. nach VDI 1991).

### 2.2.1.2 Ökobilanz

Die Wahl der Ökobilanz als Methode für diese Studie wird neben der Anforderung einer ganzheitlichen Betrachtung des Untersuchungsobjektes noch gestützt durch die Tatsache, dass eben die Ökobilanz das einzige international genormte Umweltbewertungsinstrument ist (KLÖPFFER, et al. 2004, S. 4). Mittels Ökobilanz können Produkte, Verfahren oder Dienstleistungen hinsichtlich ihrer durch die menschliche Aktivität verbundenen Umweltbelastungen anhand von Modellen untersucht und verglichen werden.

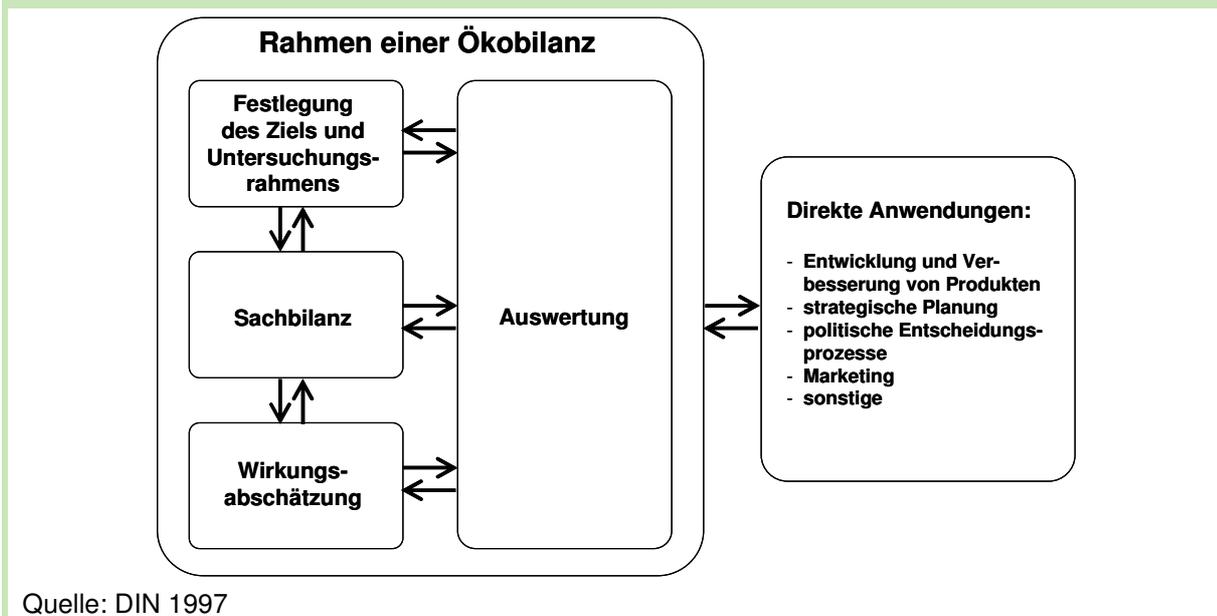
Dabei umfassen die Analysen den Produktlebenszyklus „von der Wiege bis zur Bahre“, also von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung der Abfälle. Es gilt also kein Produkt isoliert, sondern ein Produktsystem zu betrachten, für welches entsprechende Systemgrenzen zu for-

mulieren sind. Als Vergleichsmaßstab dient eine festzulegende funktionelle Einheit (KLÖPFFER, et al. 2004, S. 5). Die internationale Norm zur Ökobilanzierung (DIN 1997) schreibt einen Rahmen der Ökobilanz vor, wie ihn Abbildung 2-12 wiedergibt. Somit besteht eine Ökobilanz aus den vier wesentlichen Bestandteilen (DIN 1997):

- Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens,
- Sachbilanz,
- Wirkungsabschätzung und
- Auswertung.

Die Erstellung einer Ökobilanz erfolgt nicht in einem Strang, sondern sollte iterativ, also mit Rückkopplungen und Korrekturen, vollzogen werden. Abweichungen von ursprünglich formulierten Grundsätzen zur Durchführung gilt es jedoch als solche zu dokumentieren (DIN 1997).

Abbildung 2-12: Rahmen einer Ökobilanz nach DIN ISO 14040



Zu Beginn steht die Festlegung von **Ziel und Untersuchungsrahmen**. Die Zielformulierung umfasst neben dem Untersuchungsgegenstand auch den Anwendungsbereich der Ökobilanz sowie die Zielgruppe, für welche die Ergebnisse bestimmt sind. Der Untersuchungsrahmen, welcher selbst zu definieren ist, umfasst die Systemgrenzen, die funktionelle Einheit sowie Abschneide- und Allokationsregeln, Informationen zu Datenquellen, die Art der Wirkungsabschätzung und Bewertung sowie die geforderte kritische Prüfung durch Sachverständige. Die Systemgrenzen müssen in technischer, räumlicher und zeitlicher Hinsicht festgelegt werden. Als funktionelle Einheit soll möglichst eine Bezugseinheit gewählt werden, die eine Vergleichbarkeit gewährleistet. So kann zum Beispiel die Einheit Kilogramm Produkt bzw. Kilowattstunde erzeugte Energie als Bezugseinheit dienen, auf welche alle anfallenden Werte

bezogen werden. Die Zieldefinition darf während der Erstellungsphase der Ökobilanz verändert werden, muss dann jedoch entsprechend dokumentiert werden (KLÖPFFER, et al. 2004, S. 5).

Die **Sachbilanz** umfasst alle Input- und Outputströme des Systems. Hierfür werden alle Inputs und Outputs nach ihren Massen und Energiewerten erfasst und auf die funktionelle Einheit bezogen. Eine Übersicht über die verschiedenen Arten der Inputs und Outputs zeigt Tabelle 2-7.

**Tabelle 2-7: Input- und Outputströme einer Ökobilanz**

<b>Input</b>	<b>Output</b>
Rohstoffe	Produkte
Hilfsstoffe	Zwischenprodukte
Betriebsstoffe	Koppelprodukte
Energie	Abfälle
Wasser	Emissionen in Luft, Wasser und Boden
Flächennutzung	Energie

Quelle: nach RUBIK, et al. 1995, S. 33 f.; LFU 2002, S. 15; KLÖPFFER, et al. 2004, S. 5 f.

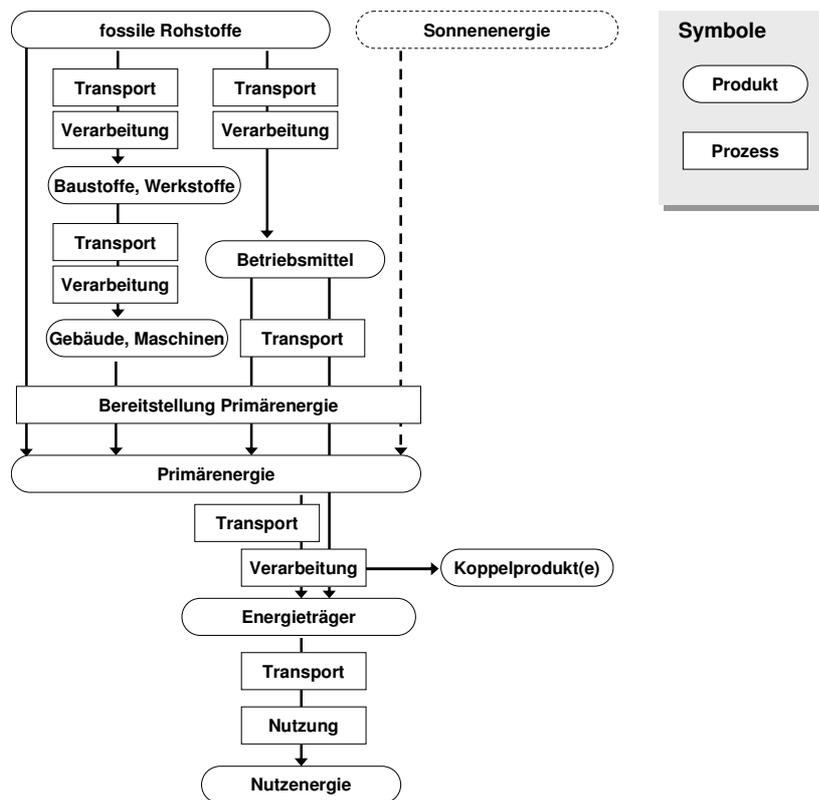
Für die Erstellung der Sachbilanz bietet sich ein modularer Aufbau an. Ein Modul ist die kleinste Einheit, für welche jeweils Input- und Outputdaten verfügbar sind (KLÖPFFER, et al. 2004, S. 5). Einzelne Module, ergeben dann zusammen als Flusschema einen so genannten „Produktbaum“ (Abbildung 2-13).

Der Produktbaum sollte den gesamten Lebensweg enthalten. Kleinere Nebenzweige ohne signifikanten Einfluss auf das Ergebnis dürfen zur Vereinfachung abgeschnitten werden (KLÖPFFER, et al. 2004, S. 5). Um also den Lebensweg eines Produktes aus ökologischer Sicht vollständig bewerten zu können, bedarf es nicht nur der Ermittlung der Input- und Outputströme des Hauptprodukts direkt. Für eine Bewertung sind vielmehr auch Referenzprodukte, Nebenprodukte sowie Referenznebenprodukte analog zum Hauptprodukt zu analysieren (CHARMER 2001, S. 20 ff.). Somit werden durch Einbeziehen von Vorketten-Modulen und nachgelagerten Modulen die Entnahmen aus der Umwelt sowie die Abgaben an die Umwelt für das zu bilanzierende Produktsystem ermittelt. Klassische Vorketten-Module stellen die Rohstoff-, Material- oder Energiebereitstellung sowie Transportprozesse dar. Nachgelagerte Module ergeben sich aus der evtl. vorhandenen Erzeugung von Kuppelprodukten sowie die Entsorgung von Abfällen.

Diese bei der Produktion des Ziel- oder Hauptproduktes anfallenden Kuppelprodukte können im Rahmen einer Ökobilanz auf verschiedene Weise berücksichtigt werden. Zunächst kann der Bilanzrahmen erweitert werden. Im erweiterten Rahmen intern verwertbare Nebenprodukte bleiben im System und müssen nicht bilanziert werden. Ihre Verwendung führt zu einer

Einsparung von externen Produktionsmitteln. Für die Nebenprodukte, die den erweiterten Bilanzrahmen verlassen, gilt es, eine Bewertung vorzunehmen. Hierzu existieren mittlerweile einige Methoden, die in der Praxis Anwendung finden. Folgende Tabelle 2-8 gibt einen Überblick über die wesentlichen Bewertungsmethoden.

**Abbildung 2-13: Schema zur Lebensweganalyse der Bereitstellung von Energie**



Quelle: eigene Darstellung nach DIN 1997; DIN 1998; GÄRTNER und REINHARDT 2003, S. 6

Die zielproduktorientierte Methode ist die einfachste, jedoch auch die ungenaueste. Nach dieser Methode werden eventuelle Leistungen durch Kuppelprodukte nicht berücksichtigt. Es liegt eher eine Art Brutto-Betrachtung vor. Die Gutschriftenmethode ermöglicht zumindest das Gegenrechnen der geleisteten Energiegehalte der Kuppelprodukte. Besser geeignet für eine ganzheitliche Bilanzierung ist die Substitutionsmethode, wenngleich die Ermittlung der Kennzahlen der realen und praktikablen Äquivalenzprozesse und Substitute sehr aufwändig ist. Noch aufwändiger gestaltet sich die Bewertung der Kuppelprodukte nach der quantitativen Methode. Hierbei werden für alle Haupt- und Nebenprodukte analog der Prozesskettenanalyse eigene Bilanzierungsräume geschaffen und die entsprechenden Umweltwirkungen nach einem einheitlichen Schlüssel verteilt (DREIER und TZSCHEUTSCHLER 2000, S. 10 ff., SCHMITZ et al. 2005, S. 31 ff., IGELSPACHER 2003, S. 54 ff. u. S. 59 ff.).

Die Daten zur Erstellung der Sachbilanz können selbst erhoben werden, soweit dies möglich ist. Meist liegen direkte Daten zur Produktion selbst, zu Vorprodukten sowie zur Entsorgung des Produkts vor, welche dann auch Verwendung finden. Zu Rohstoffen, Materialien wie

Metalle, Kunststoffe, Baustoffe etc. liegen meist keine direkten Daten vor. Ebenso zu Prozessen wie z.B. Energiebereitstellung, Transport oder Standardentsorgungsprozessen. Für nicht direkt vorhandene Daten dürfen generische Daten des entsprechenden repräsentativen Wirtschaftsraums ergänzt werden (RENNER und KLÖPFFER 2005, S. 37 f.).

**Tabelle 2-8: Methoden zur Bewertung von Kuppelprodukten im Rahmen einer Ökobilanz**

<b>Methode</b>	<b>Vorgehensweise</b>	<b>Anwendung</b>	<b>Bewertung (+) Vorteil, (-) Nachteil</b>
Zielprodukt-orientierte Methode	Gesamte Effekte werden dem Zielprodukt zugeschrieben („Worst Case Betrachtung“)	In ältere Studien verwendet	+ einfaches Verfahren + keine Unsicherheiten - keine realitätsnahe und ganzheitliche Bilanzierung
Gutschriftenmethode	Energiegehalte der Kuppelprodukte werden nach bestimmten Schlüssel dem Zielprodukt zugeschrieben	Voraussetzung: Tatsächliche Verwertbarkeit der Kuppelprodukte auch bei steigender Produktionsmenge	+ Energiegehalt der Kuppelprodukte ist eindeutig feststellbar + ganzheitliche Bilanzierung - ggfs. wirtschaftliche Verwertung der Kuppelprodukte nicht möglich
Substitutionsmethode	Systemerweiterung: Kuppelprodukte ersetzen andere Produkte, deren Umweltwirkungen dem Zielprodukt zugeschrieben werden	Voraussetzung: Tatsächliches Ersetzen eines äquivalenten Produktes	+ präzise Umweltwirkungsbetrachtung - komplexes, aufwändiges Verfahren - erfordert Äquivalenzprozesse - problematisch, wenn Bilanzen der substituierten Produkte erst erstellt werden müssen
Quantitative Methode (Allokationsmethode)	Aufteilung der Umweltwirkungen auf die einzelnen Bilanzräume aller Haupt- und Nebenprodukte nach einheitlichem Bewertungsmaßstab (Energiegehalt, Preis etc.)	bei Prozesskettenanalyse, wenn Nebenprodukte in den anfallenden Massen nicht verwertbar sind	+ allumfassende Analyse - aufwändiges Erhebungs- und Rechenverfahren - Bewertungsmaßstab u. U. nicht für alle Wirkungskategorien gleichermaßen geeignet - erschwert Transparenz

Quelle: eigene Darstellung nach DREIER und TZSCHEUTSCHLER 2000, S. 10 ff., SCHMITZ et al. 2005, S. 31 ff., IGLSPACHER 2003, S. 54 ff. u. S. 59 ff.

Als Ergebnis der Sachbilanz erscheinen Tabellen, die alle Inputs und Outputs des analysierten Produktsystems enthalten. Die Kennzahlen werden dabei auf die funktionelle Einheit bezogen. Energiewerte werden primärenergetisch bewertet und zum kumulierten Energieaufwand (KEA) nach VDI (1997) aggregiert. Kennzahlen zu den Outputs beziehen sich auf Emissionen und Nebenprodukte, nicht jedoch auf das Hauptprodukt sowie die Abfälle (RENNER und KLÖPFFER 2005, S. 38). In diesen Tabellen soll die modulare Struktur der Einzelprozesse erhalten bleiben, um in der anschließenden Wirkungsanalyse und bei der Auswertung die wichtigsten Belastungen an ihren Ursprung rückverfolgen zu können (RENNER und KLÖPFFER 2005, S. 38).

Die in der Sachbilanz erhobenen und auf die Bezugsinheit bezogenen Kennzahlen werden in der folgenden **Wirkungsabschätzung** auf potenzielle Wirkungen in der Umwelt, auf Leben und menschliche Gesundheit umgerechnet und aggregiert. Es existieren für die Gesellschaft

erkennbare schützenswerte Güter. Von der SETAC wurden vier Schutzgüter formuliert, und deren Werte nach intrinsischer (d.h. keiner weiterer Begründung bedürftig), ökonomischer und gesellschaftlicher Art definiert (Tabelle 2-9).

**Tabelle 2-9: Schutzgüter und deren gesellschaftliche Werte**

<b>Schutzgut</b>	<b>gesellschaftliche Werte</b>
menschliche Gesundheit	intrinsischer Wert des menschlichen Lebens ökonomischer Wert
natürliche Umwelt	intrinsischer Wert der Natur (Ökosysteme, Arten), ökonomischer Wert lebensunterstützender Funktionen
natürliche Ressourcen	ökonomische und intrinsische Werte
vom Menschen gemachte Umwelt	kulturelle, ökonomische und intrinsische Werte

Quelle: UDO DE HAES, et al. 1999a, KLÖPFFER, et al. 2004, S. 29 f.

Im Rahmen einer Ökobilanz gilt es nun, solche Einwirkungen auf die Umwelt zu analysieren, von welchen mögliche (negative) Wirkungen auf diese Schutzgüter ausgehen (UDO DE HAES, et al. 1999a, KLÖPFFER, et al. 2004, S. 29 f.). Diese Einschätzung bzw. Interpretation der Wirkungspotenziale kann qualitativ und/oder quantitativ erfolgen. Durch Aggregation der in die Umwelt abgegebenen Stoffe während des Lebensweges des Produktes zu Wirkungskategorien können quantitative Aussagen getroffen werden. Die Norm der Ökobilanzierung gibt keine Wirkungskategorien vor, sondern nur ein Anforderungsprofil für die Beschaffenheit einer Wirkungskategorie (DIN 2000a). Im Allgemeinen werden meist die von SETAC-Europe vorgeschlagenen Wirkungskategorien bzw. eine Auswahl daraus bei der Erstellung von Ökobilanzen verwendet (SETAC 1993, UDO DE HAES 1996, UDO DE HAES, et al. 1999b). Darüber hinaus wurden im Auftrag des Umweltbundesamtes eine neue Gruppierung sowie weitere Wirkungskategorien entwickelt (KLÖPFFER, et al. 2004, S. 50, RENNER und KLÖPFFER 2005, S. 54 ff.). Eine vergleichende Darstellung zu den Wirkungskategorien sowie den möglichen Gruppierungen zeigt Tabelle 2-10.

Hinsichtlich der Zielsetzung dieser Studie beziehen sich die folgenden Ausführungen auf die von der SETAC festgelegten Wirkungskategorien Ressourcenverbrauch, Naturraumbeanspruchung, Treibhauseffekt, Ozonabbau, Versauerung, Eutrophierung, Ökotoxizität, Humantoxizität, Sommersmog und Lärmbelastung, welche nun kurz erläutert werden.

Der Ressourcenverbrauch umfasst abiotische sowie biotische Ressourcen. Die Quantifizierung des abiotischen Ressourcenverbrauchs erfolgt durch einen Indikator der Knappheit, welcher z.B. die Dauer der Restverfügbarkeit bei gleicher Entnahmerate ausdrückt (GUINEÉ, et al. 2002). Eine Alternative dazu stellt der kumulierte Energieaufwand (KEA) dar. Dieser ist im engeren Sinne keine Wirkungskategorie, jedoch ein Hinweis auf den Ressourcenverbrauch. Nach Definition der VDI-Richtlinie 4600 (VDI 1997) gilt es zur Ermittlung alle

aufgewendete Primärenergie inklusive des nicht-energetischen Verbrauchs aus der Sachbilanz zu aggregieren. Der KEA ist von der ISO Norm zur Wirkungsabschätzung nicht direkt vorgesehen, wird aber bei der Erstellung von Ökobilanzen häufig verwendet (RENNER und KLÖPFFER 2005, S. 77 f. nach GUINEÉ, et al. 2002).

Biotische Ressourcen umfassen alle „frei“ in der Natur vorkommenden Lebewesen. Diese regenerierbaren Ressourcen sind dann gefährdet, wenn die Entnahmerate die Regenerationsrate übersteigt (GUINEÉ, et al. 2002, KLÖPFFER, et al. 2004, S. 33 f.).

**Tabelle 2-10: Ökobilanzielle Wirkungskategorien zur Bestimmung der Umweltauswirkungen, ursprüngliche und erneuerte Struktur der Wirkungskategorien**

Gruppierung nach SETAC 1996	Kategorien nach SETAC 1993	Gruppierung nach UBA 2004	Kategorien nach UBA 2004
Input-bezogene Kategorien	Ressourcenverbrauch	A Ressourcenverbrauch	A1 abiotische Ressourcen A2 biotische Ressourcen A3 Naturraumbeanspruchung
	Naturraumbeanspruchung		
Output-bezogene Kategorien	Klimaänderung	B Wirkungen durch chemische Emissionen	B1 Klimaänderung B2 Stratosphärischer Ozonabbau B3 Bildung von Photooxidantien B4 Versauerung B5 Eutrophierung (aquatisch und terrestrisch) B6 Humantoxizität B7 Ökotoxizität B8 Geruch
	Ozonabbau		
	Versauerung		
	Eutrophierung		
	Ökotoxizität		
	Humantoxizität		
	Sommersmog		
	Lärmbelastung		
		C Wirkungen durch physikalische Emissionen	C1 Lärm C2 Harte Strahlung C3 Abwärme
		D Wirkungen durch biologische Emissionen	D1 Ökosystemare Wirkungen D2 Humantoxische Wirkungen
		E weitere Kategorien	E1 Unfälle E2 Gesundheitsschädigung am Arbeitsplatz E3 Austrocknung E4 Landschaftszerstörung E5 Beeinträchtigung von Ökosystemen und der Artenvielfalt

Quelle: nach SETAC 1993, UDO DE HAES 1996, UDO DE HAES et al. 1999b, KLÖPFFER et al. 2004, S. 50; RENNER und KLÖPFFER 2005, S. 54 ff.

Der Kategorie Naturraumbeanspruchung liegen derzeit im Detail noch nicht verstandene Zusammenhänge zwischen der Nutzung von Land und der daraus resultierende Auswirkungen auf die Bodenökosysteme zugrunde. Es wird unterteilt in drei Unterkategorien: Die Verdrängung erfolgt, wenn durch die Nutzung ein Stück Land nicht mehr für den Naturhaushalt zur Verfügung steht. Während hier noch ein Indikator aus dem Produkt Fläche mal Benutzungszeit gefasst werden kann, liegen für die beiden anderen Unterkategorien, der Degradierung lebensunterstützender Funktionen und der Verminderung der Biologischen Diversität, noch keine praktikablen Indikatoren vor (UDO DE HAES, et al. 1999b, S. 169 f., KLÖPFFER, et al. 2004, S. 34 f.).

Der Indikator Treibhauseffekt beschreibt die Kategorie Klimaänderung. Die Quantifizierung des Treibhauseffektpotenzials bzw. „Global Warming Potential“ (GWP) erfolgt über das vom IPCC festgelegte Berechnungsschema (RENNER und KLÖPPFER 2005, S. 35 f.). Dabei wird das GWP jedes einzelnen relevanten Gases je Masseneinheit auf die gleiche Masseneinheit des Referenzgases bezogen und somit das Äquivalent-GWP des Gases ermittelt. Die Aggregation der einzelnen berechneten Äquivalente multipliziert mit den entsprechenden Mengen aus der Sachbilanz ergibt das gesamte GWP, welches durch ein Produktsystem verursacht wird (IPCC 2001a, S. 385). Das Referenzgas für den Treibhauseffekt stellt Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) dar, welches mit einem GWP<sub>100</sub> von 1 festgelegt ist. Die Zahl 100 beschreibt den zu betrachtenden Zeitraum von 100 Jahren, welcher neben anderen Betrachtungen von 20 bzw. 500-Jahreszeiträumen am häufigsten Verwendung findet (vgl. auch KALTSCHMITT und REINHARDT 1997, S. 91). Neben dem CO<sub>2</sub> werden zumindest Methan (CH<sub>4</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O) betrachtet. Darüber hinaus existieren mit den teil- und vollhalogenierten Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffen (FCKW) sowie einigen persistenten Chlor-Kohlenwasserstoffen (CKW) weitere klimawirksame Spurengase, welche im Bedarfsfall zu bilanzieren sind. Während der Phase der Entwicklung der Quantifizierungsmethoden und der Kennzahlen durch eine große Zahl an Wissenschaftlern unter dem Dach des IPCC, die immer noch andauert, haben sich die Kennzahlen bezüglich des GWP der einzelnen Treibhausgase je nach Stand der neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse immer wieder geändert. Folgende Tabelle 2-11 zeigt zu drei Stützzeitpunkten die Faktoren für Methan und Lachgas zur Umrechnung auf die gemeinsame Einheit CO<sub>2</sub>-Äquivalent. In den derzeit aktuell veröffentlichten Studien zu Ökobilanzen finden sich meist die GWP, die das IPCC im Jahre 2001 mit dem Bericht „Climate Change 2001“ veröffentlichte, wider.

Die Wirkungskategorie des stratosphärischen Ozonabbaus bezieht sich auf eine Vielzahl von Stoffen, die die Bildung des Ozonlochs begünstigen. Die Charakterisierung und Aggregation dieser Kategorie erfolgt durch das Ozon Depletion Potenzial (ODP) über Kennzahlen, welche die World Meteorological Organization (WMO) herausgibt (RENNER und KLÖPPFER 2005, S. 79; KLÖPPFER, et al. 2004, S. 36).

**Tabelle 2-11: Entwicklung der Angaben zum GWP<sub>100</sub> der wichtigsten Treibhausgase**

Substanz	Formel	Treibhausgaspotenzial (GWP <sub>100</sub> ) in kg CO <sub>2</sub> eq/kg		
		IPCC 1995	IPCC 2001	IPCC 2007
Kohlendioxid	CO <sub>2</sub>	1	1	1
Methan	CH <sub>4</sub>	24,5	23	25
Lachgas	N <sub>2</sub> O	320	296	298

GWP<sub>100</sub>: Treibhausgaspotenzial für einen Zeithorizont von 100 Jahren

Quelle: IPCC 1995, IPCC 2001a, S. 244, IPCC 2007, S. 33

Versauerung geschieht durch die Freisetzung von Protonen aus sauren Gasen (KLÖPPFER, et al. 2004, S. 7), welche ökotoxische Effekte auf aquatische und terrestrische Ökosysteme

haben. Das Versauerungspotenzial (Acidification Potential – AP) wird in SO<sub>2</sub>-Äquivalenten quantifiziert, wobei neben Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), Stickstoffmonoxid bzw. -dioxid, Ammoniak und Chlorwasserstoff und andere zu berücksichtigen sind (RENNER und KLÖPPFER 2005, S. 79, KALTSCHMITT und REINHARDT 1997, S. 87).

Eutrophierung aquatischer oder terrestrischer (Öko-)Systeme bedeutet Eintrag von Nährstoffen. Bei Gewässern äußert sich dies durch verstärktes Algenwachstum, welches einen Rückgang des Sauerstoffgehaltes im Gewässer verursacht und das aerobe Leben hemmt bzw. zum Erliegen bringt. Die Quantifizierung für Gewässer erfolgt über Phosphor-Äquivalente, während bei terrestrischer Eutrophierung gelegentlich auch Stickstoff-Äquivalente als Basis zur Aggregation herangezogen werden (KLÖPPFER, et al. 2004, S. 39).

Die Wirkungskategorie Ökotoxizität umfasst die mögliche Schädigung von Ökosystemen, Arten und Lebensgrundlagen durch chemische Einwirkung, soweit dies nicht schon durch eine andere Kategorie erfasst ist. Ausgedrückt wird das aquatische (AEP) und terrestrische (TEP) Ökotoxizitätspotenzial in Zink-Äquivalenten (KLÖPPFER, et al. 2004, S. 41; RENNER und KLÖPPFER 2005, S. 80).

Analog zur Ökotoxizität existiert eine Wirkungskategorie Humantoxizität, welche alle auf die menschliche Gesundheit einwirkenden Substanzen umfasst. Die Aggregation zum Humantoxizitätspotenzial (HTP) erfolgt in Blei-Äquivalenten (KLÖPPFER, et al. 2004, S. 40; RENNER und KLÖPPFER 2005, S. 80).

Die Wirkungskategorie Bildung von Photooxidantien, auch als Sommersmog bezeichnet, betrifft die lokale bis regionale Bildung von Schadstoffen aus flüchtigen organischen Verbindungen und Stickoxiden unter Einwirkung der kurzwelligen Anteile der Sonnenstrahlung. Der als bodennahe Ozon gebildete Schadstoff dient als Bezugssubstanz für eine größere Anzahl von Substanzen zur Ableitung des Ozonbildungspotenzials (Photochemical Ozone Creation Potenzial – POCP) (KLÖPPFER, et al. 2004, S. 37).

Lärmbelastung ist eine schwer zu fassende Wirkungskategorie. Die logarithmisch definierte physiologische Einheit Dezibel ist für die Wirkungsabschätzung kaum verwendbar. Für Lärmbelastung aus dem Straßenverkehr kann als Ersatz auch die gefahrene Strecke pro funktionelle Einheit herangezogen werden (KLÖPPFER, et al. 2004, S. 43).

Die Vorgehensweise zur Erstellung der Wirkungsabschätzung geschieht in folgenden Schritten. Zunächst werden die relevanten Wirkungskategorien ausgewählt. Bei der anschließenden Klassifizierung werden die in der Sachbilanz ermittelten Kennzahlen den einzelnen Kategorien zugeordnet, z.B. CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O zur Kategorie Klimaerwärmung. Der wichtigste Schritt bei der Wirkungsabschätzung ist die Charakterisierung. Hier werden die klassifizierten Daten in Wirkungsindikatorergebnisse umgerechnet und aggregiert. Dies geschieht durch Transformation und Addition der einzelnen Werte aus der Sachbilanz zu einer Kategorie zu Äquivalenten. So besitzt z. B. jedes Treibhausgas ein eigenes Global Warming Potential (GWP), das so genannte Erderwärmungspotenzial, also einen (Charakterisierungs-)Faktor, der z.B. die Vereinheitlichung der Treibhausgase zum CO<sub>2</sub>-Äquivalent für den Indikator Treib-

hauseffekt ermöglicht (DIN 2000a, QUACK 2001, S. 38 ff., KLÖPFFER, et al. 2004, S. 7). Durch diese Aggregation wird die große Vielzahl von einzelnen Werten in der Sachbilanz auf wenige Kennzahlen reduziert, was einen Vergleich verschiedener System erleichtert bzw. u. U. erst ermöglicht.

Diesen verbindlichen Bestandteilen der Wirkungsabschätzung können folgende drei optionale Schritte der Normung, der Ordnung und der Gewichtung folgen. Der Schritt der Normierung beinhaltet den Bezug der Wirkungsindikatorergebnisse auf Referenzwerte. Diese Referenzwerte können entweder die Gesamtemissionen oder den Ressourcenverbrauch des gesamten Bezugsraumes repräsentieren oder sich auf die Gesamtemissionen oder den Ressourcenverbrauch pro Kopf des Bezugsraumes beziehen. Im zweiten optionalen Schritt der Ordnung werden die Wirkungskategorien in Klassen eingeteilt, welche durch eine Hierarchie verschiedener Prioritäten der Wirkungskategorien bestimmt werden. Während die Norm beim Schritt der Ordnung noch keine numerische Gewichtung zulässt, ist dies eben Bestandteil des dritten optionalen Schrittes der Gewichtung. In diesem Verfahren werden die Indikatorergebnisse der einzelnen Wirkungskategorien durch numerische Faktoren unter Werterhaltung umgewandelt und u. U. aggregiert. Diese Gewichtung darf jedoch nur in Studien vorgenommen werden, die nicht der allgemeinen Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden, da bei der Wahl der Faktoren Subjektivität nicht ausgeschlossen werden kann (DIN 2000a, RENNER und KLÖPFFER 2005, S. 64 f.). Die anschließend verbindliche Analyse der Datenqualität in der Wirkungsabschätzung wird ebenfalls von der vierten Norm zur Ökobilanz gefordert (RENNER und KLÖPFFER 2005, S. 61).

Während der gesamten Phase der Erstellung einer Ökobilanz bedarf es der **Auswertung**. Die wesentlichen Anforderungen der Auswertung richten sich zum einen an die Identifizierung der signifikanten Parameter, zum zweiten an eine Beurteilung durch Vollständigkeitsprüfung, Sensitivitätsprüfung, Konsistenzprüfung und weitere optionale Prüfungen. Einen wesentlichen Schwerpunkt bei der Auswertung gilt es, der Analyse der Datenqualität zu schenken (DIN 2000b, RENNER und KLÖPFFER 2005, S. 61). Abgeschlossen und abgerundet wird die Auswertung durch formulierte Schlussfolgerungen und Empfehlungen (DIN 2000b).

Nicht nur aufgrund der steigenden Ansprüche an den Umweltschutz sondern auch zur Lokalisierung von Einsparungspotenzialen an Ressourcen und damit entsprechender Kosten werden verschiedenste Ökobilanz-Anwendungen in Form von Datenbanken und Computerprogrammen entwickelt und angewandt. In den Datenbanken sind zu verschiedensten Rohstoffen, Zwischenprodukten und konsumfähigen Produkten Sachbilanzdaten hinterlegt, die mittels Modellierung von Stoffströmen miteinander verknüpft werden können. Daraus lassen sich entsprechende Produkt-Lebenszyklusanalysen sowie die zugehörigen Umweltauswirkungen zusammenstellen.

Seit dem Jahr 1987 wird das Globale Emissions-Modell Integrierter Systeme, kurz GEMIS, weiterentwickelt und ist seit Mitte der 1990er Jahre als kostenlose Software verfügbar. Der Schwerpunkt bei GEMIS liegt auf der Bereitstellung verschiedenster Energieträger und Stof-

fe, wobei ein Augenmerk auf spezifische Herkünfte und Bezugszeitpunkte gelegt wird. (ÖKO-INSTITUT 2004, ÖKO-INSTITUT 2005). Die GEMIS-Stammdaten sind auch direkt online im World Wide Web auf den Seiten des Umweltbundesamtes einseh- bzw. abrufbar. In Prozessorientierten Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente, kurz ProBas, können zu verschiedensten Produkten und Prozessen ökobilanzielle Daten via Internet abgerufen werden (UBA und ÖKO-INSTITUT 2004).

Die kostenpflichtige Software Ganzheitliche Bilanzierung (GaBi) geht über die reine Ökobilanzierung hinaus. Neben der Erstellung von Ökobilanzen nach internationalen Vorschriften soll die Software die Unternehmen auch bei prozessspezifischen und organisatorischen Fragestellungen unterstützen und Auswertungsergebnisse in kommunizierbarer Darstellungsweise aufbereiten (PE INTERNATIONAL 2007).

Eine zweite Software namens „Umberto“ ermöglicht ebenfalls die Modellierung, Berechnung, Visualisierung und Bewertung von Stoff- und Energieflüssen, die nicht nur zur Prozessoptimierung dienen sollen. Durch die Verwendung u. a. von ecoinvent-Daten im Stoffstrommodell können betriebindividuelle komplette Produkt-Lebenszyklen nach den Vorschriften der produktbezogenen Ökobilanzen erstellt werden (IFU 2007).

Eine viel verwendete, kostenpflichtige, aber entsprechend umfassende Datengrundlage für Ökobilanzen bietet „ecoinvent“. Die Umfassende Datenbank „enthält internationale, Industriebasierte Sachbilanzdaten aus den Bereichen Energiebereitstellung, Gewinnung von mineralischen Ressourcen, Materialbereitstellung, Chemikalien, Metalle, Landwirtschaft, Abfallentsorgung und Transport“ (SWISS CENTRE FOR LIFE CYCLE INVENTORIES 2007).

Eine aggregierte Anwendung von Informationssystemen für allumfassende betriebliche Controlling Maßnahmen stellt u. a. BUIS Lab (Betriebliche Umweltinformationssysteme) dar. Die betrieblichen Umweltinformationssysteme „unterstützen die Umweltorganisation im Unternehmen, beispielsweise bei der Durchführung von Audits und Genehmigungsprozessen oder bei der Erfassung und Bewertung von Stoffstrom- und Ökobilanzdaten“ unter Verwendung u. a. von GEMIS, GaBi und anderen Spezialanwendungen (FRAUNHOFER IAO 2004).

Nicht nur die genannte Auswahl an Software bietet eine genaue Abbildung der Stoffströme und Energieflüsse unter definierten Bedingungen, wie diese z.B. bei industriellen Prozessen, der Fall ist. Bisher konnte noch keine Software gefunden werden, die auf die für die Landnutzung spezifischen Besonderheiten Rücksicht nimmt. Zum einen wird die Landwirtschaft durch Witterung und Bodenverhältnisse beeinflusst, worauf der einzelne Landwirt nur bedingt reagieren kann und woraus sich auch nennenswerte Auswirkungen auf die Ökobilanzen für die Agrarprodukte ergeben. Darüber hinaus existieren in der Landwirtschaft spezifische Zusammenhänge, wie zum Beispiel Nährstoffkreisläufe, die in den bisherigen Ökobilanzen zu landwirtschaftlichen Produkten nicht bzw. nur unzureichend berücksichtigt wurden. Das in dieser Arbeit vorgestellte und verwendete Modell „*RegEnOpt*“ soll u. a. diesen Aspekt weiterentwickeln und beinhaltet die entsprechenden Nährstoffkreisläufe, die spezifisch je Kultur und Verwendung auftreten. Die genaue Vorgehensweise ist dem Kapitel 2.3.2 zu entnehmen.

---

### 2.2.1.3 Exkurs: Lachgasemissionen

Schon das besonders hohe Gewicht des Lachgases hinsichtlich seines Global Warming Potentials von 296 gegenüber eins für Kohlendioxid erfordert eine genauere Auseinandersetzung mit den Lachgasemissionen. Deutschland emittierte in den vergangenen Jahren etwas mehr als ein Milliarde Tonne Kohlendioxid-Äquivalente pro Jahr (UBA 2006, S. 40) und trägt damit mit 2,4 Prozent am globalen Treibhauseffekt bei (WRI 2003). Wie im Kyoto Protokoll verankert, verpflichteten sich die beteiligten Nationen u. a. nationale Treibhausgasinventare zu erstellen (UN 1998). Nach dem Inventar, erstellt nach den Vorschriften des Intergovernmental Panel on Climate Change, stammen knapp 80 Prozent der Treibhausgasemissionen der Bundesrepublik Deutschland aus dem Energiesektor. Sechs Prozent werden der Landwirtschaft direkt zugeschrieben. Tatsächlich werden aus der Landwirtschaft etwas mehr Treibhausgase emittiert, da sämtliche Emissionen, die mit landwirtschaftlichem Energieverbrauch verbunden sind, im Treibhausgasinventar dem Energiesektor zugerechnet sind. Unter Berücksichtigung der im Treibhausgasinventar aufgeführten energetischen Emissionen im Sektor Landwirtschaft ergibt sich insgesamt ein Anteil von elf Prozent für die deutsche Landwirtschaft. 3,5 Prozent der deutschen Treibhausgase stammen nach dem Treibhausgasinventar aus direkten und indirekten Lachgasemissionen, die auf die Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Nutzflächen zurückzuführen sind. Diese direkten und indirekten Lachgasemissionen aus landwirtschaftlicher Landnutzung stellen allein ein Drittel aller landwirtschaftlichen Treibhausgasemissionen dar. Je Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche ergeben sich direkte und indirekte Emissionen von  $4,6 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ , was  $7,2 \text{ kg N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  bzw.  $2.140 \text{ kg CO}_2\text{eq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  entspricht (nach UBA 2006 und BMVEL 2004). Hinzu kommen noch die Lachgasemissionen, die aus der Tierhaltung bzw. der Dunglagerung resultieren (UBA 2006, S. 66 und S. 394 ff.). Es gilt dabei zu beachten, dass die Treibhausgasinventare nach IPCC Vorschriften anhand von Faustzahlen hochgerechnet werden. Bis zur Neuauflage der Vorschriften im Jahr 2006 wurde die BOUWMAN-Konstante (1996) für die direkten Lachgasemissionen von landwirtschaftlichen Nutzflächen herangezogen. Sie besagt, dass im Mittel 1,25 Prozent des eingetragenen Stickstoffs als Lachgas-Stickstoff emittiert wird (IPCC 1996 S. 4.37 und IPCC 1996a, S. 4.89). Hinzu kommen circa 0,75 Prozent des eingetragenen Stickstoffs als indirekte Lachgasemissionen z. B. als Folge ausgewaschenen Stickstoffs in Oberflächengewässer (FLESSA, et al. 1998, S. 11). Der direkte Lachgas-Emissionsfaktor für Stickstoffeinträge von Mineraldüngern, Wirtschaftsdüngern, Pflanzenresten und Humusabbau wurde 2006 vom IPCC auf ein Prozent Stickstoff als Lachgas reduziert (IPCC 2006a, S. 11.11). Diese Korrektur erfolgte aufgrund neuester Untersuchungen von BOWMAN et al. (2002ab) sowie STEHFEST und BOUWMAN (2006), die im Mittel 0,91 Prozent des eingetragenen Stickstoffs als Lachgasstickstoffemissionen ermittelten. Die indirekten Lachgasemissionen werden mit 0,6 Prozent des gedüngten Stickstoffs angegeben (IPCC 2006a, S. 11.24). Nach DÖHLER et al. (2002) sind knapp zwei Drittel der deutschen landwirtschaftlichen Lachgasemissionen auf die Anwendung mineralischer Düngemittel (24 %), das Wirtschaftsdün-

germanagement (17 %) sowie die Anwendung von Wirtschaftsdüngern (20 %) zurückzuführen. Die verbleibenden Anteile beziehen sich auf indirekte Lachgasemissionen (22 %) aufgrund von Deposition sowie Eintrag und Emission aus Gewässern und den direkten Emissionen aus Weidegang, Ernterückständen und Leguminosenanbau. Somit hat die Düngieranwendung einen gewichtigen Einfluss auf die Höhe der Lachgasemissionen.

Die direkte Stickstoffzufuhr auf landwirtschaftliche Nutzflächen lässt sich ableiten aus dem Mineraldüngerabsatz (BMVEL 2004b), der Stickstofffixierung von Leguminosen sowie dem Umfang der Nutztierhaltung (BMVEL 2004b), der spezifischen Stickstoffausscheidungen (LBP 1997) und den anrechenbaren Stickstoffverlusten beim Einsatz von Wirtschaftsdüngern (BGBl. 2006c, S. 41). Es ergibt sich daraus für Deutschland im Durchschnitt ein direkter Eintrag von 150 kg Stickstoff je Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche und Jahr, der nach IPCC (1996ab) Emissionen in Höhe von 3 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> verursacht. Zusätzlich verbleiben Ernterückstände und Zwischenfrüchte auf der Fläche, die während ihrer Zersetzung mineralisierte Nährstoffe freisetzen. Insgesamt werden vom Umweltbundesamt (UBA 2006) Emissionen in Höhe 4,6 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> inventarisiert. Somit leiten sich 1,6 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> Emissionen aus organischer Substanz (pflanzliche Rückstände, Erntereste, Humus) ab. Nach IPCC (1996ab) entspricht dies im Durchschnitt einem Stickstoffeintrag aus pflanzlichen Rückständen von 80 kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>.

Nach FLESSA et al. (2002) werden im Durchschnitt 2,53 Prozent des Stickstoffs aus Mineraldüngern, organischen Düngern und Pflanzenresten als Lachgasstickstoff emittiert, die einen Anteil von 60 Prozent der gesamten Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft einnehmen. 25 Prozent der Treibhausgase aus der Landwirtschaft werden in Form von Methan von Rindern und als Folge des Güllemanagement emittiert. Die verbleibenden 15 Prozent entsprechen den CO<sub>2</sub>-Emissionen, die aus dem direkten und indirekten Energieverbrauch resultieren. Deutliche Unterschiede bei den Treibhausgasemissionen zeigen sich nach FLESSA et al. (2002) zwischen konventioneller (4,2 t CO<sub>2</sub>eq ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>, dar. 60% als N<sub>2</sub>O = 2,5 t CO<sub>2</sub>eq = 8,5 kg N<sub>2</sub>O = 5,4 kg N<sub>2</sub>O-N) und ökologischer Bewirtschaftung (3,0 t CO<sub>2</sub>eq ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>, dar. 60% als N<sub>2</sub>O = 1,8 t CO<sub>2</sub>eq = 6,1 kg N<sub>2</sub>O = 3,9 kg N<sub>2</sub>O-N) landwirtschaftlicher Nutzflächen (FLESSA, et al. 2002).

Die Höhe der gemessenen Lachgasemissionen hängen stark ab von der Messmethode sowie dem Zeitintervall, in dem gemessen wurde. Nach FLESSA et al. (1998 und 2002) treten sehr hohe Lachgasemissionen nicht während der Vegetationsperiode, sondern in den Wintermonaten von Dezember bis März auf. Gerade in Frost- und Tauphasen treten erhöhte Lachgasemissionen auf, die bis zur Hälfte der Jahresemissionen erreichen können.

Die vom IPCC (IPCC 2006 nach BOWMAN et al. 2002a, b; STEHFEST und BOUWMAN 2006) herausgegebenen Emissionsfaktoren unterschätzen nicht nur deswegen die tatsächlichen Emissionen. Der Pool der Experimente, deren Ergebnisse zur Ableitung der Emissionsfaktoren führten, umfasst eine hohe Zahl von Experimenten, die nur wenige Tage bis zu einer Vegetationsperiode andauerten. Im Mittel der 1.373 mit einer Zeitangabe zur Experimentdauer

er versehenen Experimente wurden die Emissionen über einen Zeitraum von rund 200 Tagen erfasst. Lediglich 34 Prozent der Experimente liefen 200 Tage und länger. 60 Prozent der Experimente dauerten zwischen einem Tag und 200 Tagen (BOUWMAN et al. 2002a und STEHFEST und BOUWMAN 2006). Darüber hinaus sind im Datensatz, den STEHFEST und BOUWMAN (2006) verwendeten, weltweite Daten enthalten. Nach Isolation der Daten, die nur noch Deutschland betreffen, bleiben noch 152 Datensätze. In Abhängigkeit vom Stickstoff-Düngungsniveau ergeben sich daraus im Mittel Lachgas-Emissionen in Höhe von 2,1 Prozent des gedüngten Stickstoffs in Form von Lachgas-Stickstoff (aus STEHFEST und BOUWMAN 2006).

Die Entstehung von Lachgas in Böden geschieht auf zweierlei Wegen, der Nitrifikation und der Denitrifikation. Die Nitrifikation ist die mikrobiologische Oxidation von Ammonium zu Nitrat (MOSIER, et al. 1998; S. 228 f., SCHMID, et al. 2000, S. 50 ff.). Als erste Zwischenprodukte der Nitrifikation entstehen Lachgas und Nitrit. Bei Sauerstoffmangel dient das Nitrit als Sauerstoffquelle unter Freisetzung von Lachgas (SCHMID, et al. 2000, S. 50 ff.). Die Denitrifikation stellt die anaerobe mikrobiologische Reduktion von Nitrat zu Luftstickstoff dar, wobei Lachgas als Zwischenprodukt auftritt. Hohe Nitratkonzentrationen, niedrige Bodentemperaturen und ein die Diffusion fördernder niedriger Bodenwassergehalt fördern das Entweichen von Lachgas, bevor es weiter denitrifiziert werden kann (SCHMID, et al. 2000, S. 50 ff.).

Insgesamt sind hohe Lachgasemissionen zu verzeichnen nach der Ausbringung von Düngern, nach Regenereignissen, beim Auftauen des Bodens, nach dem Pflügen sowie bei Bodenverdichtungen (SCHMID, et al. 2000, S. 50 ff.). Nach FLESSA et al. (1998, S. 42) hat die Lagerungsdichte des Bodens einen erheblichen Einfluss. So wurden v. a. auf feuchtem und verdichtetem Boden, z. B. in Fahrspuren in Kartoffelschlägen, stark erhöhte Lachgasemissionen nachgewiesen (FLESSA, et al. 1998, S. 42).

Nach STEHFEST und BOUWMAN (2006) sind Lachgasemissionen aus der Landwirtschaft signifikant abhängig von der Stickstoff-Düngungsintensität, der angebauten Kultur, der Düngerart, dem Humusgehalt des Bodens sowie Boden-pH und der Bodenart. Große kulturspezifische Unterschiede verzeichnen auch SCHMID et al. (2000), FLESSA et al. (1998 und 2002) sowie FREIBAUER und KALTSCHMITT (2003).

Auf ungedüngten Böden in gemäßigten Breiten werden nach FREIBAUER und KALTSCHMITT (2003) von Ackerland  $0,7$  (0 bis  $1,7$ )  $\text{kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ , von Grünland  $1,2$  (0 bis  $5,0$ )  $\text{kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  emittiert. Unterschiede ergeben sich auch bei Getreide ( $1,0$  (0 bis  $5,2$ )  $\text{kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ) im Vergleich zu Nicht-Getreide-Kulturen ( $2,0$  (0 bis  $8,7$ )  $\text{kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ). So emittieren Nicht-Getreide-Kulturen im Mittel das 1,7-fache an Lachgas als Getreide. Es existiert dabei jedoch eine starke Abhängigkeit vom Düngungsniveau. Darüber hinaus sind im Folgejahr nach Leguminosen außerordentlich hohe Lachgasemissionen zu beobachten (FREIBAUER und KALTSCHMITT 2003). Entsprechende kulturspezifische Unterschiede lassen sich auch nach FLESSA et al. (1998), FLESSA et al. (2002), KAISER et al. (1998), KAISER und RUSER (2000) sowie STEHFEST und BOUWMAN (2006) ableiten (vgl. Tabelle 2-12).

Tabelle 2-12: Kulturspezifische direkte Lachgas-Emissionsfunktionen

Kultur	Stich- proben- umfang	N-Eintrag Mittelwert kg N ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>	Emissionen		Geradenfunktionen zu Emissionen	
			min.	max.	bei 0 kg N ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> kg N <sub>2</sub> O-N ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>	i.A.v. N-Düngung kg N <sub>2</sub> O-N ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> kg N <sup>-1</sup>
<b>Bouwman-Formel</b>					<b>1,0</b>	<b>0,0125</b>
Winterweizen	88	122 (0-275)	0,1 - 16,8		0,50	0,0182
Wintergerste	44	105 (0-270)	0,5 - 13,8		0,83	0,0109
Winterraps	38	106 (0-220)	1 - 4		1,79	0,0036
Mais	20	130 (30-275)	0,2 - 15,6		0,15	0,0217
Zuckerrübe	24	64 (0-140)	1,5 - 3,6		2,18	0,0051
Kartoffel	20	110 (37-220)	1,6 - 16		4,40	0,0227
Brache	6	57 (0-100)	0 - 2,8		2,14	0,0000
Pappel	5	20 (0-100)	0,2 - 0,6		0,37	0,0008
Sonnenblume	7	66 (0-83)	9,4 - 12,9		11,95	0,0000
Gras	32	102 (0-350)	0 - 11,2		1,56	0,0052
Körnerleguminose	4	26 (0-52)	2,1 - 3		2,75	0,0000
Klee	3	33 (0-100)	0,1 - 1,5		1,45	0,0000
Klee-Gras	10	137 (40-250)	0,4 - 3,2		0,06	0,0102

im *RegEnOpt* verwendet

Quelle: eigene Berechnungen auf Datengrundlage von BOUWMAN 1996, FLESSA, et al. 1998, KAISER, et al. 1998, KAISER und RUSER 2000, FLESSA, et al. 2002, STEHFEST und BOUWMAN 2006

Bisher findet in Ökobilanzen die BOUWMAN-Kontante (1996) Anwendung, die besagt, dass 1,25 Prozent des gedüngten und pflanzenverfügbaren Stickstoffs als Lachgasstickstoff emittiert werden ((KLÖPFFER, et al. 1999, S. 52 ff.; NEMECEK, et al. 2005, S. 38 nach SCHMID, et al. 2000; UBA 2005, S. 6-23; UBA 2006, S. 319 nach IPCC 1996c S. 4.37; IPCC 1996a, S. 4.89).

Aus den Studien von FLESSA et al. (1998) sowie FREIBAUER und KALTSCHMITT (2003) sind kulturbedingte Unterschiede hinsichtlich Lachgasemissionen unabhängig von der Stickstoffdüngungshöhe festzustellen. KAISER et al. (1998) fordern die Einführung kulturspezifischer Lachgas-Emissionsfaktoren für die Ermittlung der Lachgasemissionen. Neben den kulturspezifischen Emissionsfaktoren könnten weiterhin Witterungsfaktoren und Bodenfaktoren die Lachgasemissionen auf bestimmten Standorten besser beschreiben helfen. Hinsichtlich kulturspezifischer Faktoren sind bereits überschlagsmäßige Aussagen möglich und werden im Folgenden verwendet. Witterungs- und Bodenfaktoren werden auf eins belassen, da hierfür noch keine ausreichend genaue Datenlage vorliegt. Dennoch sind diese Faktoren in der eigens entwickelten Lachgasemissionsformel schon vorgesehen (vgl. Abbildung 2-14).

In der in Abbildung 2-14 dargestellten Lachgas-Emissionsformel werden die von der Düngungshöhe abhängigen Lachgasemissionen nach IPCC (1996) ermittelt. Ein Grund liegt in der oben geschilderten Vermutung, dass mit der aktuellen IPCC-Methode die Emissionen eher unterschätzt werden. Darüber hinaus bestätigen JUNGKUNST et al. (2006) eher die Werte der 1996er IPCC-Methode. Ein zweiter Grund ist in der Vergleichbarkeit zu anderen Studien

(z.B. NEMECEK, et al. 2005, S. 38 nach SCHMID, et al. 2000; KLÖPFFER, et al. 1999, S. 52 ff.) zu suchen.

**Abbildung 2-14: Vorgehensweise zur Ableitung der direkten kultur- und standort-spezifischen Lachgasemissionen von landwirtschaftlich genutzten Böden**

$$E_{N_2O} \left[ \text{kg } N_2O \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1} \right] = 1 + 0,0125 \cdot D_N \cdot KF \cdot WF \cdot BF \cdot UF$$

$E_{N_2O}$  Lachgasemissionen  $\left[ \text{kg } N_2O \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1} \right]$

$D_N$  Stickstoffeintrag, Stickstoffdüngung  $\left[ \text{kg } N \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1} \right]$

$KF$  Kulturfaktor: kulturspezifische Faktoren zur Funktion

$WF$  Witterungsfaktor = 1, da noch keine ausreichende Datengrundlage vorhanden

$BF$  Bodenfaktor = 1, da noch keine ausreichende Datengrundlage vorhanden

$UF$  Umrechnungsfaktor  $N_2O\text{-N}$  zu  $N_2O$  =  $\frac{44}{28}$

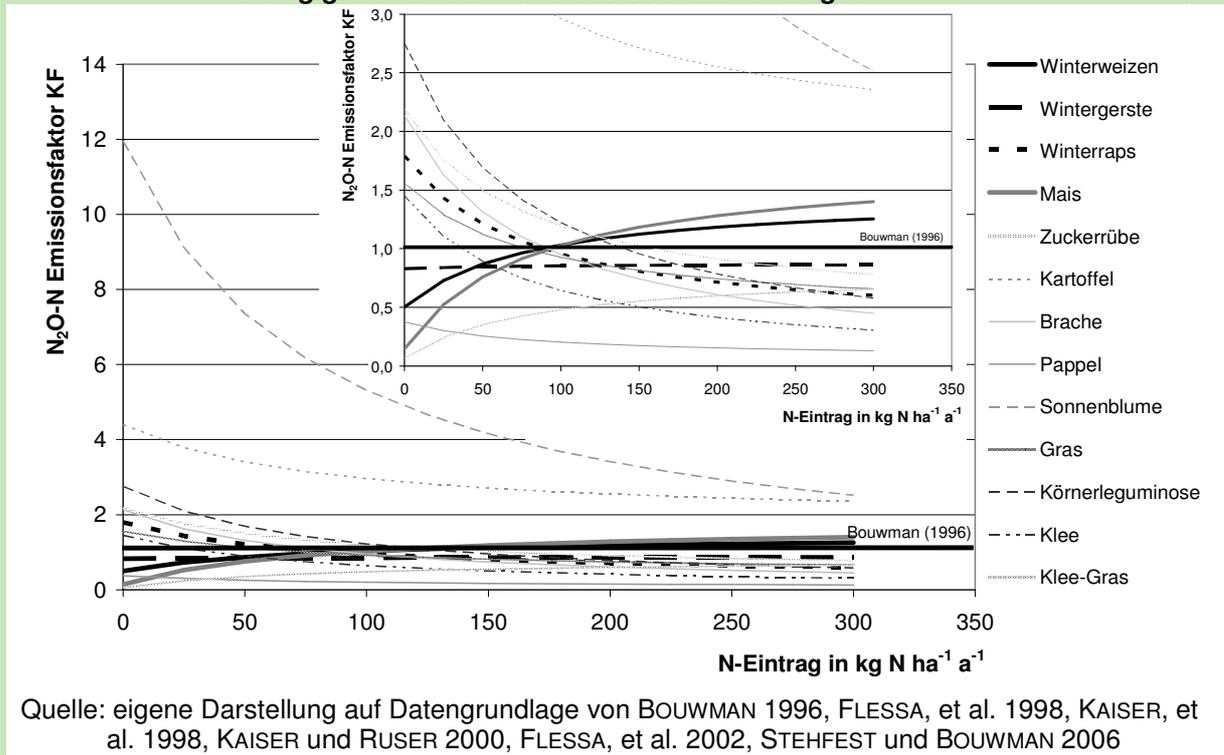
Quelle: eigene Darstellung nach IPCC 1996ab, KAISER, et al. 1998, SCHMID, et al. 2000, STEHFEST und BOUWMAN 2006

Inwieweit die Schätzung der Lachgasemissionen nach der BOUWMAN-Methode von tatsächlich gemessenen kulturspezifischen Lachgasemissionen abweicht, soll im Folgenden dargelegt werden. Eine relativ umfassende Recherche nach Messungen von Lachgasemissionen in Deutschland brachte die Erkenntnisse von Tabelle 2-12. Es konnten große Unterschiede zwischen einzelnen landwirtschaftlichen Kulturpflanzen herausgefunden werden. Die BOUWMAN-Formel kann demnach nur als grobe Durchschnittsschätzformel angesehen werden, mit der jedoch kaum Vergleiche zwischen den einzelnen Kulturen möglich sind. Aus Tabelle 2-12 wird deutlich, dass sich die Lachgasemissionen nur sehr grob über die in die Fläche eingetragene Stickstoffmenge schätzen lassen.

Die Kulturart bzw. das mit dem Anbau verbundene Produktionsverfahren hat einen wesentlichen, wenn auch nur schwer zu quantifizierenden, Einfluss auf die Höhe der Lachgasemissionen. In wie weit sich nun die Emissionen, die mit der BOUWMAN-Formel geschätzt werden, von den mittleren kulturspezifischen Emissionen (nach Tabelle 2-12) in Abhängigkeit von der Höhe des Stickstoffeintrages unterscheiden, soll Abbildung 2-15 verdeutlichen. Die Kultur Winterweizen wird demnach bei extensivem Anbau nach BOUWMAN (1996) hinsichtlich der Lachgasemissionen überschätzt. Wird Weizen jedoch intensiv, d. h. mit hohem Stickstoffeintrag, angebaut, so unterschätzt die BOUWMAN-Methode die Emissionen. Bei Raps ist ein genau gegenläufiger Effekt zu erkennen. Extensiv angebaute Raps wird nach BOUWMAN unterschätzt, ein intensiv angebaute Raps überschätzt.

Aufgrund der nicht all zu großen Datengrundlage besitzen die in Abbildung 2-15 dargestellten Zusammenhänge keine Allgemeingültigkeit.

**Abbildung 2-15: Kulturspezifische Faktoren zur N<sub>2</sub>O-Funktion nach BOUWMAN (1996) in Abhängigkeit von der Höhe des Stickstoffeintrages**



Nichts desto trotz sollen diese Erkenntnisse zur Ermittlung eines die BOUWMAN-Formel korrigierenden Kulturfaktors (KF) herangezogen werden. Wie in Abbildung 2-15 ersichtlich, hängt die Genauigkeit der BOUWMAN-Formel stark ab von der Höhe des Stickstoffeintrages auf die landwirtschaftliche Nutzfläche.

Ein dem Stickstoffeintragsniveau entsprechender Kulturfaktor zur Korrektur der BOUWMAN-Formel könnte somit die tatsächlichen Lachgasemissionen besser abschätzen helfen. Aus den deutschen Trenderträgen des Jahres 2005 sowie einer Düngung nach Entzug zuzüglich 30 Kilogramm Stickstoff je Hektar lassen sich die Emissionen nach BOUWMAN sowie nach den kulturindividuellen Funktionen schätzen. Der Quotient der Emissionsbeträge ergibt schließlich den Kulturfaktor, womit der Emissionsbetrag, der mit der BOUWMAN-Formel ermittelt wurde, noch zu multiplizieren ist. Tabelle 2-13 zeigt die Eingangsdaten der Trenderträge, die Stickstoffdüngung nach Entzug inklusive des pauschalen Zuschlags von Stickstoff sowie die abgeleiteten Kulturfaktoren.

Das im Folgenden eingeführte Modell „RegEnOpt“ beschränkt sich bei der Lachgasemissionsabschätzung auf den Stickstoffeintrag aus mineralischen Düngern und Wirtschaftsdüngern, die wie oben geschildert, die wesentlichen Emissionen verursachen. Zusätzlich werden mittels des Kulturfaktors den kulturspezifischen Unterschieden Rechnung getragen.

Für die mit dem Modell „RegEnOpt“ beabsichtigte vergleichende Analyse verschiedener Energienutzungspfade werden lediglich die direkten und vom Stickstoffeintrag abhängigen Lachgasemissionen berücksichtigt. Die indirekten Emissionen sowie die Emissionen einer Null-Düngungs-Variante treten weitgehend auch auf bei einer nicht-energetischen Nutzung

der landwirtschaftlichen Nutzflächen. Die Details zum Referenzsystem sowie genauen Annahmen zur Ermittlung der Lachgasemissionen sind dem Kapitel 2.3.3.2 ab Seite 110 zu entnehmen.

**Tabelle 2-13: Kulturspezifische Faktoren zur N<sub>2</sub>O-Funktion nach BOUWMAN (1996) zum mittleren Ertragsniveau in Deutschland**

Kultur	Trendertrag	N-Eintrag	Geradenfunktionen zu Emissionen		Kulturfaktor
	2005	nach Entzug	bei 0 kg N ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>	i.A.v. N-Düngung	
	t FM ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>	kg N ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>	kg N <sub>2</sub> O-N ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>	kg N <sub>2</sub> O-N ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>	KF
<b>Bouwman-Formel</b>			<b>1,0</b>	<b>0,0125</b>	
Winterweizen	7,7	169	0,50	0,0182	<b>1,1</b>
Wintergerste	6,6	142	0,83	0,0109	<b>0,9</b>
Winterraps	3,6	149	1,79	0,0036	<b>0,8</b>
Mais	44,5	199	0,15	0,0217	<b>1,3</b>
Zuckerrübe	59,7	137	2,18	0,0051	<b>1,1</b>
Kartoffel	43,1	181	4,40	0,0227	<b>2,6</b>
Brache	0,0	30	2,14	0,0000	<b>1,6</b>
Pappel	20,0	80	0,37	0,0008	<b>0,2</b>
Sonnenblume	2,3	95	11,95	0,0000	<b>5,5</b>
Gras	8,4	189	1,56	0,0052	<b>0,8</b>
Körnerleguminose	3,8	167	2,75	0,0000	<b>0,9</b>
Klee	9,2	229	1,45	0,0000	<b>0,4</b>
Klee-Gras	9,2	221	0,06	0,0102	<b>0,6</b>

im *RegEnOpt* verwendet

Quelle: eigene Berechnungen auf Datengrundlage von BOUWMAN 1996, EUROSTAT 2008, LBP 1997, WERNER, et al. 2006, FLESSA, et al. 1998, KAISER, et al. 1998, KAISER und RUSER 2000, FLESSA, et al. 2002, STEHFEST und BOUWMAN 2006

Neben den Lachgasemissionen nehmen Böden Methan auf und dienen somit als Senke für Treibhausgase. Aus dem Treibhausgasinventar für Deutschland gehen Methan-Aufnahmewerte für Grünland in Höhe von 2,5 kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>, für Ackerland 1,5 kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> hervor (UBA 2005, S. 6-23 ff.). Demgegenüber ermittelten FLESSA et al. Methan-Aufnahmewerte zwischen 0,1 kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> bis 0,9 kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> (FLESSA, et al. 1998, S. 121; FLESSA, et al. 2002, S. 183), die deutlich unter den UBA-Werten liegen. Nach FLESSA et al. (2002) besteht kein nachweisbarer Zusammenhang der Methanaufnahme von Böden zur Düngungsintensität und zu anbauspezifischen Effekten. Wegen der hohen Variabilität der Angaben sowie aufgrund der zu vernachlässigenden Wirkung auf den Treibhauseffekt wird im Folgenden auf die weitere Betrachtung der Methan-Aufnahme verzichtet (nach FLESSA, et al. 2002, S. 183).

**Ende Exkurs.**

## 2.2.2 Lineare Programmierung

„Planung ist die gedankliche Vorbereitung zielgerichteter Entscheidungen. Planung ist das Bindeglied zwischen Zielsetzung und kalkuliertem Handeln“ (WÖHE und DÖRING 2002, S. 103). Ausgehend von der Zielformulierung, eine optimale Faktornutzung der landwirtschaftlichen Nutzfläche für die Zukunft abzuleiten, wird ein Instrumentarium zur Planungsrechnung benötigt. Zur Lösung betrieblicher Planungs- und Koordinierungsprobleme existiert eine große Anzahl wissenschaftlicher Methoden und Verfahren, die unter dem Begriff Operations Research zusammengefasst werden. Die Grundlage dieser Methoden sind mathematische Entscheidungsmodelle. Dabei zwingt die Verwendung der Mathematik als formale Sprache zur klaren Formulierung der Probleme (WÖHE und DÖRING 2002, S. 133 ff.). Gemessen am Stand der derzeitigen Forschung und Skala der Anwendungsmöglichkeiten ist die Lineare Programmierung (LP) das bedeutendste Teilgebiet der Operations Research (WÖHE und DÖRING 2002, S. 135). Mittels Zielfunktion und Nebenbedingungen kann ein optimales Produktionsprogramm ermittelt werden (DOMSCHKE und DREXEL 1995, S. 6; THOMMEN und ACHLEITNER 1998, S. 353). Dabei werden mehrere Variable simultan betrachtet um innerhalb gegebener Grenzen die bestmögliche Lösung für das definierte Ziel zu finden (STEINHAUSER, et al. 1992, S. 215). Die Anwendungsgebiete der Linearen Programmierung liegen neben der Planung von einzelnen Betrieben in vielen Bereichen der entscheidungsorientierten betriebswirtschaftlichen, marktwirtschaftlichen und agrarpolitischen Forschung (STEINHAUSER, et al. 1992, S. 216). Der LP-Ansatz eignet sich demnach zur Ableitung des gesuchten Biomasse-Mix und bedarf einer Erklärung.

Die rechnerische Lösung des linearen Gleichungsansatzes erfolgt mit Hilfe des Simplex-Algorithmus.

Es gilt, eine lineare Zielfunktion

$$Z = \sum_{j=1}^n c_j \cdot x_j \rightarrow \max!$$

zu maximieren bzw. zu minimieren unter Beachtung von linearen Nebenbedingungen

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_j \leq b_i,$$

welche auch als Restriktionen bezeichnet werden (DOMSCHKE 1995, S. 11, BRINK, et al. 1991, S. 11 ff.), und unter Einhaltung der Nichtnegativitätsbedingungen

$$x_j \geq 0$$

für die Produkte (BRINK, et al. 1991, S. 11).

Das zu optimierende Programm vermag  $j$  ( $j=1, \dots, n$ ) Produkte mit dem spezifischen Wert der Zielzeile  $c_j$  (Zielfunktionskoeffizient) herzustellen. Dabei bilden  $i$  ( $i=1, \dots, m$ ) Produktionsanlagen mit ihrer spezifischen Produktionskapazitäten  $b_i$  die Grenzen. Jede Einheit eines Produktes  $j$  besitzt seine spezifische Inanspruchnahme  $a_{ij}$  der einzelnen Produktionsanlagen.

Die Mengeneinheit  $x_j$  gibt die Menge des Produktes  $j$  an, die in der Optimallösung produziert werden soll (BRINK, et al. 1991, S. 11 ff.).

Diese Formulierung des Planungsproblems bedingt folgende Annahmen:

Linearität der Produktionsprozesse

Beliebige Teilbarkeit der Faktoren und Produkte

Addierbarkeit und Unabhängigkeit der Produktionsprozesse.

Die Annahme der Linearität der Produktionsprozesse geht von einer gleich bleibenden Faktor-Produkt-Beziehung aus und vernachlässigt somit in der Realität auftretende Degressionseffekte. Die beliebige Teilbarkeit der Faktoren und Produkte lässt sich in der Realität nur bedingt umsetzen. Es sind somit Rundungsprozesse oder die Anwendung der wesentlich aufwändigeren „gemischt ganzzahligen Programmierung“ (Mixed Integer Programming) notwendig. Die Forderung nach Addierbarkeit und Unabhängigkeit der Produktionsprozesse ist in der Praxis häufig nicht realisierbar, weil sich bestimmte Produktionsverfahren gegenseitig beeinflussen können (STEINHAUSER, et al. 1992, S. 219 ff.). Dieses Maß an Abstraktion ist jedoch für die Lösbarkeit des Planungsproblems notwendig.

Das in ein lineares Gleichungssystem gekleidete Optimierungsproblem wird nun in einer Reihe von systematischen Schritten, Iterationen genannt, zumeist mittels geeigneter Software mit einem Computer gelöst. Dabei wird zunächst das Produktionsverfahren mit dem höchsten  $c_j$  Wert in dem Umfang in die Lösung genommen, bis die erste Grenze einer Restriktion erreicht wird. Im zweiten Iterationsschritt erfolgt nun, soweit noch eine Erhöhung des Zielwertes der Zielfunktion möglich ist, das zunächst aufgenommene Verfahren soweit reduziert, dass ein weiteres Verfahren in dem Umfang aufgenommen werden kann, der nun den Zielwert weiter erhöht. Dieser sukzessive Prozess der Reduktion vorhandener Verfahren zugunsten der Einführung neuer Verfahren mit der Intention, den Zielwert zu maximieren wird solange durchgeführt, bis keine weitere Maximierung mehr möglich ist. Die nun erreichte Schlussmatrix enthält neben dem Zielwert u. a. Informationen über den Umfang der realisierten Produktionsverfahren sowie den Umfang der nicht ausgeschöpften Produktionsfaktoren (STEINHAUSER, et al. 1992, S. 215 ff.).

Eine an die Lineare Programmierung anschließende Sensitivitätsanalyse gibt Auskunft über die Stabilität der Ergebnisse. D. h. in welchen Bereichen können Zielfunktionskoeffizienten  $c_j$  und die Beschränkungen  $b_i$  variieren, ohne dass sich die Optimallösung verändert (DOMSCHKE und DREXEL 1995, S. 44).

Im Falle von Optimierungsproblemen bei mehrfacher Zielsetzung gilt es zunächst, die Zielbeziehungen zu betrachten. Ziele können zueinander komplementär, konkurrierend oder neutral sein. Bei konkurrierenden Zielen tritt ein Zielkonflikt auf, während bei komplementären Zielen eine perfekte Lösung existiert. Bei Zielneutralität bleibt der Erreichungsgrad eines Zieles von der Veränderung des Erreichungsgrades eines anderen Ziels unberührt (DOMSCHKE und DREXEL 1995, S. 48).

---

Für den Umgang mit Zielkonflikten gibt es folgende Methoden zur Bewältigung:

- Unterteilung in Haupt- und Nebenziele
- Lexiographische Ordnung von Zielen
- Goal-Programming
- Zielgewichtung

Im Falle sich nicht ausschließender Ziele kann das Problem gelöst werden, indem nach einem Hauptziel optimiert wird, während die weiteren Ziele als Nebenbedingungen eingefügt werden, die einen Mindesterfüllungsgrad bestimmen. Bei einem Auftreten sich ausschließender Ziele kann das Problem auf diesem Wege nicht gelöst werden (HAZELL und NORTON 1986, S. 71).

Bei der lexigraphischen Ordnung der Ziele erfolgt eine Optimierung nach dem Ziel mit dem höchsten Rang. Die Ergebnismenge wird nun für eine Optimierung nach dem Ziel des zweiten Ranges herangezogen. Dieser Prozess wird analog der Zahl der Ziele fortgesetzt. Bei der Unterteilung in Haupt- und Nebenziele wird ein Ziel als Hauptziel deklariert. Die Nebenziele werden als Nebenbedingungen eingeführt. Ihre Ober- bzw. Untergrenzen beschränken die Ausdehnung des Hauptzieles. Bei der Zielgewichtung werden  $t$  Ziele, bewertet mit reellen Zahlen  $\lambda_i$  mit  $0 \leq \lambda_i \leq 1$ , berücksichtigt, wobei

$$\sum_{i=1}^t \lambda_i = 1$$

gelten soll. Somit ergibt dies eine neue gewichtete Zielfunktion, nach der optimiert wird.

Das Goal Programming geht ebenfalls von mehreren Zielen aus, ermittelt jedoch zunächst für jedes Ziel gesondert die Zielfunktion zu den Aktivitäten. Aus der Summe der Einzelzielfunktionen ergibt sich die Zielfunktion, deren Optimum sich aus der Minimierung der Abweichungen der Einzelziele vom entsprechenden Optimum ergibt. Es gilt als eine Zielabstandsfunktion zu minimieren. Je nach Wichtigkeit der einzelnen Ziele kann durch die Einführung von Wichtungsfaktoren eine Zielgewichtung vorgenommen werden. (DOMSCHKE und DREXEL 1995, S. 48 ff., HAZELL und NORTON 1986, S. 71 f.).

Die lineare Optimierung erscheint zur Ableitung eines optimierten Biomasse-Energie-Mix für definierte Regionen als geeignete Methode. Der wesentlich höhere Rechenaufwand einer (linearen) ganzzahligen Optimierung ist nicht notwendig, da die landwirtschaftliche Nutzfläche als der knappste Faktor die Bezugseinheit darstellt. Abgesehen von den betrieblichen Gegebenheiten und den Besitzstrukturen stellt die Fläche ein beliebig teilbares Gut dar (BRINK et al. S. 59 ff.).

Die Ableitung eines optimierten Biomasse-Energie-Mix nach mehreren Zielen erfolgt für spezielle Stützzeitpunkte mit repräsentativen Preisniveaus unter Verwendung entsprechender Stadien des technischen Fortschritts. Eine Dynamisierung des Optimierungsproblems über mehrere Produktionsperioden hinweg würde das Optimierungsmodell immens vergrößern, wobei der Aspekt der Korrelation zwischen zeitlicher Präferenz und Unsicherheit als zusätzliches Gegenargument hinzukommt (MCCARL und SPREEN 2004, S. 8-1 ff.). Mehrjährige Kul-

turen werden durch die Einführung jährlicher Mittelwerte zu den entsprechenden Positionen auf die einjährige Produktionsperiode transformiert, wodurch Jahresperioden als Stützzeitpunkte herangezogen werden können. Die dynamische Optimierung, nach DOMSCHKE und DREXL (2005, S. 157) besser mit Stufen-Optimierung oder sequenzielle Optimierung bezeichnet, ermöglicht die Lösung von Entscheidungsproblemen, bei denen eine Folge voneinander abhängiger Entscheidungen getroffen werden können, zu einem Optimum des Gesamtproblems. Gegenüber der Linearen Programmierung, für die der Simplex-Algorithmus existiert, gibt es für die dynamische Optimierung keinen in allgemeiner Form modellierten Algorithmus. Entsprechendes gilt für die nichtlineare Optimierung, zu der noch einige Schwierigkeiten hinsichtlich des zulässigen Ergebnisraumes sowie den höheren Anforderungen bezüglich Formulierung von Ziel- und Restriktionsgleichungen gegenüber der linearen Optimierung hinzukommen (ELSTER 1978, S. 7 ff.). Ein Teilgebiet der nichtlinearen Optimierung stellt die quadratische Optimierung dar, die sich von der linearen Optimierung durch quadratische Terme in der Zielfunktion unterscheidet. Durch eine stückweise Linearisierung der nichtlinearen Zielfunktion und nichtlinearer Nebenbedingungen kann das Problem in ein lineares Problem transformiert und mittel Simplex-Algorithmus gelöst werden (DOMSCHKE und DREXL 2005, S. 157 ff. und S. 174 ff.). Nichtlineare Zusammenhänge werden stückweise in Teilintervalle zerlegt und in lineare Zusammenhänge überführt. Es wird somit jede nichtlineare Funktion in durch eine Summe von linearen Funktionen ersetzt, wodurch das Lösungsmodell enorm an Umfang wächst (HAZELL und NORTON 1986, S. 73 ff.).

Aufgrund der Zielsetzung der vorliegenden Studie wird die Lineare Programmierung als zentrale Methode zur Optimierung des Biomasse-Energie-Mix ausgewählt. Das LP-Modell soll als „nichts übersehender“ Sortiermechanismus zur Auswahl einer optimalen Struktur aus einem umfangreichen Pool an möglichen Aktivitäten unter Berücksichtigung der relevanten Restriktionen dienen. Eine Modellierung voneinander abhängiger Produktionsperioden mittels dynamischer Optimierung mag auf den ersten Blick sinnvoll erscheinen, ist jedoch für die vorliegende Problemstellung zu aufwändig und v. a. für die Interpretation der Ergebnisse zu wenig nachvollziehbar. Der höheren Genauigkeit durch die Verwendung der nichtlinearen Programmierung bzw. der Linearisierung nichtlinearer Zusammenhänge steht der weit höhere Modellierungsaufwand sowie der hohe Datenumfang, der im Modell verarbeitet werden soll, gegenüber. Mit steigendem Datenumfang und der entsprechenden Verarbeitungstiefe steigt die Ungenauigkeit der Ergebnisse, die durch eine aufwändige Endmaximierung kaum wettgemacht werden kann.

---

### 2.3 Entwicklung des „RegEnOpt“

Die oben allgemein beschriebenen Methoden der Ökobilanzierung werden als Regelwerk sowie die lineare Programmierung als „Auswahlgenerator“ für das Modell „RegEnOpt“ herangezogen. Die Ökobilanzierung bildet die Basis für die Darstellung der einzelnen Energieumwandlungspfade aus Biomasse zu Nutzenergie. Darauf aufgebaut werden mit Hilfe des LP-Ansatzes die einzelnen optimierten Biomasse-Energie-Mixe für die verschiedenen Optimierungsziele ermittelt.

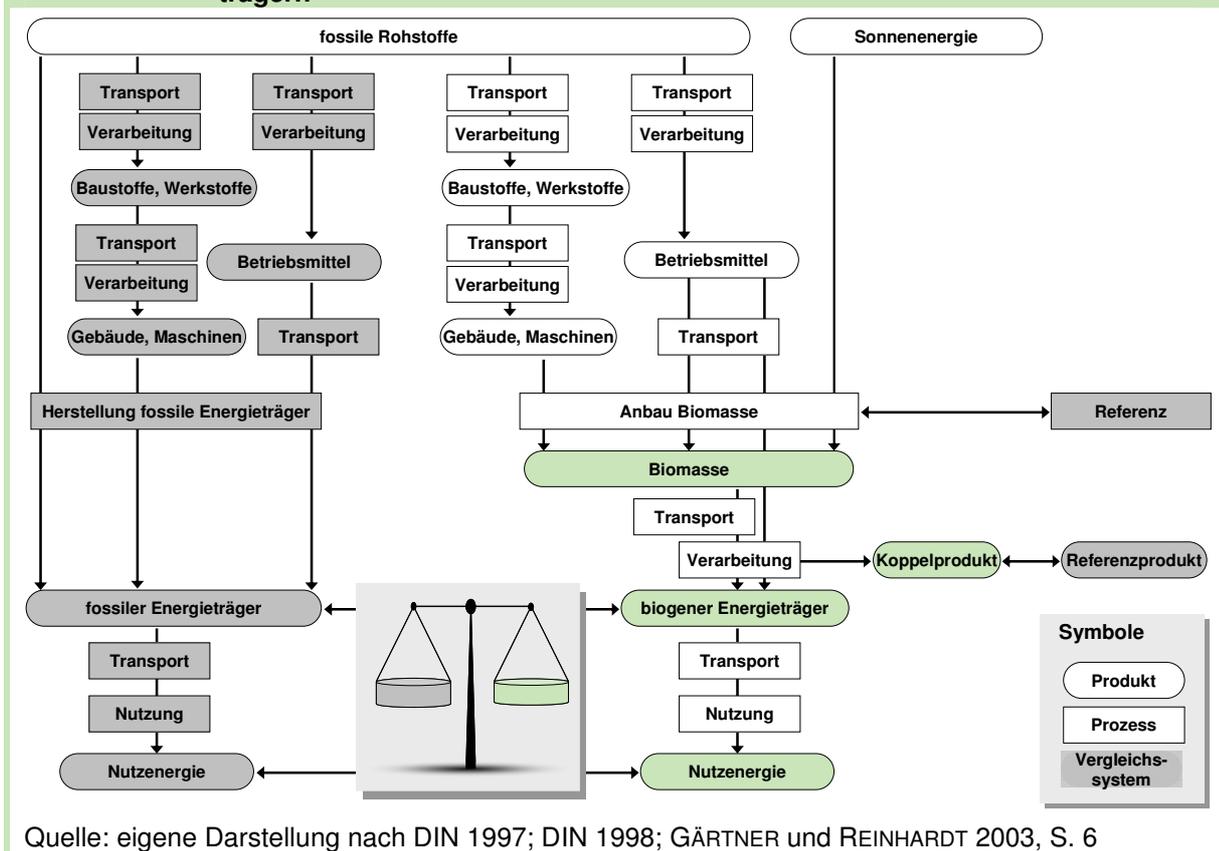
Aus dem formulierten Ziel einer einheitlich vergleichenden Studie der großen Bandbreite der Möglichkeiten, Biomasse energetisch zu nutzen, ergibt sich die Notwendigkeit einer einheitlichen Betrachtung der verschiedenen Energienutzungspfade. Die Betrachtung der einzelnen Pfade erfolgt analog zu den Ökobilanzvorschriften, wobei neben dem eigentlich zu analysierenden Biomasse-Energienutzungspfad entsprechende Referenzsysteme einfließen (Abbildung 2-16).

Bei der simultanen Betrachtung verschiedener Biomasse-Energienutzungspfade gibt es verschiedene Ebenen der Bilanzierung. Es kann auf der Ebene der Endenergieträger oder auf der Ebene der Nutzenergie bilanziert werden. Solange keine Systemwechsel in der Nutzenergiebereitstellung aus Endenergieträgern vollzogen werden, ist die Ebene der Endenergieträger die nahe liegende Bilanzierungsebene. Systemwechsel liegen dann vor, wenn z. B. für die individuelle Mobilität keine Verbrennungsmotoren sondern andere Technologien eingesetzt werden. Dadurch würden dann keine biogenen oder fossilen Kraftstoffe mehr eingesetzt, deren Substitutionseffekte zu bilanzieren wären. Die fehlende Bilanzierungsebene der Endenergieträger würde dann die Berücksichtigung der Technologie der Nutzenergiebereitstellung notwendig machen. Aktuell substituieren erneuerbare Energien jedoch ihre fossilen Äquivalente ohne bedeutenden Systemwechsel der Nutzung. Lediglich die Substitution von Heizöl bzw. Erdgas durch biogene Festbrennstoffe zur Wärmebereitstellung hat einen Technologiewechsel bei der Brennstoffzufuhr und Verbrennung zur Folge. Die Effizienz der Wärmebereitstellung unterscheidet sich unter Umständen trotz Einsatz optimaler Technologien, weswegen durch Einführung eines entsprechenden Korrekturfaktors auch hier die Ebene der Endenergieträger als Bilanzierungsebene herangezogen werden kann. Die aus der letztendlichen Verbrennung frei werdende Energie sowie die entstehenden Emissionen können schon dem Endenergieträger zugeschrieben werden.

Eine wesentliche Energiequelle bei der Endenergiebereitstellung auf Basis von Biomasse ist die in der Biomasse gespeicherte Sonnenenergie. Zusätzlich werden (fossile) Energieträger direkt (Kraftstoffe) und indirekt (Düngemittel, Pflanzenschutzmittel, Mechanisierung) eingesetzt, um die Biomasse bereitstellen zu können. Bei der Bruttoenergieerzeugung der Biomasse müssen also sämtliche Energie-Aufwendungen zur Bereitstellung von letztendlich Endenergieträgern analog einer Kostenrechnung berücksichtigt werden, um schließlich den Nettoendenergiegewinn der Verfahrenskette zu erhalten. Eventuell anfallende Koppelprodukte gilt es,

durch entsprechende Gutschriften zu berücksichtigen. Dies kann nach verschiedenen Methoden erfolgen (vgl. Tabelle 2-8). Diese Gutschriften entsprechen dem Energiebedarf zur Bereitstellung bzw. dem Energiegehalt des am nahe liegendsten Produktes, das durch das Koppelprodukt ersetzt werden kann.

**Abbildung 2-16: Vergleichende Lebenszyklusanalysen von fossilen und biogenen Energieträgern**



Quelle: eigene Darstellung nach DIN 1997; DIN 1998; GÄRTNER und REINHARDT 2003, S. 6

Im Folgenden werden nun ausgehend von den definierten Optimierungszielen der Rechengang zur Ermittlung der Zielgrößen sowie die dazu notwendige Datennormalisierung und die den Ergebnisraum einschränkenden Restriktionen dargestellt.

### 2.3.1 Festlegen der Optimierungsziele und des Untersuchungsrahmens

Den Vorschriften der Ökobilanz entsprechend gilt es, zunächst Ziel und Untersuchungsrahmen festzulegen. Das Ziel formuliert sich als eine vergleichende Analyse verschiedener Energiebereitstellungsverfahren aus Biomasse hinsichtlich der Bereitstellungskosten, der Einkommenseffekte für den Sektor Landwirtschaft, des Nettoenergieertrages sowie des Treibhauseffektes und der spezifischen CO<sub>2</sub>-Minderungskosten (Tabelle 2-14).

Der Untersuchungsrahmen umfasst mehrere Dimensionen. Räumlich umfasst die Studie die Bundesrepublik Deutschland. Zeitlich wird ein Stützzeitpunkt, nämlich das Jahr 2005 betrachtet. Zu Beginn bzw. während der Modellierungsarbeiten lagen für dieses Jahr alle wesentlichen statistischen Daten vor. Die Trendwerte der Datenreihen erfolgen auf Basis von histori-

schen Daten, die bis 1990 zurückreichen. Das untersuchte Produktsystem umfasst die Endenergiebereitstellung und Endenergieversorgung der Bundesrepublik Deutschland sowie die landwirtschaftlichen Nutzflächen, die ihren entsprechenden Beitrag zur Energieversorgung beitragen können. Die Wirkungskategorien ergeben sich aus den formulierten Zielen. Genaueres hierzu findet sich im folgenden Kapitel zur Wirkungsabschätzung. Als funktionelle Einheit dient die Kilowattstunde Endenergie.

**Tabelle 2-14: Kennzahlen der Optimierungsziele im RegEnOpt**

Ziel	Formel	Einheit
Netto-Energieeinsparung	$NEE = EIp_{foss/ fossET} - EIp_{foss/ BiomET}$	MJ oder kWh
CO <sub>2</sub> eq-Minderung	$\Delta CO_2eqM = CO_2eq_{foss} - CO_2eq_{Biom}$	kg CO <sub>2</sub> eq
CO <sub>2</sub> eq-Minderungskosten	$CO_2eqMK = \frac{K_{ges.Biom} - K_{ges.foss}}{CO_2eq_{foss} - CO_2eq_{Biom}}$	€/kg CO <sub>2</sub> eq
Beschäftigung Landwirtschaft	$B_{LW} = AKh_{LW} + AKh_{LU}$	AKh
Netto-Beschäftigung Landwirtschaft	$NB_{LW} = B_{LW;Biom} - B_{LW;kl.LW}$	AKh
Beschäftigung Region	$B_{Reg} = B_{LW} + AKh_{nLW}$	AKh
Netto-Beschäftigung Region	$NB_{Reg} = B_{Reg;Biom} - (B_{Reg;kl.LW} + B_{Reg;foss.E})$	AKh
Einkommensbeitrag Landwirtschaft	$EkB_{LW} = G_{LW} + LA_{LU}$	€
Einkommensbeitrag Region	$EkB_{Reg} = EkB_{LW} + LA_{nLW} + PA + ZA$	€

**Abkürzungen:** *NEE*: Netto-Energieeinsparung, *EIp*, Energie-Input, *Biom*: Biomasse, *foss*: fossile Energieträger, *ET*: Energieträger, *MJ*: Megajoule, *kWh*: Kilowattstunde, *CO<sub>2</sub>eq*: Kohlendioxid-Äquivalente (1 \* kg CO<sub>2</sub> + 23 \* kg CH<sub>4</sub> + 296 \* kg N<sub>2</sub>O),  $\Delta CO_2eqM$ : Minderung der CO<sub>2</sub>eq Emissionen, *CO<sub>2</sub>eqMK*: CO<sub>2</sub>eq Minderungskosten, *K*: Kosten, *ges*: gesellschaftlich, *B*: Beschäftigung, *AKh*: Arbeitskraftstunde, *LW*: Landwirtschaft, *LU*: landwirtschaftlicher Lohnunternehmer, *NB*: Netto-Beschäftigung, *Reg*: Region, *nLW*: nicht landwirtschaftlich, *kl.LW*: klassische Landwirtschaft, *foss.E*: fossile Energie, *EkB*: Einkommensbeitrag, *G*: Gewinn, *LA*: Lohnaufwand, *PA*: Pachtaufwand, *ZA*: Zinsaufwand

Quelle: eigene Darstellung

Neben den schon genannten Zielgrößen der Optimierung im Modell „RegEnOpt“ enthält Tabelle 2-14 noch weitere optionale Zielgrößen bezüglich verschiedener gesellschaftlicher Effekte auf regionaler Ebene. Der Begriff Region bezieht sich hierbei auf den betrachteten Raum Deutschland.

Die Netto-Energieeinsparung berechnet sich aus dem Energiegehalt des fossilen Energieträgers inkl. Energieaufwand zur Bereitstellung abzüglich des fossilen Energie-Inputs zur Bereitstellung des Energieträgers aus erneuerbaren Energiequellen. Analog leitet sich die Minderung der Emissionen klimawirksamer Treibhausgase ab, ausgedrückt in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten. Die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten ergeben sich aus der Differenz der Herstellungskosten der erneuerbaren Energieform gegenüber dem fossilen Pendant, bezogen auf die verminderten Treibhausgasemissionen (vgl. auch Abbildung 2-17). Die Beschäftigungseffekte im Sektor

Landwirtschaft lassen sich aus der direkten Beschäftigung des Landwirts bei der Erzeugung und Verarbeitung von Energiebiomasse berechnen. Entsprechende Dienstleistungen seitens landwirtschaftlicher Lohnunternehmer werden ebenfalls dem Sektor Landwirtschaft zugeschrieben. Die Beschäftigungseffekte in der betrachteten Region umfassen die landwirtschaftliche Beschäftigung sowie außerlandwirtschaftliche Beschäftigung, die anlässlich der Bioenergieerzeugung generiert wird. Eine Netto-Beschäftigung ergibt sich durch die Saldierung der Beschäftigung zur Bioenergieerzeugung abzüglich verdrängter Beschäftigung der alternativen Landnutzung und der verdrängten Beschäftigung der fossilen Energiebereitstellung. Landwirtschaftliches Einkommen ergibt sich aus den Gewinnen landwirtschaftlicher Aktivitäten zuzüglich der Lohnaufwendungen für landwirtschaftliche Lohnunternehmer unter der Annahme, dass sie schon entsprechende Unternehmergewinnanteile für Risiko und unternehmerische Tätigkeit enthalten und sämtliche Finanzierung mittels Fremdkapital erfolgt. Der Einkommensbeitrag für die Region umfasst neben dem landwirtschaftlichen Einkommensbeitrag die Pachtaufwendungen der Landwirte, welche ein entsprechendes Einkommen für den Verpächter bedeuten. Die abzuführende Einkommensteuer aus Vermietungen und Verpachtungen stellt ebenso regionales Einkommen dar, wenngleich nicht der Verpächter, sondern die öffentliche Hand über die Verwendung entscheidet. Entsprechendes gilt für den Zinsaufwand. Er dient der Entlohnung des angelegten Geldes in Form von Zinsen für den Anleger sowie der Aufrechterhaltung des Bankenwesens. Diese hier unterstellte Annahme gilt für einen der betrachteten Region entsprechenden Raum des Kapitalmarktes.

Die Zielgrößen tragen monetäre und naturale Einheiten. Die Kalkulationen mit monetärer Einheit erfolgt analog der Leistungs-Kosten-Rechnung auf Basis der Vollkostenrechnung unter Berücksichtigung von Faktorkosten (THOMMEN und ACHLEITNER 1998, S. 118 ff., WÖHE und DÖRING 2002, S. 830 ff., DLG 2004, S. 23 ff.). Die Zielgrößen mit naturalen Einheiten werden analog der Vorschriften der Produkt-Ökobilanz ermittelt. Einen Überblick gibt Tabelle 2-15.

Wie in Tabelle 2-15 dargestellt, werden die Zielgrößen aller betrachteten Biomasse-Energienutzungspfade sowie deren zugehörige Referenzverfahren ermittelt. Dabei werden die Leistungen der einzelnen Verfahren den Kosten gegenübergestellt. Entsprechendes gilt für die Nettoeffekte bezüglich der Zielgrößen, die naturale Einheiten tragen.

Eine Besonderheit stellt die Zielgröße Beschäftigung dar. Hier existieren keine „Kosten“, es werden lediglich analog der „Leistungen“ die notwendigen Arbeitsstunden je erzeugter Energieeinheit inklusive der Vorketten aufaddiert. Um letztendlich die Effekte der Veränderung durch Einführung von Biomasse-Energienutzungspfaden ableiten zu können, werden die Kennzahlen der neuen Verfahren mit den Kennzahlen der durch die Einführung verdrängten ursprünglichen Pfade fossiler Energiebereitstellung saldiert.

Tabelle 2-15: Zielgrößen der Sachbilanz sowie die Methoden der Ermittlung der Zielgrößen

Basis der Methode	Bezeichnung Zielgröße	Output Verfahren	Input (inkl. Vorketten) Verfahren	Saldo/Summe
		Einheit	Einheit	Einheit
Leistungs-Kosten-Rechnung	Betriebsergebnis	+ €/EE	- €/EE	+/- €/EE
Produkt-Ökobilanz	Nettoenergieertrag	+ MJ/EE	- MJ/EE	+/- MJ/EE
Produkt-Ökobilanz	CO <sub>2</sub> eq-Belastung	- kg CO <sub>2</sub> eq/EE	- kg CO <sub>2</sub> eq/EE	- kg CO <sub>2</sub> eq/EE
analog Produkt-Ökobilanz	Beschäftigung	+ AKh/EE	+ AKh/EE	+ AKh/EE

**Anmerkungen:**  
**Leistungen** tragen das positive Vorzeichen (+): Photosyntheseleistung der Pflanzen, Beschäftigungseffekte der Verfahren etc.  
**Kosten** tragen das negative Vorzeichen (-): monetäre Kosten, fossiler Energieverbrauch, CO<sub>2</sub>eq-Emissionen aus fossilen Rohstoffen etc.

Basis für den Vergleich bzw. die Saldierung zwischen Biomasse-Energieträger und dem zugehörigen Energieträger fossiler Art

**Abkürzung:** EE: Energieeinheit, z.B. kWh<sub>el</sub>, MJ<sub>Kraftstoff</sub>, kWh<sub>th</sub>

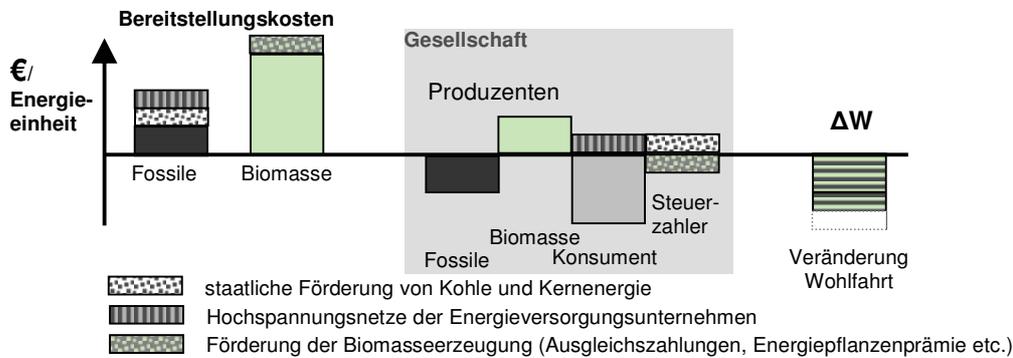
Quelle: eigene Darstellung

Hinsichtlich der gesellschaftlichen Belastung durch die verstärkte Etablierung von erneuerbaren Energieträgern im Energiemix stellt nicht der Leistungs-Kosten-Saldo die Position der gesellschaftlichen Mehrkosten dar, sondern die Differenz der tatsächlichen Herstellungskosten einer Einheit erneuerbare Energieträger und den entsprechenden Herstellungskosten des fossilen Pendant. Staatliche Förderungsmaßnahmen im fossilen Energiebereich, wie etwa die Kohlesubvention bzw. die staatlichen Leistungen für die Kernenergie gilt es entsprechend den vom Konsumenten zu bezahlenden Herstellungskosten des fossilen Energieträgers hinzuzufügen. Eine analoge Vorgehensweise ist im Bereich der erneuerbaren Energien hinsichtlich Berücksichtigung von Transferzahlungen (z. B. Ausgleichszahlungen) der öffentlichen Hand in den Sektor angebracht. Inwieweit die Kostendifferenz auf verschiedene Schultern der Gesellschaft verteilt wird, zeigt Abbildung 2-17 exemplarisch am Wirkungsmechanismus des Erneuerbaren Energie Gesetzes bezüglich der Erzeugung von elektrischem Strom aus Biomasse.

Die Veränderung der Wohlfahrt entspricht der Differenz der Herstellungskosten, wobei je nach Wirkungsweise der politischen Instrumente verschiedene Gesellschaftsgruppen in unterschiedlicher Weise beeinträchtigt bzw. begünstigt werden. So hat der Produzent der Energie aus Biomasse einen gewissen Nutzen. Demgegenüber entgeht dem Produzenten fossiler Energie dieser Nutzen, da er Produktionskapazitäten nicht mehr auslasten bzw. längerfristig weniger Stückeinheiten absetzen kann. Im Falle des Erneuerbaren Energien Gesetzes bzw. dem Beimischungszwang von Biokraftstoffen ist es dem Energieversorger bzw. Mineralölkonzern gestattet, die auftretenden Mehrkosten an den Konsumenten weiter zu geben. Der Staatshaushalt ist in diesem Falle nicht betroffen. Die Saldierung der Effekte auf die verschiedenen Gruppen der Gesellschaft ergibt schließlich die Wohlfahrtsveränderung, die derzeit zumeist gesellschaftliche Mehrkosten bedeuten. Bei diesen ersten Überlegungen wird davon ausgegangen, dass die klassische landwirtschaftliche Nahrungsmittelerzeugung nicht beeinträchtigt

wird. Es werden in dieser Studie nur die landwirtschaftlichen Nutzflächen berücksichtigt, deren Nutzung eine Überproduktion im Nahrungsmittelsektor bedeuten würde.

**Abbildung 2-17: Ableitung der gesellschaftlichen Kosten bei Nutzung von erneuerbaren Energiequellen am Beispiel des elektrischen Stroms**



Quelle: eigene Darstellung

Zur Ableitung der entsprechenden Zielgrößen der Biomasseverwertungspfade, anhand derer die optimale Biomasse-Nutzungsstrategien abgeleitet werden sollen, gilt es zunächst nach einheitlicher Vorgehensweise abzuleiten. Die Basis der Methode hierzu stellen die allgemeinen Vorschriften der Ökobilanzierung zur Erstellung der Sachbilanz dar.

### 2.3.2 Energetische Verwendungsmöglichkeiten von Biomasse - Sachbilanz

Die Sachbilanz enthält alle Input- und Outputströme der einzelnen Biomasseenergieumwandlungspfade entsprechend des Produktbaumes (vgl. Abbildung 2-13). In der Sachbilanz erfolgt die Berechnung der Kennzahlen zu den vorher formulierten Zielen. So gilt es beispielsweise analog der Vorschriften der Ökobilanz sämtliche energetischen Aufwendungen zur Herstellung einer Energieeinheit Endenergieträger aus Biomasse zu sammeln, um schließlich die spezifische Kennzahl Nettoenergieertrag ableiten zu können. Diese Kennzahl für einen speziellen Bioenergieträger kann je nach gewählten eingesetzten Rohstoffen und Energieträgern sowie je nach Art der Gutschrift für angefallene Koppelprodukte ein breites Wertespektrum einnehmen. Entsprechende Referenzsysteme und der Zeitpunkt der Bewertung haben ebenfalls entscheidende Einflüsse auf die Größenordnung der Kennzahlen. Daraus resultiert die auch in den Ökobilanzvorschriften geforderte umfassende Dokumentation der Annahmen zur Kennzahlenermittlung.

Die Verwertungspfade der Biomasse lassen sich mittels Input-Output-Tabellen beschreiben. Eine verallgemeinerte Form dieser Input-Output-Tabellen zeigt Tabelle 2-16. Es findet eine Untergliederung zwischen Biomassebereitstellung und Biomasseverwertung statt.

Tabelle 2-16: Die einzelnen Positionen der Input – Output – Tabellen

Input	Output
<b>Biomassebereitstellung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Saatgut</li> <li>• Dünger (N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O nach Entzug abzgl. Rücklieferung)</li> <li>• Pflanzenschutzmittel</li> <li>• Diesel</li> <li>• Mechanisierung für Anbau u. Transport</li> <li>• Bauliche Anlagen zur Lagerung u. ggf. Trocknung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biomasseenergieträger (Korn, Saat, Ganzpflanze etc.)</li> <li>• Koppelprodukte (Stroh, Blatt etc.)</li> <li>• Treibhausgasemissionen (u. a. bodenbürtiges N<sub>2</sub>O)</li> </ul>
<b>Endenergiebereitstellung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Biomasseenergieträger (Korn, Saat, Ganzpflanze etc.)</li> <li>• Koppelprodukte (Stroh, Blatt etc.)</li> <li>• Bauliche Anlagen zur Lagerung und Verwertung (Fermenter, Kessel, Raffinerie, BHKW inkl. Einhausung)</li> <li>• Endenergieträger zum Betrieb der Anlagen</li> <li>• Betriebsmittel (Chemikalien, Wasser etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Endenergieträger</li> <li>• Treibhausgasemissionen</li> <li>• Koppelprodukte</li> </ul>

Quelle: eigene Darstellung

Zunächst erfolgt die Dokumentation der Methodik zur Erstellung der Sachbilanz zur Biomassebereitstellung. Darauf folgt in einem zweiten Schritt die Erläuterung des methodischen Vorgehens der Erstellung der Sachbilanzen zu den verschiedenen Verwertungsmöglichkeiten der Biomasse.

### 2.3.2.1 Bereitstellung der Biomasse-Rohstoffe

Als erster Schritt erfolgt die Dokumentation der Sachbilanz der Stufe 1 der Energieumwandelungspfade (vgl. Abbildung 2-1), die die Bereitstellung von Anbaubiomasse darstellt. Die wesentlichen Inputgrößen bei der Bereitstellung von landwirtschaftlichen Kulturen sind

- Saatgut,
- Dünger,
- Pflanzenschutzmittel,
- Endenergieträger (v. a. Diesel),
- Maschinen,
- Transportsysteme und
- Lagerungssysteme.

Analog der Vorschriften zur Erstellung einer Sachbilanz werden für diese Inputgrößen alle notwendigen Parameter sowie deren spezifische Ausprägung hinsichtlich Energiebilanz, Treibhauseffekt, Beschäftigung und Kosten erfasst.

### Saatgut

Die Kennzahlenermittlung für das Saatgut erfolgt mittels mehrerer iterativer Schritte unter der Annahme, dass ein Teil der Ernte des Vorjahres als Saatgut des aktuellen Jahres verwendet wird (vgl. DIEPENBROCK et al. 1995, S.23 ff. und EYERER und REINHARDT 2000 S. 116). Für eine Weizenernte von 7,7 Tonnen Hektarertrag werden 180 Kilogramm Saatgut aufgewendet, was einem prozentualen Anteil von 2,3 Prozent entspricht. Bei Raps werden für einen Hektarertrag von 3,7 Tonnen 4 Kilogramm Saatgut (0,1 %), bei Kartoffeln für 43 Tonnen Ertrag 2,8 Tonnen Pflanzgut (6,5 %) verwendet. Raps und Kartoffeln spannen die Extrempunkte des Spektrums des Saat- bzw. Pflanzguteinsatzes auf. Entsprechend der Bilanzierung der Biomasserohstoffe werden die Koeffizienten für das Saatgut analog der Formel in Abbildung 2-18 selbst ermittelt.

**Abbildung 2-18: Ableitung der spezifischen Aufwendungen zur Saatgutherstellung**

$$sSA_i = SfA_i \cdot (1 + x) \cdot Z_K \cdot E^{-1}$$

$sSA_i$ : spezifischer Saatgutaufwand [MJ, kg CO<sub>2</sub>eq Emissionen, ...]

$i$  = {Energieinput in MJ, kg CO<sub>2</sub>eq Emissionen, ...}

$SfA$ : saatgutfreier Aufwand [MJ, kg CO<sub>2</sub>eq Emissionen, ...]

$x$ : relativer Anteil der Saatgutmenge am Ertrag

$Z_K$ : Kulturspezifischer Zuschlag für zusätzlichen Aufwand für Transport, Aufbereitung und Lagerung

$E$ : Ertrag in kg/ha

Grundsätzlich  $Z_K = 1,2$

Ausnahmen: Mais:  $Z_{K\text{örnemaiss}} = 1,7$

Raps:  $Z_{\text{Raps}} = 1,7$

Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an die Formel von NISSEN 1985, zitiert in VON OHEIMB 1987, KALTSCHMITT und REINHARDT 1997, S. 224 f.

Durch die Multiplikation mit einem kulturspezifischen Zuschlagfaktor soll der zusätzliche Energieaufwand sowie die damit verbundenen Treibhausgasemissionen für Transport, Aufbereitung und Lagerung des Saatgutes abgedeckt werden.

Die im Modell „*RegEnOpt*“ ausgewiesenen Treibhausgasemissionen für das Saatgut sind um den Betrag der Lachgasemissionen höher als die Angaben für Saat- und Pflanzgut bei KALTSCHMITT und REINHARDT (1997, S. 224 f.). Nach Abzug der anteiligen Lachgasemissionen bei den Ergebnissen im Modell „*RegEnOpt*“ werden die gleichen Größenordnungen für die Koeffizienten bezüglich Energieinput und Treibhausgasemissionen abgeleitet, wie sie auch aus KALTSCHMITT und REINHARDT (1997, S. 224 f.) zu entnehmen sind. DREIER und TZSCHEUTSCHLER (2000) sowie IGELSPACHER (2003) geben für den Energieaufwand zur

Bereitstellung von Saatgut wesentlich höhere Werte an, die Datengrundlage sowie die grundsätzlichen Annahmen gehen jedoch nicht aus den Studien hervor.

Eine iterative Ermittlung der tatsächlichen Aufwendungen für Saatgut erscheint nicht sinnvoll. Zur Erzeugung der 180 Kilogramm Weizensaatgut wären 4,2 Kilogramm Saatgut nötig, hierfür wiederum noch 100 Gramm. Eine unendliche Folge führte dazu, dass die oben dargestellten Koeffizienten mit einem Faktor 1,001 für Raps bis 1,070 für Kartoffeln multipliziert werden müssten.

Somit können die ermittelten Kennzahlen der Erntegüter zusätzlich als Datengrundlage zur Ermittlung der spezifischen Kennzahlen für das Saatgut dienen. Neben der reinen Bereitstellung des Erntegutes werden zusätzliche Bearbeitungsschritte mit dem Faktor zwei und spezielle Inputfaktoren wie die Beize zusätzlich berücksichtigt.

Lediglich für Kulturen, wie z. B. die Zuckerrübe, Pappel, Miscanthus usw., bei der ein extra Produktionsverfahren allein zur Saatgutgewinnung notwendig ist, werden Literaturdaten zum Saatgut (IGELSPACHER 2003, KALTSCHMITT und REINHARDT 1997, S. 224 f.) verwendet.

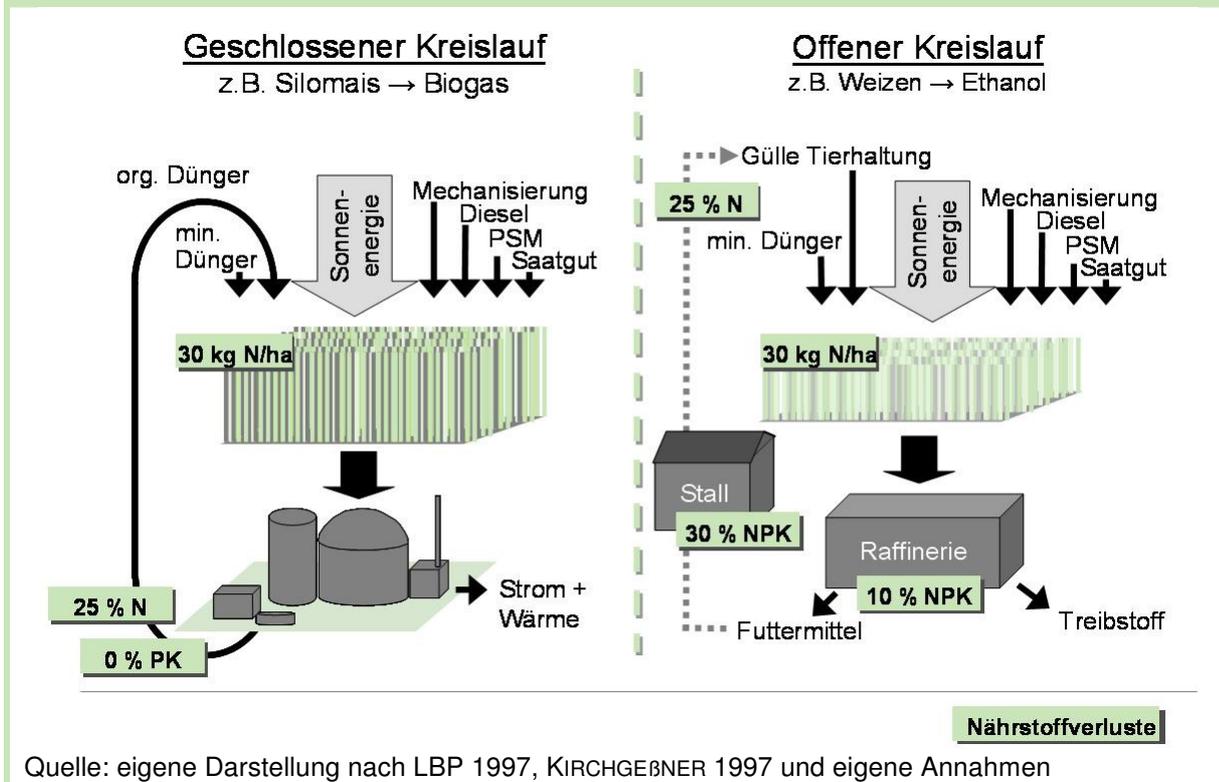
### Düngung

Die Kalkulation zur Düngung der Kulturen erfolgt im Modell „*RegEnOpt*“ nach den mit den Erntegütern entzogenen Nährstoffen zuzüglich pauschaler Zuschläge für nicht vermeidbare Verluste. Dabei beschränkt sich die Betrachtung auf die drei Makronährstoffe Stickstoff (N) Phosphat ( $P_2O_5$ ) und Kali ( $K_2O$ ). Die spezifischen Nährstoffentzüge der Kulturen sind in Anhangtabelle 1 zu finden. Gerade bei den neu hinzukommenden Energiekulturen wie Sudangras, Zuckerhirse, Miscanthus und Kurzumtriebsgehölz variieren die Nährstoffentzugsdaten erheblich. Für das Modell „*RegEnOpt*“ werden demnach plausibel erscheinende Mittelwerte herangezogen. Um den entsprechenden Nährstoffkreisläufen bei der energetischen Verwertung von Biomasse Rechnung zu tragen, werden spezifische Rücklieferungsraten zugelassen. So besteht beispielsweise bei einer Biogasanlage, die mit speziell angebauter Biomasse beschickt wird, ein nahezu geschlossener Nährstoffkreislauf. Mineralische Dünger sind nur zur Ergänzung der nicht vermeidbaren Stickstoffverluste notwendig. Bei der Verwertung von Biomasse zu Treibstoffen fällt bei den Verfahren der Treibstoffherzeugung der ersten Generation als Koppelprodukt ein Eiweißfuttermittel an. Dieses Futtermittel wird zur Tierernährung eingesetzt, ein großer Teil der darin enthaltenen Nährstoffe gelangt schließlich nach der Passage des Verdauungstraktes des Tieres als Wirtschaftsdünger wieder auf landwirtschaftliche Nutzflächen. Diese beiden Varianten der Nährstoffkreisläufe zeigt Abbildung 2-19.

Neben Verfahren der energetischen Biomasseverwertung mit geschlossenem bzw. offenem Kreislauf existieren Verfahren ohne Nährstoffkreislauf. Dies sind die Verfahren der direkten thermischen Verwertung der Biomasse sowie weitgehend die Verfahren der Treibstoffgewinnung der zweiten Generation. Dabei fallen als Reststoffe Aschen an, die nur selten wieder auf landwirtschaftliche Nutzflächen ausgebracht werden. Anbauverfahren, bei deren Erntegüter

als Koppelprodukt lediglich Asche verbleibt, müssen komplett mit mineralischen Düngemitteln gedüngt werden.

Abbildung 2-19: Energie- und Stoffflüsse bzw. Nährstoffkreisläufe



Zur Überprüfung der in Abbildung 2-19 angenommenen Verlustraten der Nährstoffe in den Kreisläufen wurde eine nationale Nährstoffbilanz für Deutschland erstellt. Als Nährstoffsенke dienen letztendlich die angebauten Kulturen, die entsprechend des Ertrages sowie den Nährstoffgehalten der Erntegüter gewisse Nährstoffmengen benötigen. Zur Nährstoffversorgung können drei Quellen herangezogen werden: Die Nährstoffe der Handelsdünger, die Nährstoffe in den Ausscheidungen der landwirtschaftlichen Nutztiere sowie der Stickstoff, der durch Leguminosen fixiert wurde. Für Stickstoff ergäbe sich demnach eine Bruttonährstoffeffizienz von gerade 60 Prozent gegenüber Phosphat mit 92 Prozent und Kali mit 79 Prozent. Es treten jedoch Verluste beim Nährstoffeinsatz auf. Bei der eigenen Annahme dass lediglich 50 Prozent des in den tierischen Ausscheidungen enthaltenen Stickstoffs bei 100-prozentiger Effizienz des Handelsdüngereinsatzes für die Pflanzen verfügbar wird, vermindert sich der direkte Nettonährstoffeinsatz zur Düngung der Pflanzen und erhöht die Stickstoffeffizienz auf 77 Prozent. Für die Nährstoffe Phosphat und Kali wurden pauschale Verluste von zehn Prozent angenommen. Tabelle 2-17 zeigt die Nährstoffbilanz für Deutschland sowie die Effizienzen und Anteile der Nährstoffherkünfte.

Unter der Annahme, dass auch bei Einsatz der mineralischen Handelsdünger Verluste auftreten, mindert sich der absolute pflanzenverfügbare Stickstoffüberschuss zusätzlich. Die Annahme von insgesamt 50 Prozent Stickstoffverlusten bei Wirtschaftsdüngermanagement und

Ausbringung erscheint nach diesen Zusammenhängen als realistisch und findet sich wieder im Modell „RegEnOpt“.

**Tabelle 2-17: Nährstoffbilanz der deutschen Landwirtschaft**

Bezeichnung	Einheit	Makronährstoffe		
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Nährstoffentzüge Kulturen <sup>1)</sup>	1.000 t	1.966	803	1.595
Ausscheidungen Tierhaltung <sup>2)</sup>	1.000 t	1.421	560	1.511
Handelsdüngereinsatz	1.000 t	1.792	315	506
Stickstofffixierung Leguminosen	1.000 t	56		
Nährstoffeinsatz brutto	1.000 t	3.269	875	2.017
Verluste bei Wirtschaftsdüngereinsatz <sup>3)</sup>	%	50%	10%	10%
Nährstoffeinsatz netto	1.000 t	2.558	819	1.866
Nährstoffeffizienz	%	77%	98%	85%
Anteil Wirtschaftsdünger	%	28%	62%	73%
Anteil Mineraldünger	%	70%	38%	27%
Anteil Leguminosen-Stickstoff	%	2%		

<sup>1)</sup> Haupternteerzeugnisse - ohne Strohabfuhr

<sup>2)</sup> ohne Verluste

<sup>3)</sup> eigene Annahmen

Quelle: eigene Berechnungen nach EUROSTAT 2008, LFL 2007

Diese Vorgehensweise unterscheidet sich erheblich zu den bis 2005 veröffentlichten Ökobilanzen zu Anbaubiomasse für die energetische Verwertung. Die Ökobilanzmodelle GEMIS (ÖKO-INSTITUT 2004) und ProBas (UBA 2004) sowie die Kalkulationen von KALTSCHMITT und REINHARDT (1997, S. 180 f.), DREIER und TSCHETSCHLER (2000, S. 17 ff.), IGELSPACHER (2003, S. 23 ff.) unterstellten den Biomasserohstoffen Nährstoffentzüge, denen keinerlei bzw. in nur geringfügigem Maße berücksichtigte Rücklieferungen in organischer Form gegenüber stehen. Es erfolgt nach diesen Ansätzen eine komplette bzw. zu hoch eingeschätzte mineralische Düngung mit der entsprechenden Annahme an Energieinput und den damit verbundenen Treibhausgasemissionen je Flächeneinheit, die nur dann in dieser Höhe zu rechtfertigen sind, wenn keine Nährstoffe aus dem abgefahrenen Erntegut mehr auf landwirtschaftlich genutzte Flächen zurück gelangen können. Dies ist nur bei Verbrennung der Biomasse der Fall, wenn nur Rauchgas und Asche zurückbleiben und die Asche nicht als Dünger verwendet wird.

### Pflanzenschutz

Der Pflanzenschutz stellt unter ökobilanzieller Betrachtung ein Problem dar. Es existieren kaum verlässliche Daten zum Energieeinsatz bei der Herstellung von Pflanzenschutzmitteln sowie zu den zugehörigen Treibhausgasemissionen. Entsprechend schwierig stellt sich eine

exakte kulturspezifische Ermittlung der Kennzahlen zum Pflanzenschutz dar. Aus einschlägiger Statistik sind jedoch national eingesetzte Wirkstoffmengen zu entnehmen. Zusätzlich enthält die Statistik den monetären Aufwand des Sektors Landwirtschaft für Pflanzenschutzmittel. Daraus lässt sich die Kennzahl Wirkstoffmasse je Euro ableiten (Tabelle 2-18).

**Tabelle 2-18: Ableitung der spezifischen Wirkstoffmasse je aufgewendetem Euro für Pflanzenschutzmittel**

Bezeichnung	Einheit	2001	2002	2003	2004	2005	Mittelwert
Vorleistungen für den Bereich Landwirtschaft dar. Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmittel	Mio. €	1.412	1.469	1.457	1.367	1.351	1.411
Produktion, Ausfuhr und Inlandsabsatz an Wirkstoffen von Pflanzenschutzmitteln dar. Inlandsabsatz	t	33.663	34.678	35.755	35.131	35.494	34.944
<b>spezifische Wirkstoffkosten</b>	<b>€/kg PSM</b>	42	42	41	39	38	<b>40</b>
<b>spezifische Wirkstoffmasse je Euro</b>	<b>kg PSM/€</b>	0,024	0,024	0,025	0,026	0,026	<b>0,025</b>

Quelle: eigene Berechnungen nach KRÄNZLEIN 2005, BMELV 2006, Bestätigung nach BRENDLER, et al. 2005

Aus entsprechenden Anbau- und Pflanzenschutzempfehlungen sind kulturspezifische monetäre Aufwendungen für Herbizide, Fungizide, Insektizide und sonstige Pflanzenschutzmittel bekannt. Aus diesen kulturspezifischen Aufwandsbeträgen und der spezifischen Wirkstoffmasse je Euro lassen sich die für die einzelnen Kulturen spezifischen Aufwandsmengen an Herbiziden, Fungiziden, Insektiziden und sonstigen Pflanzenschutzmitteln ableiten (nach KRÄNZLEIN 2005). Für diese Wirkstoffklassen existieren aggregierte Kennzahlen zur Energie- und Treibhausgasbilanz, die auch im Modell „RegEnOpt“ Verwendung finden. Eine Analyse einer umfassenden Darstellung verschiedenster Herbizide aus einer Pflanzenschutzempfehlung erbrachte ebenfalls durchschnittliche Wirkstoffkosten von 40 Euro je Kilogramm (BRENDLER et al. 2005). Aus Tabelle 2-19 und Anhangtabelle 2 gehen hervor, welche spezifischen Wirkstoffmengen von Pflanzenschutzmitteln für die einzelnen landwirtschaftlichen Kulturen eingesetzt werden.

**Tabelle 2-19: Ableitung der spezifischen Pflanzenschutzmittel-Wirkstoffmengen exemplarisch für Winterweizen bei Wirkstoffkosten von 40 €/kg**

Kultur Wirkstoffklasse	Pflanzenschutzintensität			Pflanzenschutzintensität		
	niedrig	mittel	hoch	niedrig	mittel	hoch
	€/ha			kg WS/ha		
<b>Winterweizen</b>						
Herbizide	29	42	54	0,72	1,04	1,34
Fungizide	40	60	84	0,99	1,48	2,08
Wachstumsregler	2	4	12	0,05	0,10	0,30
Insektizide u. sonst. Pflanzenschutz	0	4	8	0,00	0,10	0,20

Quelle: eigene Berechnungen nach LFL 2006, BMELV 2006 und BRENDLER et al. 2005

Tabelle 2-19 zeigt exemplarisch für den Winterweizen, welche spezifischen Wirkstoffmengen bei unterschiedlichen Pflanzenschutzintensitäten für Herbizide, Fungizide, Wachstumsregler sowie Insektizide und sonstige Pflanzenschutzmittel eingesetzt werden. In der Anhangtabelle 2 befinden sich entsprechende spezifische Wirkstoffmengen für alle wesentlichen Ackerkulturen. Im Modell „RegEnOpt“ wird die mittlere Pflanzenschutzintensität als Datengrundlage herangezogen. Die große Heterogenität der Wirkstoffe bezüglich Aufwandmenge je Hektar ist bekannt. Die Datenlage hinsichtlich ökobilanzieller Parameter ist jedoch gerade ausreichend für die oben beschriebene Vorgehensweise.

### Endenergeträger

Der hauptsächlich verwendete Energieträger beim Anbau von landwirtschaftlichen Kulturpflanzen ist Dieselkraftstoff. Die kulturspezifischen Dieselverbrauchsmengen wurden in Anlehnung an zu Beginn der Modellierung vorliegenden KTBL-Daten (KTBL 2004), wie in Tabelle 2-20 dargestellt, ermittelt.

**Tabelle 2-20: Dieselverbrauch von Traktoren bei den verschiedenen Arbeitsgängen**

Standardtraktor mit Allradantrieb	durchschnittlicher Dieselverbrauch	Arbeitsgang	Lastfaktor
41 - 48 kW	5,3 l/h	Pflügen	1,7
49 - 59 kW	6,3 l/h	Grubbern	1,6
60 - 74 kW	7,8 l/h	Eggen	1,5
75 - 92 kW	9,7 l/h	Kreiseleggen	1,6
93 - 111 kW	11,9 l/h	Säen	0,8
112 - 129 kW	14,0 l/h	Düngen	1,0
130 - 147 kW	16,1 l/h	Pflanzenschutz	0,8
148 - 167 kW	18,3 l/h	Transport	0,6
168 - 184 kW	20,5 l/h	Mähen	1,1
185 - 215 kW	23,3 l/h	Zetten, Wenden	1,2

$$DV_{AG} = dDV_{ST} \cdot LF_{AG} \cdot ZB_{AG/ST}$$

$DV_{AG}$ : Dieselverbrauch Arbeitsgang [l/ha]

$dDV_{ST}$ : durchschnittlicher Dieselverbrauch Standardtraktor [l/h]

$LF_{AG}$ : Lastfaktor Arbeitsgang

$ZB_{ST/AG}$ : Zeitbedarf des Standardschleppers für den Arbeitsgang [h/ha]

Quelle: eigene Darstellung nach KTBL 2004

Die Auswahl der Zugmaschinen wurde auf landwirtschaftliche Standardtraktoren mit Allradantrieb beschränkt. Jede Leistungsklasse besitzt einen spezifischen mittleren Dieselverbrauch je Stunde. In der KTBL-Datenbank hinterlegt, aber nicht zugänglich, sind Lastfaktoren für die einzelnen landwirtschaftlichen Arbeitsgänge. Bei praxisnaher Kombination von Traktor und Arbeitsgerät können mittels eigens abgeleiteter und in Tabelle 2-20 zusammengestellter Lastfaktoren der spezifische Dieselverbrauch je Arbeitsgang und Stunde ermittelt werden. Aus der jeweiligen Flächenleistung je Traktor-Maschinenkombination ergibt sich daraus der Dieselverbrauch je Hektar und Arbeitsgang. Aus der Summe der Dieselverbräuche der Arbeitsgänge

ergeben sich daraus Dieserverbräuche je Hektar und Kultur. Analog KTBL-Daten wird der Schmierölverbrauch mit einem Prozentpunkt an den Dieserverbrauch angelehnt.

## Maschinen

Neben dem Kraftstoffbedarf bei der Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Nutzflächen bedurfte es auch eines gewissen Energieeinsatzes, verbunden mit entsprechenden Treibhausgasemissionen, um die Maschinen bereitzustellen und in betriebsfähigem Zustand zu erhalten.

Analog zur ökonomischen Abschreibung von Maschinen und Gerät (Abbildung 2-20) sollen auch die energetischen Aufwendungen zur Bereitstellung der Maschinen und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen den produzierten Gütern zugewiesen werden.

**Abbildung 2-20: Monetäre Abschreibung und Verzinsung des eingesetzten Kapitals**

### monetäre Abschreibung

$$Afa_a = A \cdot (1 - RW) \cdot ND_{max,a}^{-1}$$

### Verzinsung des eingesetzten Kapitals

$$Z_a = A \cdot (1 + RW) \cdot \left( \frac{(1 + Zf)^{ND_{max,a}}}{(1 + Zf)^{ND_{max,a}-1}} - \frac{1}{ND_{max,a} \cdot Zf} \right) \cdot Zf$$

$Afa_{ai}$ :	jährliche Abschreibung in €/a
$A$ :	Anschaffungs- u./o. Herstellungskosten
$RW$ :	Restwert nach Vollendung der Nutzungsdauer in Prozent der Anschaffungs- u./o. Herstellungsaufwendungen (in dieser Arbeit = 0%)
$ND_{max,a}$ :	maximale Nutzungsdauer in Jahren
$Z_a$ :	jährliche Verzinsung des eingesetzten Kapitals
$Zf$ :	Kalkulationszinsfuß

Quelle: eigene Darstellung nach BRANDES und ODENING 1992, S. 43 u. S. 55

Eine Besonderheit der ökonomischen Auswertung stellt die Verzinsung des eingesetzten Kapitals dar, welche sich aus dem Umfang des Kapitaleinsatzes, des Kalkulationszinsfußes sowie der Nutzungsdauer des Investitionsgutes ableitet. Im Modell „RegEnOpt“ werden sämtliche Investitionsgüter, somit auch die landwirtschaftlichen Maschinen, an der Abschreibungsschwelle abgeschrieben. Entsprechendes gilt auch für die Parameter, die für die Ökobilanz relevant sind. Der in Abbildung 2-21 dargestellte Rechengang zeigt dies auf. Im Modell „RegEnOpt“ erfolgt in diesem Bereich keine exakte Erfassung der tatsächlichen Ökobilanzen einzelner Maschinen. Aus der Datensammlung des KTBL (2004) gehen die spezifischen Gewichte der einzelnen Maschinen hervor. Ein Zusammenhang zwischen Anschaffungskosten und Gewicht lässt sich aus den KTBL-Daten (2004) bei Gummi bereiften Selbstfahrern und Anhängern ableiten. Alle übrigen Maschinen weisen eine größere Streuung auf (vgl. Anhangabbildung 1). Die Schweizer Wissenschaftler GAILLARD et al. (1997) haben ein Umweltinventar der landwirtschaftlichen Inputs im Pflanzenbau erstellt und hierfür u. a. zu ver-

schiedenen Maschinenklassen den Energieaufwand zur Herstellung sowie die damit verbundenen Treibhausgasemissionen je Gewichtseinheit Maschine ermittelt, die auch in den folgenden Analysen Anwendung finden. Datengrundlage für diese Analysen sowie auch für die Untersuchungen von DIEPENBROCK (1995) waren die Ausführungen von DOERING (1980).

**Abbildung 2-21: Ableitung des spezifischen Mechanisierungsaufwandes einzelner Arbeitsgänge und Produktionsverfahren zur Pflanzenproduktion**

**Arbeitsgang**

$$sA_{AG,i} = \left( (I_{W,ij} + I_{P,ij}) \cdot (ND_{max,h}^{-1} \cdot ND_{max,a}) \right) \cdot ND_{max,a}^{-1} \cdot l_k + \sum_{k=1}^n \left( (I_{W,ik} + I_{P,ik}) \cdot (ND_{max,ha}^{-1} \cdot ND_{max,a}) \right) \cdot ND_{max,a}$$

$sA_{AG,i}$ : spezifischer Mechanisierungsaufwand je Arbeitsgang in MJ ha<sup>-1</sup>, kg CO<sub>2</sub>eq ha<sup>-1</sup> etc.  
 $i$ : = {Energieinput in MJ, kg CO<sub>2</sub>eq Emissionen, ...}  
 $j$ : = {Schlepper, Selbstfahrer}  
 $k$ : = {Maschinen, Geräte}  
 $l$ : Maschinenspezifischer Zeitaufwand in h ha<sup>-1</sup>  
 $I_W$ : Input Werkstoffe zur Bereitstellung der Maschine inkl. Ersatzteile  
 $I_P$ : Input Prozessenergie zur Bereitstellung der Maschine aus den Werkstoffen inkl. Reparaturen  
 $ND_{max,h}$ : maximale Nutzungsdauer in Stunden  
 $ND_{max,a}$ : maximale Nutzungsdauer in Jahren  
 $ND_{max,ha}$ : maximale Nutzungsdauer in Hektar

**Produktionsverfahren**

$$sA_{PV,i} = \sum_{a=1}^n sA_{AG,ia}$$

$sA_{PV,i}$ : spezifischer Mechanisierungsaufwand je Produktionsverfahren in MJ/ha, kg CO<sub>2</sub>eq/ha etc.  
 $a$ : = {Pflügen, Säen, Düngen, Pflanzenschutz, Ernte, ...} (verschiedene Arbeitsgänge)

Quelle: eigene Darstellung

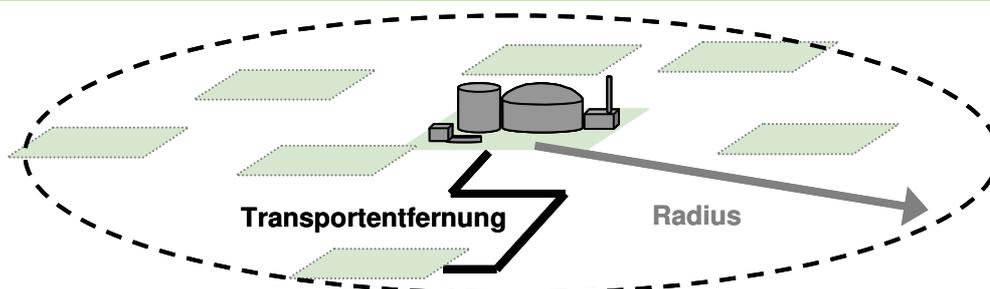
In Anlehnung an die vom KTBL definierten Produktionsverfahren werden aus den im Modell „RegEnOpt“ festgelegten Arbeitsgängen entsprechende plausible Produktionsverfahren für die einzelnen Kulturen zusammengestellt. Um den in der Realität praktizierten Vorgehensweisen Rechnung zu tragen, erfolgt eine Unterscheidung zwischen Eigenmechanisierung und Arbeiterledigung gewisser Arbeitsgänge durch einen Lohnunternehmer. Bezüglich ökobilanzieller Kalkulationen ergeben sich daraus keine Unterschiede für die Ergebnisse, da die energetische sowie die monetäre Abschreibung generell an der Abschreibungsschwelle erfolgt. Hinsichtlich des Gewinnbeitrages des Landwirts ist diese Unterscheidung der Arbeiterledigung jedoch relevant.

### Transportsysteme

Der Transport nimmt gegenüber den KTBL-Produktionsverfahren im Modell „RegEnOpt“ eine Sonderstellung ein. Lediglich die Annahmen für Betriebsmitteltransporte von z. B. Mineraldüngemitteln oder Saatgut wurden analog KTBL (2004) getroffen. Der Transport der Erntegüter bzw. von Reststoffen aus der Verarbeitung, u. U. mit hohen Wassergehalten, wird aus den Produktionsverfahren des Biomasseanbaus herausgenommen, um mittels spezifisch definierter Transportprozesse verschiedene Entfernungsklassen, die aus den Kapazitäten der

Verarbeitungsstätten und dem daraus resultierenden Einzugsgebiet resultieren, implementieren zu können (Abbildung 2-22). Bei Getreidekorn fällt der Transport vergleichsweise gering ins Gewicht, während der Transport von Stroh, frischen Ganzpflanzen in gehäckselter Form und anderen voluminösen Biomasserohstoffen einen erheblichen Anteil zu den gesamten Bereitstellungskosten und somit auch insgesamt zur Ökobilanz beitragen. Die durchschnittliche Transportentfernung wird mittels des einfachen Schätzmodells aus Abbildung 2-22 abgeleitet.

**Abbildung 2-22: Ableitung der mittleren anlagenspezifischen Transportentfernung für Biomasserohstoffe**



$$TE = TF_{Reg} \cdot (FB_{Anlage} \cdot A_{LF}^{-1} \cdot A_{FF}^{-1} \cdot 0,01 \cdot \pi^{-1})^{\frac{1}{2}}$$

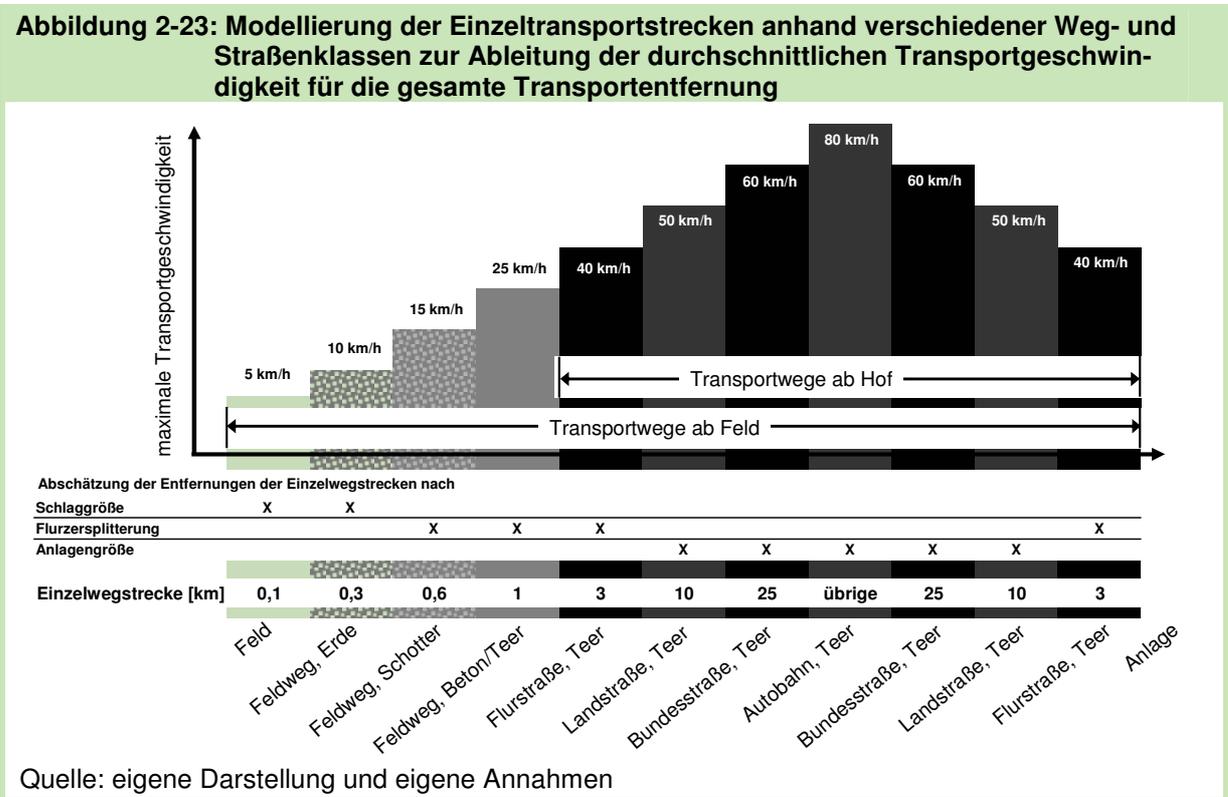
$TE$ :	Transportentfernung einfach in Kilometer
$TF_{Reg}$ :	regional spezifischer Korrekturfaktor (Wege- und Straßenverhältnisse)
$FB_{Anlage}$ :	spezifischer Flächenbedarf der Anlage in Hektar
$A_{LF}$ :	Anteil der landwirtschaftlichen Nutzfläche an der Gesamtfläche der Region
$A_{FF}$ :	Anteil der eingesetzten Kulturen an der landwirtschaftlichen Nutzfläche
$\pi$ :	3,14159265

Quelle: eigene Darstellung

Die Verarbeitungskapazität der Anlage sowie ein ortsübliches Ertragsniveau ergeben den Flächenbedarf für die zu verarbeitende Kultur. Durch das Einbeziehen der Faktoren bezüglich des Anteils der landwirtschaftlichen Nutzfläche in der Region sowie des entsprechenden durchschnittlichen Anteils der Kultur an der Fruchtfolge kann die Fläche des Einzugsgebietes geschätzt werden. Durch die Modellannahme eines kreisrunden Einzugsgebietes lässt sich der Außenradius ermitteln. Dieser wird multipliziert mit einem für die Region spezifischen Korrekturfaktor, der die Verhältnisse des Wege- und Straßennetzes hinsichtlich Kurven, bzw. Abdeckungsgrad analog Erreichbarkeit der Fläche durch Straßen repräsentiert. Als Ergebnis der einfachen Schätzmethode erscheint die durchschnittliche Transportentfernung für die Rohstoffversorgung der Biomasse verarbeitenden Anlage.

Neben der reinen Transportentfernung hat die Qualität der Transportwege einen erheblichen Einfluss auf die Transportaufwendungen monetärer und ökologischer Art, da die durchschnittliche Transportgeschwindigkeit eines Transportsystems direkt abhängig ist von den Wege- und Straßenverhältnissen. Für die Modellierung im Modell „RegEnOpt“ werden entsprechen-

de Annahmen zu den Transportwegen subjektiv analog den Angaben in Abbildung 2-23 geschätzt.



Es wird die gesamte Transportstrecke unterteilt in Intervalle verschiedenster Weg- bzw. Straßenklassen. Jede Klasse ist gekennzeichnet mit einer entsprechenden realisierbaren maximalen durchschnittlichen Transportgeschwindigkeit. Die einzelnen Längen der Klassen ergeben sich aus für die Region spezifisch geschätzten Faktoren wie durchschnittliche Schlaggröße, Grad der Flurzersplitterung sowie Flächeneinzugsgebiet, welches durch die Anlagengröße bestimmt wird (vgl. Abbildung 2-22). Die theoretische Maximalgeschwindigkeit auf den einzelnen Wegklassen wird je nach Transportsystem begrenzt durch dessen natürliche Maximalgeschwindigkeit. Je nach tatsächlicher Transportentfernung werden im Modell „RegE-nOpt“ sukzessive die Einzelwegstrecken von schlechten Verhältnissen bis zu besten Verhältnissen hinsichtlich maximaler Fahrtgeschwindigkeit mit der in Abbildung 2-23 angegebenen Einzelstreckenlängen „abgefahren“. Während bei nur sehr geringen Entfernungen keine Autobahnen und Bundesstraßen benutzt werden, bildet die Autobahn den variablen Streckenpuffer bei sehr weiten Transportentfernungen. Bei Transportsystemen, die die Autobahn nicht benutzen dürfen, bildet die Bundesstraße den variablen Streckenpuffer.

Die Auslastung der Transportsysteme wird je nach Gutbeschaffenheit begrenzt durch die maximal zulässige Massenzuladung oder durch das maximale Zuladungsvolumen. Die spezifische Schüttdichte der Transportgüter dient mit den Angaben zu Massen- und Volumenobergrenze des Transportsystems als Entscheidungskriterium für die tatsächlich zugeladene Mas-

se. Damit und mit den spezifischen Be- und Entladezeiten sind alle Einflussparameter bekannt und im Modell „*RegEnOpt*“ implementiert, um jeder Tonne Transportgut entsprechende Kosten und Ökobilanzparameter zuweisen zu können. Ein Transport per Bahn oder (Binnen-)Schiff wird in der vorliegenden Studie nicht betrachtet.

### Lagerungssysteme

Zwischen der Bereitstellung der Biomasserohstoffe und der eigentlichen Verarbeitung verstreicht meist ein gewisses Zeitintervall, welches durch den Prozess der Lagerung überbrückt wird. Neben der Notwendigkeit, entsprechende Lagerkapazität bereitzustellen, erfolgt während der Lagerdauer eine Veränderung des Lagergutes. Durch die biologische Veratmung findet unter Freisetzung u. a. von Kohlendioxid ein Massenverlust statt. Je geringer der Wasserhalt des Lagergutes bzw. je besser der Sauerstoffabschluss bei Lagergütern mit hohem Wassergehalt ist, desto geringere Lagerverluste sind je Zeiteinheit zu verzeichnen. Die Lagerverluste werden jeweils auf Basis der halben Lagerdauer nach Angaben des BUNDESARBEITSKREIS FUTTERKONSERVIERUNG (2006) berechnet und dem Lagerungsgut als Durchschnittswert während der gesamten Lagerungs- bzw. Entnahmepériode zugewiesen. Das Modell „*RegEnOpt*“ bietet neben der Modellierung von Lagerungsprozessen ebenso die Berücksichtigung aktiver Veränderung des Lagerungsgutes wie z.B. die Trocknung von Druschfrüchten. Nach PFÄNDER et al. (1995) werden zum Ein- und Auslagern von Getreide circa 0,25 kWh elektrischer Strom benötigt. Die Trocknung von Getreide von einem Feuchtigkeitsgehalt von 20 Prozent auf 16 Prozent erfordert durchschnittlich 2,4 kWh Strom und zusätzlich rund sieben Liter Heizöl (PFÄNDER et al. 1995).

Die ökobilanzielle Berücksichtigung der baulichen Anlagen bezüglich Lagerung erfolgt analog der Vorgehensweise bei Gebäuden und baulichen Anlagen zur Biomasseverarbeitung mittels überschlagsmäßiger Kalkulationen. Hierzu werden die Bau- bzw. Werkstoffvolumina anhand greifbarer Größen bezüglich Gebäudeabmessungen geschätzt, um daraus über die spezifischen Bau- und Werkstoffdichten den Masseneinsatz an Bau- und Werkstoffen abzuleiten. Die Ableitung der Volumina der einzelnen Bau- bzw. Werkstoffe für spezifische Gebäudetypen erfolgt analog der Darstellungen in Anhangabbildung 2 bis Anhangabbildung 5. Den ermittelten Massen an Bau- und Werkstoffen können dann die spezifischen Kennzahlen bezüglich Energieaufwand sowie Treibhausgasemissionen zugewiesen werden. Für die Erstellung der Gebäude bedarf es nochmals circa zehn Prozent (Spektrum zwischen 5 bis 20 Prozent) des Energiebedarfes der Baustoffbereitstellung. Als Energieträger werden weitestgehend Diesel sowie elektrischer Strom zum Betrieb der Baumaschinen eingesetzt (EYERER und REINHARDT 2000, S. 135 ff.). Damit können die aus einschlägiger Literatur bekannten Herstellungskosten von Gebäuden mit zusätzlichen Informationen bezüglich Energieeinsatz, Treibhausgasemissionen und Beschäftigung ergänzt und analog der Vorgehensweise der Abschreibung der Maschinen auf entsprechende Produktionsperioden bzw. Produkteinheiten verteilt werden (vgl. Abbildung 2-20 und Abbildung 2-21). Verbrauchsgüter wie Energieträ-

ger zur Förderung und Trocknung bzw. Folienabdeckungen und andere werden dem Lagergut eines Lagerungsintervalls zugerechnet. Anhangtabelle 3 zeigt die verschiedenen Transport- und Lagerungsgüter mit spezifischen Dichten sowie den Masseverlusten pro Jahr während der Lagerung.

### 2.3.2.2 Biomasseverarbeitung zu Endenergieträgern

Aufgrund der großen Vielfalt an energetischen Verwertungsmöglichkeiten von Biomasse werden zunächst die Verwertungswege ökobilanziell hinsichtlich allgemeiner Abläufe analog der Prozessbeschreibungen im Kapitel 2.1.1.2 skizziert. Danach folgt die Darstellung der Stoffströme und Effizienzen für einzelne Bioendenergieträger mittels Input-Output-Tabellen (vgl. Tabelle 2-7). Die spezifischen Rohstoffansprüche wurden schon in Tabelle 2-2 dargestellt. Je nach Produkt und Komplexität des Verarbeitungsverfahrens können kleintechnische bis großindustrielle Produktionsstätten die entsprechenden Endenergieträger aus der Biomasse hervorbringen.

Als wesentliche Einflussgrößen bei der Biomasseverarbeitung (Stufe 2 der Energieumwandlungspfade) zu konsumfähigen Endenergieträgern treten neben den bereitgestellten Biomasserohstoffen

- Endenergieträger (Kohle, Gas, Öle, elektrischer Strom, Fernwärme),
- Betriebs- und Hilfsstoffe,
- Maschinen und bauliche Anlagen,
- Gutschriften für Koppelprodukte sowie
- Transport- und Lagerungsprozesse

auf.

#### **Energieträger**

Zur Verarbeitung der Biomasse wird in unterschiedlichstem Maße Prozessenergie eingesetzt. Elektrischer Strom wird für Antriebe sowie Beleuchtung eingesetzt. Thermische Prozessenergie wird durch den Einsatz möglichst günstiger Brennstoffe meist fossiler Herkunft (z. B. Kohle, Rohöl bzw. dessen Produkte oder Erdgas) sowie z. T. durch Wärmerückgewinnung bereitgestellt. Die fossilen Energieträger unterscheiden sich erheblich hinsichtlich Bereitstellungskosten je Energieeinheit sowie den korrespondierenden Treibhausgasemissionen. Art und Umfang des Bedarfes und Verbrauchs an Energieträgern erscheint in den Input-Outputtabellen der Biomasseendenergieträger.

#### **Betriebs- und Hilfsstoffe**

Die Herstellung konsumfähiger Energieträger aus Biomasse erfordert neben den Biomasserohstoffen zusätzlichen Input von gewissen Einsatzstoffen, die entweder im Prozess direkt verbraucht werden oder als Katalysatoren zugeführt und nach dem Umwandlungsprozess wieder zurück gewonnen werden. Verbrauchte Hilfsstoffe werden direkt ökobilanziell be-

---

rücksichtigt. Die Aufwendungen zur Bereitstellung und Entsorgung der Katalysatoren werden auf die mittlere Anzahl an Nutzungszyklen umgelegt sowie mit den Aufwendungen der Wiederaufbereitung versehen.

### Maschinen und bauliche Anlagen

Aufgrund der noch zu geringen Datenlage detaillierter Stücklisten von Bau- und Werkstoffen zu den einzelnen Biomasse-Verarbeitungsstätten werden in dieser Arbeit die ökobilanziellen Aufwendungen für bauliche Anlagen sowie Maschinen lediglich geschätzt. Zu den monetären Aufwendungen existiert eine Datenbasis, aus der Positionen wie Abschreibung und jährliche Zinsansätze abgeleitet werden können. Als Instrument zur Ableitung der ökobilanziellen Kenngrößen wird die volumetrische Abschätzung gewählt. So werden für Gebäudebestandteile analog der Darstellung in Abbildung 2-24 einzelne Werkstoffvolumina geschätzt und über die Werkstoffdichte die Masse ermittelt, zu welcher ökobilanzielle Parameter in einschlägigen Tabellen zu finden sind.

**Abbildung 2-24: Ableitung des Bau- bzw. Werkstoffbedarfs zur Erstellung spezifischer Gebäudetypen anhand volumetrischer Abschätzung**

$$M_{WS} = V_{WS} \cdot \delta_{WS}$$

$M_{WS}$ :	Masse des Bau- bzw. Werkstoffes [kg]
$V_{WS}$ :	Volumen des Bau- bzw. Werkstoffes [dm <sup>3</sup> ], Abschätzung analog Anhangabbildung 1 bis Anhangabbildung 4
$\delta_{WS}$ :	Dichte des Bau- bzw. Werkstoffes [kg/dm <sup>3</sup> ]

Quelle: eigene Darstellung

Eine Visualisierung der angewandten Schätzmethode befindet sich im Anhang in Anhangabbildung 2 bis Anhangabbildung 5. Da Gebäudebestandteile wie Wände oder Decken selten aus nur einem Werkstoff bestehen, gilt es, diese spezifisch aus mehreren Bau- und Werkstoffen zusammensetzen. Dies geschieht in Anlehnung an EYERER und REINHARDT (2000, S. 155 ff.), wo typische Bauteile mit Schicht- bzw. Fachwerkaufbau definiert wurden. Im Schichtaufbau existieren Angaben zu Wänden aus Mauerwerk, Mörtel, Dämmung und Putz sowie Decken aus Beton, Estrich und Bodenbelag. Für den Fachwerkaufbau sind Deckenkonstruktionen mit Lattung sowie Dachstühle inkl. Dacheindeckung und Innenverkleidung erläutert (EYERER und REINHARDT 2000, S. 155 ff.).

Maschinen, wie z. B. Generatoren, BHKW's etc., werden analog der landwirtschaftlichen Mechanisierung direkt über das Gewicht ökobilanziell abgeschätzt. Liegen keine konkreten Gewichtsangaben vor, so wird das Gewicht über Leistungsparameter geschätzt.

Der Prozess der Gebäudeerstellung wird analog der Angaben nach EYERER und REINHARDT (2000, S. 135 ff.) berücksichtigt. Demnach werden fünf bis 20 Prozent, im Mittel etwa zehn Prozent des Energiebedarfs für die Bereitstellung der Bau- und Werkstoffe zusätzlich noch für

das Zusammenfügen der Bau- und Werkstoffe zum Gebäude benötigt. Hierfür fallen im Wesentlichen elektrischer Strom sowie Diesel ins Gewicht. So werden für Erdarbeiten etwa 0,25 Liter Diesel je Kubikmeter Boden benötigt. Das Betonieren erfordert ca. 0,33 kg Diesel sowie 0,8 kWh elektrischen Strom für das Einschalen und die Betonierarbeiten an sich (EYERER und REINHARDT 2000, S. 135 ff.). Im Modell „RegEnOpt“ werden dem kumulierten Energieaufwand zur Bereitstellung der Baustoffe zehn Prozent Prozessenergie zur Erstellung der baulichen Anlagen aufgeschlagen, wobei 20 Prozent der Prozessenergie aus elektrischem Strom und 80 Prozent aus Dieselkraftstoff bereitgestellt werden.

Die Summe der Aufwendungen monetärer sowie energetischer Art wird analog der monetären Abschreibungsmethode auf die produzierten Endenergieträgereinheiten umgelegt.

### **Koppelprodukte**

Neben den Endenergieträgern bringen die Umwandlungsprozesse häufig Koppelprodukte hervor, die stofflich oder energetisch weiter verwertbar sind. Durch die Erzeugung dieser Koppelprodukte werden alternative Produkte verdrängt, welche durch diese Verdrängung nicht erzeugt werden müssen. Mittels Substitutionsmethode (vgl. Tabelle 2-8) werden dem Hauptprodukt entsprechende Gutschriften gewährt. Bei stofflich verwertbaren Koppelprodukten erfolgt eine Äquivalent-Gutschrift zum naheliegendsten Produkt, wobei das Äquivalent allein auf den wichtigsten Qualitätsparameter bezogen wird. Bei energetischer Verwertung erfolgt eine Netto-Gutschrift, d. h. erzielbarer Umfang Endenergieträger abzüglich entsprechender Aufwendungen zur Konversion.

Handelbare Koppelprodukte werden mit dem entsprechenden Marktpreis berücksichtigt und wirken sich direkt auf den ökonomischen Erfolg der Produktionsstätte aus. Nicht handelbare, aber verwertbare Koppelprodukte werden ebenfalls nach Substitutionsmethode bewertet. Es folgt eine gesellschaftliche Gutschrift in entsprechender Höhe des verdrängten Produktes. Damit wirkt sich der Effekt zumindest in der gesellschaftlichen Betrachtung aus, wenn nicht zu klären ist, wer letztendlich Nutznießer durch Anfallen dieser Koppelprodukte ist.

Eine Sonderstellung nehmen die Nährstoffe im System der energetischen Nutzung von Biomasse ein. Außer bei thermochemischen Verfahren bleiben sie nahezu unverändert im System erhalten und befinden sich in einem mehr oder weniger geschlossenen Kreislauf. Damit werden die Nährstoffkreisläufe schon bei der für einen definierten Zweck erzeugten Biomasse berücksichtigt (vgl. Abbildung 2-19). Die erzeugten Biomasse-Endenergieträger erhalten somit keine Gutschriften für anfallende Düngemittel, da diese schon bei der Biomassebereitstellung nicht in Rechnung gestellt wurden.

### **Transport- und Lagerungsprozesse**

Angemessene Lagerungskapazitäten für die erzeugten Biomasse-Endenergieträger sind in die Produktionsstätten schon integriert. Je nach Gutbeschaffenheit und Verwertungsmöglichkeiten müssen die Biomasse-Endenergieträger noch zur Stelle der folgenden Verwertungsstufe

transportiert werden. Spezifische Entfernungen ergeben sich je nach Energieträger und Verwendungszweck. Die Vorgehensweise entspricht der Methodik zu Transportsystemen zur Biomassebereitstellung.

### 2.3.2.3 Sachbilanzen zu einzelnen Biomasseendenergieträgern

Im Folgenden werden die verschiedenen energetischen Biomasseverwertungsmöglichkeiten per Input-Output-Tabellen dargestellt. Innerhalb der verschiedenen Nutzungsmöglichkeiten werden verschiedene Szenarien hinsichtlich Verarbeitungskapazität, verwendeter Biomasse, eingesetzter Energieträger, Nutzungsgrade, Nutzung der Koppelprodukte sowie der korrespondierenden fossilen Referenzsituation gebildet und analysiert:

Folgende Verwertungspfade werden analysiert

- Festbrennstoff Holz zu Wärme oder zu Strom und Wärme,
- Festbrennstoff Halmgut zu Wärme oder zu Strom und Wärme,
- Festbrennstoff Getreidekorn zu Wärme oder zu Strom und Wärme,
- Ganzpflanzen zu Biogas als Biomethan,
- Ganzpflanzen über Biogas zu Strom und Wärme,
- Ölsaaten zu Pflanzenöl als Kraftstoff,
- Ölsaaten über Pflanzenöl zu Strom und Wärme,
- Ölsaaten über Pflanzenöl zu Biodiesel (RME),
- stärke- und zuckerhaltige Pflanzenbestandteile zu Bioethanol sowie
- Holz zu synthetischem Kraftstoff (BtL).

Eine exemplarische Auswahl von Verwertungspfaden zeigt Tabelle 2-21 in Form einer originalen Input-Output-Tabelle aus dem Modell „*RegEnOpt*“. Die Bezeichnung der Biomasse-Umwandlungspfade enthält Informationen zum Endenergieträger (BG = Biogas, EtOH = Ethanol, FBSt = Festbrennstoff, PME = Pflanzenölmethylester), welcher u. U. zu elektrischem Strom (eS) bzw. Wärme (W) weiterverarbeitet wird. Weiterhin ist die Verarbeitungskapazität mit entsprechender Bezugseinheit angegeben. Massenangaben beziehen sich auf den Zeitraum von einem Jahr. Es folgen ergänzende Angaben z. B. zum Energieträger, der zur Konversion der Biomasse verwendet wird bzw. Angaben zu wesentlichen Koppelprodukten. In der Klammer sind Kultur sowie Erntegut aufgeführt, gefolgt vom Endprodukt sowie Angaben zur Bezugsregion und dem Bezugsjahr. Als letztes wird aufgezeigt, welche Art der Landnutzung das Referenzsystem darstellt (SL = Stilllegung, BF = Basisfläche). Stilllegung stellt die Nicht-Nutzung landwirtschaftlich nutzbarer Fläche dar. Die so genannte Basisfläche stellt die klassisch zur Nahrungsmittel- bzw. Futtermittelherstellung genutzte Fläche dar.

Die wesentlichen Inputs zum Anbau der Energiebiomasse werden hinsichtlich spezifischer Einsatzmengen je Hektar dargestellt, die nach oben erläuterten Methoden ermittelt wurden. Die u. U. niedrig erscheinenden Abschreibungsbeträge der Mechanisierung je Hektar ergeben sich aus der Annahme der Abschreibung an der Abschreibungsschwelle, welche eine optimale Auslastung der Mechanisierung unterstellt.

---

Die Angaben hinsichtlich Betriebsmitteleinsatz und spezifischen Annahmen zu den einzelnen Biomasseverwertungsanlagen werden hier lediglich dokumentiert. Genaue Einsatzumfänge und Annahmen, die nicht aus dem Folgenden hervorgehen, können dem Modell „RegE-nOpt.xls“ entnommen werden. Tabelle 2-21 zeigt lediglich einen exemplarischen Überblick. Die Bandbreite der analysierten Verfahren erscheint im Anhang von Anhangtabelle 4 auf Seite 210 bis Anhangtabelle 10 auf Seite 216.

**Tabelle 2-21: Input-Output-Tabelle zu ausgewählten Biomasse-Nutzungs-Pfaden**

<b>Biomasse-Rohstoff</b>	Pappel-Holz	Silomais-GPS	Silomais-GPS	Winterraps-Korn	Winterweizen-Korn	
<b>Endenergeträger</b>	Wärme	el. Strom	Methan	Pflanzenölmethylester	Ethanol	
<b>Bezeichnung</b>	FBSt-100 kWth-(Pappel-Holz)-W-DE-2005-SL	BG-500 kWel-(Silomais-GPS)-eS+W-DE-2005-SL	BG-2MWel-eq-PSA-(Silomais-GPS)-Methan-DE-2005-SL	PME-200T t Erdgas-(Winterraps-Korn)-Pflanzenölmethylester-DE-2005-SL	EtOH-100T t Erdgas DDGS-(Winterweizen-Korn)-Ethanol-DE-2005-SL	
<b>Input</b>						
<b>Bereitstellung Biomasse</b>						
Saatgut	BE <sup>1)</sup> /ha	10.000	2	2	4	180
Dünger N	kg/ha	68	78	78	94	103
Dünger P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	kg/ha	22			24	23
Dünger K <sub>2</sub> O	kg/ha	34			14	17
Pflanzenschutz	kg WS/ha		1,8	1,8	1,7	2,1
Diesel	l/ha	21	101	101	103	103
Mechanisierung (AfA)	€/ha	33	160	160	133	130
Anbauumfang	ha	4	255	956	136.816	42.871
Transport	km	8	15	30	200	200
<b>Bestandteile Anlage</b>						
	Heizkessel, Einhausung, Lagerraum	Biogasanlage, Fernwärmeleitung, Fermenter, Technikraum, BHKW, Lagerraum	Biogasanlage inkl. Gasreinigung	Ölmühle, RME-"Raffinerie", Lagerraum	Ethanol-Anlage, Lagerraum	
<b>Betriebsmittel Anlage</b>						
	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil), Sauerstoff flüssig	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil), Dampf Erdgas 40-250 °C nth=85%, Hexan, Phosphorsäure 85%ig	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil), Dampf Erdgas 40-250 °C nth=85%	
<b>Output</b>						
<b>Endenergeträger</b>						
Anzahl Einheiten	Wärme	el. Strom	Methan	Pflanzenölmethylester	Ethanol	
Bezugseinheit	200.000 kWhth	3.750.000 kWhel	4.223.431 Nm <sup>3</sup>	224.719.101 l	125.944.584 l	
<b>Koppelprodukte</b>						
		Wärme		synthetisches Glycerin 100%ig, Soja-Äquivalent Rapsextraktions schrot	Soja-Äquivalent DDGS Weizen	

<sup>1)</sup> BE: Getreide, Raps: kg; Mais, Rüben: Einheit; Pappel: Stück Setzlinge

Quelle: eigene Darstellung

Die Bereitstellung der Biomasse vom Anbau über Ernte und Transport frei Verarbeitungsanlage erfolgt analog der Dokumentation nach Tabelle 2-21 bzw. Anhangtabelle 4 bis

Anhangtabelle 10. Hierbei wurden mittlere Schlaggrößen angenommen. Die Biomasse-Verwertungsanlagen unterliegen Skaleneffekten hinsichtlich spezifischer Investitionsvolumina bzw. Arbeitszeitbedarf in Abhängigkeit von der Verarbeitungskapazität. Eine umfassende Literaturrecherche erbrachte die Zusammenhänge, die in Tabelle 2-22 dargestellt sind.

**Tabelle 2-22: Spezifische Investitionsvolumina sowie ergänzende Informationen zu den einzelnen Arten der Biomasse-Verwertungsanlagen**

Anlage	spezifisches Investitionsvolumen	ergänzende Informationen
<b>Festbrennstoffe</b>		
Hackschnitzelheizung	$I [\text{€/kW}_{th}] = 1.909 \text{ kW}_{th}^{-0,47}$	$G [\text{kg/kW}_{th}] = 14,8 \text{ kg/kW}_{th}$
Biomasseheizwerk	$I [\text{€/kW}_{th}] = 6.956 \text{ kW}_{th}^{-0,26}$	
Biomasseheizkraftwerk	$I [\text{€/kW}_{th}] = 5.063 \text{ kW}_{th}^{-0,20}$	
<b>Biogas</b>		
Biogasanlage (Rohbiogas)	$I [\text{€/kW}_{el-eg}] = 6.122 \text{ kW}_{el-eg}^{-0,16}$	$A [\text{AKh}/(\text{kW}_{el} a)] = 39 \text{ kW}_{el}^{-0,41}$
Zündstrahl-BHKW	$I [\text{€/kW}_{el}] = 6.877 \text{ kW}_{el}^{-0,48}$	$\eta_{el} [\%] = 9,4 \text{ Ln}(\text{kW}_{el}) - 16,9$
Gas-Otto-BHKW	$I [\text{€/kW}_{el}] = 6.699 \text{ kW}_{el}^{-0,40}$	$\eta_{el} [\%] = 4,2 \text{ Ln}(\text{kW}_{el}) + 7,2$
Biogas-Aufbereitung		
DWW	$I [\text{€/}(\text{Nm}^3 \text{ Rg/h})] = 455.322(\text{Nm}^3 \text{ Rg/h})^{-0,83}$	$A [\text{AKh}/((\text{Nm}^3 \text{ Rg/h})a)] = 261 (\text{Nm}^3 \text{ Rg/h})^{-0,78}$
PSA	$I [\text{€/}(\text{Nm}^3 \text{ Rg/h})] = 208.462(\text{Nm}^3 \text{ Rg/h})^{-0,71}$	$A [\text{AKh}/((\text{Nm}^3 \text{ Rg/h})a)] = 59 (\text{Nm}^3 \text{ Rg/h})^{-0,53}$
BCM	$I [\text{€/}(\text{Nm}^3 \text{ Rg/h})] = 202.592(\text{Nm}^3 \text{ Rg/h})^{-0,65}$	$A [\text{AKh}/((\text{Nm}^3 \text{ Rg/h})a)] = 183 (\text{Nm}^3 \text{ Rg/h})^{-1}$
<b>Biokraftstoffe</b>		
Pflanzenöl	$I [\text{€/}(\text{kg PÖl/h})] = 2.811(\text{kg PÖl/h})^{-0,17}$	$P_{el} [\text{kW}_{el}] = 0,19 (\text{kg PÖl/h})$
Biodiesel	$I [\text{Mio. €/}(1.000 \text{ m}^3 \text{ RME/a})] = 0,23 (1.000 \text{ m}^3 \text{ RME/a})$	$A [\text{AKh}/(1.000 \text{ m}^3 \text{ RME/a})] = 3,4 (1.000 \text{ m}^3 \text{ RME/a})^{-0,38}$
Bioethanol	$I [\text{Mio. €/}(1.000 \text{ m}^3 \text{ EtOH/a})] = 3,5 (1.000 \text{ m}^3 \text{ EtOH/a})$	$A [\text{AKh}/(1.000 \text{ m}^3 \text{ EtOH/a})] = 12 (1.000 \text{ m}^3 \text{ EtOH/a})^{-0,56}$
BtL	keine Zusammenhänge (noch zu geringe und heterogene Datenlage)	
<b>Abkürzungen:</b> <i>A</i> : spezifischer Arbeitszeitbedarf, <i>el</i> : elektrisch, <i>el-eg</i> : elektrisch Äquivalent, <i>G</i> : spezifisches Gewicht, <i>I</i> : spezifisches Investitionsvolumen, <i>kW</i> : Kilowatt, <i>Nm<sup>3</sup></i> : Normkubikmeter, <i>P</i> : Leistung, <i>Rg</i> : Rohgas, <i>th</i> : thermisch		

Quelle: eigene Darstellung nach AGRA-EUROPE verschiedene Jahrgänge; ASUE 2005; ASUE 2007; BIOPETROL INDUSTRIES AG 2006, 2007, 2008; BRENNDÖRFER, GRAF 2005; CROPENERGIES 2007; EBERLE 2006; EOP BIODIESEL AG 2007; FNR 2005a; FNR 2005b; FNR 2007c; FNR 2007d; GANGL 2004; GRAF, REINHOLD 2005; HENNIGES 2007; HOFMANN et al. 2006; MT-ENERGIE 2007ab; SCHMITZ et al. 2003; SCHULZ 2004; VERBIO 2007

Einen genaueren Überblick über die in Tabelle 2-22 dargestellten Zusammenhänge geben Anhangabbildung 6 auf Seite 217 bis Anhangabbildung 14 auf Seite 225.

Eine statistische Absicherung der abgeleiteten Zusammenhänge erfolgte nicht. Hierzu war die Datengrundlage nicht ausreichend. Zu hohe zeitliche und räumliche Variabilität sowie hohe Variabilitäten in Abhängigkeit von den betriebsspezifischen Gegebenheiten aus persönlichen Erfahrungswerten bei zu geringem Datensatzumfang ermöglichen nur grobe Abschätzungen. Gerade der Sektor der erneuerbaren Energien zeichnet sich aus durch erhebliche Abschöpfungsmechanismen seitens der Anbieter von Anlagen zur Gewinnung erneuerbarer Energien

in Abhängigkeit der jeweiligen politischen Förderinstrumente. Damit können die abgeleiteten Zusammenhänge nur Anhaltspunkte liefern. Da keine bessere Datengrundlage zur Verfügung steht, fließt diese in die Analysen ein.

Die spezifischen Investitionsvolumina konnten in Abhängigkeit der Produktionskapazitäten geschätzt werden. Bezüglich der ökobilanziellen Parameter „kumulierter Energieaufwand“ sowie korrespondierende „Treibhausgasemissionen“ existieren kaum Daten. Die Abschätzung dieser ökobilanziellen Parameter für die einzelnen Produktionsstätten wird im Folgenden näher erläutert. Der kumulierte Energieaufwand sowie die korrespondierenden Treibhausgasemissionen wurden einerseits hergeleitet aus den Parametern zu den Massen der einzelnen verbauten Werkstoffe über die Ableitung einzelner Werkstoff-Volumina und zugehöriger spezifischer Dichte (BECKSCHULTE VERFAHRENSTECHNIK GMBH 2001). Dieses Verfahren wurde angewandt für Fermenter von Biogasanlagen, Lagerräume sowie Einhausungen. Die Methoden zu den verschiedenen Arten von Bauwerken werden in Anhangabbildung 2 bis Anhangabbildung 5 näher erläutert. Die einzelnen Bauelemente bestehen aus reinen Werkstoffen bzw. aus einem Verbund von Werkstoffen, wie z. B. isolierte Gärbehälter einer Biogasanlage. Bei Raffinerien bzw. ähnlichen industriellen Anlagen wurde ein anderer Ansatz gewählt. Die Biodiesel-, Ethanol- und BtL-Anlagen wurden nach Daten aus GEMIS 4.3 (ÖKO-INSTITUT 2005) zu Raffinerien und EYERER und REINHARDT (2000, S. 135 ff.) über spezifische Materialaufwendungen je  $MW_{\text{Kraftstoff}}$  geschätzt. Analog erfolgte die Schätzung bei Heiz- und Heizkraftwerken nach installierter thermischer oder elektrischer Leistung. Kleinere Heizkessel wurden mit einem spezifischen Gewicht von knapp 15 kg je  $kW_{\text{th}}$  und den Parametern von Stahl veranschlagt.

Die nicht aus Tabelle 2-22 hervorgehenden Zusammenhänge, die im Modell „RegEnOpt“ Verwendung finden, werden im Folgenden skizziert.

Zu Heizkesseln für die thermische Verwertung von Biomasse konnte lediglich für Holz bzw. Holzhackschnitzel eine umfangreiche Datengrundlage gefunden werden. Die Übertragung dieser Daten auf andere Brennstoffe wie Halmgut oder Getreidekorn erfolgt nach Literaturangaben (FNR 2007b, S. 153) durch die Veranschlagung der um 30 Prozent (Korridor von 20 bis 40 Prozent) höheren zu installierenden thermischen Leistung. Direkte Mehrkosten bei gleicher Kesselkapazität waren nach FNR (2007d) nicht ermittelbar.

Für das Faulraumvolumen der Biogasanlagen wurden pauschal  $6 \text{ m}^3$  Faulraum je  $kW_{\text{el}}$  veranschlagt. Die Fermenter bestehen dabei aus Stahlbeton inklusive Dämmmaterial sowie einem Foliendach. Die Blockheizkraftwerke im Bereich Biogas werden mit einem spezifischen Gewicht von  $15,29 \text{ kg}/kW_{\text{el}}$  (nach ASUE 2005, S. 37 f.) und den Parametern von Stahl bilanziert.

Für die Gasaufbereitung wurde als Produktgas der Standard für das H-Netz GUS gewählt. Dies ist die flächenmäßig am weitesten verbreitete Gassorte in Deutschland. Darüber hinaus bedarf es bei Gas dieses Brennwertes keiner Aufmischung durch LPG (ASUE 2007; HOFMANN et al. 2006; MT-Energie 2007ab; Schulz 2004). Datengrundlage für Betriebsmittel

sowie spezifische Einsatzmengen für die verschiedenen Aufbereitungsarten sind Literaturangaben sowie einzelne „Datenpunkte“ aus Fachvorträgen (ECOINVENT 2007, FISCHER SCIENTIFIC 2008, ROBERT KIND GMBH 2008, GÜNTHER 2006, HOFMANN, FREIER 2006, WECKS 2006, WETTERMANN 2006).

Der Bereich der Biokraftstoffe orientiert sich stark an schon bestehenden Ökobilanzen. Der wesentliche Unterschied zu den einzelnen Ökobilanzen besteht darin, dass in dieser Arbeit eine nach einheitlicher Methode kalkulierte Agrarrohstoffbasis einfließt. Angaben zum Prozess der Biokraftstofferzeugung bezüglich Investitionsvolumen, Betriebsmitteleinsatz sowie Energiebedarf orientieren sich an den vorliegenden Ökobilanzen und Informationen zu bestehenden Biodieselanlagen (AGRA-EUROPE versch. Jg.; BIOPETROL INDUSTRIES AG 2006 – 2008; DREIER, T.; TSCHETSCHLER, P. 2000; EBERLE 2006; EOP BIODIESEL AG 2007; HENNIGES 2007; REINHARDT 1993; SCHARMER 2001, S. 20 ff.; VERBIO 2007). Die ökobilanziellen Parameter der einzelnen Betriebsmittel und Energieträger basieren auf dem einheitlichen Datenpool im „RegEnOpt“. Bezüglich des spezifischen Investitionsvolumens in Abhängigkeit der Größenordnung der Biodieselanlage konnte ein Zusammenhang erkannt werden. Somit wurde für die Investition der Mittelwert der Daten von circa 255.000 € je 1.000 t/a Produktionskapazität herangezogen.

Analog zu den Biodieselanlagen werden die Bioethanolanlagen an bestehende Ökobilanzen angelehnt. Investitionsvolumen und spezifischer Arbeitszeitbedarf gehen aus den Schätzfunktionen in Tabelle 2-22 hervor. Für die Ökobilanz wurden plausible Verfahren aus einschlägiger Literatur herangezogen (CROPENERGIES 2007; GANGL 2004; HENNIGES 2007; IGELSPACHER 2003; SCHMITZ et al. 2003; VERBIO 2007).

Im Bereich der synthetischen Kraftstoffe existieren noch keine Erfahrungen für den Betrieb großtechnischer Anlagen trotz der großen Vielfalt von derzeit denkbaren Verfahren (vgl. Abschnitt zu synthetischen Biokraftstoffen im Kapitel 2.1.1.2 ab Seite 24). Entsprechend wenig umfangreich ist die Datenlage. Für die Analysen im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Anlagenkonzepte zur Erzeugung von BtL auf Basis der Fischer-Tropsch-Synthese näher betrachtet. Zum einen wird die zentrale Vergasung und Kraftstoffsynthese nach Choren mit zwei Effizienzscenarien betrachtet. Hierbei muss die Biomasse über weite Wege transportiert werden (CHOREN 2004; CHOREN 2007; LEIBLE et al. 2005; REINHARDT et al. 2006, S. 76 ff.). Zum zweiten erfolgt eine Analyse der dezentralen Pyrolyseölerzeugung nach FZK-Konzept mit anschließender zentralen Vergasung und Fischer-Tropsch-Synthese. Bei diesem Verfahren muss die wenig transportwürdige Biomasse nur über kurze Wege transportiert werden. Das Pyrolyseöl mit wesentlich höherer Energiedichte wird zur zentralen Kraftstoffsyntheseanlage transportiert (HENRICH und DINJUS 2004, S. 298 ff.; LEIBLE et al. 2005; REINHARDT et al. 2006, S. 76 ff.).

---

### 2.3.2.4 Fossile Energieträger als Input-Faktoren und Referenzsystem

Die parallel zu den energetischen Biomassenutzungspfaden zu betrachtenden fossilen Referenzpfade sind an Literaturdaten angelehnt bzw. die Daten direkt entnommen. Letzteres gilt für die fossilen Mineralölprodukte der Kraftstoffe und Heizöl sowie für Erdgas. Die im Modell „RegEnOpt“ verwendeten Daten sind dem folgenden Kapitel zu entnehmen.

Die direkten Treibhausgasemissionen verschiedenster Energieträger fossiler sowie erneuerbarer Art zeigt Tabelle 2-23. Dabei wurden die Vorketten der Bereitstellung noch nicht berücksichtigt. Die von den erneuerbaren Energieträgern verursachten Treibhausgasemissionen entsprechen weitgehend dem Kohlenstoff, der während des Pflanzenwachstums gebunden wurde.

**Tabelle 2-23: Heizwerte und Treibhausgasemissionen direkt aus der Verbrennung von verschiedenen Brennstoffen**

Brennstoff	Bezugs- einheit (BE)	Heizwert [MJ/BE]	Treibhausgasemissionen [kg CO <sub>2</sub> eq/BE]			
			CO <sub>2</sub> (1)	CH <sub>4</sub> (23)	N <sub>2</sub> O (296)	CO <sub>2</sub> eq
(Treibhausgaspotenzial)						
Rohöl	kg	42,7	3,130	0,003	0,008	3,140
Benzin	l	32,4	2,248	0,002	0,006	2,256
Diesel	l	35,7	2,649	0,002	0,006	2,657
Flüssiggas, Propangas	kg	46,6	2,940	0,001	0,001	2,943
Steinkohle	kg SKE	29,3	2,881	0,001	0,013	2,895
Braunkohle	kg SKE	29,3	2,960	0,001	0,013	2,974
Erdgas	MWh	3.600	202,0	0,083	0,107	202,1
Torf	kg <sub>atro</sub>	21,0	2,226	0,000	0,009	2,236
Holz	kg <sub>atro</sub>	18,0	2,016	0,012	0,021	2,050
Biomasse-Festbrennstoffe	kg <sub>atro</sub>	17,0	1,700	0,012	0,020	1,732
Holzkohle	kg	31,0	3,472	0,021	0,037	3,530
Biodiesel	l	33,4	2,363	0,002	0,006	2,371
Ethanol	l	21,3	1,507	0,001	0,004	1,512
Biogas	MWh	3.600	196,6	0,083	0,032	196,7

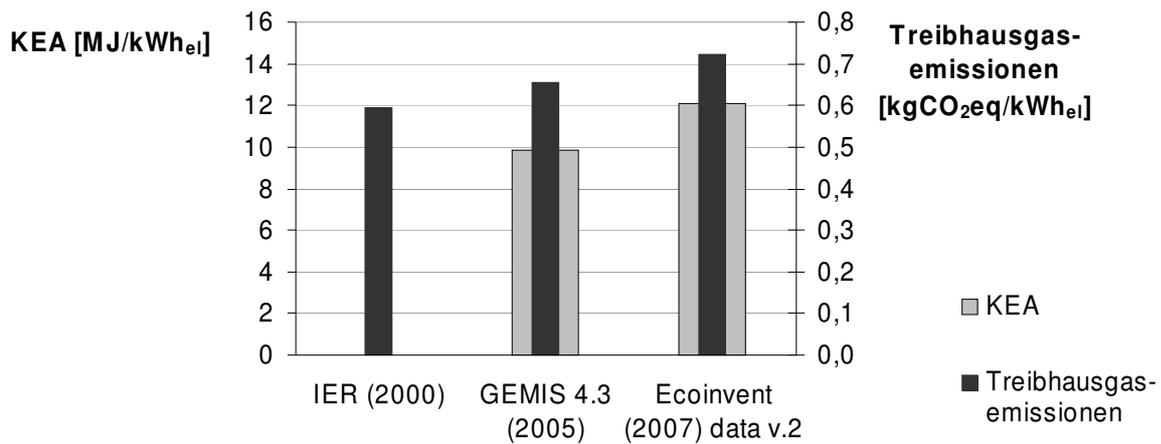
Quelle: eigene Darstellung nach IPCC 2001b, IPCC 2006b S. 2.16 ff., FNR 2005c, QUIRIN et al. 2004, S. 7

Neben den direkten Effekten bei der Nutzung von Energieträgern treten Effekte aus den Vorketten der Bereitstellung auf, welche sich je nach Energieträger sehr unterschiedlich verhalten. Ökobilanzielle Parameter zu den Kraftstoffen liegen in den Ökobilanzdatenbanken wie GEMIS (ÖKO-INSTITUT 2005) oder bei ECOINVENT (2007) vor. Die tatsächlichen Herstellungskosten zu fossilen Kraftstoffen werden nicht veröffentlicht. Sie lassen sich jedoch aus einschlägigen Statistiken zumindest abschätzen. Konsumentenpreise abzüglich der entsprechenden Umsatzsteuer von derzeit 19 Prozent, abzüglich Mineralölsteuer (0,47 €/l Diesel und 0,65 €/l Benzin) sowie abzüglich einer Gewinnmarge von 0,04 bis 0,13 €/l Liter fossiler Kraftstoff ergeben die Größenordnung der Herstellungskosten (MWV 2008).

Der Bereich des elektrischen Stroms unterliegt keiner eindeutigen Datenlage. Dies liegt nicht nur an der im Bezug auf die regionale sowie die zeitliche Zusammensetzung sehr heterogene

Stromerzeugung in Deutschland. Nach den offiziellen Ökobilanzierungsvorschriften nach DIN (1998, S. 16) gilt es, gegen den tatsächlichen Elektrizitätserzeugungsmix zu bilanzieren. Die Abbildung 2-25 zeigt die Entwicklung der ökobilanziellen Parameter des kumulierten Energieaufwandes (KEA) sowie die Treibhausgasemissionen zum fossilen Strommix in Deutschland im Zeitablauf auf Basis dreier verschiedener Datenquellen.

**Abbildung 2-25: Kumulierter Energieaufwand (KEA) sowie Treibhausgasemissionen der Bereitstellung des fossilen elektrischen Strommixes in Deutschland 2005**



Quelle: eigene Darstellung nach BMWi 2008; ÖKO-INSTITUT 2005; MARHEINEKE et al. 2000; ECOINVENT 2007

Es wurde der jeweilige fossile Strommix inklusive Kernkraft nach BMWi (2008) herangezogen und mit den entsprechenden Ökobilanzparametern zu einzelnen fossilen Brennstoffarten aus den drei Datenquellen verrechnet. Die gewichteten Mittelwerte je Kilowattstunde elektrischen Stromes werden in Abbildung 2-25 aufgezeigt. Die ökobilanziellen Daten der drei Datenquellen umfassen neben den direkten Energieaufwendungen und Emissionen aus der Verbrennung auch Ansätze zu indirekten Energieaufwendungen und Emissionen für den Bau und Betrieb der Kraftwerke. Die Studie von VIEBAHN et al. (2007) berücksichtigt die Vorketten zum Kraftwerksbau nicht, darüber hinaus findet eine Untergliederung der Fossilen in fossile Brennstoffe und Kernenergie statt. Beim Vergleich des Strommixes auf Basis der fossilen Brennstoffe Kohle, Öl und Gas mit den oben genannten Datenquellen weisen VIEBAHN et al. (2007) etwas niedrigere Werte aus als Ecoinvent (2007). Durch die fehlende Berücksichtigung der Vorketten bei VIEBAHN et al. (2007) erscheint dies plausibel. Im Modell „RegEnOpt“ werden die Daten nach Ecoinvent (2007) für den deutschen fossilen Strommix herangezogen.

Entsprechend zu den ökobilanziellen Parametern gestalten sich die tatsächlichen Herstellungskosten des elektrischen Stroms wenig transparent. Aus Studien von SCHNEIDER (1998) und GEIGER et al. (2004) lassen sich Herstellungskosten für elektrischen Strommix aus fossilen Quellen inklusive Kernkraft in Höhe von 0,043 bis 0,054 €/kWh<sub>el</sub> ableiten. Dieses Spektrum bestätigt sich auch in den Untersuchungen nach FRITSCHKE et al. (2007b). Ein zweiter

Weg, die Herstellungskosten für den elektrischen Strom zu ermitteln, führt über den in EUROSTAT (2008) ausgewiesenen Preis ohne Steuern. Diesen gilt es, um die Beträge für Netzentgelte, Abgaben für Messungen sowie die Konzessionsabgabe zu bereinigen (VDN 2006). Nach Abzug dieser Kostenpositionen verbleiben die abgeleiteten Herstellungskosten in der Größenordnung von 0,04 €/kWh<sub>el</sub>. Die Herstellungskostenermittlung nach SCHNEIDER (1998) und GEIGER et al. (2004) erfolgte hierbei ohne Berücksichtigung schon abgeschriebener Kraftwerke. Damit dürften die knapp 4 Eurocent den von den Kraftwerksbetreibern zu verzeichnenden Herstellungskosten für elektrischen Strom aus fossilen Energieträgern für das Bezugsjahr 2005 entsprechen.

Die Herstellungskosten liegen tatsächlich jedoch höher. Dies liegt zum einen an der Kohlesubventionierung durch den deutschen Steuerzahler nach BGBL. (1997) durch das Gesetz zur Neuordnung der Steinkohlesubventionen. Zum anderen wurden nach NITZSCHKE (2003) erhebliche Geldbeträge aus Steuermitteln zur Förderung von Braunkohle sowie zur Förderung von Kernenergie aufgewendet. Bei entsprechender zeitlicher Verteilung sowie Umlage auf die erzeugten Kilowattstunden elektrischen Strom aus fossilen Energiequellen entspricht dies knapp 1 Eurocent je Kilowattstunde.

Die externen Kosten der Nutzung fossiler Energieträger, wie schon im Kapitel 2.1.2 erwähnt, finden in dieser Arbeit keine Berücksichtigung. Es wird hier lediglich darauf hingewiesen, dass sie existieren. Eine realitätsnahe Ermittlung bzw. Ableitung spezifischer Geldbeträge würde jedoch nicht nur den Rahmen der Arbeit, sondern auch das Zeitbudget sprengen.

### **2.3.2.5 Ökobilanzielle Kennzahlen zu Betriebsmitteln, Werkstoffen und Substituten von Koppelprodukten**

Die Ableitung der spezifischen Einsatzmengen von Betriebsmitteln und Werkstoffen bei den einzelnen Biomasseverwertungspfaden wurde schon erläutert. Im Zusammenhang der Ökobilanzierung werden im Folgenden die für diese Arbeit relevanten ökobilanziellen Kennzahlen dieser Einsatzstoffe aufgezeigt. Tabellen, die die wesentlichen Betriebsmittel und Werkstoffe enthalten, befinden sich im Anhang auf den Seiten 226 und 227.

Die Kennzahlen für Saatgut wurden, wie in Kapitel 2.3.2.1 erläutert, selbst abgeleitet. Für die Düngemittel wurde auf den Datenpool nach PATYK, REINHARDT (1997, S. 167) zurückgegriffen, da hier ein Querschnitt über die jeweiligen Düngemittelarten je Reinnährstoff aufgeführt ist. In einschlägigen Ökobilanz-Datenbanken wie ECOINVENT (2004 und 2007) werden die jeweiligen Düngemittel dargestellt. Die Streubreite einzelner Düngemittelarten sind in Anhangabbildung 15 auf Seite 228 dargestellt. Da die spezifischen Verbrauchsmengen je Düngemittelart unbekannt sind, kann kein realitätsnaher gewichteter Mittelwert abgeleitet werden. Diese Datenbankdaten eignen sich jedoch für eine konkrete einzelbetriebliche Ökobilanzierung, wo entsprechende Detailtreue gewünscht und aufgrund der Datenlage realisierbar ist. Der Bereich der Pflanzenschutzmittel gestaltet sich schwierig. Die Datenlage ist gering und, soweit vorhanden, häufig veraltet. GREEN (1987) veröffentlichte kumulierte Energieauf-

wendungen für einzelne Wirkstoffe. Der Mittelwert für die Herstellung beträgt 211 MJ/kg WS (58 – 460 MJ/kg WS) zuzüglich 20 bis 50 MJ/kg WS für die Formulierung. In der ECOINVENT (2007) Datenbank sind ebenfalls ökobilanzielle Daten zu einzelnen Wirkstoffen vorhanden. Das Bezugsjahr für diese Daten liegt im Jahr 1987. Eine Korrelationsanalyse der ECOINVENT (2007) Daten zwischen dem kumulierten Energieaufwand und den korrespondierenden Treibhausgasemissionen erbrachte folgende Erkenntnisse. Es existiert demnach eine enge Korrelation zwischen dem kumulierten Energieaufwand und den Treibhausgasemissionen. Im Mittel errechnen sich 230 MJ/kg WS und 8,0 kg CO<sub>2</sub>eq/kg WS, wobei eine große Streuung zwischen einzelnen Wirkstoffen (80 bis 510 MJ/kg WS bzw. 2 bis 22 kg CO<sub>2</sub>eq/kg WS) erscheint. Es lässt sich aus diesen kein erkennbarer Unterschied zwischen einzelnen Wirkstoffklassen ableiten (vgl. Anhangabbildung 15 auf Seite 228). KALTSCHMITT und REINHARDT (1997, S. 219 f.) aggregierten Pflanzenschutzmittel zu den Wirkstoffklassen Herbizide, Fungizide sowie Insektizide. Ebenso weisen DREIER und TZSCHEUTSCHLER (2000) kumulierte Energieaufwendungen für die Wirkstoffklassen aus. Im Modell „*RegEnOpt*“ finden die Daten nach KALTSCHMITT und REINHARDT (1997, S. 219 f.) Verwendung.

Das wesentliche Betriebsmittel der landwirtschaftlichen Mechanisierung ist Dieselkraftstoff, der nach ECOINVENT (2007) unter Berücksichtigung von Bereitstellung und Nutzung veranschlagt wird. Die direkten Emissionswerte aus der Nutzung von Kraftstoffen unterscheiden sich nicht wesentlich von Angaben anderer Datenquellen (IPCC 2006; QUIRIN et al. 2004, S. 7). Die Herstellung von Maschinen an sich wurde nach GAILLARD et al. (1997) und den Gewichtsangaben nach KTBL (2004) bewertet. GAILLARD et al. (1997) unterscheiden Fahrzeuge (Stahl und Gummi) sowie Maschinen (ausschließlich Stahl). Die ökobilanziellen Kennzahlen je Kilogramm Maschine leiten sich aus den Kennzahlen zu den verwendeten Werkstoffen sowie den Kennzahlen zum Herstellungsprozess der Maschinen aus den Werkstoffen ab.

Gebäude und bauliche Anlagen wurden an Literaturdaten angelehnt. Ökobilanzielle Daten zu einzelnen Werkstoffen wurden v. a. dem Internet-Datenpool von FFE (2005) entnommen. Die spezifischen Werkstoffumfänge, die zum Bau verschiedenster Bauwerk- bzw. Anlagentypen (Raffinerie, Kraftwerk, Gasleitung, Wärmeleitung etc.) je Bezugseinheit unterstellt werden, sind dem GEMIS 4.3 (ÖKO-INSTITUT 2004) entnommen. Diesel- und Strombedarf zum Bau der Anlagen wurden nach EYERER und REINHARDT (2000) veranschlagt.

Die Notwendigkeit der Genauigkeit einzelner Eingangsdaten für den Anbau von Biomasse erläutern NEMECEK et al. (2005 S. 8). So besitzen Ertrag und Düngung großen Einfluss auf die meisten Umweltkategorien, während Unsicherheiten bei der Mechanisierung kaum Einfluss nehmen. Entsprechend wurde auf die aufwändige detailgetreue Analyse der Mechanisierung sowie Anlagenbau verzichtet und lediglich näherungsweise Schätzungen vorgenommen. Die Koppelprodukte, die bei der energetischen Verwertung von Biomasse anfallen, wurden ausschließlich mittels Literaturdaten bewertet und mittels Substitutionsmethode als Gutschrift veranschlagt. Gerade die Erzeugung von Biokraftstoffen der ersten Generation (Biodiesel und Bioethanol) führt zu erheblichen Mengen an Eiweißfuttermittel. Diese Eiweißfuttermittel

verdrängen importierten Sojaextraktionsschrot aus Übersee. Die Literaturangaben zum kumulierten Energieaufwand sowie zu den Treibhausgasemissionen je Kilogramm Sojaextraktionsschrot weisen eine große Bandbreite auf. Die Ursachen konnten im Detail nicht nachvollzogen werden. Die Angaben nach SCHARMER (2001) sind deutlich geringer als die Daten nach ECOINVENT (2004), zitiert in SCHOLWIN et al. (2006, S. 31), und entsprechen nur einem Bruchteil der Daten nach ECOINVENT (2007). Eine Analyse der Kalkulationen inklusive Dokumentation von RENNER und KLÖPFFER (2005, S. 107 ff.) bestätigte die Angaben der ECOINVENT (2007) Daten, welche im Modell Verwendung finden. Die ökobilanzielle Gutschrift erfolgte per Substitutionsmethode gemessen am Rohproteingehalt (ZMP versch. Jahrg.; ECOINVENT 2007).

### **2.3.3 Berechnete Zielgrößen - Wirkungsabschätzung**

Die ökobilanzielle Wirkungsabschätzung dieser Arbeit beschränkt sich auf die beiden Wirkungskategorien Ressourcenverbrauch fossiler Energieträger sowie Treibhausgasemissionen. Neben den beiden ökobilanziellen Wirkungskategorien wurde die Analyse um eine ökonomische Kategorie, den Bereitstellungsvollkosten der Energieträger, sowie um die sozioökonomischen Kategorien Beschäftigungseffekte und Einkommenseffekte (vgl. Zielgrößen in Tabelle 2-14 auf Seite 81) erweitert. Zum einen sind die einzelnen Zielgrößen für jedes Verfahren der energetischen Verwertung von Biomasse zu berechnen. Zum zweiten gilt es, die Nettoeffekte der einzelnen Biomasse-Verfahren gegenüber dem fossilen Pendant zu ermitteln. Dabei werden lediglich die entsprechenden Hauptenergieträger miteinander verglichen. Koppelprodukte energetischer oder stofflicher Art werden per Substitutionsmethode als Gutschrift berücksichtigt.

#### **2.3.3.1 Die Wirkungsabschätzung**

Einen Überblick über die genannten Wirkungskategorien und dem Schema zur Berechnung zeigt Abbildung 2-26.

Dies entspricht der Vorgehensweise der Sachbilanz. Es werden im Rahmen der Wirkungsanalyse lediglich die einzelnen Positionen der jeweiligen Wirkungskategorien aggregiert auf den einzelnen Ebenen der Verwertungspfade dargestellt, um letztendlich die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Ökobilanz lokalisieren zu können. So kann festgestellt werden, ob nun die Bereitstellung des Biomasserohstoffes, die Logistik oder die Verarbeitung zum Energieträger den größten Einfluss auf ökobilanzielle Kennzahlen hat. Darüber hinaus gilt es, die Effekte der bewerteten und berücksichtigten Koppelprodukte auszuweisen, um deren Einfluss auf die Gesamtökobilanz des jeweiligen Bioenergieträgers festzustellen.

Die Referenzpfade der Energiebereitstellung aus fossilen Energieträgern wurden nicht nach der Systematik nach Abbildung 2-26 über die gesamte Wertschöpfungskette selbst abgeleitet. Es wurden schon aggregierte Literaturdaten herangezogen.

Abbildung 2-26: Schema zur Wirkungsabschätzung der Endenergieträger

Wirkungsabschätzung für _____ in kWh								
Wirkungsindikator	Einheit	Vorkette(n)	Biomasse- erzeugung	Transport/ Lagerung	Ver- arbeitung	Gut- schriften	...	Summe
funktionelle Einheit		kWh	kWh	kWh	kWh	kWh		kWh
Ressourcenverbrauch	MJ							
Treibhauseffekt	kg CO <sub>2</sub> -Äqu.							
Herstellungskosten	€							
Einkommensbeitrag	€							
Beschäftigung	AKh							

Quelle: eigene Darstellung

Für die Zielgröße des Einkommensbeitrages im Sektor Landwirtschaft sind neben den Bereitstellungskosten der Biomasserohstoffe auch die entsprechenden Produktpreise relevant. Für handelsübliche Agrarrohstoffe werden Preise gelistet und können herangezogen werden. Bisher nicht gehandelte Agrarrohstoffe wie z. B. Silagen besitzen keinen offiziell gelisteten Preis. Hiefür wurde der Weg einer Preisschätzung in Anlehnung an den Weizenpreis gewählt. Anhangabbildung 16 auf Seite 229 zeigt die Preisfindung für Silomais und für Hackschnitzel von Kurzumtriebsplantagen in Abhängigkeit vom Weizenpreis. Mit der Unterstellen, die Erntegüter der Kulturen sollen den gleichen Deckungsbeitrag je Hektar erzielen können unter Berücksichtigung spezifischer Unterschiede bei der Bewirtschaftung Äquivalenzpreise zum Weizenpreis geschätzt werden. Für Hackschnitzel aus Kurzumtriebsplantagen können nicht die Preise für Waldhackschnitzel herangezogen werden, da in der Landwirtschaft im Vergleich zur Forstwirtschaft Opportunitätskosten ganz anderer Art und Höhe auftreten. Neben den Erlösen, die sich aus Ertrag und Stückpreis ergeben, erzielen Landwirte ihr Einkommen aus gekoppelten sowie entkoppelten Ausgleichszahlungen der EU. Nationale und regionale Programme werden im Rahmen dieser Arbeit außer Acht gelassen.

### 2.3.3.2 Das Referenzsystem zur Ableitung der Netto-Effekte

Durch den Vergleich der energetischen Verwertungspfade der Biomasse mit den entsprechenden fossilen Energiebereitstellungspfaden ergeben sich die Netto-Effekte der jeweiligen Biomasse-Verwertung. Zur Ableitung der in Tabelle 2-14 auf Seite 81 formulierten Zielgrößen bedarf es neben den analysierten Biomasseverwertungspfaden einer entsprechenden Datengrundlage zu den fossilen Pendanten bzw. dem gesamten Referenzsystem, das anstelle der energetischen Nutzung der Biomasse vorherrschen würde, um die gewünschten Netto-Effekte ableiten zu können. Die ökobilanziellen Kennzahlen zu den fossilen Referenzen wurden schon im Kapitel 2.3.2.4 erläutert.

Eine zentrale Kennzahl im Rahmen der Ökobilanzierung stellen die CO<sub>2</sub>eq-Vermeidungskosten dar. Diese Kennzahl drückt aus, welche gesellschaftlichen Mehrkosten auftreten im Bezug auf die reduzierten Treibhausgasemissionen, wenn anstelle der Nutzung fossiler Energieträger z. B. erneuerbare Energien herangezogen werden. Die Methode zur Ableitung der Bereitstellungskostendifferenz auf Basis einer Vollkostenanalyse stellt Abbildung 2-17 auf Seite 84 dar.

Die Referenz für eine alternative landwirtschaftliche Landnutzung stellt in dieser Arbeit die Nicht-Nutzung dar. Die über die zur Nahrungsmittelproduktion genutzte Fläche hinausgehende Fläche kann entweder brach fallen oder zur Bereitstellung von Biomasse herangezogen werden. Diese Vereinfachung der landwirtschaftlichen Referenz ist notwendig, da sonst die aktuelle landwirtschaftliche Situation mit der großen Vielfalt an Wertschöpfungsketten der Nahrungsmittelproduktion mit modelliert werden müssten. Ein pauschaler Ansatz für die Landnutzung zur Nahrungsmittelproduktion würde der tatsächlichen Heterogenität nicht gerecht und würde somit zu keiner höheren Aussagekraft der Ergebnisse führen. Darüber hinaus ist die Versorgung der Bevölkerung mit Nahrungsmitteln nach wie vor gesetzlich verankertes Ziel (BGBI. 1955; ABl. EG 1957). In zahlreichen Studien wurden Flächenpotenziale für die Energiebiomasseproduktion ermittelt, auf deren Grundlage die jeweils optimale Nutzungsstrategie entwickelt werden soll. Ausgangspunkte dieser Studien (FRITSCHÉ et al. 2004, THRÄN et al. 2005, ZEDDIES 2006, SIMON 2006) waren jeweils primär Szenarien der Nahrungsmittelversorgung, auf die aufbauend die nicht zur Nahrungsmittelversorgung benötigte Fläche mit Energiebiomasse belegt werden kann. Alternativ wäre die Fläche stillzulegen bzw. fiele aus der Produktion heraus. Natürlich sind bei diesen Kalkulationen sämtliche Marktmechanismen außer Acht gelassen worden, denn die über den heimischen Verbrauch hinausgehende Nahrungsmittelerzeugung könnte bei entsprechenden Rahmenbedingungen auf internationalen Märkten abgesetzt werden. Um jedoch unter Berücksichtigung der tatsächlichen Marktbedingungen die Nahrungsmittelflächen und daraus die zur Verfügung stehenden Energiebiomasseflächen ableiten zu können, bedürfte es nahezu eines „Welt-Modells“, das bisher nicht vorliegt. Daraus resultiert für diese Studie, auf vorhandene ermittelte Flächenpotenziale zurückzugreifen und die Nicht-Nutzung als alternative Flächennutzung anzunehmen. Einen zweiten Diskussionspunkt liefert die zum Energiebiomasseanbau alternative Bodennutzung bezüglich der Notwendigkeit, die Lachgasemissionen zu berücksichtigen oder nicht. Ausgehend von der Annahme, dass sich heimische Verzehrsgewohnheiten auch bei massivem Ausbau der energetischen Nutzung von Biomasse nicht ändern werden, müssen die aus heimischer Nahrungsmittelproduktion verdrängten Agrarrohstoffe andernorts erzeugt werden. Im einfachsten Fall stellt also eine nicht genutzte landwirtschaftliche Nutzfläche (Stilllegung) die Referenz dar. Erfolgt durch die Ausdehnung des Biomasseanbaues eine Verdrängung der heimischen Nahrungsmittelerzeugung, so müsste nachvollzogen werden, woher die zu importierenden Nahrungsmittel stammen könnten. Auch dort wird durch externe Nachfrage eine Flächenumnutzung induziert werden. Bei massivem Ausbau der energetischen Biomassenut-

zung müssen somit global entsprechende Flächen in Kultur genommen werden. In der Vergangenheit bis heute erfolgte und erfolgt die landwirtschaftliche Flächenausdehnung u. a. durch Rodung von Wald. Die daraus resultierenden Auswirkungen auf den Treibhauseffekt sind schwer fassbar. Fassbar jedoch ist die Referenz einer ursprünglich nicht landwirtschaftlich genutzten Fläche. Lediglich dann, wenn, induziert durch den massiven Ausbau der energetischen Biomassenutzung aufgrund züchterische Fortschritte, sich die Leistungsfähigkeit der Nutzpflanzen steigert, dass Flächen zur Erzeugung gegebener Massen frei werden, stünde eine intensiv genutzte Fläche als Referenz zur Verfügung. In diesem Falle läge die zusätzlich emittierte Lachgasmenge nur im marginalen Bereich der zusätzlich gedüngten Stickstoffmenge. Die plausible Referenzsituation stellt demnach eine stillgelegte Fläche dar, wodurch dem Produktionsverfahren Energiebiomasseproduktion die stickstoffdüngungsabhängigen Lachgasemissionen im Rahmen der Sachbilanz und der Wirkungskategorie Erderwärmungspotenzial anzulasten sind. Die Grundemission einer nicht gedüngten Stilllegungsfläche kann unberücksichtigt bleiben.

Zum Dritten ist die alternative Flächennutzung zum Energiebiomasseanbau relevant für die Beschäftigungseffekte. Würde die Energieproduktion Verfahren der Nahrungsmittelproduktion verdrängen, so ist anzunehmen, dass eher negative Netto-Beschäftigungseffekte beim Vergleich der gesamten Wertschöpfungsketten zu verzeichnen sind. Stillgelegte bzw. aus der landwirtschaftlichen Produktion herausgenommene Flächen erzeugen keine nennenswerte Beschäftigung. Jegliche Nutzung durch Kultivierung und Anbau von Agrarrohstoffen stellt damit inklusive der Verarbeitung einen Zuwachs an Beschäftigung dar. Bei der Verdrängung von Energieträgern fossiler Art durch Biomasseenergieträger werden jedoch Arbeitsplätze im fossilen Energiesektor verdrängt. Dieser Effekt wird berücksichtigt, indem zumindest überschlagsmäßige Beschäftigungsintensitäten einzelner fossiler Energieträger aus einschlägiger Statistik (BMWi 2008) abgeleitet und bei der Ableitung von Netto-Beschäftigung saldiert wird. So waren nach BMWi (2008) knapp 300.000 Beschäftigte im Energiesektor tätig. Durch die Substitution fossiler Energieträger durch Erneuerbare werden sich die Arbeitsplätze entsprechend verlagern. Durch die eher kleintechnische Gewinnung erneuerbarer Energien auf Basis von Biomasse sind damit Zuwächse von Arbeitsplätzen zu erwarten.

Analog gilt es, die Einkommenseffekte für den Sektor Landwirtschaft sowie für die gesamte Region gegenüber dem Referenzszenario zu saldieren.

Auch wenn aus Vereinfachungsgründen die Nicht-Nutzung von landwirtschaftlichen Nutzflächen als Referenz herangezogen wird und damit nicht die in der Realität tatsächlich zu erwartenden Effekte dargestellt werden können, so können zumindest die einzelnen Verfahren der energetischen Biomassenutzung miteinander verglichen und hinsichtlich ihrer Effekte auf die einzelnen Zielgrößen analysiert werden. Dies entspricht auch der Zielsetzung, einen optimalen Mix von Verfahren herauszuarbeiten, der für das formulierte Ziel den größten Nutzen bringt.

---

Problematisch stellt sich ein Vergleich verschiedenster Energieformen, nämlich der Vergleich zwischen elektrischem Strom, Wärme und Fortbewegungsenergie aus Kraftstoffen dar. Diese drei Energieformen besitzen unterschiedliche Wertigkeiten hinsichtlich ihrer Überführbarkeit in eine andere Energieform. Der Bereich der Fortbewegungsenergie wurde aufgrund der Komplexität der Nutzungsgrade verschiedenster Transportsysteme auf der Ebene der Kraftstoffe abgeschnitten, wenngleich hierdurch die formulierte Mehrstufigkeit der Energieumwandlungskette nach Abbildung 1-2 auf Seite 4 nicht konsequent umgesetzt wird. Um dennoch alle Formen der Energie, die aus Biomasse bereitzustellen sind, am Vergleich teilhaben zu lassen, wurden Bezugseinheiten und Zielgrößen gewählt, bei welchen die Wertigkeit der Energieträger unerheblich ist. Durch die der Arbeit zugrunde liegenden Grundhypothese des knappsten Produktionsfaktors Boden werden die zu erzielenden Effekte zunächst auf ein Hektar landwirtschaftliche Nutzfläche bezogen. Des Weiteren werden nicht Netto-Energieerträge mit nicht vergleichbaren Bezugseinheiten miteinander verglichen, sondern aufgezeigt, wie viel Primärenergieträger bzw. Treibhausgasemissionen durch die Alternative aus Biomasse je Hektar eingespart werden können.

Aus den Nettoeffekten lassen sich dann weitere Kennzahlen, wie z. B. die CO<sub>2</sub>eq-Vermeidungskosten ableiten. Diese Kennzahlen sind unabhängig von jeglichen spezifischen Bezugseinheiten der Biomassenutzungspfade und ermöglichen damit uneingeschränkt einen Vergleich der sich unterscheidenden Biomasse-Nutzungs-Alternativen.

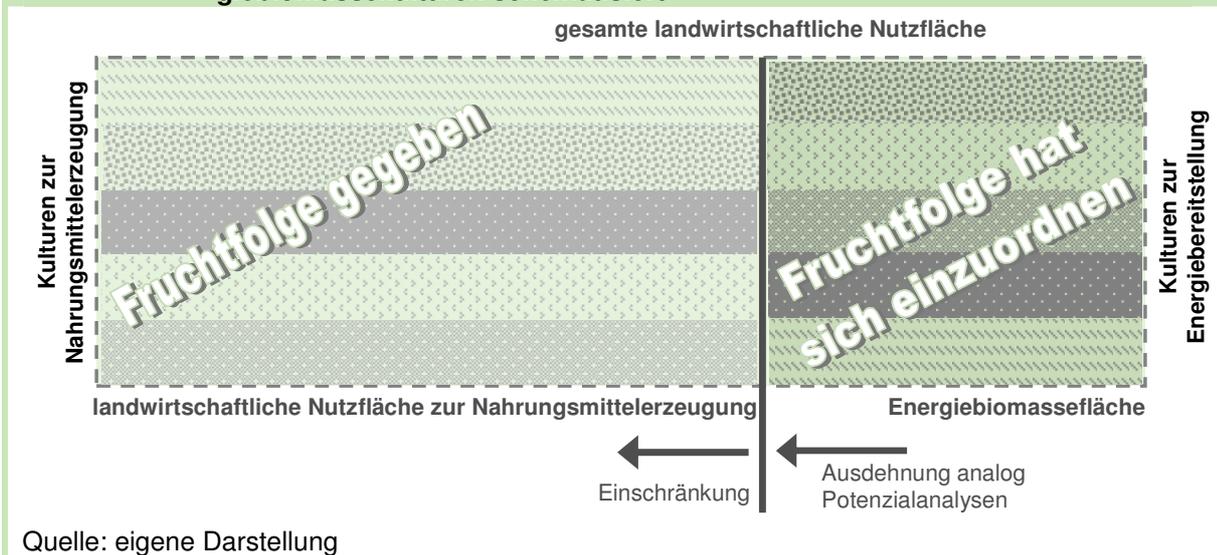
### **2.3.4 Definition der Restriktionen zum Ergebnisraum**

Durch die Formulierung des Zieles der Ableitung einer optimierten Biomasse-Nutzungsstruktur werden neben den gerade geschilderten Zielgrößen die Nebenbedingungen benötigt, die die Optimierung im realistischen Rahmen erfolgen lassen. Der Ergebnisraum wird im Wesentlichen von zwei Bereichen eingeschränkt. Zum einen die Landnutzung durch die Verfügbarkeit an Flächen für die Energiebiomasseerzeugung sowie durch die Energieverbrauchsstruktur an sich. Darüber hinaus können spezifische gesellschaftliche Ziele als Restriktionen eingeführt werden.

Als Optimierungsgrundlage sollen schon andernorts ermittelte Flächenpotenziale dienen. Die zur Biomasseproduktion zur Verfügung stehenden Flächen stellen die Obergrenze dar. Darüber hinaus hat sich die Fruchtfolge der Energiebiomasseerzeugung einzuordnen in die Fruchtfolge der zwar eingeschränkten aber bestehenden Nahrungs- und Futtermittelerzeugung. Abbildung 2-27 zeigt die methodische Vorgehensweise zur Ableitung der Fruchtfolge-restriktionen für den Energiebiomasseanbau schematisch auf. Grundsätzlich ist dabei unterstellt, dass die Nahrungsmittelproduktion erste Priorität einnimmt und sich die Energiebiomasse in die gegebenen Fruchtfolgemöglichkeiten einzuordnen hat. Die Fruchtfolgeobergrenzen der einzelnen Kulturen richten sich dabei zum einen an der guten fachlichen Praxis sowie regional an der Eignung bzw. fehlenden Eignung bestimmter Standorte für die einzelnen Kulturen. Datengrundlage für die tatsächliche Anbaustruktur sind EROSTAT (2008) Daten.

Die jeweiligen Fruchtfolgeobergrenzen der einzelnen Kulturen wurden einschlägiger Literatur des Pflanzenbaus entnommen.

**Abbildung 2-27: Vorgehensweise zur Ableitung der Fruchtfolgerestriktionen für die Energiebiomassekulturen schematisiert**



Analog zu den Biomasse-Rohstoffen, die sich in die bestehende Fruchtfolge eingliedern müssen, haben sich die produzierten Biomasse-Energieträger in die bestehende Energieverbrauchsstruktur einzuordnen. Damit wird unterstellt, dass aufgrund der vermehrten energetischen Biomassenutzung sich die Energieverbrauchsgewohnheiten nicht sofort nennenswert ändern werden. Systemwechsel bedürfen langer Vorlaufzeiten, wodurch sich die Biomasseenergie-träger zunächst in das bestehende Energieversorgungssystem einordnen müssen. Damit geben die Verbrauchsmengen der einzelnen fossilen Endenergieträger den Rahmen vor, innerhalb dessen eine Substitution durch Biomasse-Energieträger mit den entsprechenden Qualitäten erfolgen kann. Es ist aufgrund des derart hohen Energieverbrauchs damit zu rechnen, dass diese energetischen Restriktionen im LP-Modell kaum greifen werden.

Darüber hinaus formulieren politische Entscheidungsträger gewisse Mindestziele bezüglich einzelner Bioenergieträger. Diese Mindestziele wurden im Kapitel 2.1.2 schon erläutert. Da Biokraftstoffe derzeit ausschließlich aus Biomasse bereitgestellt werden, können die Ziele übernommen werden, wenngleich damit der Außenhandel unterschlagen wird. Bei Eigenerfüllung der z. T. ehrgeizigen Ziele werden die tatsächlichen gesellschaftlichen Kosten deutlich. Unter Einbeziehung des Außenhandels wären aufgrund vieler weiterer Wechselwirkungen diesbezüglich kaum Aussagen möglich. Die Ziele für den Stromsektor sind schwer zuordenbar, da neben der Stromerzeugung aus Biomasse auch auf andere erneuerbare Energiequellen zurückgegriffen werden kann. Damit muss eine subjektive Zuteilung der Ziele erfolgen.

Weitere gesellschaftliche Ziele bezüglich bestimmter Einschränkungen des Biomasseanbaues, wie z. B. gewisse Maisobergrenzen in bestimmten Regionen bzw. eine Einschränkung des Ackerholzanbaues in schon stark bewaldeten Regionen können implementiert werden. Davon

wird im Rahmen dieser Arbeit Abstand genommen, da keine konkret formulierten Ziele vorliegen, die verbindliche und von der Allgemeinheit getragene Vorschriften darstellen.

## 2.4 Anwendung des „*RegEnOpt*“ auf die Region Deutschland

Im Rahmen dieser schwerpunktmäßig methodischen Arbeit wird das entwickelte Modell „*RegEnOpt*“ auch angewendet. Wie schon im Kapitel 2.3.1 ab Seite 80 dargelegt, wird mit dem Modell die Region Deutschland zum Stützzeitpunkt des Jahres 2005 näher analysiert hinsichtlich der Möglichkeiten eines optimierten Biomasse-Energie-Mixes. Für Deutschland und das Jahr 2005 liegen umfassende Inputdaten für das Modell bezüglich Ertrags- und Preisentwicklungen vor (EUROSTAT 2008). Alle weiteren benötigten Daten bezüglich Energieverbrauchsstrukturen, landwirtschaftlichen Anbauverhältnissen und Hektarerträgen sind dem Datenpool von EUROSTAT (2008) ebenfalls zu entnehmen. Um spezielle Besonderheiten des Jahres 2005 zu glätten, werden entsprechende mehrjährige Trends für das Jahr 2005 im Modell als Datenbasis herangezogen. Durch den Bezug auf das Jahr in der Vergangenheit können die hier erzeugten Ergebnisse mit Ergebnissen anderer Studien verglichen und somit evaluiert werden.

Diese Rahmendaten für das Modell werden nun verrechnet mit den speziellen ökobilanziellen Kennzahlen zur Ableitung der Zielgrößen der einzelnen Biomassennutzungspfade. Nach einer isolierten Betrachtung dieser einzelnen Zielgrößen werden die verschiedenen Nutzungspfade nun simultan im LP-Modell innerhalb der für die Region Deutschland spezifischen Restriktionen dahingehend bewertet, als dass das Modell den optimalen Mix für das jeweilige Ziel ableitet. Die Daten für die Restriktionen liefern die tatsächliche Anbaustruktur in Deutschland sowie die vorherrschende Energieverbrauchsstruktur (EUROSTAT 2008). Zur Einbeziehung des Reststoffes Gülle als Biogassubstrat wurden lediglich die Rinder- und Schweinebestände Deutschlands herangezogen (EUROSTAT 2008) und mit einschlägigen Gülleanfallswerten (LFL 2007) das Güllepotenzial für die Obergrenze im LP berechnet. Durch die Gesetzgebung der Bundesregierung wurden Mindestbeimischungsquoten von Biokraftstoffen festgelegt, welche nun als Untergrenzen Biokraftstoffe im LP in die Lösung zwingen werden (BGBL. 2006a).

Da der Energieverbrauch in Deutschland im Vergleich zum Energiepotenzial der Biomasse derart groß ist, ist bei einem nur geringen Flächenpotenzial kaum ein vielseitiger Biomasse-Energiemix zu erwarten. Die Bandbreite der Flächenpotenziale für die Energieerzeugung erstreckt sich in den vorliegenden Studien von wenigen Prozentpunkten hin auf über 40 Prozent in Zukunftsszenarien (FRITSCHÉ et al. 2004, SIMON 2006, THRÄHN 2005, S. 69 ff., ZEDDIES 2006, ERICSSON und NILSSON 2006). Entsprechend soll diesem Aspekt dahingehend Rechnung getragen werden, als dass mehrere Flächenszenarien gerechnet werden. Für das erste Szenario werden 10 Prozent der landwirtschaftlichen Nutzfläche für den Biomasse-Mix zugelassen. Im zweiten Szenario wird der Biomasse-Mix auf 40 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche abgeleitet. Das dritte Szenario auf der kompletten landwirtschaftlichen Nutzfläche

stellt ein theoretisches Extremszenario dar, woraus zum einen die Begrenztheit des Energiepotenzials der Biomasse zum derzeitigen Energieverbrauch aufgezeigt werden soll. Zum anderen können die Ergebnisse herunterskaliert werden auf beliebige Flächen, wenn die Biomasseflächen unabhängig von der Nahrungsmittelproduktion betrachtet werden sollen.

---

## 3 Ergebnisse

Die Vielfalt landwirtschaftlicher Kulturen sowie deren vielseitige energetische Verwendungsmöglichkeiten bietet unter Berücksichtigung verschiedener Größenordnungen bzw. Prozessvarianten ein nahezu unendlich großes Spektrum spezifischer Biomasse-Nutzungspfade. Aus dem theoretischen Pool der Möglichkeiten werden die Pfade ausgewählt, die derzeit in der Praxis wiederzufinden sind, um den Ergebnispool einzugrenzen. Zunächst werden die einzelnen Pfade nebeneinander hinsichtlich ihrer realisierten Zielgrößen dargestellt. Dabei wird auf die einzelnen Stufen der Pfade im Einzelnen eingegangen. Im Rahmen dieser Ergebnisdarstellung erfolgt gleichzeitig die Validierung der Ergebnisse anhand von Vergleichen mit schon vorhandenen Studien. Soweit die Ergebnisse nicht direkt vergleichbar sind, werden die Ergebnisse der anderen Studien auf die Bezugseinheit dieser Studie normiert.

Die evaluierten Pfade werden dann mittels Linearer Programmierung auf die definierten Szenarien angewandt und für die jeweilige Zielgröße der optimale Biomasse-Energiemix abgeleitet.

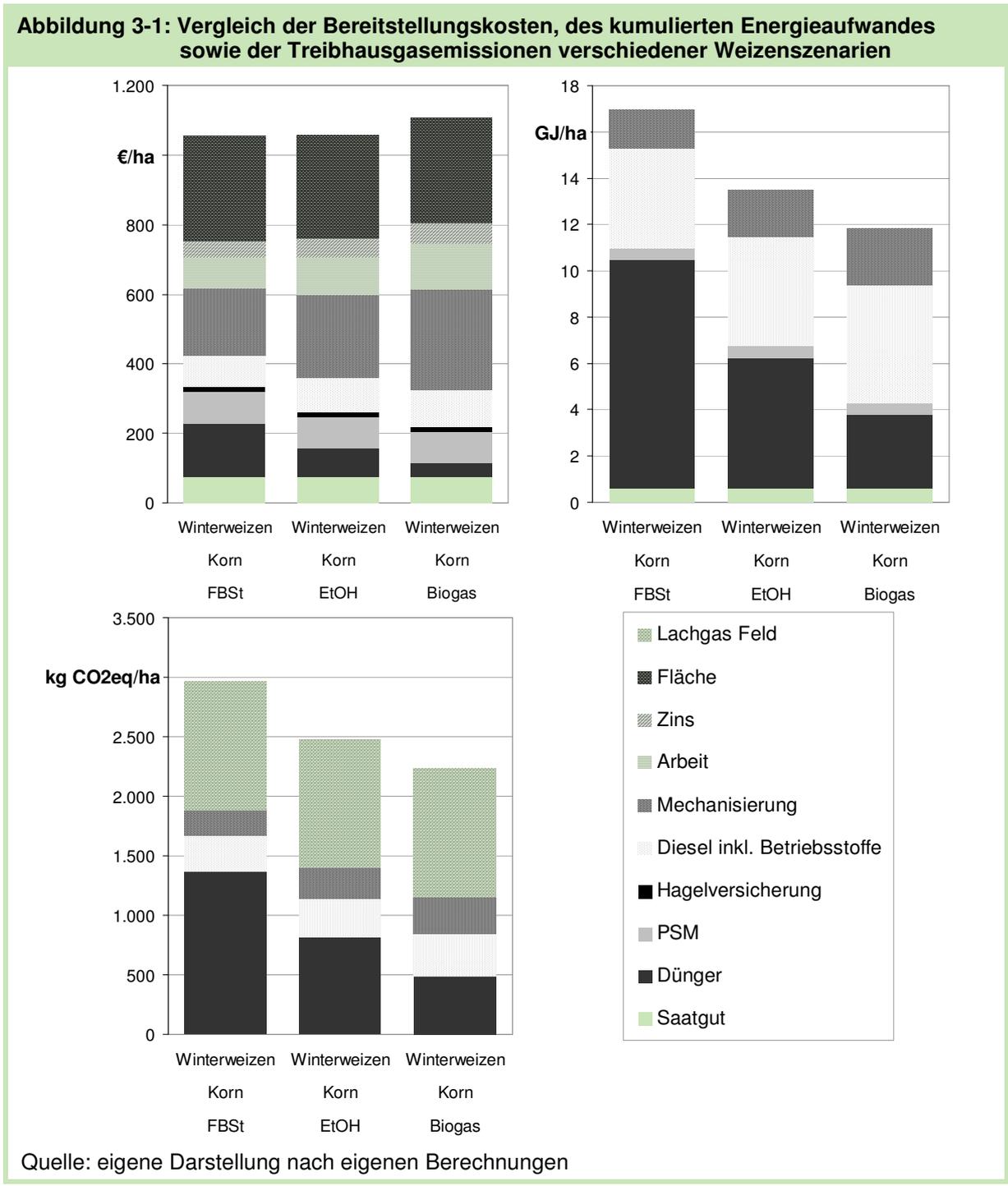
### 3.1 Die einzelnen Biomasse-Verwertungspfade

Die Biomasse-Verwertungspfade erstrecken sich vom Anbau der Biomasse-Rohstoffe auf landwirtschaftlichen Nutzflächen über Transport- und Lagerungsprozesse hin bis zur Erzeugung konsumfähiger Endenergieträger. Die in Ökobilanzen übliche Betrachtung gesamter Lebenswege von der Rohstoffförderung bis hin zur Entsorgung wird in dieser Arbeit nicht konsequent umgesetzt. Aufgrund der Heterogenität der Antriebssysteme v. a. im Mobilitätsbereich werden die Motortechnologien mit ihren spezifischen Eigenschaften ausgeklammert und nur die Verbrennung der Kraftstoffe an sich betrachtet. Zu Beginn erfolgt eine detaillierte Analyse der Bereitstellung der Biomasse auf landwirtschaftlichen Nutzflächen und Berücksichtigung der spezifischen Nährstoffkreisläufe. Es folgt die Analyse der Transportkette in Abhängigkeit von Transportgut, Transportsystem und Entfernung. Vor der Analyse der Verarbeitung der Biomasserohstoffe zu konsumfähigen Endenergieträgern erfolgt die Betrachtung der Lagerung.

---

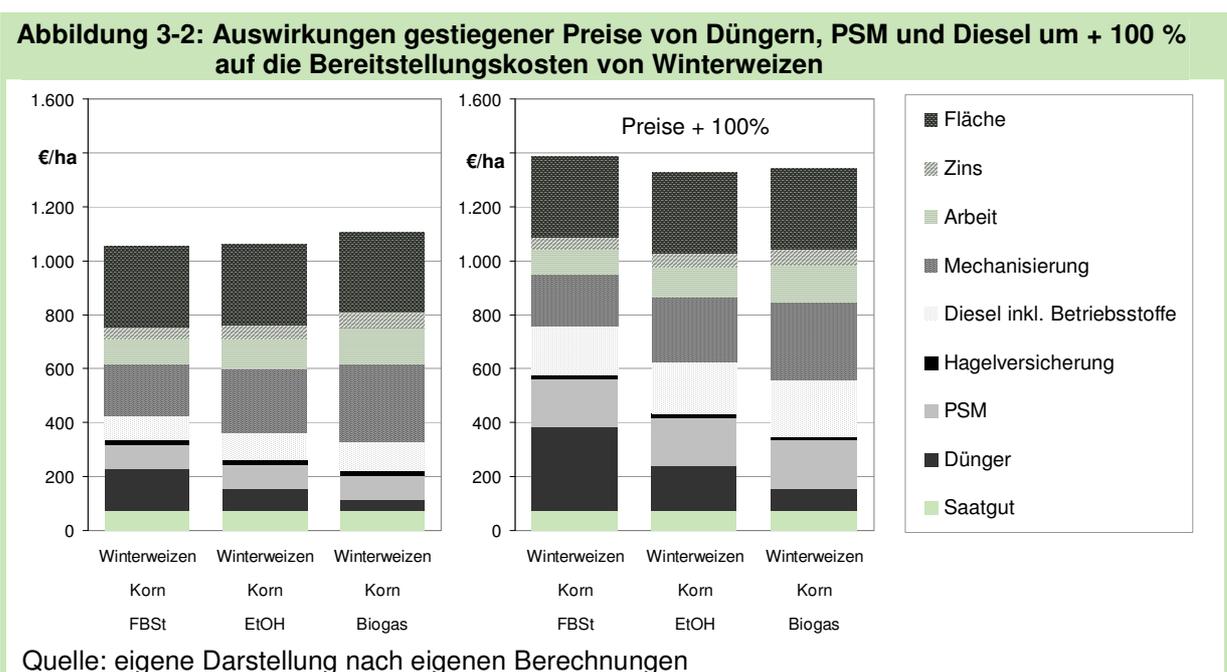
### 3.1.1 Die Biomasse-Rohstoffe

Der Prozess Anbau der Biomasse beginnt mit der Bestellung und Aussaat und endet mit der Ernte inklusive Stoppelbearbeitung. Abbildung 3-1 zeigt die Ergebnisse zum Anbau von Winterweizen mit drei verschiedenen energetischen Verwendungsmöglichkeiten. Aufgezeigt werden Bereitstellungskosten, der kumulierte Energieaufwand sowie die Treibhausgasemissionen.



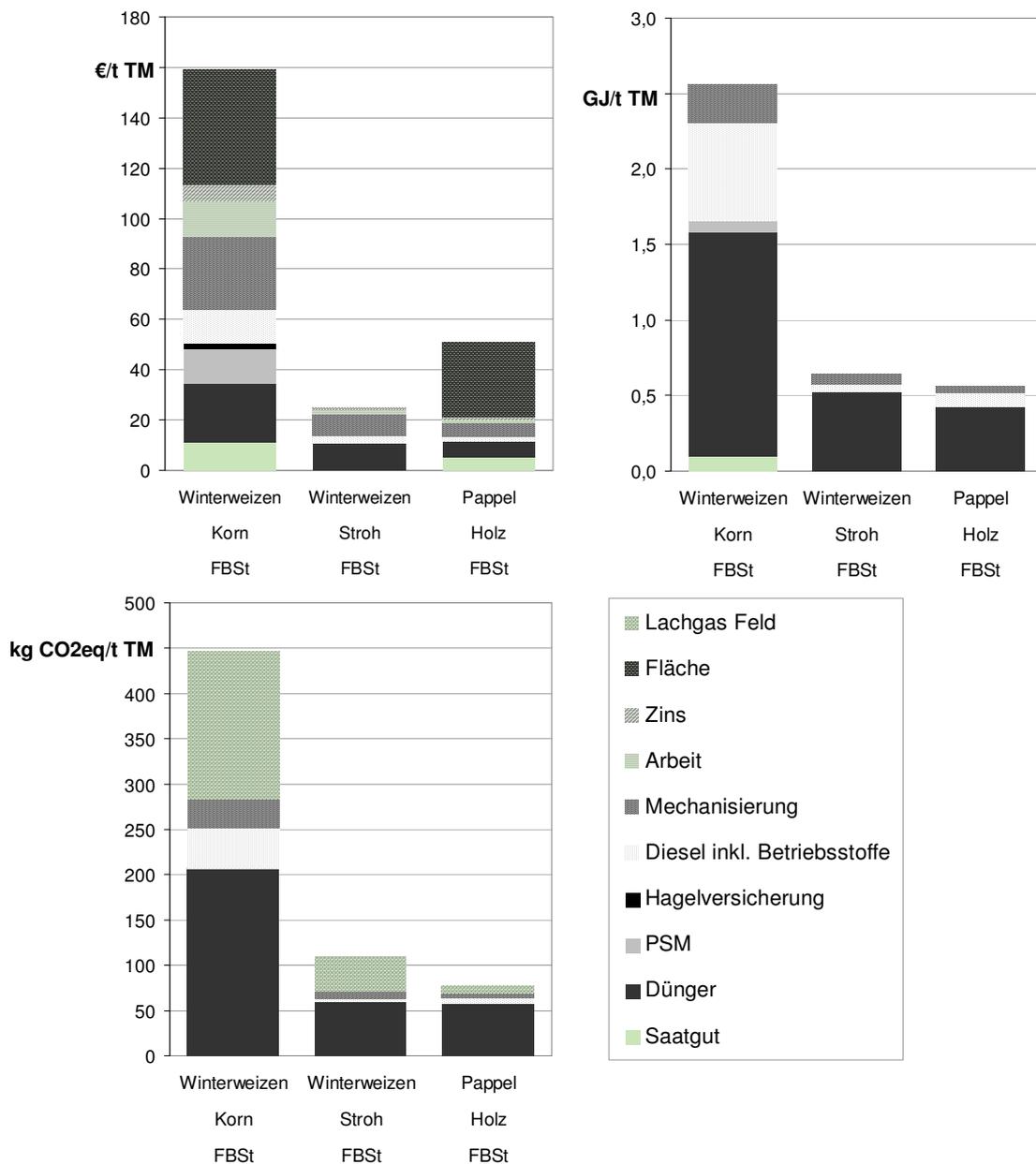
Die drei Szenarien in Abbildung 3-1 unterscheiden sich hinsichtlich der Düngungsszenarien. Es werden schon beim Anbau die weitere Verwendung der Erntegüter und die daraus resultierenden Nährstoffkreisläufe berücksichtigt. So werden bei der energetischen Nutzung des Weizenkorns als Festbrennstoff (FBSt) keine Nährstoffe auf die landwirtschaftliche Nutzfläche zurückgeführt. Die Düngung nach Entzug muss ausschließlich mit mineralischen Düngemitteln erfolgen. Bei der Nutzung des Weizenkorns zur Gewinnung von Bioethanol (EtOH) fällt Eiweißfuttermittel an, wodurch ein Teil der Nährstoffe über den Tiermagen wieder auf landwirtschaftliche Nutzflächen gelangt (vgl. Abbildung 2-19). Nahezu geschlossene Nährstoffkreisläufe treten bei der Nutzung des Weizenkorns als Biogassubstrat auf. Neben den unterschiedlichen Nährstoffkreisläufen unterscheiden sich die Szenarien weiterhin im Bereich der Mechanisierung. Mineraldünger werden mit dem Schleuderdüngerstreuer verteilt, während Gülle bzw. Gärrest aus Biogasanlagen mit dem Güllefass ausgebracht werden. Entsprechend unterscheiden sich die Szenarien hinsichtlich Dieseleinsatz sowie Abschreibung der Mechanisierung. Zum Bezugsjahr 2005 unterscheiden sich die drei Szenarien hinsichtlich der Erzeugungskosten des Weizens kaum. Bezüglich des kumulierten Energieaufwands und der Treibhausgasemissionen ergeben sich deutliche Unterschiede. Diese sind vor allem begründet in den unterschiedlichen Aufwandsmengen an mineralischem Stickstoff, dessen Produktion mit hohem Energieaufwand und hohen Treibhausgasemissionen verbunden ist.

Interessant erscheint in diesem Zusammenhang die Frage nach den Auswirkungen steigender Betriebsmittelpreise, die relativ nahe an den Rohölpreis gebunden sind. Zur Verdeutlichung der Auswirkungen wurde für die Darstellung in Abbildung 3-2 eine Preissteigerung um plus 100 Prozent, d. h. eine Verdoppelung, der vom Energie-, bzw. Rohölpreis abhängigen Preise für Diesel, Mineraldünger und Pflanzenschutzmittel unterstellt.



Wie Abbildung 3-2 zeigt, werden die Biomasse-Nutzungsstrategien bei gestiegenen Betriebsmittelpreisen ökonomisch interessanter, die weitgehende Nährstoffkreisläufe realisieren. Es folgt eine vergleichende Darstellung der relevanten Anbauszenarien von Biomasse-Rohstoffen zur energetischen Nutzung. Dabei wird unterschieden zwischen thermischer Nutzung, der Erzeugung von elektrischem Strom sowie der Produktion von Biokraftstoffen. Die Bezugseinheit stellt die Tonne Trockenmasse dar. Die spezifischen Trockenmassegehalte der Biomasse-Rohstoffe gehen aus Anhangtabelle 1 hervor. Die Abbildung 3-3 zeigt einen Vergleich dreier Biomasse-Rohstoffe zur thermischen Verwertung.

**Abbildung 3-3: Vergleich der Bereitstellungskosten, des kumulierten Energieaufwandes sowie der Treibhausgasemissionen verschiedener Biomasserohstoffe zur thermischen Verwertung**

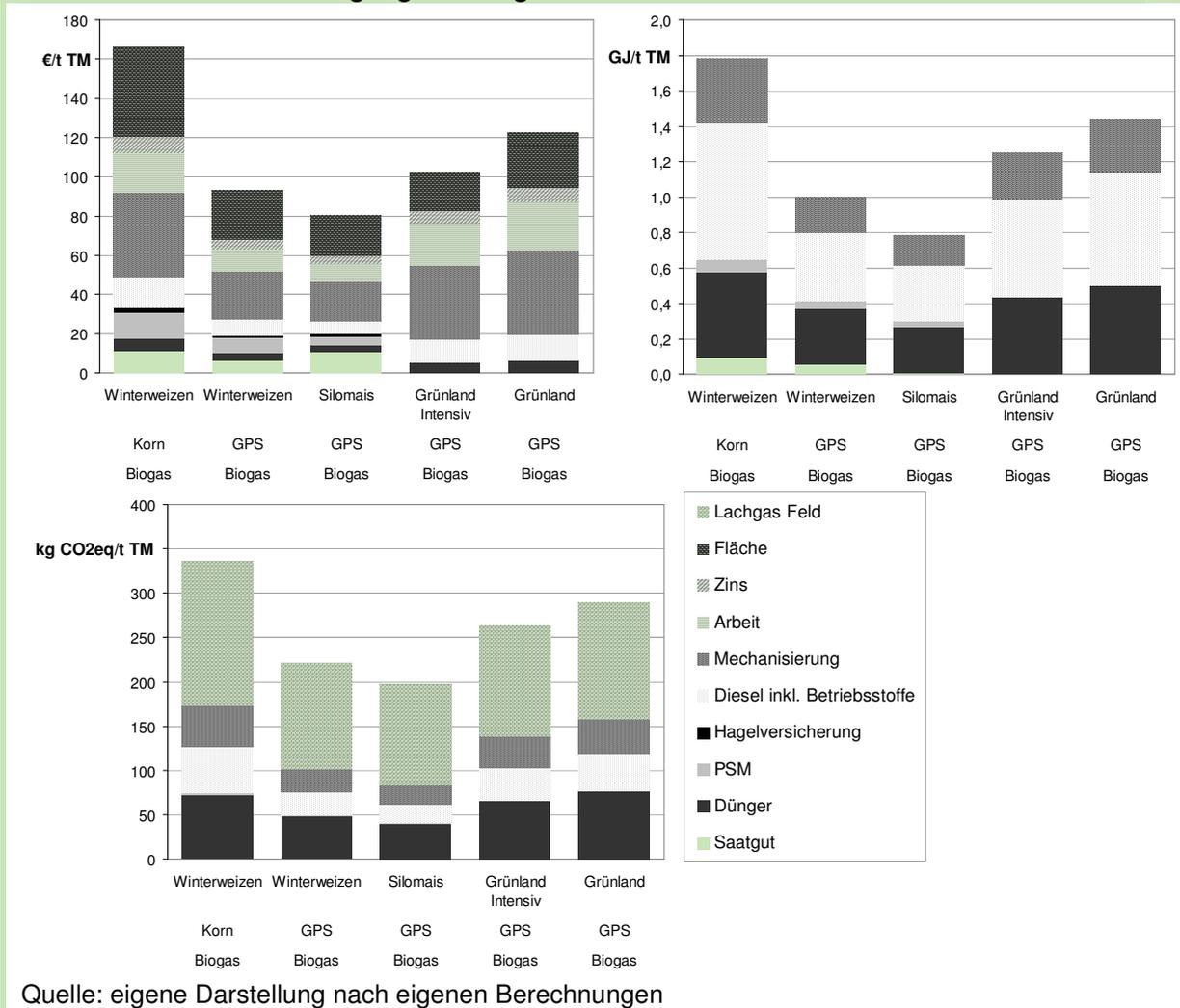


Quelle: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen

Es wird deutlich, dass die Tonne Trockenmasse Getreidekorn am aufwändigsten in jeder Hinsicht zu erzeugen ist. Demgegenüber stellen Stroh und Hackschnitzel aus Pappeln Rohstoffe dar, die mit vergleichsweise geringen Aufwendungen je Tonne Trockenmasse bereitzustellen sind. Dies liegt zum einen an den geringeren Nährstoffentzügen je Bezugseinheit im Vergleich zum Getreidekorn, die mit den kulturspezifischen Lachgasemissionen nach Tabelle 2-12 gerade bei Kurzumtriebsplantagen zu geringen Treibhausgasemissionen führen. Bei diesen Betrachtungen blieben jedoch die Nicht-Methan-VOC-Emissionen unberücksichtigt. Zum anderen sind bei der Kostenanalyse die Flächenkosten allein dem Hauptprodukt Getreidekorn zugeordnet.

Eine zweite Gruppe von Biomasse-Rohstoffen eignet sich zur Erzeugung von Biogas. Abbildung 3-4 zeigt die Ergebnisse der Kosten-, Energieaufwands- und Treibhausgasemissionsanalyse.

**Abbildung 3-4: Vergleich der Bereitstellungskosten, des kumulierten Energieaufwandes sowie der Treibhausgasemissionen verschiedener Biomasserohstoffe zur Stromerzeugung aus Biogas**

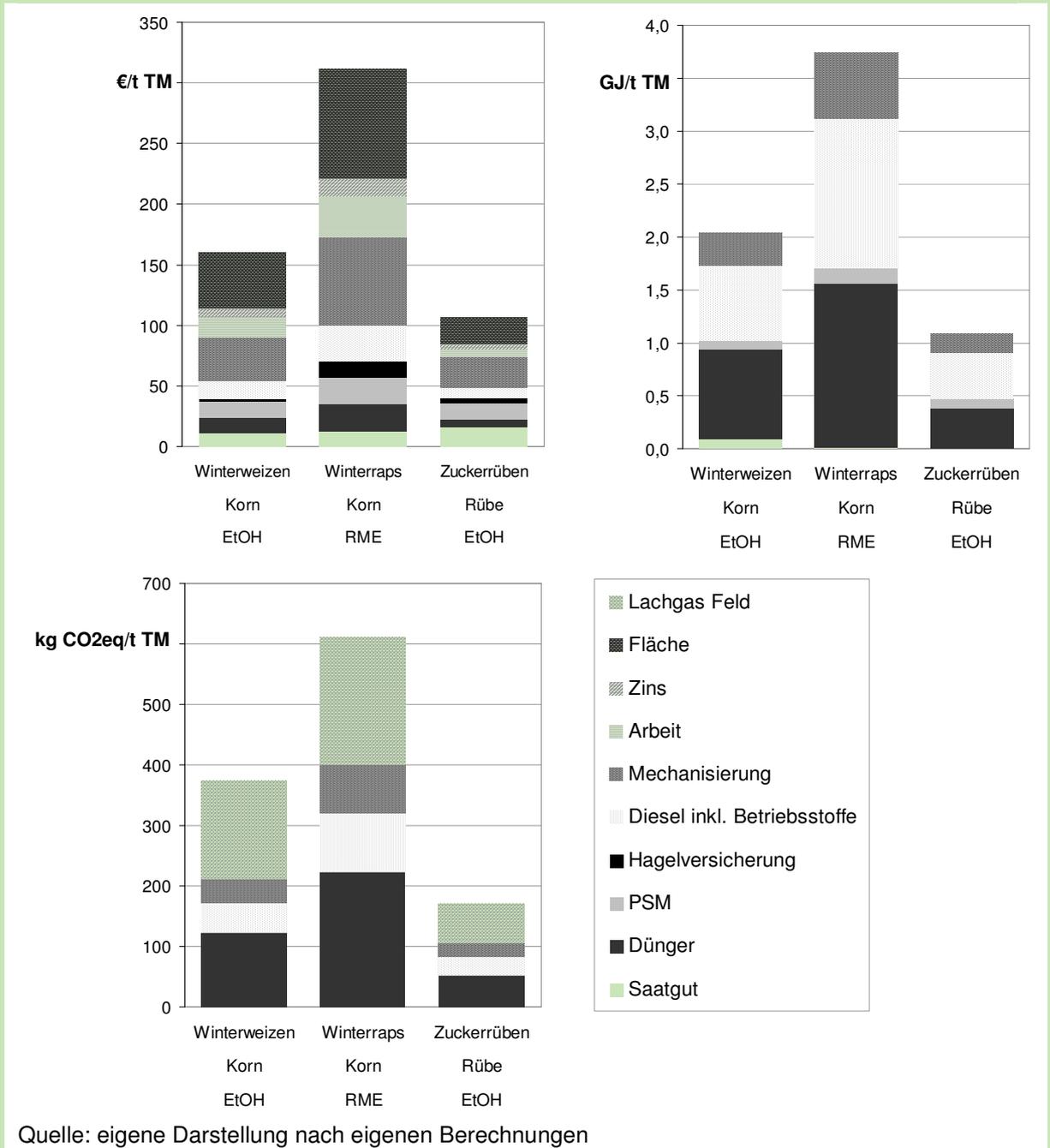


Die große Gemeinsamkeit der in Abbildung 3-4 dargestellten Biomasse-Rohstoffe sind die weitgehend geschlossenen Nährstoffkreisläufe. Dies ergibt vergleichsweise geringe Aufwendungen im Bereich der Düngemittel. Die Aufwendungen zur Ausbringung des Gärrestes sind demgegenüber höher als bei rein mineralischer Düngung. Durch den Ansatz der Düngung nach Entzug ergeben sich Lachgasemissionen unabhängig von der Herkunft der Nährstoffe nur abhängig von der Düngungsintensität. Die Bezugseinheit bei den Analysen stellt die Tonne Trockenmasse dar. Bei allen betrachteten Parametern schneidet die C-4 Pflanze Mais zur Silagegewinnung am besten ab, gefolgt von Getreideganzpflanzensilage. Die Grünlandnutzung zeichnet sich durch mehrere Erntetermine aus, was sich entsprechend bei Dieserverbrauch sowie Aufwendungen der Mechanisierung niederschlägt. Trotz häufigerer Erntemaßnahmen schneidet das Grüngetreide von intensiv genutztem Grünland besser ab als das Grüngetreide von etwas extensiver genutztem Grünland. Die höchsten Aufwendungen bzw. Treibhausgasemissionen hat das Getreidekorn zu verzeichnen.

Der dritte Bereich der Verwendungsmöglichkeiten von Biomasse-Rohstoffen umfasst die Biokraftstoffe. In Abbildung 3-5 werden die Ergebnisse der Bereitstellung von Rohstoffen für Biokraftstoffe der ersten Generation dargestellt. Die Erzeugung von Rohstoffen für Biokraftstoffe der zweiten Generation unterscheiden sich nicht von der Bereitstellung von Biomasse-Feststoffen, die in Abbildung 3-3 dargestellt sind. Auch in Abbildung 3-5 sind die Ergebnisse auf die Tonne Trockenmasse Erntegut bezogen.

Es lässt sich aus Ertragsstatistiken ableiten, dass mit steigender Komplexität der von den Pflanzen erzeugten Substanzen der Trockenmasseertrag sinkt. Die Ressourcen, die die Pflanze zur Herstellung höhermolekularer Substanzen benötigt stehen somit nicht für eine Masseproduktion von Biomasse zur Verfügung. Die Zuckerrübenpflanze mit den niedermolekularen Substanzen der Zucker hat demnach deutlich geringere spezifische Aufwendungen zu verzeichnen wie die Getreidepflanzen zur Erzeugung der stärkehaltigen Körner oder die Raps-pflanze zur Erzeugung der pflanzenöhlhaltigen und proteinreichen Saat. Dies wird an der Kultur Raps mit dem Pflanzenöl mit hoher Energiedichte deutlich. Die Energiekonzentration geht zulasten des Massenertrags. Da die Umfänge des Produktionsmittel- und Produktionsfaktoreinsatzes nicht generell abhängig sind von der jeweiligen Ertragsmasse, ergeben sich in Abhängigkeit vom Ertragsniveau gewisse Skaleneffekte. Diese werden deutlich aus dem Vergleich der drei Kulturen in Abbildung 3-5. Mit steigender Komplexität der erwünschten Substanzen steigen auch die Aufwendungen und Emissionen in jeglicher Hinsicht je produzierter Einheit durch den Bezug der flächenbezogenen Aufwendungen auf eine geringere Trockenmasse. Auf den ersten Blick erscheint damit die Zuckerrübe als die geeignetste Kultur zur Biokraftstoffherstellung. Die Aussage zur Eignung setzt jedoch die Berücksichtigung der Verarbeitung zum Kraftstoff mit voraus und kann somit an dieser Stelle noch nicht getroffen werden. Analog kann Raps noch nicht als ungünstigste Kultur zur Biokraftstoffproduktion erklärt werden.

**Abbildung 3-5: Vergleich der Bereitstellungskosten, des kumulierten Energieaufwandes sowie der Treibhausgasemissionen verschiedener Biomasserohstoffe zur Produktion von Biokraftstoffen**



Auffällig ist bei allen Arten der Biomasserohstoffe unabhängig von deren Verwendung der hohe Anteil der Lachgasemissionen an den gesamten Treibhausgasemissionen. Sie nehmen unter den getroffenen Annahmen ein Drittel bis die Hälfte der gesamten Treibhausemissionen ein. Gerade diese Position unterliegt jedoch nach Literaturangaben (vgl. Kapitel 2.2.1.3 ab Seite 68) sehr großen Unsicherheiten. Entsprechend erscheint hier ein wesentlicher Ansatzpunkt intensiverer Auseinandersetzungen, die Unsicherheiten einzugrenzen. Durch eine genauere Erklärung der Zusammenhänge ergeben sich u. U konkrete Möglichkeiten, entspre-

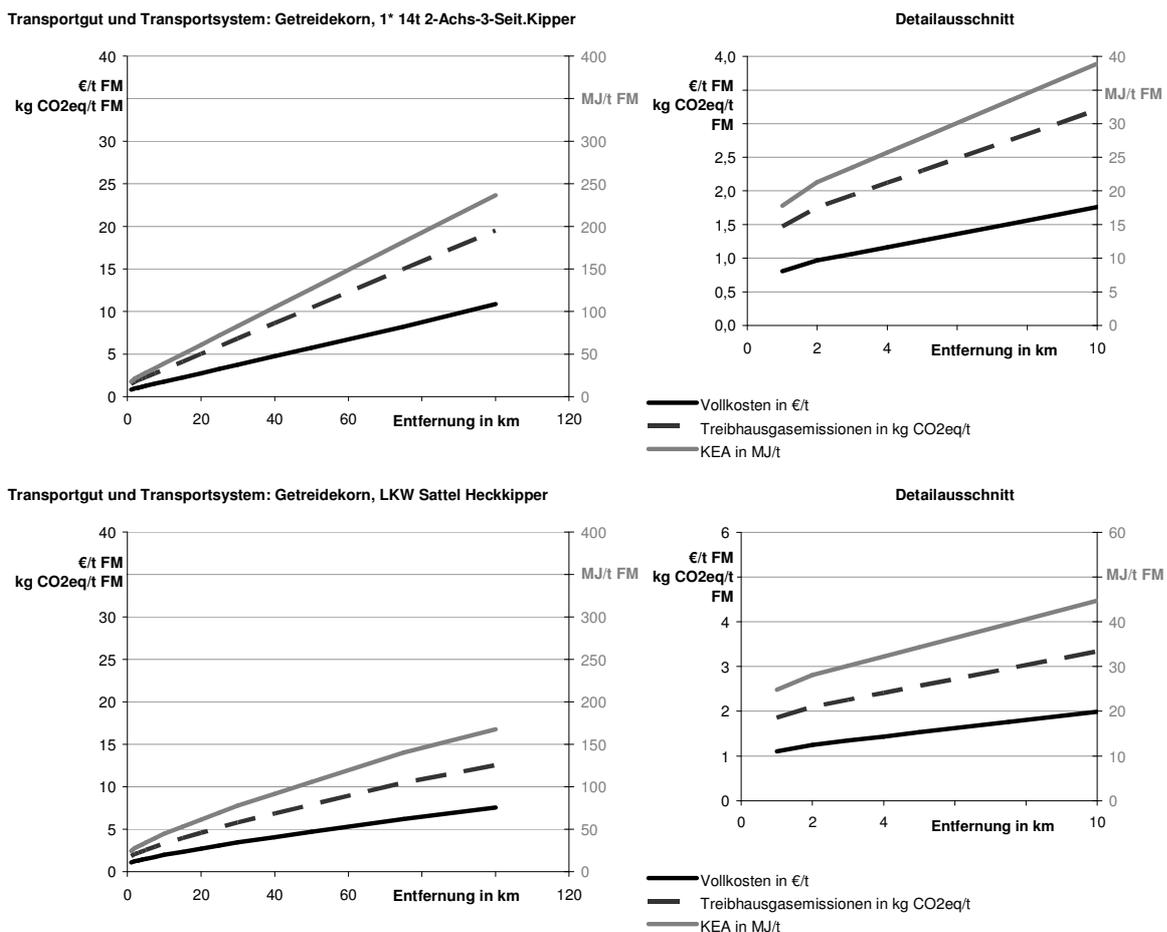
chende Maßnahmen zu entwickeln, die zu einer tatsächlichen Emissionsreduktion führen können.

### 3.1.2 Transportverfahren

Bisher wurde die Bereitstellung der Biomasse-Rohstoffe inklusive Ernte frei Feld dargestellt. Je nach Art der Biomasse sowie Größenordnung der Biomasse-Verarbeitungsstätte sind unterschiedliche Logistikkonzepte zum Transport der Biomasse zur Weiterverarbeitung nötig. Aus den Eigenschaften der Biomasserohstoffe sowie der Transportentfernung eignen sich unterschiedliche Transportverfahren. Im Rahmen dieser Studie wird mit Entfernungsklassen und unterschiedlichen Transportsystemen gearbeitet.

Die Abbildung 3-6 zeigt die Ergebnisse der Kosten-, Energieaufwands- und Treibhausgasemissionsanalyse zum Getreidetransport zu zwei verschiedenen Transportsystemen in Abhängigkeit von der Transportentfernung.

**Abbildung 3-6: Vergleich der Transportkosten, des kumulierten Energieaufwandes sowie der Treibhausgasemissionen zweier Transportsysteme zum Transport von Getreidekorn in Abhängigkeit von der Transportentfernung**

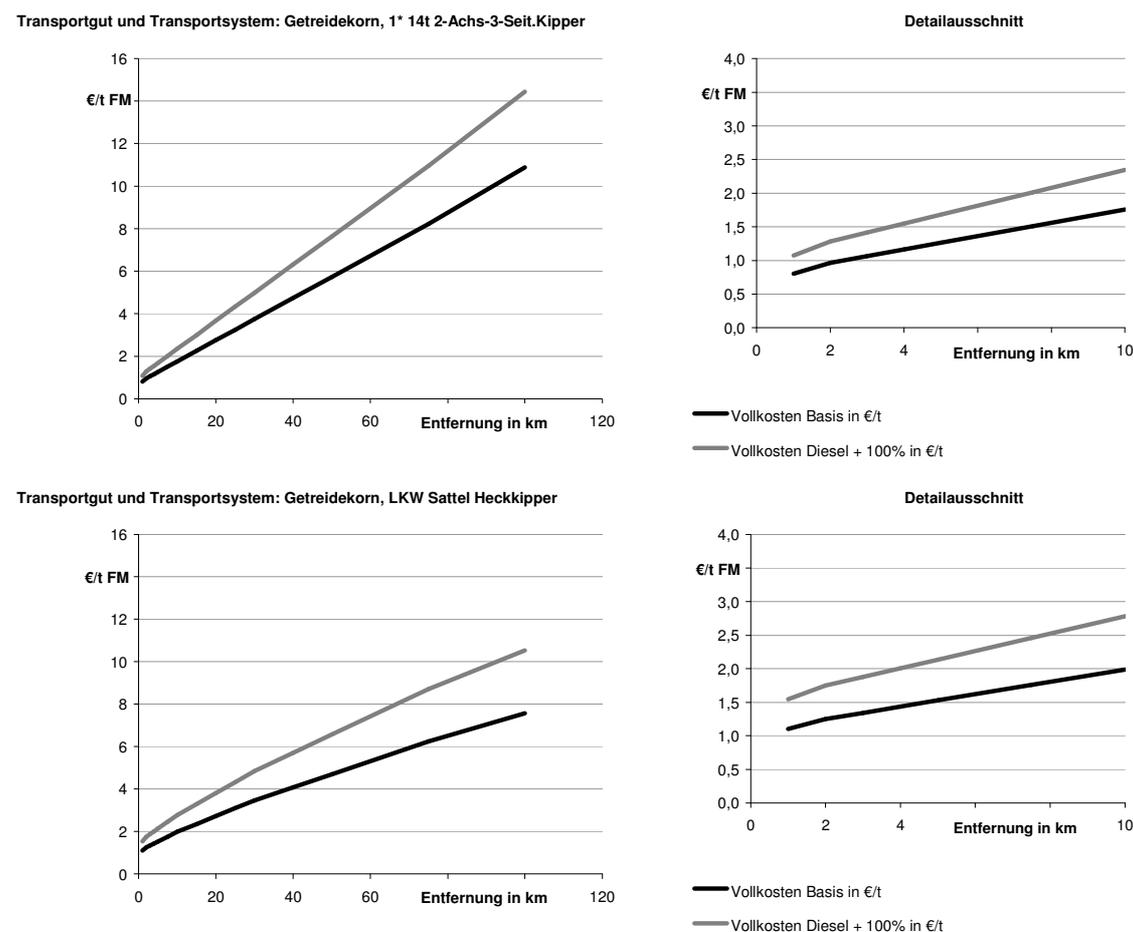


Quelle: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen

Auftretende Nichtlinearitäten in den Ergebnissen der Transportanalysen ergeben sich aus den unterschiedlichen wegspezifischen Transportgeschwindigkeiten (vgl. Abbildung 2-23 auf Seite 95). Es wird aus Abbildung 3-6 deutlich, dass Kosten, kumulierter Energieaufwand und die Treibhausgasemissionen mit zunehmender Entfernung steigen. Im Vergleich der beiden Transportsysteme Traktor mit Anhänger und LKW zeigt sich die Vorteilhaftigkeit der Traktor-Anhänger-Kombination bei geringen Entfernungen. Unter den getroffenen Annahmen kann der LKW seine Vorteilhaftigkeit erst bei einer Transportentfernung ab circa 20 Kilometern entfalten.

Eine Sensitivitätsanalyse zeigt die Auswirkungen steigender Kraftstoffkosten auf die gesamten Transportkosten. In Abbildung 3-7 werden für die beiden Transportsysteme zum Getreidetransport die Referenzsituation sowie die um 100 Prozent gestiegenen Dieselpreise verglichen. Der Break-Even entwickelt sich unter den entsprechenden Annahmen hin zu einer höheren Transportentfernung von etwa 25 Kilometern.

**Abbildung 3-7: Auswirkungen gesteigerter Dieselpreise um + 100 % auf die Transportkosten von Getreidekorn**



Quelle: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen

Analog zum Getreidetransport (vgl. Abbildung 3-6) werden weitere Transportsysteme für die wesentlichen Biomasse-Rohstoffe bezüglich Kosten, kumuliertem Energieaufwand und Treibhausgasemissionen analysiert. Die Ergebnisse hierzu sind in Anhangabbildung 17 dokumentiert.

### 3.1.3 Lagerungsverfahren

Die durchschnittliche Lagerungsdauer beträgt mit 183 Tagen ein halbes Jahr. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass einmal pro Jahr eine Ernte eingefahren wird, während eine ganzjährige Rohstoffversorgung gewährleistet werden muss. Eine Ausnahme stellen die Zuckerrüben dar, welche mehr oder weniger just in time angeliefert werden. Entsprechend ist hier lediglich ein Lagerraum für wenige Tage notwendig. Die Art des Lagerungsverfahrens orientiert sich zum einen am Lagerungsgut an sich. Zum anderen hat die Verarbeitungskapazität mit der entsprechenden Rohstoffnachfrage einen Einfluss auf die Größenordnung und somit auch auf die Bauweise der Lagerungsstätte. Tabelle 3-1 zeigt die Ergebnisse hinsichtlich der Kosten, des kumulierten Energieaufwands und der korrespondierenden Treibhausgasemissionen zu ausgewählten Lagerungsverfahren.

**Tabelle 3-1: Lagerungskosten, kumulierter Energieaufwand sowie Treibhausgasemissionen von Lagerungssystemen zur Lagerung von verschiedenen Biomasse-Rohstoffen**

Lagerungsgut und Lagerungssystem	Vollkosten €/t <sup>1)</sup>	KEA MJ/t <sup>1)</sup>	Treibhausgas- emissionen kg CO <sub>2</sub> eq/t <sup>1)</sup>
Getreidekorn, Rieselsilo 25 m <sup>3</sup> Stahl verzinkt	26,97	650,0	66,97
Getreidekorn, Getreidesilo Blech, Betonfundament 1.000m <sup>3</sup>	11,04	28,8	2,67
Rapssaar, Getreidesilo Blech, Betonfundament 1.000m <sup>3</sup>	11,42	29,8	2,76
Stroh Quaderballen 85%TS, Bergehalle 1.500 m <sup>3</sup> BRI	19,37	448,7	27,10
Laubholz hackschnitzel 85%TS, Bergehalle 1.500 m <sup>3</sup> BRI	10,19	235,9	14,25
Maissilage verdichtet, Flachsilo BGA 500kW 15.000 m <sup>3</sup>	1,53	34,8	3,78
GPS gehäckselt, Flachsilo BGA 500kW 15.000 m <sup>3</sup>	2,03	46,6	5,06
Grassilage verdichtet, Flachsilo BGA 500kW 15.000 m <sup>3</sup>	1,92	43,9	4,77
Gülle, Gülle-, Gärrestlager 1.000 m <sup>3</sup>	3,31	71,5	7,81

<sup>1)</sup> die Werte beziehen sich jeweils auf die Tonne Frischmasse des jeweiligen Lagerungsgutes

Quelle: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen

Eine ausführliche Übersicht der Ergebnisse der einzelnen Lagerungsverfahren befinden sich in Anhangtabelle 13 auf Seite 232. In den ökonomischen und ökologischen Analysen sind die spezifischen Lagerungsverluste (vgl. Anhangtabelle 3 auf Seite 200) für die durchschnittliche Lagerungsdauer von 183 Tagen berücksichtigt. Entsprechend erhöht sich der erntefrische Rohstoffbedarf der Verarbeitungsstätten und somit die spezifische Flächennachfrage.

### 3.1.4 Endenergieträger aus Biomasse-Rohstoffen

Die nach Anbau, Transport und Lagerung bereitgestellten Biomasse-Rohstoffe werden in den unterschiedlichen Verarbeitungsstätten zu nutzbaren Energieträgern umgewandelt. Die Verarbeitungsstätten unterscheiden sich zum einen hinsichtlich des erzeugten Endenergieträgers. Zum anderen werden Verarbeitungsstätten mit verschiedenen Verarbeitungskapazitäten analysiert. Die Analysen zielen ab auf die Ableitung der Zielgrößen, wie sie in Tabelle 2-14 auf Seite 81 dargestellt sind. Neben den Aufwendungen monetärer und energetischer Art mit den korrespondierenden Treibhausgasemissionen aus der Bereitstellung der Biomasse-Rohstoffe werden die entsprechenden Inputs berücksichtigt, welche in Tabelle 2-21 auf Seite 101 und den zugehörigen Anhangtabellen dokumentiert sind. Mit entsprechenden Effizienzkoeffizienten werden die ebenfalls dokumentierten Outputs erzielt, aus welchen sich die spezifischen Aufwendungen je Einheit Endenergieträger ableiten lassen. Zur Ableitung entsprechender Netto-Effekte wird eine Referenzsituation nahe liegender fossiler Energieträger herangezogen. Die Beschäftigungseffekte basieren im Bereich der Biomasse-Bereitstellung v. a. auf KTBL-Daten (KTBL 2004). Für die einzelnen Verarbeitungsstätten wurden viele Literaturstellen ausgewertet und die abgeleiteten spezifischen Beschäftigungskennzahlen herangezogen.

Die Ergebnisse werden strukturiert nach den wesentlichen Energieträgern abgehandelt. Als erstes werden die verschiedenen Varianten der Wärmeerzeugung als Alternative zu Heizöl dargestellt. Es folgen die unterschiedlichen Alternativen der Erzeugung von elektrischem Strom als Hauptprodukt. Abschließend werden die verschiedenen Biokraftstoffe behandelt.

#### 3.1.4.1 Wärme

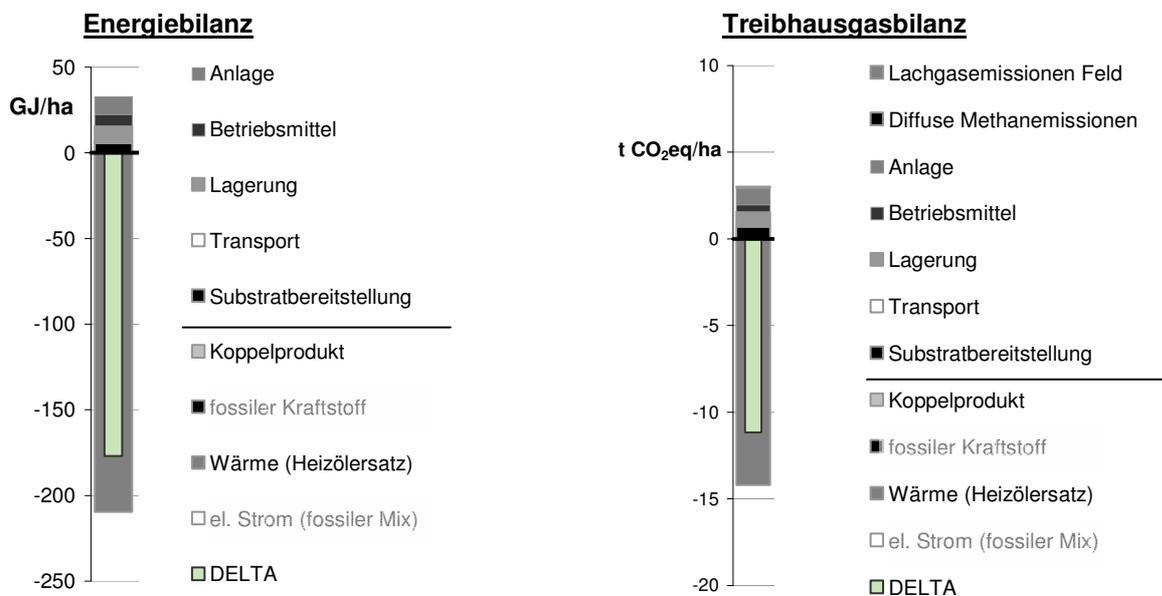
In den Analysen zur Wärmegewinnung aus Biomasse werden die Rohstoffe Holzhackschnitzel aus Pappel-Kurzumtriebsplantagen, Getreidekorn und Getreidestroh analysiert. Eine weitere Differenzierung erfolgt hinsichtlich der verschiedenen Größenordnungen der Heizanlagen. Es werden Kessel mit der Größenordnung eines Einfamilienhauses ab 15 Kilowatt bis hin zu großen Heizwerken mit einem Megawatt thermischer Leistung betrachtet.

Die grafische Aufbereitung der Ergebnisse ist von Anhangabbildung 18, Seite 233, bis Anhangabbildung 22, Seite 237, dargestellt. Exemplarisch wird in Abbildung 3-8 der Biomasse-Umwandlungspfad Pappel-Hackschnitzel zur Wärmegewinnung dargestellt. Die Bezugseinheit stellt der knappste Produktionsfaktor, der Boden dar. So wird deutlich, dass einem Energie-Input von knapp 33 Gigajoule pro Hektar ein Energie-Output in Höhe von 209 Gigajoule gegenübersteht. Netto werden somit 176 Gigajoule fossile Energieträger wie zum Beispiel Heizöl pro Hektar eingespart. Umgerechnet ergeben sich jährlich knapp 5.000 Liter Heizöl, die pro Hektar Pappel-Kurzumtriebsplantage ersetzt werden können.

Analog zur Energiebilanz verhält sich auch die Treibhausgasbilanz, wobei hier noch die bodenbürtigen Lachgasemissionen sowie je nach Prozess Methanemissionen die Bilanz für die Biomasse-Energieträger belasten. Damit liegen die prozentualen Einsparungseffekte bei

Treibhausgasemissionen je nach Stickstoffdüngungsintensität und Verarbeitungsprozess ein paar Prozentpunkte unter den Ergebnissen aus der Energiebilanz, was das Einsparungspotenzial angeht.

**Abbildung 3-8: Ergebnisse zu Energie- und Treibhausgasbilanz zum Biomasse-Umwandlungspfad Pappel-Hackschnitzel zur Wärmeengewinnung in einer 15 kW<sub>th</sub>-Heizanlage**



Quelle: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen

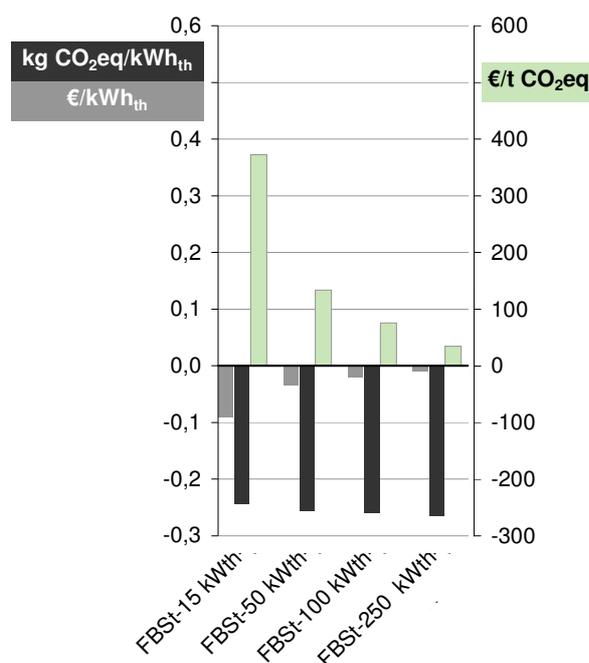
Generell stellt die Wärmeengewinnung aus Biomasse eine sehr effiziente Möglichkeit zur Verdrängung fossiler Energieträger dar. Es werden, abgesehen vom Einsatz von Getreidekorn als Brennstoff, mehr als 80 Prozent Primärenergie fossiler Herkunft eingespart. Bei der thermischen Verwertung von speziell für diesen Zweck angebautem Getreidekorn schlägt der Anbau mit entsprechendem Mechanisierungs- und Düngaufwand zu Buche, wodurch sich Energieeinsparungseffekte in der Größenordnung von 50 bis 60 Prozent ergeben. Aufgrund der geringen Nährstoffzüge des Pappelholzes sind vergleichsweise geringe Stickstoffmengen zu düngen. Dies führt unter den beschriebenen Modellannahmen zu vergleichsweise geringen Lachgasemissionen im Vergleich zu Getreide und Getreidestroh als Festbrennstoffe.

Die Energie- und Treibhausgasbilanzen verbessern sich bei steigender Anlagenkapazität. Diese Effekte stagnieren in der üblichen Größenordnung von Heizwerken. Inwieweit steigende Transportaufwendungen bei großen Heizkapazitäten den Degressionseffekt umkehren, konnte nicht geklärt werden.

Zur Berechnung der Treibhausgas-Vermeidungskosten (vgl. Abbildung 3-9) werden neben den Einsparpotenzialen von Treibhausgasemissionen die Kosten der Wärmeengewinnung der beiden alternativen Verfahren herangezogen. Die Kostendifferenz zwischen Biomasse-Verfahren und fossilem Referenzverfahren hängt neben einzelnen Effizienzkriterien vor allem ab vom Preisniveau fossiler Energieträger und den daran gekoppelten Betriebsmittelpreisen

des Biomasse-Nutzungspfades. Gerade die Biomasse-Heizanlagen kleinerer Dimensionen führen zu höheren Wärmegestehungskosten wie entsprechende Heizölkessel. Dies liegt an den vergleichsweise hohen Anschaffungskosten der aufwändigen Biomasseheizkessel. Damit ergibt sich ein negativer Kostensaldo für die Gesellschaft, den jedoch hauptsächlich die Betreiber der Heizanlagen zu tragen haben. Diese gesellschaftlichen Kosten, bezogen auf die eingesparte Menge von Treibhausgasemissionen, führt dann zu den Treibhausgas-Vermeidungskosten. Im Falle der Kostenersparnis bei der Wärmeerzeugung aus Biomasse anstelle aus fossilen Energieträgern führt dies zu negativen Treibhausgas-Vermeidungskosten. Neben der Einsparung von Treibhausgasemissionen reduzieren sich auch die gesellschaftlichen Kosten. Es tritt ein so genannter Treibhausgas-Vermeidungsnutzen auf. Dieser lässt sich gerade für größere Heizanlagen bei hohen fossilen Energiekosten ableiten.

**Abbildung 3-9: Ergebnisse zu Treibhausgas-Vermeidungskosten zum Biomasse-Umwandlungspfad Pappel-Hackschnitzel zur Wärmegewinnung in einer 15 kW<sub>th</sub>-, 50 kW<sub>th</sub>-, 100 kW<sub>th</sub>- und 250 kW<sub>th</sub>- Heizanlage**



Quelle: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen

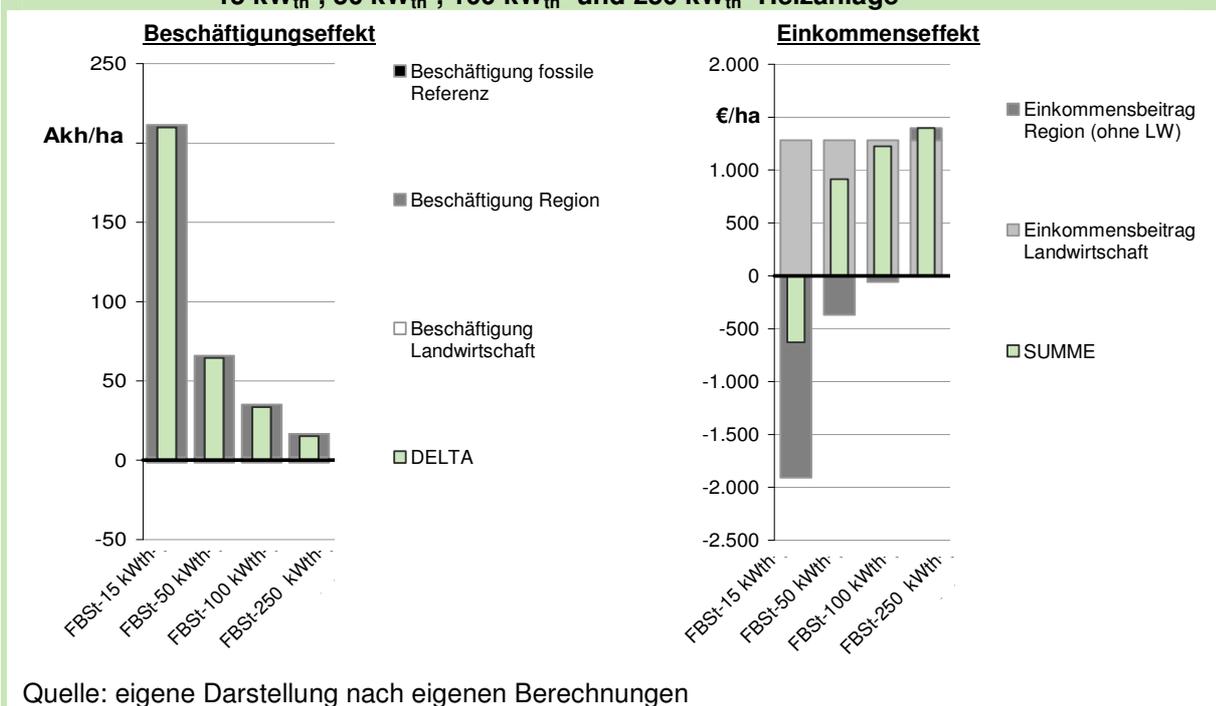
Auffallend ist die extrem hohe Differenz der Vermeidungskosten zwischen den verschiedenen Heizkesselkapazitäten beim Brennstoff Getreide von über 800 Euro je Tonne Treibhausgase bis unter 50 Euro je Tonne Treibhausgase. Weit geringer ist die entsprechende Spannweite beim Brennstoff Stroh oder Holz. Zu erklären ist dieser Effekt dahingehend, dass Pappel- und Stroheinsatz deutlich mehr Treibhausgasemissionen vermeiden als die Verbrennung von Getreide. Wie Anhangabbildung 20 auf Seite 235 zeigt, sind die Veränderungen der spezifischen Treibhausgasemissionen in Abhängigkeit von der Kesselkapazität geringer als die relative Kostendifferenz zwischen den Kesselgrößenordnungen. Die deutlich steigende öko-

nomische Vorteilhaftigkeit größerer Kesselkapazitäten bei relativ gleich bleibenden Treibhausgasemissionen führt zu den erkennbaren Effekten bei den Treibhausgasemissionen. Werden die Kosteneffekte auf eine vergleichsweise geringe Menge Treibhausgasemissionseinsparung bezogen, so entsteht die beim Brennstoff Getreide zu beobachtenden hohe Differenz der Treibhausgas-Vermeidungskosten zwischen kleinem und großem Heizkessel.

Insgesamt lässt sich ableiten, dass die Wärme in großen Einheiten effizienter erzeugt werden kann als in Kleinanlagen. Die Effizienzkriterien beziehen sich hierbei auf die ökonomischen und ökologischen Parameter. Damit leitet sich die Empfehlung zu zentralen Wärmegewinnungsanlagen mit entsprechender Verteilungsinfrastruktur anstelle vieler kleinster dezentraler Wärmegewinnungsanlagen ab.

Bei erster Betrachtung der Beschäftigungseffekte bei der Wärmegewinnung aus Biomasse in Abbildung 3-10 bzw. Anhangabbildung 21 auf Seite 236 erscheinen die Kleinanlagen günstiger als Großanlagen. Dabei gilt es zu beachten, dass die Beschäftigung im Sektor Landwirtschaft, die die Brennstoffbereitstellung repräsentiert, bei allen Brennstoffen einen sehr kleinen Anteil einnimmt.

**Abbildung 3-10: Ergebnisse zu Beschäftigungs- und Einkommenseffekte zum Biomasse-Umwandlungspfad Pappel-Hackschnitzel zur Wärmegewinnung in einer 15 kW<sub>th</sub>-, 50 kW<sub>th</sub>-, 100 kW<sub>th</sub>- und 250 kW<sub>th</sub>- Heizanlage**



Der bedeutende Anteil betrifft die Beschäftigung, die einen Arbeitsplatz für die Region darstellt. Im Bereich der Kesselkapazitäten bis ca. 100 Kilowatt thermischer Leistung wird kaum ein tatsächlicher Arbeitsplatz geschaffen. Vielmehr wird der Eigentümer einen Teil seiner Freizeit für den Betrieb der Heizanlage verwenden. Kesselkapazitäten, die zur Versorgung von Mehrfamilienhäusern dienen können, ist ein tatsächlicher Beschäftigungseffekt dahinge-

hend zu erwarten, als dass der zuständige Hausmeister mehr Stunden je Wohnanlage benötigt, und somit die ein oder andere zusätzliche Stelle geschaffen werden kann. Entsprechendes gilt für größere Heizkraftwerke zur Versorgung von Kunden lokaler Nahwärmenetze. Hierbei sind jedoch entsprechende Verdrängungseffekte von Beschäftigung der fossilen Alternative mit zu berücksichtigen. Es ergeben sich in Abhängigkeit von der Leistung der Heizanlage zwischen 10 und 50 Stunden Nettobeschäftigung je Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche und Jahr. Damit sind je Arbeitsplatz 30 bis 160 Hektar Biomasseanbau notwendig.

Die Referenz der Einkommensbeiträge, wie sie in Anhangabbildung 22 auf Seite 237 dargestellt ist, stellt die Nicht-Nutzung der landwirtschaftlichen Nutzfläche dar. Damit sind für die Referenzsituation keine Einkommenseffekte unterstellt. Es ergäben sich deutlich andere Effekte, wenn durch den Biomasse-Anbau entsprechend Nahrungsmittelproduktion und damit u. U. sogar tierische Veredelung verdrängt würde. Damit wären in jedem Falle Netto-Arbeitsplatzverluste zu verzeichnen. Inwieweit sich die Einkommenseffekte unter dieser genannten Referenzsituation entwickeln würden, hängt sehr stark von der Situation auf den entsprechenden Nahrungsmittelmärkten und fossilen Energiemärkten ab. Ein Gesamt-Markt-Modell auf LP-Basis könnte diese Frage beantworten.

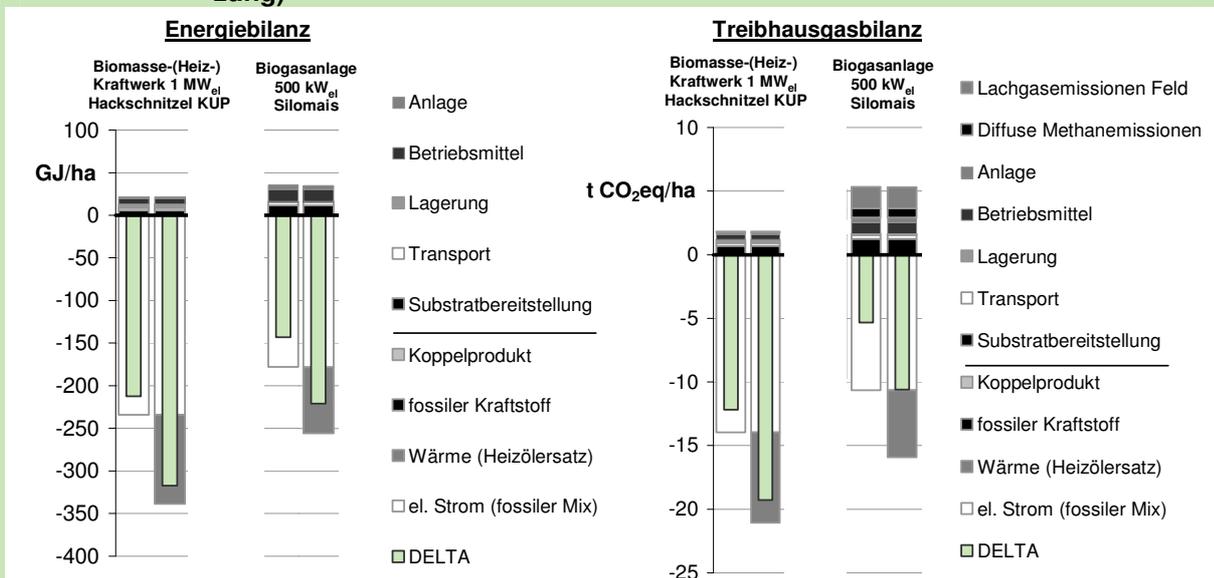
Netto-Einkommensbeiträge aus der Biomasseverwertung gegenüber einer fossilen Referenz können nicht ausgewiesen werden. Die tatsächlichen Gewinne der Unternehmen im fossilen Energiesektor sind kaum ableitbar. Darüber hinaus fließen bei Rohöl, Erdgas und Uran große Teile der Wertschöpfung in die Exportländer. Lediglich bei Braun- und Steinkohle werden heimische Einkommensbeiträge erzielt, die jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht analysiert werden können. Analog zur Situation der Bereitstellungskosten, die u. a. zur Berechnung der Treibhausgas-Vermeidungskosten herangezogen werden, verhalten sich auch die gesamten Einkommenseffekte aus dem landwirtschaftlichen und nicht-landwirtschaftlichen Anteil. Im Vergleich zum Referenzszenario der Nicht-Nutzung der Flächen kann der Sektor Landwirtschaft unter den übrigen getroffenen Annahmen bei jeder Art der thermischen Nutzung von Biomasse positive Einkommenseffekte erzielen. Anders sieht die Situation im nicht-landwirtschaftlichen Teil der Gesellschaft aus. Analog zur ökonomischen Vorteilhaftigkeit der fossilen Alternative der Wärmebereitstellung sind entsprechende negative Einkommenseffekte zu verzeichnen. Ganz deutlich wird dies bei den kleinen Biomasse-Heizkesseln unter den getroffenen Annahmen. Vor allem bei den Brennstoffen Getreidekorn aber auch Stroh überwiegen die nicht-landwirtschaftlichen negativen Einkommenseffekte deutlich über die positiven Effekte für die Landwirtschaft. Eine grundsätzlich positive Situation bezüglich landwirtschaftlicher und nicht-landwirtschaftlicher Einkommenseffekte ergibt sich bei den Heizwerken. Lediglich Heizwerke kleiner Kapazität, befeuert mit Stroh, verzeichnen negative regionale Einkommenseffekte in moderater Größenordnung. Die Befeuerung von Heizwerken mit Hackschnitzeln aus Kurzumtriebsplantagen lässt nach diesen Analysen vergleichsweise hohe Einkommenseffekte für die Region inklusive Landwirtschaft erwarten.

### 3.1.4.2 Elektrischer Strom

Die Analysen zur Erzeugung von elektrischem Strom aus Biomasse umfassen Kraftwerke, befeuert mit Hackschnitzeln von Pappel-Kurzumtriebsplantagen bzw. Getreidestroh. Einen zweiten Schwerpunkt stellt die Verstromung von Biogas dar. Als Gärsubstrate für die Biogaserzeugung wurden Gülle, Maissilage, Getreidekorn, Getreide-Ganzpflanzensilage (GPS) sowie Grassilage von normaler bzw. intensiver Bewirtschaftung näher analysiert. Die Bewirtschaftungsintensität von Grünland wird nach Schnitthäufigkeit und Düngungsintensität nach Nährstoffentzügen differenziert. Drei Schnitte entsprechen „normaler“, vier Schnitte der „intensiven“ Nutzung. Eine weitere Differenzierung findet zwischen den Extremszenarien von keiner Wärmenutzung bis hin zu maximal möglicher Wärmenutzung statt. Entsprechend ist für eine anteilige Wärmenutzung eine Interpolation möglich.

Die Ergebnisse sind von Anhangabbildung 23, Seite 238, bis Anhangabbildung 27, Seite 241 visualisiert. Exemplarisch werden in Abbildung 3-11 mit einem Biomasse-Kraftwerk und einer Biogasanlage wesentlichen Biomasse-Umwandlungspfade zur Erzeugung von elektrischem Strom herausgegriffen. Die Energie- und Treibhausgasbilanzen zu beiden Pfaden werden ohne und mit der Nutzung der auskoppelbaren Wärme betrachtet.

**Abbildung 3-11: Ergebnisse zu Energie- und Treibhausgasbilanz zu den Biomasse-Umwandlungspfaden Pappel-Hackschnitzel bzw. Silomais via Biogas zur Erzeugung von elektrischem Strom (Vergleich mit bzw. ohne Wärmenutzung)**



Quelle: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen

Die Unterschiede bezüglich des Einsparungspotenzials an fossilen Energieträgern bzw. Treibhausgasemissionen zwischen Heizkraftwerk und Biogasanlage werden ebenso deutlich wie die Bedeutung der Nutzung der auskoppelbaren Wärme. Die Nettoeinsparung von fossilen Primärenergieträgern durch die Stromerzeugung aus Biomasse liegt bei den Heizkraftwerken, befeuert mit Holz oder Stroh bei ca. 90 Prozent. Der wesentliche Unterschied zwischen Holz-

hackschnitzeln zu Stroh liegt vor allem im unterschiedlichen Hektarertrag pro Jahr, welcher bei Stroh etwa halb so hoch ist wie der rechnerische jährliche Durchschnittsertrag von Pappel-Kurzumtriebsplantagen. Die Aufwendungen zur Hackschnitzelerzeugung und -bereitstellung sind deutlich höher als die zur Strohbergung. Dies liegt an der Tatsache, dass das Stroh als Koppelprodukt anfällt und entsprechend lediglich die direkt zuordenbaren Aufwendungen veranschlagt werden.

Die Einsparungspotenziale bei Biogasanlagen sind nicht derart homogen und liegen im Bereich von ca. 60 bis 80 Prozent. Bei Biogasanlagen sind deutliche Effekte bezüglich der Größenordnung, ausgedrückt in Kilowatt elektrischer Leistung zu erkennen. Kleine Biogasanlagen erzielen in der Regel niedrige elektrische Nutzungsgrade, was sich aus einer vergleichsweise ineffizienten Verstromung des Biogases ergibt. Mit steigender Größenordnung steigt der elektrische Nutzungsgrad und damit verbessert sich entsprechend die Energiebilanz. Vor diesem Hintergrund sind kleinere Anlagen nur bei entsprechend hohem Nutzungsgrad zu rechtfertigen. In der Größenordnung von etwa 500 Kilowatt bis ein Megawatt elektrischer Leistung stagnieren die positiven Degressionseffekte. Es wirken unter anderem die Effekte höherer Transportentfernungen. Die Gülle-basierten Biogas-Verfahren wurden mittels der nach Düngeverordnung vorgegebenen Grenzen auf die landwirtschaftliche Nutzfläche bezogen.

Im Vergleich zum Anteil der eingesparten Primärenergie durch Wärmeauskopplung wird durch die Erzeugung von elektrischem Strom sehr viel an fossilen Primärenergieträgern eingespart. Dies liegt am elektrischen Wirkungsgrad der Kraftwerke, welcher bei etwa 40 Prozent liegt (MACHAT und WERNER 2007), während der thermische Wirkungsgrad vieler Heizanlagen über 80 Prozent liegt. Die effiziente Wärmenutzung kann damit einen nennenswerten Beitrag zur Energieeinsparung liefern.

Bei genauerem Vergleich der verschiedenen Gärsubstrate zur Biogaserzeugung fällt der Silomais als ergiebigste Kultur auf. Die leistungsstarke C4-Pflanze kann mit dem meist knappen Regenwasser am meisten Biomasse während der Vegetationsperiode bilden. Die Biomasse wiederum bildet die Basis für die Biogasausbeute je Flächeneinheit.

Annähernd gleich zur Einsparung von fossilen Energieträgern verhalten sich im direkten Vergleich die Einsparungseffekte an Treibhausgasemissionen, wie dies in Anhangabbildung 24 auf Seite 239 ersichtlich ist. Energieeffiziente Verfahren zeichnen sich auch durch hohe Netto-Einsparungen an Treibhausgasen fossiler Herkunft aus. Die Heizkraftwerke erreichen Einsparungseffekte von über 80 Prozent an fossilen Treibhausgasen. Wesentlich weniger können die Biogasanlagen verzeichnen. Der düngungsintensive Anbau der Biomasse mit den entsprechenden Lachgasemissionen sowie die zweimalige Umwandlung der Biomasse zunächst in Gas mit gewissem Methanschluß und im zweiten Schritt in den gewünschten Strom führen zu entsprechenden Verlusten, die sich auch in der Treibhausgasbilanz niederschlagen. Damit erstreckt sich das Einsparungspotenzial in einer Bandbreite zwischen 25 und 80 Prozent. Auch hier spielt die von der Größenordnung abhängige Effizienz des BHKW's

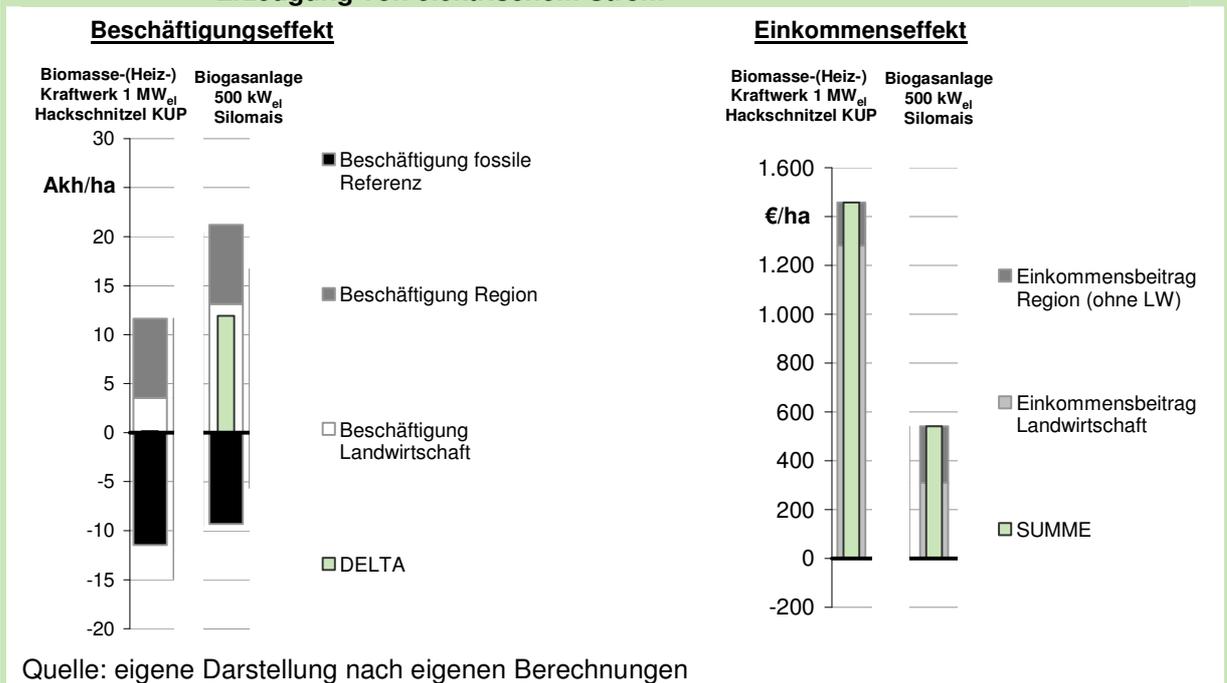
eine wesentliche Rolle. Die Nutzung der entstehenden und nutzbaren Abwärme liefert einen erheblichen Beitrag, die Treibhausgasbilanz zu verbessern.

Insgesamt verursachen die meisten Verfahren der Stromerzeugung aus Biomasse mittlere bis hohe Treibhausgas-Vermeidungskosten (Anhangabbildung 25, Seite 240). Lediglich mit Biomasse befeuerte Kraftwerke mit hoher Abwärmenutzung können vergleichsweise niedrige Vermeidungskosten verzeichnen. Bei der Biogaserzeugung und Verstromung wird ebenfalls ein großer Effekt der Senkung der Vermeidungskosten durch die Wärmenutzung sichtbar. Bei reiner Verstromung des Biogases liegen die Treibhausgas-Vermeidungskosten bei rund 500 Euro je Tonne Treibhausgase. Würde theoretisch die komplette auskoppelbare Wärme genutzt, so könnten die Vermeidungskosten auf deutlich unter 150 Euro je Tonne Treibhausgase sinken. Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass die Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern im deutschen Strommix sehr günstig ist. Es ist anzunehmen, dass die tatsächlichen Herstellungskosten noch unter den in vielen Studien veranschlagten vier bis sechs Eurocent liegen (SCHNEIDER 1998; GEIGER et al. 2004; FRITSCHKE et al. 2007b). Die Autoren dieser Studien müssen stets auf Daten zurückgreifen, die vom engen Oligopol der Stromerzeuger preisgegeben werden. Die Stromerzeuger werden jedoch kaum die tatsächlichen Herstellungskosten bzw. die enthaltenen Gewinnmargen preisgeben, um eine öffentliche Diskussion mit Verbraucherschützern zu vermeiden. Tendenziell werden unter diesen Annahmen die Treibhausgasvermeidungskosten der Stromerzeugung aus Biomasse eher zu niedrig ausgewiesen. Wird jedoch der Teil an Kraftwerken in Deutschland einbezogen, der mittlerweile abgeschrieben ist und dem eine Erneuerung bevorsteht, so verändert dies die Kalkulation der Herstellungskosten von elektrischem Strom fossiler Herkunft in die andere Richtung. Unter diesen Umständen lägen die Treibhausgasvermeidungskosten der Stromerzeugung aus Biomasse unter den hier ermittelten.

Analog zu Energie- und Treibhausgasbilanz werden durch die Erzeugung von elektrischem Strom aus Biomasse Arbeitsplätze aus dem fossilen Stromsektor verdrängt. Diese Verdrängung wird jedoch durch die neu geschaffenen Beschäftigungsmöglichkeiten mehr als überkompensiert. Im Vergleich zur Wärmeerzeugung liegt bei der Stromerzeugung aus Biomasse ein nennenswerter Anteil der Beschäftigung im Sektor Landwirtschaft. Wird die Biogasanlage von Landwirten betrieben, so kann die Beschäftigung nahezu komplett dem Sektor Landwirtschaft zugeschrieben werden. Für die Landwirtschaft schlägt die aufwändige Biomassebereitstellung inklusive Transport bei der Beschäftigung zu Buche. Es wird aus Abbildung 3-12 und Anhangabbildung 26 auf Seite 241 deutlich, dass Heizkraftwerke, befeuert mit Biomasse, wesentlich arbeitsexensiver zu betreiben sind als Biogasanlagen. Dies liegt u. a. an den unterschiedlichen Bereitstellungsketten der Biomasse mit unterschiedlichen Anforderungen an Transport und Lagerung. Darüber hinaus stellt die Verstromung der Biomasse über Biogas einen zweistufigen Prozess mit biologischer Stufe dar, der entsprechend Arbeitszeit beansprucht. Die Unterschiede bei den Beschäftigungseffekten zwischen den einzelnen betrachteten Biogas-Substraten resultieren aus den unterschiedlichen Biomasse-Erträgen. Mit steigen-

dem Biomasseertrag wird ein größerer Teil der Biogasanlagenkapazität an ein Hektar landwirtschaftliche Nutzfläche gebunden, was zu entsprechender Beschäftigung führt. Damit erstreckt sich die Nettobeschäftigung von nahezu Null bis auf über 20 Arbeitsstunden je Hektar und Jahr. Abgesehen vom Gärsubstrat Gülle erzielt die Biogaserzeugung Nettobeschäftigungen zwischen 10 und über 15 Stunden. Demgegenüber sind die Netto-Beschäftigungseffekte bei Heizkraftwerken nur sehr gering. Es werde in entsprechender Größenordnung Arbeitsplätze im fossilen Energiesektor verdrängt.

**Abbildung 3-12: Ergebnisse zum Beschäftigungs- und Einkommenseffekt zu den Biomasse-Umwandlungspfaden Pappel-Hackschnitzel bzw. Silomais via Biogas zur Erzeugung von elektrischem Strom**



Ein völlig anderes Bild ergibt sich bei der Betrachtung der Netto-Einkommenseffekte (Abbildung 3-12 und Anhangabbildung 27, Seite 242). Auch hier steht als Referenzszenario die Nicht-Nutzung der Flächen. Die Verstromung des Festbrennstoffs Pappel-Hackschnitzel fällt hierbei auf. Der vergleichsweise hohe Einkommenseffekt je Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche kommt zustande durch die vergleichsweise geringen Bereitstellungskosten der Hackschnitzel. Es fällt je Hektar nur circa die Hälfte der Vollkosten an wie bei Bereitstellung von Getreidekorn. Die Erntemenge an Hackschnitzeln liegt mit durchschnittlich zehn Tonnen atro je Hektar und Jahr jedoch über dem Trockenmasseertrag von Weizen mit 6,6 Tonnen. Es gilt noch zu beachten, dass mit 300 Euro je Hektar nur moderate Nutzungskosten der landwirtschaftlichen Nutzfläche veranschlagt wurden. Entsprechend günstige Bereitstellungskosten des Brennstoffs Holz mit den vom EEG vorgegebenen Vergütungssätzen für den erzeugten elektrischen Strom ermöglichen die ermittelten Einkommenseffekte. Im Vergleich zu den Hackschnitzeln fallen die Einkommenseffekte beim Brennstoff Stroh gering aus. Stroh fällt

zwar als Koppelprodukt an, es muss jedoch jährlich mit entsprechendem Aufwand bei lediglich halb so hohem jährlichen Trockenmasseertrag geerntet werden. Damit kann der Einkommenseffekt nicht hoch ausfallen. Bei der Stromerzeugung über Biogas sind wieder die schon genannten Effekte hinsichtlich unterschiedlicher Ertragsleistung der Kulturen sowie die steigenden elektrischen Nutzungsgrade bei steigender Anlagenkapazität erkennbar. Bei der Nutzung von nicht überdurchschnittlich ertragreichem Grünland übersteigen die Erntekosten den Wert des Grüngutes, wodurch der Bereich Landwirtschaft negative Einkommenseffekte zu verzeichnen hat. Generell steckt im Grünland ein geringeres Einkommenspotenzial als im Ackerland. Wegen der weitestgehend geschlossenen Nährstoffkreisläufe treten als wesentliche Kostenpositionen vor allem die Kosten der Mechanisierung auf. Die Grünlandnutzung erfordert mehrere Erntetermine bei nicht höheren Erträgen als der Anbau von Silomais. Die etwas geringeren Nutzungskosten des Grünlands gegenüber dem Ackerland können die Mehrkosten der Mechanisierung bei weitem nicht kompensieren. Getreide-GPS schneidet vor allem wegen höherem Biomasseertrag günstiger ab als das Getreidekorn alleine als Biogassubstrat. Mit 500 bis 550 Euro liefert der Silomais den höchsten Einkommensbeitrag der von landwirtschaftlichen Nutzflächen stammenden Biogassubstrate. Auf für Pappel günstigen Flächen mit niedrigen Nutzungskosten bezüglich alternativer Nutzungsmöglichkeiten können deutlich über 1.000 Euro Einkommenseffekte mit der Verstromung mit und ohne Wärmeauskopplung je Hektar erzielt werden. Die Option der Wärmeauskopplung und Nutzung erfordert entsprechende Infrastruktur, deren Kosten gerade durch die Wärmeverwertung aufgefangen werden. Sollten die fossilen Energiepreise extrem steigen, so bringt dies dann zusätzliche positive Einkommenseffekte für die Wärmenutzung mit sich.

### 3.1.4.3 Biokraftstoffe

Im Gegensatz zur Wärme bzw. dem elektrischen Strom stellen die Biokraftstoffe gespeicherte und gezielt abrufbare Energie dar. Die hohe Energiedichte in flüssiger Form, die einen relativ unkomplizierten Umgang ermöglicht, macht die Kraftstoffe vor allem interessant für den Mobilitätssektor. Die große Heterogenität der Pflanzenwelt mit verschiedenen Stoffgruppen an Inhaltsstoffen bietet eine breite Basis für verschiedene Biokraftstoffe, die ähnliche Eigenschaften aufweisen wie die fossilen Pendanten. Pflanzenöl und Pflanzenölmethylester (Biodiesel) ersetzen Diesel, Bioethanol aus Zuckerrüben oder Getreide wird als Benzinersatz verwendet. Der Dieselerersatz Biomass to Liquid (BtL) wird aus Pappel-Hackschnitzel modelliert, da dies derzeit der einzig praktikable Biomasserohstoff ist. Aufgrund der vielseitigen Einsatzmöglichkeiten wird Biomethan aus verschiedensten Biomasserohstoffen und über verschiedenste Reinigungsverfahren mit in die Reihe der Biokraftstoffe aufgenommen.

Die in Anhangabbildung 28, Seite 243, bis Anhangabbildung 32, Seite 247, dargestellten Verwertungspfade weisen durchwegs eine positive Energiebilanz auf. D. h. es werden durch die Bereitstellung und Nutzung der Biokraftstoffe fossile Energieträger eingespart. Dies gilt jedoch nicht generell für alle Biokraftstoffe bzw. die zugehörigen Herstellungsverfahren. Die

Energieeinsparpotenziale (Anhangabbildung 28, Seite 243) sind entsprechend dem Aufwand der Herstellung der Biokraftstoffe verschieden. Sie liegen in den vorliegenden Ergebnissen zwischen 20 und 90 Prozent. Dabei weist Ethanol, erzeugt aus Zuckerrüben, die niedrigsten Einsparpotenziale auf. Dies liegt zum einen an der energieaufwändigen Ethanolherstellung an sich. Zum zweiten fällt die Gutschrift für das Koppelprodukt Zuckerrübennassschnitzel bei weitem nicht so günstig aus, wie z. B. die Gutschrift für das Eiweißfuttermittel DDGS als Substitut für Sojaextraktionsschrot bei Ethanolherstellung aus Getreide. Hier liegen die Einsparpotenziale bei rund 50 Prozent. Eine ähnliche Größenordnung fossiler Primärenergieträger kann bei der Bereitstellung und Nutzung von Biomethan eingespart werden. Bei Pflanzenöl und Biodiesel liegt das Einsparungspotenzial bei ca. 85 Prozent, vor allem wegen dem vergleichsweise geringen Energiebedarf und der Gutschriften der anfallenden Koppelprodukte, wie Eiweißfuttermittel. Nach den Literaturdaten zur BTL-Herstellung bestehen trotz hoher Transportaufwendungen Energieeinsparungspotenziale in Höhe von rund 90 Prozent. Dies ist begründet mit einem endothermen Prozess, der lediglich in der Anfahrphase der Anlage mit enormem Energieaufwand angestoßen werden soll. Jedoch beruhen diese Kalkulationsgrundlagen auf bisherigen Versuchsergebnissen, die noch nicht in einer großtechnischen Anlage realisiert werden konnten (vgl. CHOREN INDUSTRIES 2007, 2011 und 2012). Durch entsprechende Gutschriften aus verdrängten fossilen Energieträgern sowie Substituten (Koppelprodukte) ergeben sich durchwegs positive Energiebilanzen. Es wird somit generell fossile Primärenergie eingespart. Für die Biomethanherzeugung wurde in den Darstellungen das so genannte BCM-Verfahren herangezogen, welches sich durch geringen Methanschlupf und damit eine vertretbare Treibhausgasbilanz auszeichnet (Anhangabbildung 29, Seite 217). Die DWW und PSA-Verfahren haben eine ungünstigere Treibhausgasbilanz, die v. a. wegen relativ hohem Methanschlupf zustande kommt. Die Rangfolge der Energiebilanzen bleibt bei den Treibhausgasbilanzen bestehen, wenngleich in unterschiedlichem Maße Methan- und Lachgasemissionen hinzukommen. Intensive Kulturen wie Weizen, Mais oder Zuckerrüben weisen entsprechende Lachgasemissionen auf. Bei der Verwertung der Biomasse zu Biogas erscheinen zusätzlich Methanemissionen. Damit beschränkt sich das Treibhausgaseinsparungspotenzial auf maximal 30 Prozent bei der Bereitstellung von Biogas im Vergleich zur Nutzung des fossilen Substitutes Erdgas. Bei Pflanzenöl und Biodiesel liegen die Einsparpotenziale zwischen 60 und 70 Prozent. Ein weit differenzierteres Bild ergeben die verschiedenen Verfahren zur Ethanolherstellung. Ethanol aus Zuckerrüben trägt lediglich zu 10 bis 25 Prozent, Ethanol aus Weizen zu 25 bis 40 Prozent Treibhausgaseinsparung bei. Demgegenüber ergeben die Analysen zu BtL Einsparpotenziale von über 80 Prozent. Entsprechend zu den Treibhausgasvermeidungspotenzialen ergeben sich für die Treibhausgasvermeidungskosten große Unterschiede zwischen rund 50 und 5.000 Euro je Tonne Treibhausgase (Anhangabbildung 30, Seite 245). Basis der Berechnung sind die eingesparten Mengen an Treibhausgasemissionen sowie die Bereitstellungskostendifferenz zum fossilen Pendant, wobei als vergleichbare Bezugseinheit ein „Megajoule“ (MJ) Treibstoff gewählt wurde. Bezüglich Treibhausgasvermei-

dungskosten liegen Pflanzenöl und Biodiesel mit unter 50 bis 150 Euro je Tonne Treibhausgase an der Spitze der Biokraftstoffe, gefolgt von BtL im Bereich zwischen 300 und 500 Euro. Eine sehr große Bandbreite an möglichen Treibhausgasvermeidungskosten nehmen die Verfahren der Biomethanbereitstellung ein. Diese Bandbreite lässt sich durch die Verschiedenheit der Verfahren sowie durch die unterschiedlichen Einsatzstoffe erklären. Vergleichsweise hohe Treibhausgasvermeidungskosten ergeben sich bei Bioethanol im Bereich zwischen 300 und 1.300 Euro je Tonne Treibhausgase. Diese sind ähnlich den Verfahren der Biomethanherzeugung u. a. in den vergleichsweise geringen Emissionseinsparungen an Treibhausgasen begründet.

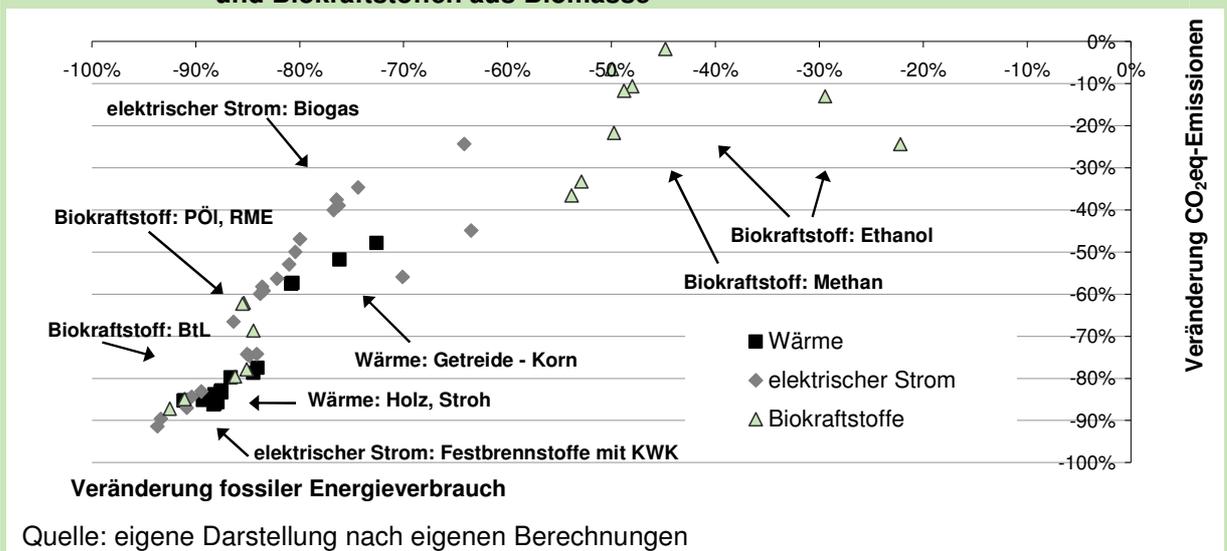
Die Beschäftigungseffekte der Bereitstellung von Biokraftstoffen, dargestellt in Anhangabbildung 31 auf Seite 246, erstrecken sich zwischen sieben und 30 Arbeitskraftstunden pro Hektar Biomassefläche. Arbeitsintensiv stellen sich vor allem Transport-intensive Verfahren wie die Ethanol-Erzeugung aus Zuckerrüben oder die zentrale BtL-Erzeugung aus Pappel-Hackschnitzeln dar. Hierbei nehmen die Aufwendungen für den Biomassetransport nennenswerte Beträge ein. Das zentrale BtL-Verfahren nach Choren erfordert ein Vierfaches des Transportaufwandes für die Biomasse im Vergleich zum dezentralen FZK-Konzept. Demgegenüber ist der Verarbeitungsprozess der Biomasse zum Treibstoff BtL nach FZK-Konzept mehr als doppelt so arbeitsintensiv als nach Choren-Verfahren. Insgesamt sind die Ergebnisse zu BtL mit Vorsicht zu behandeln, da sie lediglich auf Planungsdaten beruhen, die bisher noch in keiner großtechnischen Anlage bestätigt werden konnten. Die Beschäftigungseffekte der übrigen Biotreibstoffbereitstellungsverfahren entsprechen im Bereich Landwirtschaft üblichen effizienten Arbeitserledigungszeiten für die einzelnen Produktionsverfahren. Die zur Gewinnung der Biokraftstoffe aus den Biomasserohstoffen notwendige Arbeitskraft ergibt sich aus Literaturdaten.

Die Einkommenseffekte der Biotreibstoffbereitstellung (Anhangabbildung 32, Seite 247) zeigen bei der BtL-Erzeugung auf Basis von Hackschnitzeln aus Kurzumtriebsplantagen mit rund 1.600 Euro je Hektar hohe Beträge. Diese Höhe der Einkommenseffekte lässt sich ebenso erklären, wie dies schon im Kapitel der Bereitstellung von elektrischem Strom erfolgte. Den Hackschnitzeln folgen die Zuckerrüben zur Ethanolgewinnung mit etwas über 700 Euro je Hektar. Dabei schlägt vor allem die Ernte und Transportlogistik stark zu Buche. Die Rapsbasierten Biokraftstoffe erzielen wie Bioethanol aus Getreide Einkommenseffekte zwischen 200 und 400 Euro je Hektar. Die Einkommenseffekte der Biomethanherstellung sind sehr heterogen, wobei sich Biomethan aus Silomais mit knapp 600 Euro je Hektar auszeichnet. Mit Grünland können circa 200 Euro je Hektar erzielt werden, worin sich der vergleichsweise hohe Arbeitszeitbedarf der Ernte widerspiegelt. Die Gülle-basierten Verfahren können in den Vergleich nicht einbezogen werden, da der Flächenbezug lediglich über die Vorgaben der Düngeverordnung hergestellt wurde.

### 3.1.5 Vergleich Wärme, elektrischer Strom und Biokraftstoffe

Nach der isolierten Betrachtung von Wärme, elektrischem Strom und Biokraftstoffen aus Biomasse werden im Folgenden die drei Produktgruppen anhand mehrerer Parameter verglichen. Abbildung 3-13 stellt den vergleichenden Zusammenhang zwischen dem Einsparungspotenzial an fossilen Energieträgern und dem Vermeidungspotenzial an Treibhausgasemissionen dar. Am effizientesten bezüglich Energie- und Treibhausgasemissionseinsparung sind Wärme bzw. gekoppelte Strom- und Wärmeproduktion aus Festbrennstoffen wie Holz und Stroh. Die Daten zu BtL sind mit Vorsicht zu genießen, da die zugrunde liegenden Planungsdaten bisher nicht realisiert und damit bestätigt werden konnten. Wärmegewinnung aus dem Festbrennstoff Getreidekorn stellt sich weniger effizient dar, da mit Treibhausgasemissionen verbundener Energieeinsatz zur Brennstoffbereitstellung notwendig ist.

**Abbildung 3-13: Vergleich der Zusammenhänge zwischen Einsparung fossiler Energie und Treibhausgasemissionseinsparung zwischen Wärme, elektrischem Strom und Biokraftstoffen aus Biomasse**

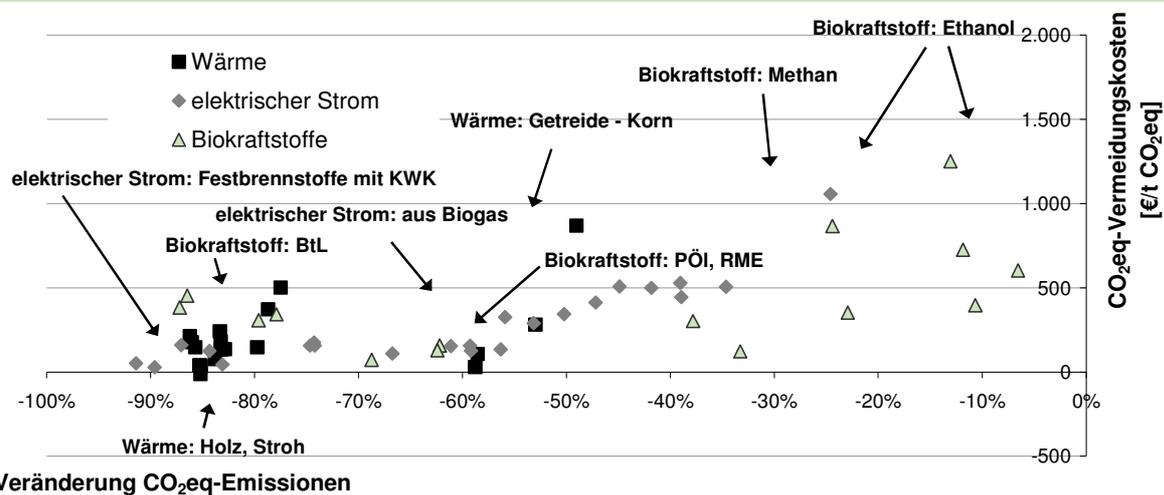


Die Erzeugung von elektrischem Strom über das Zwischenprodukt Biogas umfasst ein weites Spektrum von Energie- und Treibhausgasemissionseinsparung, wobei jedoch die beiden Parameter eng korrelieren. Je nach Einsatzstoff und nach Effizienz der Anlage ergeben sich günstige bzw. ungünstigere Ergebnisse. Sehr günstig fallen die Bilanzen aus bei der Vergärung von Reststoffen, hier repräsentativ am Substrat Gülle analysiert. Es folgen masseertragsreiche Biomasserohstoffe. Am ungünstigsten stellen sich masseertragsschwache, aber aufwändige Biomasserohstoffe als Substrate dar. Die große Heterogenität der Biokraftstoffe spiegelt sich auch in den Ergebnissen wieder. Auch hier korreliert der Energieaufwand zur Bereitstellung sehr stark mit den Treibhausgasemissionen, so dass energieintensive Biokraftstoffe wie z. B. Bioethanol auch nur geringe Treibhausgasemissionseinsparungen verzeichnen können. Die Besonderheit des unter die Biokraftstoffe eingeordneten Biomethans stellen die

nicht vermeidbaren Methanemissionen dar, die die Treibhausgaseinsparungspotenziale überproportional reduzieren.

In Abbildung 3-14 folgt die Betrachtung des Zusammenhanges zwischen Treibhausgasemissionsvermeidung und den zugehörigen Vermeidungskosten. Tendenziell führt ein hohes Vermeidungspotenzial auch zu geringen Vermeidungskosten. Umgekehrt können jedoch bei geringem Einsparungspotenzial niedrige als auch hohe Vermeidungskosten resultieren. Hier schlägt der Effekt der Kostendifferenz viel stärker durch. Sehr effizient in beiderlei Hinsicht stellt sich auch hier die Wärme- bzw. gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung dar, wobei die in der Anschaffung je Leistungseinheit teureren Kleinanlagen zu höheren Vermeidungskosten führen.

**Abbildung 3-14: Vergleich der Zusammenhänge zwischen Treibhausgasemissionseinsparung und Treibhausgasvermeidungskosten zwischen Wärme, elektrischem Strom und Biokraftstoffen aus Biomasse**



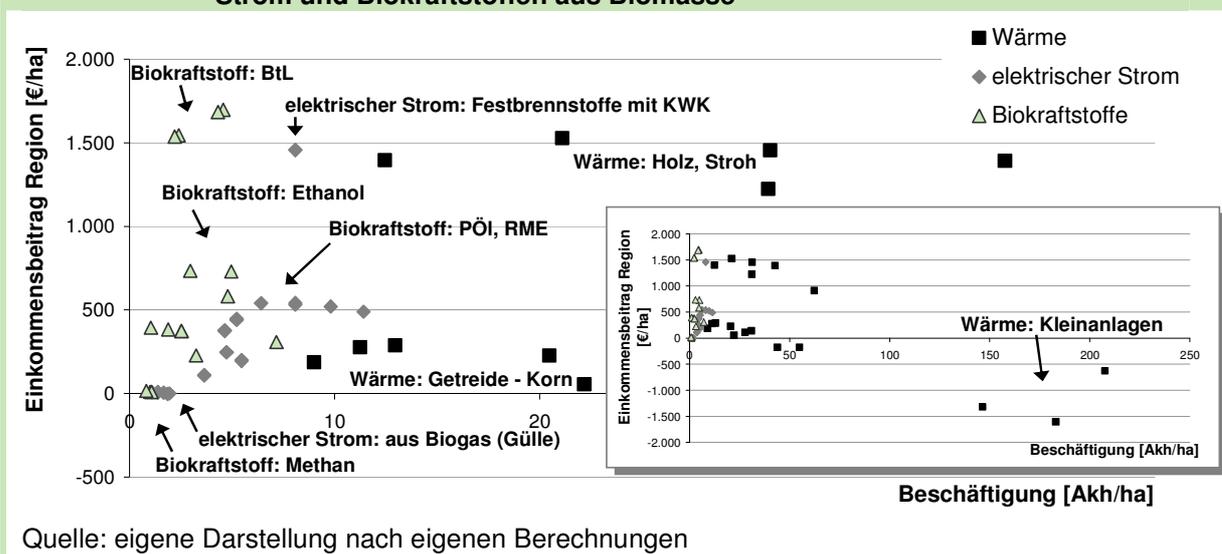
Quelle: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen

Die größte Streuung ergibt sich bei den Biokraftstoffen. Die sehr effizient erscheinenden Ergebnisse zu BtL spiegeln nur Planungsdaten wider. Durch die geringen Treibhausgasemissionsvermeidung bei der Bioethanolproduktion bei vergleichsweise hohen Bereitstellungskosten ergeben sich entsprechend hohe Treibhausgasvermeidungskosten.

Inwieweit nun die Erzeugung von Energieträgern aus Biomasse zu Beschäftigung und Einkommen in der Region beitragen kann, wird in Abbildung 3-15 zusammengefasst. Gerade bei der Wärmebereitstellung aus Biomasse fällt eine große Streuung der Ergebnisse auf. Je kleiner die Anlagenkapazität ist, ein desto höheres Beschäftigungspotenzial ergibt sich, welches gerade bei kleineren Anlagen nur ein theoretisches darstellt. Die Höhe des Einkommensbeitrages ist abhängig vom Brennstoff. So liefern die Brennstoffe Holz und Stroh deutlich höhere Einkommensbeiträge als der Brennstoff Getreidekorn. Auch hier fallen die sehr positiven Ergebnisse zu BtL auf, welche jedoch in der Praxis noch nicht bestätigt wurden. Insgesamt geringere Beschäftigungs- und Einkommenspotenziale weisen alle übrigen Biokraftstoffe auf.

Biomethan erzeugt mit am wenigsten Beschäftigung und lässt auch geringe Einkommenseffekte erwarten. Dies ist u. a. im Erdgaspreis begründet, der derzeit noch viel zu weit entfernt ist von den derzeitigen Bereitstellungskosten von Biogas in Erdgasqualität. Ein weiterer Aspekt bezieht sich auf die Konzernstrukturen mit entsprechender Beteiligungsfinanzierung zu Konditionen, die Gewinne aus der Region fließen, aber realisierte Verluste die Region tragen lassen. Demgegenüber vergleichsweise hohe Beschäftigungsraten bei sehr hohem Einkommensbeitrag je Flächeneinheit ergeben sich bei der gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung aus Festbrennstoffen.

**Abbildung 3-15: Vergleich der Zusammenhänge zwischen Treibhausgasemissionseinsparung und Treibhausgasvermeidungskosten zwischen Wärme, elektrischem Strom und Biokraftstoffen aus Biomasse**



Damit lässt sich als Fazit der vergleichenden Betrachtungen zusammenfassen, dass hohe Ausnutzungsgrade bei möglichst wenigen Konversionsschritten am effizientesten sind in vielerlei Hinsicht. Konversion kostet neben Geld und Energie auch Umweltbelastung durch Emissionen, was zum Teil auch auf entsprechende Konversionsverluste zurückzuführen ist.

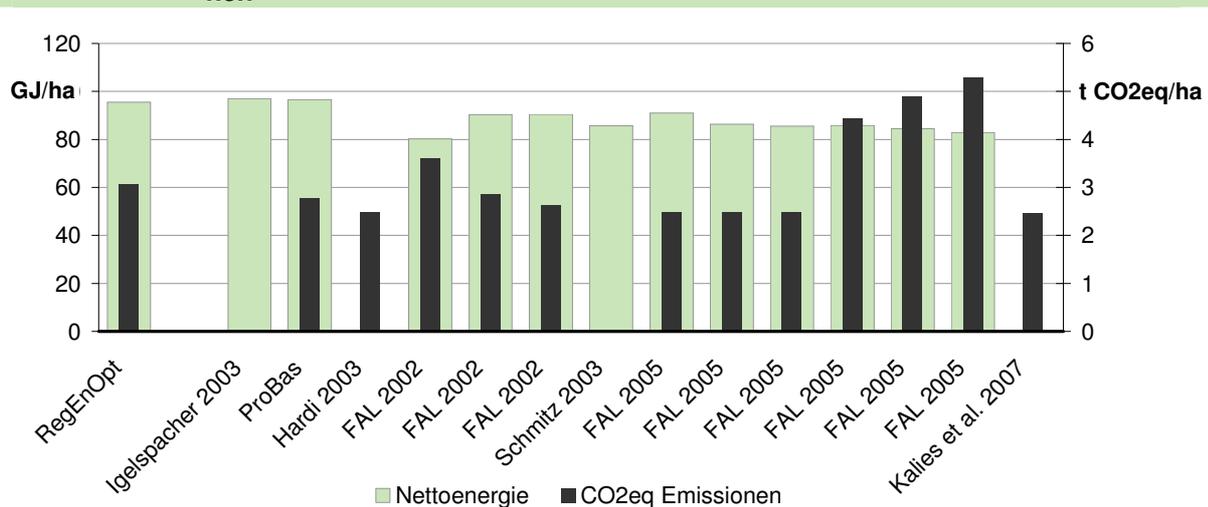
### 3.1.6 Validierung der Ergebnisse zu den Umwandlungspfaden

Ein Ziel dieser Arbeit ist die vergleichende Analyse der verschiedenen Biomasseumwandlungspfade auf einheitlicher Datengrundlage. Zur Validierung der mittels des Modells „RegEnOpt“ abgeleiteten Ergebnisse zu Energie- und Treibhausgasbilanzen sollen einzelne Ergebnisse mit Literaturdaten verglichen werden. Da in bisherigen Studien die Nährstoffkreisläufe nicht derart berücksichtigt wurden wie in dieser vorliegenden Arbeit, gehen hier die Biomassebereitungsverfahren aus dem „RegEnOpt“ ohne Nährstoffkreislauf ein. Es wird analog zu den bisherigen Ökobilanzen zu Biomassebereitstellung völlige mineralische Düngung unterstellt.

Die weit verbreitetste analysierte Kultur stellt der Winterweizen dar. Aufgrund dessen erfolgt der detaillierte Methoden-Check anhand dieser Kultur (Abbildung 3-16). Weitere Kulturen werden im Folgenden ebenso mit vorhandenen Literaturdaten verglichen.

Aufgrund unterschiedlicher Ertragsniveaus in Dezitonnen Frischmasse je Hektar werden die Ergebnisse der Literaturdaten auf das Ertragsniveau von 7,7 Tonnen Frischmasse Winterweizen je Hektar im „*RegEnOpt*“ skaliert, um Vergleichbarkeit herzustellen. Häufig fehlen in den Literaturdaten genaue Aufschlüsselungen der Energie-Inputs und Treibhausgasemissionen auf einzelne Positionen wie Saatgut, Dünger, Pflanzenschutz, Treibstoffe und Mechanisierung, so dass keine ertragsabhängigen und ertragsunabhängigen Positionen isoliert werden können. Der kleine Fehler bei der Skalierung auf das Ertragsniveau des „*RegEnOpt*“ muss somit hingenommen werden.

**Abbildung 3-16: Vergleich „*RegEnOpt*“-Ergebnis zum Anbau Winterweizen mit auf „*RegnOpt*“-Ertragsniveau normierten Ergebnissen aus Literaturstellen bezüglich Nettoenergieertrag und korrespondierenden Treibhausgasemissionen**



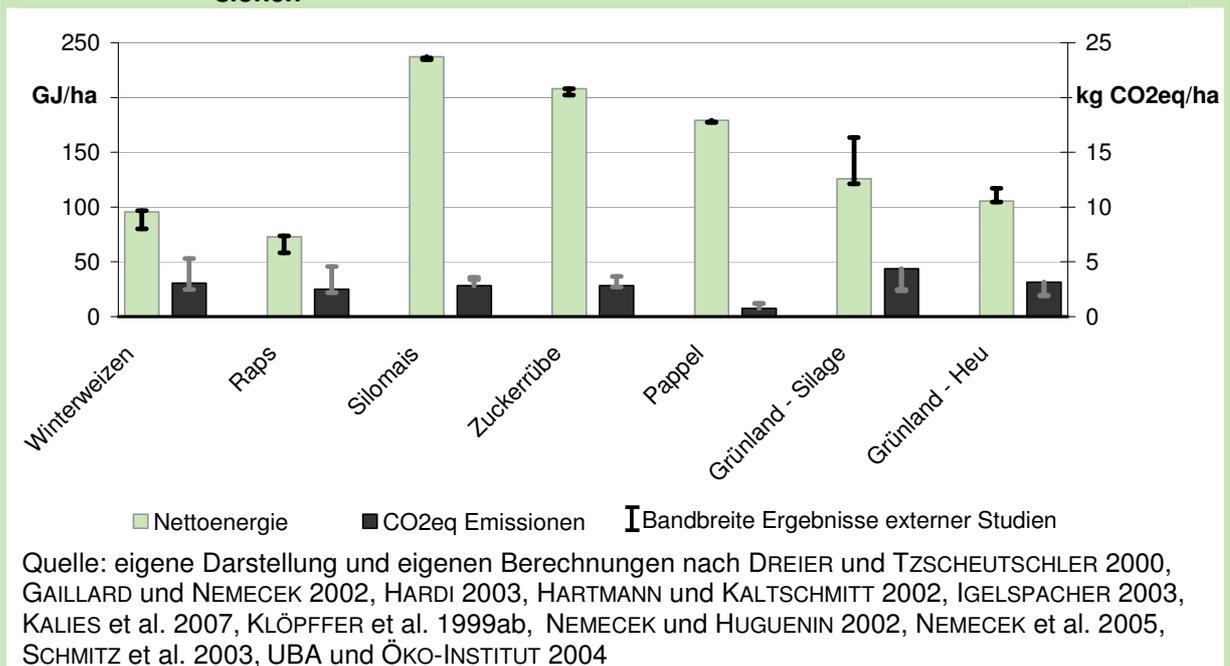
Quelle: eigene Darstellung und eigenen Berechnungen nach GAILLARD und NEMECEK 2002, HARDI 2003, IGELSPACHER 2003, KALIES et al. 2007, NEMECEK et al. 2005, SCHMITZ et al. 2003, UBA und ÖKO-INSTITUT 2004

Aus Abbildung 3-16 wird deutlich, dass sich die Energiebilanzen der einzelnen Literaturstellen im Ergebnis weitgehend ähneln. Die Ergebnisse zu den Treibhausgasemissionen weisen vergleichsweise große Unterschiede auf, wobei das „*RegEnOpt*“-Ergebnis mit rund drei Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent inklusive der bodenbürtigen Lachgasemissionen in der Mitte der Bandbreite der Ergebnisse aus Literaturangaben rangiert. Wesentliche Ursachen für die Abweichungen sind mit unterschiedlichen Kennzahlen zu den Inputs sowie mit unterschiedlichen Systemgrenzen zu erklären.

Neben der Kultur Winterweizen werden auch die „*RegEnOpt*“-Ergebnisse anderer Kulturen mit Ergebnissen anderer Studien verglichen (Abbildung 3-17). Analog zur ausführlichen Betrachtung des Winterweizens fällt bei den anderen Kulturen auf, dass die Nettoenergieer-

träge je Flächeneinheit sich deutlich weniger unterscheiden, als die Treibhausgasemissionen. Bei Betrachtung der Kennzahl Nettoenergie je Hektar liegen die *RegEnOpt*-Ergebnisse innerhalb der Bandbreite der Literatur-Ergebnisse. Bei Betrachtung der Treibhausgasemissionen liegen die Emissionen nach Literaturangaben über dem „*RegEnOpt*“-Ergebnis, bei der Grünlandbewirtschaftung unter dem „*RegEnOpt*“-Ergebnis. Bei Raps führt der im „*RegEnOpt*“ eingeführte kulturspezifische Korrekturfaktor für die Lachgasemissionen zu diesem Effekt. Bei der Grünlandbewirtschaftung liegen Literaturergebnisse vor, denen ein deutlich höherer Ertrag als im „*RegEnOpt*“ angenommen zugrunde liegt. Durch die Skalierung der flächenbezogenen Emissionen proportional zum Ertrag ergeben sich die dargestellten niedrigen Werte. Würden die Literaturangaben unabhängig vom Ertragsniveau herangezogen so lägen die Emissionswerte mit 2,5 bis 3,8 Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalent je Hektar im Bereich der „*RegEnOpt*“-Ergebnisse.

**Abbildung 3-17: Vergleich „*RegEnOpt*“-Ergebnisse zum Anbau verschiedener Kulturen mit auf „*RegEnOpt*“-Ertragsniveau normierten Ergebnissen aus Literaturstellen bezüglich Nettoenergieertrag und korrespondierenden Treibhausgasemissionen**



Die nach einheitlichem Ansatz ermittelten und nachvollziehbaren Ergebnisse mittels „*RegEnOpt*“ liegen im Bereich der Ergebnisse anderer Studien. Damit werden einheitlich bewertete Biomasserohstoffe für die weitere Verwendung in den Biomasse-Nutzungspfaden herangezogen.

Deutlich schwieriger stellt sich die Bewertung der Ergebnisse kompletter Umwandlungspfade dar, da bei fehlender Transparenz der Datengrundlage die Unsicherheitsbereiche größer werden und damit die nicht erklärbare Schwankungsbreite der Ergebnisse ebenfalls größer wird. Um dennoch einen Vergleich der „*RegEnOpt*“-Ergebnisse mit Literaturdaten zu ermöglichen,

wurden Ergebnisse aus Literaturstellen gesammelt und diesen entsprechende „*RegEnOpt*“-Ergebnisse gegenübergestellt. Dabei wurden hinsichtlich Leistung bzw. Kapazität entsprechende Modellanlagen aus dieser vorliegenden Studie ausgewählt, um entsprechende Verzerrungen wegen Skaleneffekten zu vermeiden. Im Rahmen dieser vorliegenden Studie wurden bei einigen Energieumwandelungspfaden mehrere Varianten modelliert. Entsprechend ergibt sich für den jeweiligen Energieträger eine Bandbreite möglicher Ergebnisse. Eben diese Bandbreite erscheint bei der grafischen Darstellung der Ergebnisse dieser Validierung in Anhangabbildung 33 und Anhangabbildung 34 auf den Seiten 248 bis 249. Viele Studien enthalten Ergebnisse zum kumulierten Energieaufwand fossiler Art zur Bereitstellung von Endenergieträgern aus Biomasse und bzw. oder die korrespondierenden Treibhausgasemissionen. Auf eben diese beiden Parameter beschränkt sich die vorliegende Validierung. In der Gesamtschau ergeben sich Unterschiede zwischen den „*RegEnOpt*“-Ergebnissen und den Ergebnissen aus den Literaturstellen, wobei keine extrem systematische Differenz der „*RegEnOpt*“-Ergebnisse erkennbar ist. Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen werden als tragbar eingestuft. Vor allem die tendenziell höheren Werte für Treibhausgasemissionen bei den „*RegEnOpt*“-Ergebnissen lassen sich durch die in dieser Arbeit einbezogenen bodenbürtigen Lachgasemissionen erklären, welche mit dem Faktor 296 in die Treibhausgasbilanz eingehen. Eben diese Lachgasemissionen wurden in vielen Studien um die Jahrtausendwende nicht berücksichtigt. Die auffallend niedrigen Werte zu Treibhausgasemissionen in der Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (ABl. EG 2009) basieren auf einer Reihe Studien aus früheren Jahren und stellen die Situation optimistisch für Biokraftstoffe dar.

### 3.2 Optimaler Biomasse-Mix zu den einzelnen Zielen

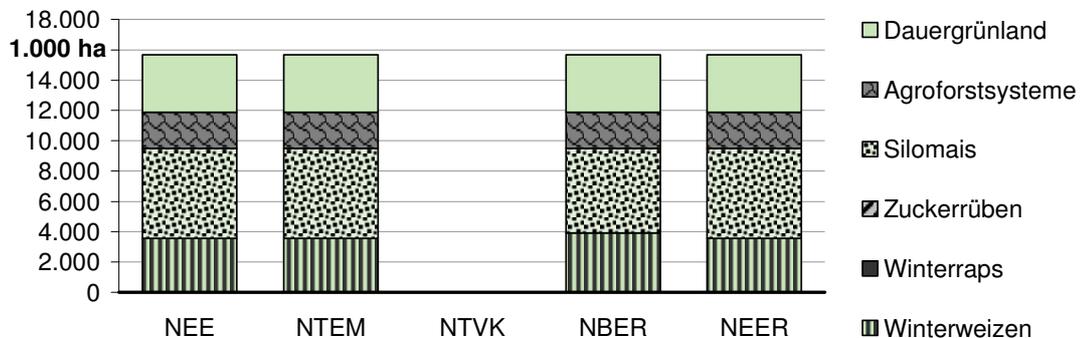
Im Folgenden werden einzelne Ergebnisse zu den Zielen Einsparung fossile Energieträger, Einsparung von Treibhausgasemissionen fossiler Herkunft, niedrige Treibhausgas-Vermeidungskosten, hohe Beschäftigungsraten und hohe Einkommenseffekte in den Regionen anhand mehrerer Flächennutzungsszenarien (10 %, 40 % und 100 % der LF) dargestellt. Würden theoretisch alle landwirtschaftlichen Nutzflächen in Deutschland zur Bereitstellung von Energie genutzt, so könnten damit mit einem auf Energieertrag optimierten Mix gerade 29 Prozent des Endenergiebedarfs der Bundesrepublik gedeckt werden. Dies weist zum einen auf das äußerst begrenzte Potenzial der Biomasse für die Energiebereitstellung hin. Zum anderen zeigt es den derzeit viel zu hohen Energieverbrauch der Gesellschaften der westlichen Welt.

Die umfassende grafische Darstellung der Optimierungsergebnisse befindet sich in Anhangabbildung 35 bis Anhangabbildung 40 auf den Seiten 250 bis 255. Dabei wird differenziert zwischen den für die Energie-Biomasse zur Verfügung stehenden Flächenpotenzialen. Je Szenario bezüglich des Flächenpotenzials erfolgt die Betrachtung mit und ohne Einbe-

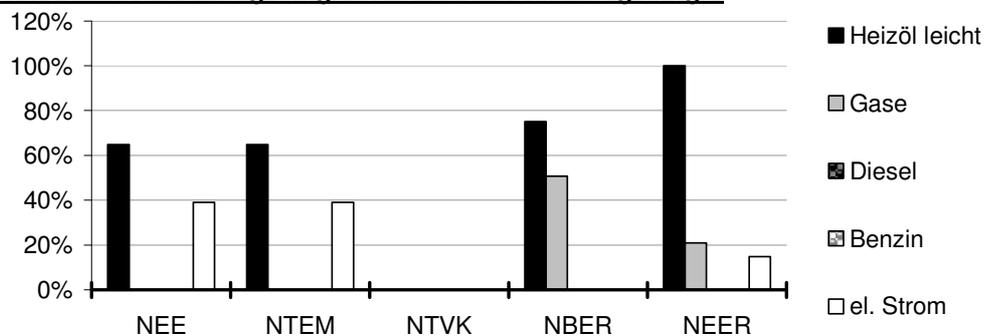
ziehung der Mindestquoten für Biokraftstoffe. Zu jedem Optimierungsziel wird zum einen die Struktur der Flächennutzung zur Erzeugung der Biomasse dargestellt. Zum zweiten wird der Anteil jedes fossilen Energieträgers ausgewiesen, der durch die Biomasse-Nutzung eingespart werden kann. Ergänzend erfolgt eine Auflistung der Biomasse-Umwandlungspfade, durch welche die dargestellte Energiebereitstellung in den Ergebnissen zustande gekommen ist. Exemplarisch zeigt Abbildung 3-18 das Ergebnis für das Szenario, dass sämtliche landwirtschaftliche Nutzfläche Deutschlands zur Energiebiomasseerzeugung verwendet wird und keinerlei politische Instrumente spezielle Biomasse-Energieträger „in die Lösung zwingen“:

**Abbildung 3-18: Ergebnisse der Linearen Optimierung für die einzelnen fünf Optimierungszielen, Szenario: 100 Prozent der Fläche für Biomasseanbau**

#### Energiebiomasseanbaustruktur



#### Substitution fossiler Energieträger durch Biomasse-Energieträger



#### Abkürzungen:

NEE: Netto-Energie-Einsparung  
 NTEM: Netto-Treibhausgasemissions-Minderung  
 NTVK: Netto-Treibhausgas-Vermeidungskosten  
 NBER: Netto-Beschäftigungseffekte Region  
 NEER: Netto-Einkommenseffekte Region

Quelle: eigene Darstellung und eigenen Berechnungen

Aus Abbildung 3-18 wird zum einen deutlich, dass bei der Optimierung nach vier Zielen mit knapp 17 Mio. Hektar die komplette Fläche für den Energiebiomasseanbau verwendet wird. Das Ziel, die Netto-Treibhausgasvermeidungskosten zu minimieren, kann nicht realisiert werden. Jegliche energetische Nutzung von Biomasse erzeugt unter den getroffenen Rahmenbedingungen so genannte Treibhausgasvermeidungskosten. Steigende Bereitstellungskosten

der fossilen Energieträger können das Ergebnis kippen, so dass auch Treibhausgasvermeidungsnutzen bei der energetischen Nutzung der Biomasse entsteht.

Die vier Ziellösungen unterscheiden sich in der Zusammensetzung der Nutzung nicht. Das Grünland wird jeweils komplett genutzt. Die Nutzung der Ackerfläche orientiert sich an den Fruchtfolgebegrenzungen mit maximal 50 Prozent Silomais und maximal 20 Prozent Kurzumtriebsplantagen. Für die verbleibende Fläche kommt Winterweizen in die Lösung. Die Optimierung zeigt deutlich die Überlegenheit der C-4-Pflanzen Mais gegenüber den anderen Kulturen hinsichtlich Photosyntheseleistung und damit Biomasseertrag.

Zum zweiten zeigt Abbildung 3-18, dass je nach Optimierungsziel unterschiedliche fossile Energieträger ersetzt werden. Die Maximierung der Nettoenergieproduktion bzw. Minimierung der Treibhausgasemissionen führen zur Verdrängung von leichtem Heizöl als Energieträger zur Wärmebereitstellung sowie fossilem elektrischen Strom. Die Biomasse wird in Biogasanlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung verwertet (vgl. Anhangabbildung 40). Bezüglich Optimierung nach Beschäftigung, d.h. Maximierung der Anzahl der Arbeitsplätze, sowie nach Maximierung des Einkommens ergibt sich jeweils eine veränderte Situation hinsichtlich verdrängter fossiler Energieträger.

Insgesamt lassen sich folgende Feststellungen aus den Ergebnissen der Optimierung ableiten: Sehr deutlich wird die starke Begrenztheit der Potenziale der Biomasse zur Energieversorgung. Bei Nutzung von zehn Prozent der landwirtschaftlichen Nutzfläche zur Bereitstellung von Energieträgern können einzelne fossile Energieträger nur im einstelligen Prozentbereich ersetzt werden. Lediglich bei 100-prozentiger Flächennutzung zur Energiebereitstellung und Optimierung nach Netto-Einkommenseffekt für die Region wird die Obergrenze des Heizölbedarfs erreicht. Damit stellt der Bedarf nach einzelnen fossilen Energieträgern keine Obergrenze für die Energiebereitstellung aus Biomasse dar. Bei dieser Aussage bleiben die bestehenden Kapazitäten der fossilen Energiebereitstellung unberücksichtigt.

Alle Verfahren im „*RegEnOpt*“ verursachen unter den getroffenen Annahmen Treibhausgas-Vermeidungskosten. Daraus resultiert, dass bei Realisierung der Minimierung dieser Kosten keine Biomasse zur Energiebereitstellung herangezogen werden darf. Jede bereitgestellte Einheit Energie aus Biomasse würde Kosten verursachen. Bei steigenden Kosten fossiler Energieträger können Verfahren mit derzeit geringen Treibhausgas-Vermeidungskosten relativ schnell in den Bereich gelangen, ab dem sie bei Einsparung von Treibhausgasemissionen gleichzeitig Kosten zur Energiebereitstellung sparen.

Durch Staatsziele, wie z. B. die Beimischung von Biokraftstoffen, werden entsprechende Biomasse-Umwandlungspfade in die Lösung gezwungen. Die Umsetzung der Mindestanteile von Biokraftstoffen mit 4,4 % Dieselmotorkraftstoff und 1,2 % Ottomotorkraftstoff ergibt rund 540 Millionen Euro Treibhausgas-Vermeidungskosten. Die Kosten würden in dieser Höhe nicht anfallen, würden Verfahren der energetischen Nutzung von Biomasse mit geringeren Treibhausgas-Vermeidungskosten realisiert. Dabei ist vor allem die thermische Nutzung zur Wärmebereitstellung zu nennen (vgl. auch Abbildung 3-14, Seite 140).

Der am günstigsten zu ersetzende fossile Energieträger ist Heizöl. Bei nahezu allen Optimierungsläufen erscheint der Heizölersatz in nennenswertem Umfang in der Lösung. Die Substitution kann hierbei zum einen durch Festbrennstoff, zum anderen durch das Koppelprodukt Abwärme bei der Verstromung von Biogas erfolgen.

Agroforstsysteme zur Bereitstellung von Festbrennstoff erscheinen in jedem Lösungs-Mix, meist sogar bis zu einer der unterstellten Systemgrenzen, nämlich der Flächenobergrenze für Energie aus Biomasse oder der absoluten Obergrenze von maximal 20 Prozent der Ackerfläche in Deutschland. Der im Vergleich zu Silomais geringe Energie-Output wird durch den deutlich geringeren Energie-Input kompensiert. Die ertragsstarke Pflanze Silomais wird bei Optimierung nach Energieertrag bevorzugt in die Lösung genommen.

Eine unter energetischen Gesichtspunkten optimale Grünlandnutzung stellt die intensive Nutzung dar. Der Aufwuchs lässt sich in Biogasanlagen zum Energieträger Biogas verarbeiten. Geringe Intensitäten der Flächennutzung stehen dabei in einem ungünstigen Verhältnis zum Energieertrag.

Die einzelnen Optimierungsläufe des LP-Tableaus im Modell „*RegEnOpt*“ brachten neben der Struktur der Energiebereitstellung aus Biomasse jeweils auch einen Zielwert für das optimierte Szenario. In Tabelle 3-2 sind diese Zielwerte dargestellt. Durch die Mindestquoten an Biokraftstoffen wird auf die Einsparung von über 100 PJ Primärenergie fossiler Art verzichtet. Damit verbunden sind fünf Millionen Tonnen Treibhausgasemissionen. Bei der Optimierung nach möglichst geringen Treibhausgas-Vermeidungskosten dürfte unter den getroffenen Modellannahmen keine Biomasse zur Energiebereitstellung eingesetzt werden.

**Tabelle 3-2: „*RegEnOpt*“-Zielwerte der LP-Optimierung**

Optimierungsziele	Einheit	Anteil der LF für Energie-Biomasse		
		10%	40%	100%
<b>mit Untergrenzen</b>				
Netto-Energieeinsparung	PJ	302	1.313	2.276
Netto-Treibhausgas-Emissionsminderung	Mio. t CO <sub>2</sub>	16	66	114
Netto-Treibhausgasvermeidungskosten	Mio. €	545	545	545
Netto-Beschäftigungseffekte (Region)	1.000 AK	54	408	573
Netto-Einkommenseffekte (Region)	Mio. €	2.038	6.555	9.532
<b>ohne Untergrenzen</b>				
Netto-Energieeinsparung	PJ	416	1.427	2.343
Netto-Treibhausgas-Emissionsminderung	Mio. t CO <sub>2</sub>	22	71	117
Netto-Treibhausgasvermeidungskosten	Mio. €	0	0	0
Netto-Beschäftigungseffekte (Region)	1.000 AK	132	469	595
Netto-Einkommenseffekte (Region)	Mio. €	2.356	6.643	9.599

Quelle: eigene Darstellung und eigene Berechnungen

Da Biokraftstoffe vornehmlich in industriellen Großanlagen, meist sehr arbeitseffizient erzeugt werden, ergäben sich bei Verzicht auf die Mindestquoten für Biokraftstoffe und damit alternativen energetischen Verwertungsmöglichkeiten der Biomasserohstoffe deutlich höhere Beschäftigungseffekte. Dabei gilt es zu beachten, dass ein Teil dieser hier in der Arbeit ausgewiesenen Beschäftigungseffekte im Hobby-Bereich anzusiedeln sind. Kleine Heizanlagen, beschickt mit biogenen Festbrennstoffen, werden nahezu ausschließlich privat betrieben. Ebenso erfolgt die Brennstoffbereitstellung meist privat. Durch den Einsatz regionaler Biomasse anstelle fossiler Energieträger aus dem Ausland bleiben wesentlich größere Anteile der Wertschöpfung im Land. Nicht ins Ausland abfließende Devisen tragen dabei zum Einkommenseffekt in der Region bei.

Die dargestellten Ergebnisse sind ein Abbild der eingegangenen Basisdaten und Annahmen, die aufgrund fehlender Daten getroffen werden mussten.

Allgemein lassen sich jedoch zu den einzelnen Energieformen auf Basis von Biomasse individuelle Stärken und Schwächen ableiten (Tabelle 3-3). Der Überblick über die einzelnen Vorzüge und Nachteile der Energieträger zeigt die Komplexität unseres derzeitigen Systems der Energieversorgung. Jede Energieform kann in ihrem Bereich ihre Stärken ausspielen, wogegen die Schwächen derzeit einen Einsatz in anderen Bereichen noch verhindern. Nicht zu unterschätzen sind die Koppelprodukte, die bei der energetischen Nutzung von Biomasse anfallen. Eiweißfuttermittel, die bei der Bereitstellung von Biodiesel und Ethanol anfallen, stellen wertvolle Alternativen in vielen Bereichen zum zu importierenden Soja dar. In der vorliegenden Arbeit wurden die Effekte der Koppelprodukte bei der Energie- und Treibhausgasbilanzierung sowie den Beschäftigungs- und Einkommenseffekten berücksichtigt (vgl. Anhangtabelle 9 und Anhangtabelle 10). Trotzdem bleiben die Biokraftstoffe nur dann im Lösungsraum der Optimierung, wenn sie durch entsprechende Untergrenzen im Lösungsraum vorkommen müssen.

Nach Abwägung der Stärken und Schwächen mag es dennoch Argumente geben, trotz der bekannten Schwächen und fehlenden Stärken den Bioenergieträger aus anderen Gründen zu favorisieren. Die Schlussfolgerungen in Tabelle 3-3 enthalten exemplarisch entsprechende Argumente für einen gezielten Einsatz der Energiebiomasse. Generell gilt es zu beachten, dass einzelne Bioenergieträger mit vielen Schwächen nur sehr gezielt in Spezialbereichen eingesetzt werden sollten, wo sie wie kein anderer Bioenergieträger die speziell gefragte Stärke ausspielen können.

Tabelle 3-3: Stärken und Schwächen der verschiedenen Energieformen aus Biomasse

Energieform	Stärken	Schwächen	Schlussfolgerungen
elektrischer Strom aus Biomasse	höchste Energiequalität - umwandelbar in Licht, Bewegung und Wärme	hohe Konversionsverluste bei Herstellung	keine Wärme aus Strom Mobilität nur mit Strom aus Wasser-, Windkraft oder Fotovoltaik (keine Konversionsverluste bei Herstellung, Speicherung von temporären Produktionsüberschüssen in Fahrzeugakkus möglich)
Methan (Biogas)	vielseitig einsetzbar, Nährstoffkreislauf im landwirtschaftlichen Betrieb	hohes Treibhauseffektpotenzial des Methans bei Austreten. Hoher Transportaufwand der Biomasse und der Reststoffe begrenzt Größe der Anlagen	auf Teile der wenig effizienten Verstromung verzichten: BHKW-Leistung an der Biogasanlage an den Wärmebedarf des Prozesses bzw. die Wärmeabnehmer ausrichten. Daraus resultierende Biogas-Überschüsse effizienter als Erdgasersatz nutzen
Ethanol	reiner Kraftstoff Koppelprodukt Eiweißfuttermittel	aus Getreide und Zuckerrübe weniger effizient wie aus Zuckerrohr. Assoziiert mit Wasser	kostbarer Treibstoff: zuerst als Klopfverbesserer ETBE einsetzen
Pflanzenöl	Koppelprodukt Eiweißfuttermittel	Raps, Sonnenblume: geringe Energieerträge je Hektar. Schwierigkeiten bei Einhaltung hoher Abgasnormen.	kostbarer Treibstoff: in sensiblen Naturräumen einsetzen (u. a. Land- und Forstwirtschaft)
Biodiesel	Koppelprodukte Eiweißfuttermittel und Glycerin	Raps, Sonnenblume: geringe Energieerträge je Hektar. Schwierigkeiten bei Einhaltung hoher Abgasnormen	kostbarer Treibstoff: in sensiblen Naturräumen einsetzen (u. a. Land- und Forstwirtschaft)
BtL-Kraftstoff	definierter Reinstkraftstoff	Asche und Rauchgasrückstände bei Herstellung („Sondermüll“)	biogenen Ersatz für fossilen Flugturbinenkraftstoff wegen Energiedichte und Reinheit
Biomasse-Festbrennstoff	höchste Effizienz bei Wärmebereitstellung	Asche und Rauchgasrückstände je nach Reinheit des Brennstoffs	Aschereiche Biomasse (Getreidekorn, Stroh etc.) nur mit entsprechender Rauchgasreinigung nutzen

Quelle: eigene Darstellung

Als Fazit bleibt der schon bekannte Ausspruch: Einsparung vor Substitution vor Konversion. Im folgenden Ausblick wird eingegangen auf mögliche Weiterentwicklungen des Modells „RegEnOpt“. Dabei besteht zusätzlich Potenzial, die Eingangsdaten zu überarbeiten.

### 3.3 Ausblick

Neben den vorhandenen Ökobilanzierungsinstrumenten stellt das Modell „*RegEnOpt*“ eine Ergänzung dar, welches eine differenzierte Betrachtung der Biomasse-Bereitstellung zulässt. Damit wurde eine Basis geschaffen, mit welcher weitere Fragestellungen zu beantworten sind. So lassen sich verschiedene Szenarien bezüglich Biomasse-Bereitstellung parallel berechnen. Das in Abbildung 3-1 auf Seite 118 dargestellte Beispiel stellt mit der Variation der Preise der fossilen Energieträger nur eine von vielen Möglichkeiten dar. So haben steigende Rohölpreise direkt Auswirkung auf die Betriebsmittelpreise wie Düngemittel, Kraftstoff und Pflanzenschutzmittel. Damit ergeben sich je nach Einsatzumfang der Betriebsmittel entsprechende Veränderungen in den ökobilanziellen Parametern und damit auf die jeweilige Vorzüglichkeit, z. B. bezüglich Reihenfolge nach Treibhausgas-Vermeidungskosten.

Das ökobilanzielle Analysepotenzial ermöglicht auch ganzheitliche Systemvergleiche wie z. B. verschiedene Bodenbearbeitungsintensitäten. Dabei ist es möglich die pfluglose Bewirtschaftung mit höherem Pflanzenschutzinsatz und gelegentlich niedrigeren Erträgen gegenüber der Bewirtschaftung mit Pflug ökonomisch und ökobilanziell zu vergleichen.

Neben dem Anbau von Biomasse auf dem Feld erlaubt das Modell „*RegEnOpt*“ differenzierte Transportanalysen. Neben der Auswahl aus verschiedensten Transportsystemen sind auch Entfernungen und Wegbeschaffenheiten individuell zu definieren. Die Biomasse-Verarbeitung zu Energieträgern basiert in der vorliegenden Arbeit aus Literaturangaben. Bei vorliegenden individuellen Daten können anlagenspezifische Analysen durchgeführt werden. Eine intensivere Analyse dürfte im Bereich der Effizienz-Koeffizienten von Biomasse zu Endenergieträger notwendig sein. Je nach Verlustrate ergeben sich gravierende Auswirkungen auf die Ökobilanz des jeweiligen Energieträgers. Im Vergleich mittels LP können sich somit entsprechend deutliche Verschiebungen ergeben.

Bisher nicht berücksichtigt sind Fälle mit Synergieeffekten z. B. durch eine Kaskadennutzung der Biomasse. Beispiele hierfür sind Energiegewinnung aus Verbrennung von getrocknetem Biogasgärrest oder die Biogaserzeugung aus der Schlempe der Bioethanolerzeugung.

Deutlich wurde, dass politische Instrumente direkt Einfluss nehmen auf die Vorzüglichkeit bzw. sogar auf das Vorhandensein von Bioenergieträgern. Das Modell „*RegEnOpt*“ erlaubt auch in diesem Bereich vergleichende Analysen, wo neben den ökonomischen Effekten auch ökobilanzielle Parameter gleichzeitig beobachtet werden können.

Der Problembereich Lachgasemissionen wurde in einem eigenen Exkurs in dieser Arbeit gewürdigt. Die Überlegungen basieren aus Auswertungen der zum Auswertungszeitpunkt vorgelegenen Datensätze aus Mitteleuropa. Inwieweit sich die kulturspezifischen Emissionsfaktoren bewahrheiten, können künftige Analysen zeigen.

Das Modell „*RegEnOpt*“ umfasst derzeit die komplette landwirtschaftliche Flächennutzung sowie die Verarbeitung von Biomasse zu Endenergieträgern. Die klassische tierische Erzeugung als wesentlicher Bestandteil der Landwirtschaft fehlt bisher. Um ein gesamtes Landnutzungsmodell zu erhalten, gilt es, die vorherrschenden Produktionsverfahren der tierischen

Erzeugung analog zur Biomasse-Verarbeitung zu Energie zu modellieren. Mittels eines solchen Landnutzungsmodells ließen sich dann Aussagen treffen zur Vorzüglichkeit spezieller Produktionsverfahren. Darüber hinaus könnten die Auswirkungen politischer Instrumente auf einzelne Produktionsverfahren, wie z. B. die Förderung der Bioenergieerzeugung, anhand von Szenarien analysiert und bewertet werden.

---



## 4 Diskussion

Die Arbeit zielte darauf ab, ein in sich schlüssiges Modell zu schaffen, mittels dessen monetäre und ökobilanzielle Analysen zur Bereitstellung von Energie auf Basis von Biomasse durchgeführt werden können. Ein wesentlicher Fokus wurde auf die detaillierte Betrachtung der Flächenbewirtschaftung zur Bereitstellung der Biomasse gelegt. Dabei spielt die Betrachtung der bodenbürtigen Lachgasemissionen eine wesentliche Rolle. Die Ableitung der optimalen Biomasse-Mixe für definierte Ziele erfolgte mittels LP-Ansatz.

Es erschien sinnvoll, gewisse diskussionswürdige Punkte direkt in der Methoden- oder Ergebnisteil der Arbeit aufzunehmen. Das Kapitel 3.1.6 „Validierung der Ergebnisse zu den Umwandlungspfaden“ hat gewissen Diskussionscharakter. Jedoch sollten vor Verwendung der Zwischenergebnisse im LP-Modell diese Werte bezüglich ihrer Gültigkeit überprüft und gewürdigt werden.

Neben der Bereitstellung des Modells galt es, dieses für diese Arbeit auf eine definierte Region anzuwenden und weitest möglich zu validieren. Deutschland mit dem Bezugszeitpunkt Jahr 2005 eignet sich hervorragend zur Modellvalidierung, da zu dieser Region sowie zu diesem Zeitpunkt eine Vielzahl Studien zu den verschiedensten Bioenergieträgern durchgeführt wurden. Darüber hinaus gibt es für keine andere Region umfassendere Datenpools von Grunddaten, die die Basis der Kalkulationen im Modell darstellen. Beginnend mit Flächen- und Anbaustatistik über Ertragsniveaus und detaillierter Energieverbrauchsstatistik sind für Deutschland viele Einzeldaten aus einzelnen Studien zu Ökobilanzen verfügbar. Die größte Schwierigkeit stellte die Bereitstellung eines in sich schlüssigen Datenpools dar. Da der Bezug auf den Zeitpunkt im Jahr 2005 selten möglich war, musste auch auf ältere Daten zurückgegriffen werden, wohl wissend, dass ältere Daten den vollzogenen technischen Fortschritt noch nicht enthalten und damit in der Regel einen eher ungünstigeren Wert darstellen.

Im Folgenden wird nun zum einen der Modellansatz des „*RegEnOpt*“ und zum zweiten die Datengrundlage für die vorliegenden Ergebnisse kritisch gewürdigt.

### 4.1 Diskussion des Modellansatzes des „*RegEnOpt*“

Einen Anstoß zur detaillierten Modellierung der Biomasse-Bereitstellung gaben neben eigenen Überlegungen NEMECEK et al. (2005). Neben dem Ertrag hat die Art der Düngung größten

---

Einfluss auf Ergebnisse der Ökobilanz. Eben dieser Aussage sollte mit einem eigenen Schwerpunkt in dieser Arbeit, nämlich die tatsächlichen Stoffflüsse abzubilden (vgl. Abbildung 2-4 auf Seite 88), Rechnung getragen werden. Viele vorangegangene Studien unterstellten theoretisch volle mineralische Düngung, was nicht den tatsächlichen Stoffströmen entspricht und zu stark verzerrten Ergebnissen führt (vgl. Abbildung 3-1 auf Seite 118).

Während der Aufbereitung der Ergebnisse tauchte eine kleine Unsauberkeit im Modul der Lagerung auf. Bei Lagerhallen und Fahrsiloanlagen mit mobiler Befüll- und Entnahmetechnik ist diese Technik nicht modellierbar. Diese fehlende Mechanisierung der Ein- und Auslagerung gilt es, im Modul des Biomasseanbaues zu berücksichtigen. Bei Siloanlagen demgegenüber können Strom und Betriebsmittel, z. B. für die Trocknung direkt berücksichtigt werden.

Die Wirkungskategorien im Modell beschränken sich auf Energie- und Treibhausgasbilanzierung. Weiter Wirkungskategorien lassen sich im derzeit MS-Excel-basierten Modell schwer implementieren. Andere Studien mit den zusätzlichen Wirkungskategorien Versauerung, Nährstoffeintrag/Eutrophierung, Fotosmog, Ozonabbau, Humantoxizität ergeben positive Ergebnisse für die Biomassenutzung hinsichtlich Energieeinsparung und Treibhausgasemissionen, jedoch häufig negative Ergebnisse hinsichtlich der anderen Wirkungskategorien (REINHARDT et al. 2006; GÄRTNER und REINHARDT 2003, QUIRIN et al. 2004, PATYK et al. 2000). Damit ergibt sich die Notwendigkeit der Erweiterung der Analysen auf weitere Wirkungskategorien. Um dann aus dem Pool der Einzelergebnisse aussagekräftige Empfehlungen ableiten zu können, wird eine Aggregation der Einzelergebnisse der Wirkungskategorien unumgänglich sein. Einen wesentlichen Einfluss auf die Aussagen haben dann die Gewichtungsschlüssel der Wirkungskategorien. Diese im Rahmen dieser Arbeit zu entwickeln, wäre unmöglich gewesen. Für diese Gewichtung bedarf es eines Expertenkreises aus ökobilanziell erfahrenen Fachleuten und politischen Entscheidungsträgern, die das Wohl der Gesellschaft mit deren natürlichen Umwelt bei der Gewichtung berücksichtigen.

Das Modell ließe sich erweitern zu einem Prognosemodell für die Zukunft. Hierfür müssten Lernkurven bezüglich Effizienzsteigerungen und Kostendegressionen abgeleitet, abgesichert und implementiert werden (BMU 2004b, GREENPEACE, EREC 2007, S. 24 ff.). Auch dies war allein aufgrund der noch sehr dünnen Datenlage noch nicht möglich.

Im Bereich der LP-Optimierung existieren einige Ansatzpunkte der Verbesserung bzw. Erweiterung des Modells: Derzeit wird ausgehend von einem fix vorgegebenen Flächenpool ein optimaler Biomasse-Energie-Mix abgeleitet. Die Implementierung der gesamten Wirtschaftsbereiche, die sich aus der Landnutzung ergeben, kann erst zu tatsächlichen Prognosen für künftige Entwicklungen der Landnutzung führen. Darüber hinaus ließen sich damit konkurrierende Märkte abbilden. Durch die Einführung von „Produktionsverfahren“, die den Handel an internationalen Märkten abbilden, ließen sich neben den nationalen auch die internationalen Vorzüge ableiten. Im aktuellen Modell wird vereinfachend von linearen Zusammenhängen ausgegangen. Z. B. die Treibhausgasvermeidungskosten steigen jedoch mit der Ausdehnung der Emissionseinsparung. Es wird immer aufwändiger, noch ein zusätzliches Kilo-

gramm Treibhausgase zu vermeiden. Die Implementierung dieses Zusammenhangs würde einen iterativen Prozess auslösen, dessen Umsetzung noch nicht durchdacht ist.

## 4.2 Diskussion der Datengrundlage der vorliegenden Ergebnisse

Nach einzelner Analyse verschiedenster energetischer Biomasse-Nutzungspfade sollte mittels LP-Ansatz ein optimierter Mix abgeleitet werden. Der LP-Ansatz setzt klare Eingangszahlen voraus, um eine Lösung finden zu können. Allein dieses Erfordernis machte es notwendig, für jeden Biomasse-Nutzungspfad Entscheidungen zu treffen. Dabei galt es, aus den je Parameter vorhandenen Wertemengen den möglichst allgemeingültigsten abzuleiten. Meist war die Datenlage jedoch so inhomogen bezüglich Bezugszeitraum und Bezugsregion, dass zu wenige Datenpunkte für eine saubere statistische Absicherung vorhanden waren. Damit wählte der Autor den Weg, durch einfache Regressionsgleichungen bzw. einfach durch Mittelwertbildung sich für einen Wert oder einen funktionalen Zusammenhang zu entscheiden. Damit ist jeder Eingangsdatenpunkt angreifbar, soll aber zumindest eine Diskussionsgrundlage für künftige Untersuchungen liefern. Daraus ergibt sich nun folgende Konsequenz für die Aussagekraft der LP-Ergebnisse: Fehler, Unstimmigkeiten bzw. nicht richtig getroffene Annahmen in den Eingangsdaten haben direkten Einfluss auf die LP-Ergebnisse. Kleine Veränderungen eines Datenpunktes können das gesamte LP-Ergebnis kippen. Damit erscheint die Arbeit jedoch nicht wertlos. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich in allen Bereichen Über- und Unterschätzungen ergeben haben, die sich im besten Falle gegenseitig ausgleichen. Sollten einzelne Biomasse-Nutzungspfade nicht der aktuellen Realität entsprechen, so liegt das u. a. an einer dünnen und schon älteren Datenlage. Es ist nachvollziehbar, dass Unternehmen keine aktuellen Stoff- bzw. Energiebilanzen preisgeben wollen. Damit wäre ein Großteil des Firmengeheimnisses preisgegeben, und Mitbewerber am Markt könnten daraus auf Feinheiten in der Prozesssteuerung schließen. Im Rahmen wissenschaftlicher Arbeiten, die sich mit vergleichenden Analysen verschiedenster Verfahren auseinandersetzen, werden jedoch bevorzugt die Verfahren als die günstigen im Ergebnis erscheinen, deren Eingangsdaten dem aktuellen Stand des technischen Fortschritts entsprechen.

Einen wesentlichen Einflussfaktor auf die Ökobilanz im Bezug auf Treibhausgasemissionen und damit auf die Treibhausgas-Vermeidungskosten stellen die bodenbürtigen Lachgasemissionen dar. Die Höhe der tatsächlichen Emissionen ist sehr schwer greifbar, da sie von vielen Faktoren abhängig ist. Bisher fand v. a. die BOUWMAN-Formel Verwendung in vielen Studien. Der einzige Einflussfaktor, der in dieser Formel berücksichtigt wird, ist die Höhe der Stickstoffdüngung. Es ist bekannt, dass ebenso Boden, Witterung und die Bewirtschaftungsweise große Einflüsse auf die Höhe der Lachgasemissionen haben. Jede Kultur hat ihre spezifischen Arten der Flächenbewirtschaftung. Für die vorliegende Studie war es zumindest möglich kulturspezifische Unterschiede herauszuarbeiten. Eben diese Erkenntnisse können als Diskussionsgrundlage für weitere Überlegungen dienen.

---

Damit werden die bodenbürtigen Lachgasemissionen im Modell berücksichtigt und beeinflussen somit alle Biomasse-Nutzungspfade nach gleicher Methodik. Der Anspruch einer tatsächlich vergleichenden Analyse kann auf diese Weise deutlich besser erfüllt werden, als wenn Teilergebnisse aus verschiedensten Studien als Basis für weitere Analysen herangezogen würden. In vielen Studien ist nicht eindeutig nachvollziehbar, ob bzw. in welcher Höhe die Lachgasemissionen berücksichtigt wurden.

Insgesamt ist der Exkurs zur Lachgasproblematik als Ansatz eines Ökonomen anzusehen, der klare funktionale Zusammenhänge benötigt, um weiterrechnen zu können. Damit wird kein Anspruch auf absolute Richtigkeit erhoben. Die Absicht war jedoch, näher an die Realität zu gelangen, als dies mit der pauschalen BOUWMAN-Formel möglich gewesen wäre.

Weitere Input-Parameter mussten ebenfalls geschätzt werden. So existieren seitens der Pflanzenschutzmittelindustrie keine aktuellen Zahlen zu ökobilanziellen Parametern der Wirkstoffe. Die öffentlich zugänglichen Daten gehen zurück in die frühen 1980er Jahre. Seit dem haben sich jedoch die Wirkstoffklassen und spezifischen Aufwandmengen deutlich geändert. Die im Modell verwendeten Daten und unterstellten Aufwandmengen können nicht der Realität entsprechen. Bevor jedoch auf die Berücksichtigung des Pflanzenschutzes verzichtet wurde, wurden die veralteten Zahlen herangezogen.

Der Bereich der Düngung wurde mit Durchschnittswerten zu den einzelnen Reinnährstoffen im Modell berücksichtigt. Für die regionale vergleichende Analyse erscheint diese Vorgehensweise als akzeptabel. Bei individuellen Analysen sollten jedoch die ökobilanziellen Parameter der tatsächlich eingesetzten Düngemittel verwendet werden, da es v. a. bei den Stickstoffdüngern erhebliche Unterschiede gibt (vgl. Anhangabbildung 15 auf Seite 228).

Die Mechanisierung basiert auf KTBL-Daten. Dabei wurden die einzelnen Maschinen mit ökobilanziellen Parametern aus Literaturdaten versehen. Eine eigene ökobilanzielle Bewertung, wie dies bei den Bauwerken in dieser Arbeit vorgenommen wurde, erschien wenig praktikabel und eine bessere Datenqualität hätte sich kaum realisieren lassen. Grundsätzlich werden im Modell alle Maschinen an der Abschreibungsschwelle ausgelastet. Dies hat entsprechende Auswirkungen auf die ökonomischen und ökobilanziellen „Kosten“ je produzierter Einheit. Die Kosten der Mechanisierung erscheinen in der Modellbetrachtung im Vergleich zu reellen Buchführungsergebnissen eher günstig. Da jedoch alle Maschinen auf die gleiche Weise kalkuliert wurden, würden sich durch eine an die Realität angepasste Auslastung der Maschinen nur geringe Verschiebungen ergeben. Zudem nicht greifbar für diese Arbeit waren die tatsächlichen durchschnittlichen Auslastungen der Maschinen in der Realität.

Demgegenüber waren für definierte Bauwerke keine ökobilanziellen Daten greifbar, weswegen der Weg der eigenen Abschätzung gewählt wurde. Aus der eigenen Erfahrung von Baustellen, die als Bauhelfer in Semesterferien begleitet wurden, und den entsprechenden Literaturdaten konnten die Bauwerke zumindest grob ökobilanziell abgeschätzt werden. Dieser

---

Ansatz hat zumindest den Vorteil der Nachvollziehbarkeit und damit der Möglichkeit, gezielt Änderungen vorzunehmen.

Die Effizienzkoeffizienten wurden ebenfalls Literaturstellen entnommen. Die Problematik zur Verfügbarkeit aktueller Prozess-Kennzahlen wurde oben schon erläutert.

Insgesamt erscheint eine vertiefende und aktuelle Analyse der Input-Parameter sinnvoll. Der noch relativ junge Wirtschaftsbereich der erneuerbaren Energien ist nach wie vor im Optimierungsprozess. Dadurch schreitet der technische Fortschritt wesentlich rascher voran als in lang etablierten Wirtschaftsbereichen. Eine noch intensivere Auseinandersetzung mit den Input-Parametern hinsichtlich Ausprägung könnten gültige Bandbreiten aufzeigen. Um mit Gültigkeitsbereichen anstelle von definierten Werten kalkulieren zu können, bedarf es eines Simulationsverfahren. Es bietet sich hierfür die Monte-Carlo-Simulation an, in die die einzelnen Input-Parameter mit gültigen Wertebereichen und einer speziellen Verteilung der Werte eingehen. Mittels Simulation erscheint jedoch dann kein scharfes Ergebnis sondern vielmehr ein Ergebnisbereich, welchen es dann zu interpretieren gilt. Fragwürdig bleibt, ob diese Ergebniswolke dann tatsächlich interpretierbar ist.

### 4.3 Diskussion der Ergebnisse

Wesentliche Punkte zu einzelnen Ergebnissen wurden schon im Kapitel der Ergebnisse unter anderem im Unterkapitel 3.1.6, Validierung der Ergebnisse zu den Umwandlungspfaden diskutiert. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass mit dem Modell „*RegEnOpt*“ ein neues Instrument und eine neue Diskussionsgrundlage zum Themenbereich der Ökobilanzierung von erneuerbaren Energie auf Basis von Biomasse geschaffen wurde. Mit dem Modell sind vergleichende Analysen der verschiedensten Biomasse-Nutzungspfade aufbauend auf einer einheitlichen Datengrundlage und mit einheitlicher Methodik möglich. Entwicklungspotenzial wird gesehen in der Aktualisierung der Datengrundlage, v. a. was die Effizienzkoeffizienten der einzelnen Biomasse-Verwertungsprozesse betrifft. Darüber hinaus stellen die Systemgrenzen einen wesentlichen Einflussfaktor auf das Ergebnis dar. Je nach Referenzsituation der Landnutzung ergeben sich extrem Auswirkungen auf die Treibhausgasbilanz eines Biomasse-Energieträgers, da in Ansatz gebrachte bodenbürtige Lachgasemissionen mit dem Faktor 296 in die Bilanz eingehen.

Die Aussagekraft der optimalen Biomasse-Mixe mittels dieses Modells ist noch begrenzt, da die Basis der Optimierung ein technisches Flächenpotenzial darstellt. Wesentlich höhere Aussagekraft ergäbe ein gesamtwirtschaftlicher LP-Ansatz zur Ableitung ökonomischer Potenziale der energetischen Biomassenutzung. Dabei sind repräsentative Produktionsverfahren der klassischen Landwirtschaft zur Nahrungsmittelerzeugung inklusive deren nachgelagerte Bereiche zur Ableitung der gesamten Wertschöpfung bis hin zum konsumfähigen Gut einzubeziehen. Damit ließen sich auf der gleichen Ebene die Biomasse-Energieträger mit den Nahrungsmitteln als die alternativen Verwertungsmöglichkeiten der landwirtschaftlichen Biomasse vergleichen.

---

Im Rahmen der Erstellung dieser Arbeit wurde deutlich, dass komplexe Fragestellungen komplexe Herangehensweisen erfordern. Aus dieser Komplexität lassen sich jedoch nicht ohne weiteres einfach interpretierbare Ergebnisse ableiten. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit gerade bei komplexen Fragestellungen, die Zielgröße(n) sowie den Rechengang der Analysen klar zu definieren. Das weite Spektrum der Ergebnisse lässt selbst dann noch mehr als ausreichend Interpretationsspielräume.

---

## 5 Zusammenfassung

Die Erkenntnis der Endlichkeit der fossilen Energieträger mit den entsprechenden Auswirkungen auf die Preise sowie die zunehmende Diskussion zu den Folgen des anthropogenen Klimawandels führten zur Suche nach alternativen Energiequellen. Dabei wurde die älteste vom Menschen genutzte Energiequelle, die Biomasse, von der Gesellschaft mit in den Fokus der Betrachtungen gestellt. Die Biomasse zeichnet sich durch die Vielfalt der Inhaltstoffe und damit durch das sehr weite Spektrum der Nutzungsmöglichkeiten aus. Darüber hinaus ist die Sonnenenergie in der Biomasse sowie in deren Verarbeitungsprodukten gespeichert und kann bei Bedarf abgerufen werden. Aus den vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten ergibt sich die Frage nach den kostengünstigsten Verfahren. Die relativen Vorzughigkeiten ändern sich mit der konkreten Zielvorstellung, die verfolgt wird. Nach rein ökonomischen Gesichtspunkten entwickeln sich andere Verfahren, als wenn auch ökologische Aspekte berücksichtigt werden. Da Lösungen nach ökologischen Aspekten selten aus individueller Motivation heraus realisiert werden, greift der Staat mit politischen Instrumenten ein, um durch gewisse Fördermechanismen die Wirtschaftlichkeit zu gewährleisten. Die ursprüngliche Steuerbefreiung der Biokraftstoffe sowie das Erneuerbare-Energien-Gesetz sind Beispiele, die die Etablierung und Verbreitung von Biodiesel-, Bioethanol- und Biogasanlagen ermöglicht haben. Deutlich wurde der Einfluss der politischen Instrumente bei Absenkung der Steuererleichterung für Biodiesel. Das Marktvolumen wurde auf einen Schlag reduziert, Produktionsstätten mussten Konkurs anmelden bzw. konnten erst gar nicht in Betrieb genommen werden. Damit wird deutlich, dass derzeit noch keine eigenständige Konkurrenzkraft von Biokraftstoffen und Biogas unabhängig von der weiteren Verwertung gegenüber den fossilen Energieträgern gegeben ist. Lediglich die Wärmebereitstellung aus Biomasse erscheint ökonomisch in den meisten Fällen schon auf Augenhöhe im Vergleich zur Wärmeerzeugung aus fossilen Brennstoffen.

Für eine vergleichende Analyse verschiedenster Biomasse-Umwandlungspfade von Biomasse-Rohstoffen zu nutzbaren Endenergieträgern sind eine einheitliche Kalkulationsmethode sowie eine einheitliche Datenbasis notwendig. Mit den Vorschriften zur Ökobilanzierung ist eine allgemein anerkannte Vorgehensweise vorhanden. Es werden aus der Fülle der möglichen Wirkungskategorien mit der Nettoenergieeinsparung sowie dem Treibhausgaseinspa-

---

rungspotenzial zwei Kategorien herausgriffen. Die weiteren Zielgrößen Beschäftigungseffekt und Einkommenseffekt werden neben diesen beiden ökobilanziellen Kategorien in das Rechenmodell „*RegEnOpt*“ mit aufgenommen. Als einheitliche Datenbasis dienen ökobilanzielle Datensätze, die auch in vielen anderen ökobilanziellen Studien zu einzelnen Produkten oder Bioenergieträgern Verwendung fanden.

In vielen Studien zu Ökobilanzen wurde der Fokus auf die Verarbeitungsstufe der Biomasse-Rohstoffe gelenkt. Die Bereitstellung der Biomasse wurde häufig mit groben Abschätzungen abgebildet. Dabei ergeben sich je nach Ausgangssituation und nach mehr oder weniger geschlossenen Nährstoffkreisläufen große Unterschiede in den ökobilanziellen Ergebnissen. Um dem mehr gerecht zu werden, werden in der vorliegenden Studie tatsächliche Nährstoffkreisläufe berücksichtigt und die bezüglich des Treibhauseffektes sehr wirksamen Lachgasemissionen kulturspezifisch und abhängig vom Stickstoffdüngungsniveau abgeschätzt. Die spezifischen Einsatzmengen von Grund- und Rohstoffen sowie die jeweiligen Einsatzeffizienzen sind der einschlägigen Literatur entnommen.

Die einzelnen Ergebnisse zu den Zielgrößen der Biomasse-Umwandlungspfade vom Rohstoff zur Endenergie unter Berücksichtigung von Koppelprodukten fließen ein in ein LP-Modell (Lineare Programmierung), um unter Berücksichtigung von definierten Einschränkungen den je nach Zielgröße optimalen Biomasse-Mix abzuleiten. Die Restriktionen ergeben sich aus den Ansprüchen an eine Fruchtfolge, an die Energiebedarfsstruktur und an spezielle politische Ziele, wie z. B. den Beimischungszwang von Biokraftstoffen.

Die Verarbeitung der in fester Form vorliegenden Biomasse in flüssige oder gasförmige Energieträger oder in direkt nutzbare Energie erfordert Technologie- und Energieeinsatz. Beides beeinflusst die ökonomische sowie die ökologische Bilanz negativ. Auch wenn bei der Konversion der Biomasse Koppelprodukte, wie z. B. Eiweißfuttermittel anfallen, wodurch Pflanzennährstoffe weitgehend im Kreislauf bleiben, bleibt die direkte Verbrennung zur Wärmeerzeugung derzeit die effizienteste Form der Biomassenutzung. Dies wird u. a. auch aus den Ergebnissen dieser Arbeit ersichtlich, wo die Agroforstsysteme zur Brennstoffbereitstellung häufig bis an die Obergrenze bezüglich Fläche in der Lösung erscheinen. Demgegenüber erscheinen die Biokraftstoffe nur im Pool der Lösungen, wenn sie durch entsprechende Untergrenzen in die Lösung gezwungen werden.

Die Einsparungspotenziale bezüglich des fossilen Primärenergieeinsatzes sowie die Vermeidung von Treibhausgasemissionen unterscheiden sich zwischen den Energieformen Wärme, elektrischer Strom und Kraftstoffe deutlich. Die Bandbreiten der Einsparungen liegen bezüglich fossiler Primärenergie bei der Wärmeerzeugung aus Biomasse im Bereich von 70 bis 90 Prozent, bei elektrischem Strom im Bereich von 60 bis 90 Prozent und bei Biokraftstoffen im Bereich von 20 bis 90 Prozent. Damit wird deutlich, dass es unter den getroffenen Annahmen bei allen Energieformen sehr effiziente Verfahren gibt. Die Einsparungspotenziale der Treibhausgasemissionen zeigen noch breitere Spannweiten. Die Bandbreiten der Einsparungen liegen bezüglich Treibhausgasemissionen bei der Wärmeerzeugung aus Biomasse im

Bereich von 50 bis 85 Prozent, bei elektrischem Strom im Bereich von 25 bis 90 Prozent und bei Biokraftstoffen im Bereich von 0 bis 80 Prozent. Damit zeigt sich, dass die Konversion zu elektrischem Strom oder Kraftstoffen mit Energieverlusten verbunden ist. Die hohen Einsparungspotenziale ergeben sich nur durch Wärmenutzung bzw. entsprechende Koppelprodukte, die anderweitig zu Einsparungen führen.

Neben den ökologischen Effekten der energetischen Biomassennutzung ergeben sich auch ökonomische Effekte. Durch die regionalen Wertschöpfungsketten werden Arbeitsplätze geschaffen und bei Verfahren, die gegenüber den fossilen Alternativen wettbewerbsfähig sind, auch Einkommenseffekte erzielt. Die Wettbewerbsfähigkeit wird auch durch die politischen Instrumente gewährleistet. Nicht in diese Diskussion eingeflossen ist die Fragestellung, inwieweit Tierhaltung in der Landwirtschaft durch die energetische Verwertung der Biomasse verdrängt wird. Dann ergibt sich eher ein Schwund an Arbeitsplätzen, die Einkommenseffekte verhalten sich entsprechend. Ist die Nicht-Nutzung von landwirtschaftlicher Nutzfläche die Referenz zur Nutzung mit Energie-Biomasse, so liegt das Beschäftigungspotenzial im Bereich zwischen zehn und 50 Stunden pro Hektar und Jahr, der Einkommenseffekt der gesamten Wertschöpfungsketten liegt im Bereich von wenigen Hundert Euro bis knapp 2.000 Euro.

Die so intensive Auseinandersetzung mit der energetischen Nutzung von Biomasse dauert nun circa zwei Jahrzehnte an, wovon in der zweiten Hälfte viele Entwicklungen bereits in der Praxis getestet werden konnten. Die Dynamik in der Entwicklung zeigt, dass vieles heute noch Unbekannte in Zukunft möglich sein wird. Es bleibt spannend, die zukünftigen Entwicklungen zu erleben. Grundsätzliche physikalische Zusammenhänge werden dabei wohl nicht verändert, wodurch als Fazit der schon bekannte Ausspruch bleibt: Einsparung vor Substitution vor Konversion.

---



## 6 Summary

The recognition of the finiteness of fossil fuel with the corresponding effects on prices and the increasing debate on the impacts of anthropogenic climate change have led to the search for alternative energy sources. At the same time was biomass, the oldest man-used energy source, made with the focus of considerations. The biomass is characterized by the variety of ingredients and thus by the very wide range of uses. In addition, the solar energy in the biomass and in the processed products can be stored and retrieved on demand. From the multiple uses, the question is to find the cheapest method. The relative merits of interest vary with the specific objective that is pursued. According to purely economic considerations different processes expand than focusing ecological aspects. Since environmental issues are rarely realized out of individual motivation out, the State generates policy instruments to ensure the economic viability through certain funding mechanisms. The original tax exemption of biofuels and the Renewable Energy Law are examples that have resulted the establishment and spread of biodiesel, bioethanol and biogas plants. Clearly appeared the influence of policy instruments while reducing the tax exemption for biodiesel. The market volume has been reduced to the beat, production had to file bankruptcy and could not even be put into operation. This makes it clear that there is currently no independent competitive ability of biofuels and biogas, independently of the further exploitation, compared to the fossil fuels. Only the heat supply from biomass appears economically on par compared to heat generation from fossil fuels.

For a comparative analysis of different biomass conversion pathways of biomass raw materials into usable final energy calculation method and a uniform and consistent data base are necessary. With the rules for life cycle assessment (LCA) an accepted procedure exists. From the abundance of the possible effect categories with the net energy conservation as well as the greenhouse gas saving potential two categories are picked out. The other targets employment effects and income effects are in addition to these two categories of life cycle assessment in the computer model "RegEnOpt" included. As a unified data base used life cycle assessment records, which were also used in many other life cycle assessment studies on specific products or bioenergy. In many studies on LCA, the focus was drawn to the stage of processing of biomass feedstocks. The provision of the biomass was often portrayed with rough estimates. This result, depending on the situation, and after more or less closed nutrient cycles, large

---

differences in life cycle assessment results. To meet the more, in the present study are considered actual nutrient cycles and the greenhouse effect is very effective with respect to the nitrous oxide emissions from crop-specific and dependent on the nitrogen fertilization level estimated. The specific consumption of basic raw materials and their use as well as the efficiencies are found in the relevant literature. The individual results for the outcomes of the biomass conversion paths from raw material to final energy, taking account of co-products are incorporated into an LP model (linear programming) in consideration of the constraints defined for each target to derive optimum biomass mix. The restrictions arise from the demands of a crop rotation, the energy demand structure and specific policy goals, such as the blending obligation of biofuels.

The processing of the present in solid form biomass into liquid or gaseous fuels requires technology and energy. Both the economic and the ecological balance are adversely affected. Although obtained in the conversion of biomass by-products, such as protein feed, which as plant nutrients are largely recycled, the direct combustion for heat generation is currently the most efficient use of biomass. This can be seen including the results of this study, where the agro-forestry systems for fuel supply often reach in the solution to the ceiling concerning agricultural land. In contrast, biofuels appear only in the pool of solutions when they are forced by corresponding lower limits in the solution.

The potential savings with respect to the primary fossil energy use and mitigating greenhouse gas emissions are significantly different between the forms of heat energy, electric power and fuels. The ranges of fossil primary energy savings are with respect to the heat generation from biomass in the range of 70 to 90 percent of electricity in the range 60 to 90 percent of biofuels in the range of 20 to 90 percent. This makes it clear that there are among the assumptions made for all forms of energy very efficient processes. The potential savings in greenhouse gas emissions show even wider spans. The ranges of the savings are with respect to greenhouse gas emissions from the production of heat from biomass in the range of 50 to 85 percent, with electric current in the range of 25 to 90 percent of biofuels in the range of 0 to 80 percent. This shows that the conversion is connected to electricity and fuels with energy losses. The high potential savings occur only through use of heat or corresponding coupling products, which lead to savings elsewhere.

Besides the ecological effects of biomass for energy use, there are also economic effects. Through the regional value chains creates jobs and procedures to be competitive with fossil alternatives achieved income effects. Competitiveness is also ensured by the policy instruments. Not included in this discussion is the question of how farming is displaced in agriculture through the utilization of biomass energy. Then the result would be more of a loss of employment, income effects behave accordingly. If the non-use of agricultural land is the reference to the land use with energy-biomass, the employment potential is between ten and 50 hours per hectare per year, the income effect of the entire value chain is in the range of a few hundred euros to just under 2,000 euro.

---

The so intense engagement with the energy use of biomass takes about two decades now, which in the second half of many developments have been widely tested in practice. The dynamics of the development shows that much still unknown will be possible in future. It is exciting to see the future developments. Fundamental physical relationships are not well-changed, which is summarizing the already-known saying: Savings before substitution before conversion.

---



## 7 Epilog

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen auf, dass das Potenzial der Biomasse zur Energieversorgung am derzeitigen Energiebedarf der Gesellschaft sehr begrenzt ist. Weitaus begrenzter sind die Möglichkeiten, Treibhausgasemissionen durch den Biomasseinsatz zu reduzieren. Es resultiert die Erkenntnis, dass eine „Energirevolution“ unumgänglich ist, v. a. für die westlichen Länder dieser Erde. Der Begriff Revolution implementiert keineswegs einen gewaltsamen Wandel, sondern soll viel mehr untermauern, dass aktiv und massiv gehandelt werden muss. Dieser Wandel muss in jedem einzelnen Kopf der Gesellschaft in Form einer Änderung des Bewusstseins geschehen. Jedes Individuum muss anerkennen, dass die Nutzung fossiler Energieträger nicht selbstverständlich und beliebig fortsetzbar ist. Vielmehr stellt diese Art der Energieversorgung ein Privileg der westlichen Welt dar, welches seitens der ärmeren Länder ebenso angestrebt wird. Aufgrund der Erschöpfbarkeit der fossilen Energieträger sowie den aus der Nutzung resultierenden negativen Effekte auf Klima und Umwelt kann diese Art der Energieversorgung nur eine Übergangslösung für die Menschheit darstellen. Als eine Ursache für die so hohen Steigerungsraten bei Verbrauch fossiler Energieträger kann die Tatsache angesehen werden, dass die fossilen Energieträger nicht zu tatsächlichen Preisen gehandelt werden sondern für die Preisfindung nur die Förder- und Transportkosten zuzüglich kalkulatorischer Gewinnmargen je nach Marktlage angerechnet werden. Es fehlt die Bewertung der historischen Leistung der Umwelt hinsichtlich Entstehung der Vorkommen oder besser noch die Bewertung der gesellschaftlichen Kosten, die durch die Nutzung fossiler Energieträger auftreten. Einige Beispiele für schon heute bzw. aber künftig auftretende Kosten sollen dies untermauern: Der anthropogene Anteil am Klimawandel, die Schäden an der Umwelt, die nicht nur durch Öltankerunglücke entstehen, die nicht absehbaren Folgen der Kernenergie bzw. der Endlagerung der verbrauchten Brennstäbe usw.

Bei näherer Betrachtung des aktuellen Energienutzungssystems wird deutlich, dass die aktuelle Bereitstellung der Nutzenergie mit enorm hohen Verlusten verbunden ist. Durch erhebliche Verminderungsmaßnahmen der Verluste könnte schon ein nennenswerter Anteil des Primärenergiebedarfs eingespart werden, ohne auf die hohen Nutzenergieansprüche verzichten zu müssen. Neben den positiven Umwelteffekten bei Energieeinsparung treten nach dem Systemwechsel auch positive ökonomische Effekte auf.

---

Insgesamt wird diese notwendige Energierevolution mit erheblichen Anstrengungen, Mehrkosten und Unannehmlichkeiten verbunden sein, da traditionelle Strukturen sich verändern werden. Am Ende des Kraftaktes sollte dann jedoch ein neues Niveau einer tatsächlich nachhaltigen Energieversorgung erreicht sein, das für viele künftige Generationen ein zukunftsfähiges Konzept darstellt.

Dieses von einem Idealisten skizzierte künftige System wird nur nach Umsetzung wesentlicher Maßnahmen möglich werden können: Ein wesentlicher Punkt wird die Veränderung der momentan extrem zentralisierten und nahezu monopolistischen Strukturen der fossilen Energieversorgung sein. Aufgrund der extremen Konzentration und den entsprechenden Machtverhältnissen wird eine dezentral organisierte und einem tatsächlichen Markt entsprechende Energieversorgung den wohl größten Kraftakt erfordern. Ein zweiter wesentlicher Punkt gilt der primären Aufgabe der Landwirtschaft mit der Ernährung der Menschheit. Verzerrungen treten hierbei in zunehmendem Maße auf, wenn v. a. westliche Industrieländer die Bereitstellung von erneuerbaren Energieträgern auf Biomassebasis fördern. Agrarrohstoffpreise werden damit an die fossilen Energiemärkte gekoppelt, deren Preise tendenziell steigen. Gerade arme Nationen mit Nettoimporten von Nahrungsmitteln, aber auch arme Agrarstaaten mit Nettoexporten von Nahrungsmitteln werden zunehmend Hungerkatastrophen zu verzeichnen haben. Analog der Kaffee- und Bananendiskussion der Vergangenheit sind westliche Industrienationen verantwortlich, wenn die in armen Ländern erzeugten Agrarrohstoffe eben nicht zur Ernährung der eigenen Bevölkerung, sondern zur Devisenbeschaffung durch Energieträgerverkauf verwendet werden. Ein ehrlicheres und gerechteres Vorgehen zur Steigerung der Wettbewerbskraft von erneuerbaren Energien nicht nur in Industriestaaten wäre anstelle der positiven Förderung eine entsprechende Belastung der fossilen Energieträger. Beispielsweise könnte eine angemessene CO<sub>2</sub>-Steuer zur Verteuerung fossiler Energieträger beitragen. Erhebungsort der Steuer könnten im Hinblick auf die administrative Durchführbarkeit die Flaschenhälse der Energieversorgung wie z.B. Raffinerien, Kraftwerke usw. sein, die natürlich analog dem EEG-Mechanismus diese Zusatzbelastung an den Konsumenten weitergeben dürfen. Neben der Vermeidung von Verzerrungen in den Nahrungsmittelmärkten hat eine solche CO<sub>2</sub>-Steuer einen zweiten positiven Effekt. Der Konsument muss je verbrauchter Energieeinheit mehr bezahlen und wird entsprechend motiviert, seine Bedürfnisse durch Einsparungsmaßnahmen mit weniger Energieeinheiten zu decken. Eine analog der Ökosteuer schrittweise Steigerung der CO<sub>2</sub>-Steuer kann soziale Konfliktbereiche abmildern, denn nach entsprechender Ankündigungsfrist und mit einigen Steigerungsintervallen bleibt jedem die entsprechende Zeit, die Gewohnheiten und die Ausstattung an PKWs, Heizungssystemen oder Elektrogeräten anzupassen. Dem Argument der KfZ-Lobby von Verlusten an Arbeitsplätzen kann begegnet werden durch das Argument, dass ein solcher Systemwechsel in erheblichem Umfang neue Arbeitsplätze erfordert, um Innovationen zunächst zu entwickeln und dann mit entsprechender Produktionskapazität bereitzustellen. Der Nettoarbeitseffekt wird zumindest bis zu einem gewissen Sättigungszeitpunkt positiv ausfallen. Darüber hinaus werden sich

---

gerade solche Innovationen als Exportschlager entwickeln, wie das erfindungsstarke Deutschland schon vielfach bewiesen hat. Der Widerstand der bisherigen gewichtigen Marktteilnehmer gegenüber einem Systemwechsel ist nachvollziehbar. So haben doch gerade kleine, flexible und innovative Unternehmen in Umbruchzeiten große Chancen, sich am neu entstehenden Markt zu etablieren, was unweigerlich zum Verlust von Marktanteilen der Alteingesessenen führt. Wie die Geschichte zeigt, wird beim Menschen erst dann der Erfindergeist umfassend aktiviert, wenn es akute Notsituationen erfordern. Damit soll keine Not heraufbeschworen werden, sondern darauf hingewiesen werden, dass ein drastischer, politisch initiiertes Wechsel notwendig ist, um einen Umdenkprozess anzustoßen sowie grundsätzlich erforderliche Maßnahmen in die Wege zu leiten.

Eine sofort umsetzbare Maßnahme zur erheblichen Einsparung von Kraftstoffen stellt die Geschwindigkeitsbegrenzung auf deutschen Autobahnen dar. Eine einfache Rechnung soll dies verdeutlichen: In Deutschland sind 45 Millionen Autos zugelassen. Angenommen, jedes Auto lege im Durchschnitt 12.000 Kilometer zurück, davon die Hälfte auf Autobahnen. Durch die Einführung der Höchstgeschwindigkeit auf Autobahnen von 120 Stundenkilometern wird eine Kraftstoffeinsparung von zwei Litern je 100 Kilometer unterstellt. Diese Kraftstoffeinsparung hat eine Treibhausgasemissionsminderung von 16 Millionen Tonnen zur Folge, was einem Anteil von knapp sechs Prozent der Treibhausgasemissionen aus flüssigen fossilen Energieträgern in Deutschland entspricht. Das Argument der Interessensverbände von Autofahrern gegen eine Einführung von einer Geschwindigkeitsbegrenzung mit der Begründung, dass die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit auf Autobahnen kaum über 120 Stundenkilometern liege, kann aufgegriffen und verwendet werden. Warum sollen Autos auf der Autobahn streckenweise weit jenseits der 200 Stundenkilometer fahren, wenn dann wieder Passagen mit Schritttempo folgen, woraus sich dann die tatsächliche durchschnittliche Reisegeschwindigkeit ergibt. Der durch die Geschwindigkeitsbegrenzung verursachte Zeitverlust wird sich in Grenzen halten, wogegen eine nennenswerte Kraftstoffeinsparung Tatsache sein wird.

Um schon die künftigen Entscheidungsträger möglichst früh für die skizzierten Notwendigkeiten zu sensibilisieren, gilt es, möglichst früh bei der Erziehung diese Themen aufzugreifen. Für Schüler der höheren Klassen könnte zum Beispiel das Werk von MEADOWS et al. (2006), nun schon in der dritten komplett überarbeiteten Auflage erschienen, eine Pflichtlektüre darstellen. Neben der Sensibilisierung der jungen Generation auf die Notwendigkeiten grundlegender Veränderungen der individuellen Gewohnheiten hinsichtlich des Ressourcenverbrauchs bietet das Werk Fächer übergreifende Themen. Die Zusammenhänge und Folgen von exponentiellem Wachstum als Thema der Mathematik beschreiben Zusammenhänge der Energienutzung und deren Folgen, die Thema des Erdkundeunterrichtes sind. Die Originalausgabe wäre zudem für den Englischunterricht geeignet.

Abschließend erlaubt sich der Autor, aus seiner Fantasie heraus einen Blick in die Zukunft zu wagen und eine Art Vision zu entwickeln, die als sehr überspannte und dramatisierte Darstel-

lung des Menschendenkbaren angesehen werden kann, wohl wissend, dass diese so nie eintreten wird.

Aus den vorangegangenen Ausführungen wurde das eng begrenzte Potenzial der Biomasse für die derzeitige Energieversorgung deutlich. Der Blick in die Geschichte zeigt, dass dies für die Menschheit keine ausweglose Situation darstellt. Die Hypothese von Malthus, ein exponentielles Wachstum der Bevölkerung gegenüber nur einem linearen Wachstum der Nahrungsmittelproduktion müsse unweigerlich zu sich wiederholenden Einbrüchen der Bevölkerung aufgrund Hungersnöte führen, hat sich nicht bestätigt. Thärs Ansätze zur Intensivierung der Landwirtschaft, die mineralische Düngung, Pflanzenschutzmaßnahmen und die aktuell heiß diskutierte Gentechnologie ermöglichten und sollen auch künftig so genannte Quantensprünge in einem auf Linearität begrenzten Wachstum ermöglichen. Ausgehend von diesen Entwicklungen im Bereich der Nahrungsmittelproduktion wagt der Autor einen Blick in die Zukunft der Energieversorgung, deren aktuelle Entwicklung aufgrund der begrenzten Ressourcen fossiler Energieträger in einer Sackgasse zu enden scheint.

Die Erde im Jahr 2100. Fossiles Erdöl herkömmlicher Art ist lange erschöpft. Die seit dem Jahr 2000 enorm gewachsene Gier nach flüssigen Energieträgern, v. a. für die individuelle Mobilität, wird gestillt aus verflüssigtem Erdgas, verflüssigter Kohle, aus Ölsanden und ein wenig aus Biokraftstoffen, vielleicht schon aus einer so genannten dritten oder vierten Generation. Jedoch eine innovative, Erfolg versprechende und Bahn brechende Erfindung scheint die Lösung aller Kraftstoffprobleme und vielleicht Energieprobleme zu werden: Die künstliche Photosynthesemaschine. Mit sechs Prozent Kohlendioxidanteil in der Atmosphäre scheint die „Rohstoffsituation“ für diese Maschine unerschöpflich. Diese Maschine fängt Kohlendioxid ein, um es mit Wasser unter direkter Nutzung der Sonnenenergie in Kohlenwasserstoffverbindungen und Sauerstoff reagieren zu lassen. Diese Maschine wird nach wenigen Jahren für jeden erschwinglich sein. Neugebaute Häuser gibt es nicht mehr ohne Sonnenkollektoren und diese Maschine unterm Dach. Jeder tankt sein maximal „Zwei-Liter“-Auto in der eigenen Garage. Gegen Aufpreis, versteht sich, ist für das Auto ein Kohlendioxid-Auffangmodul zu bekommen. Das aus der Treibstoffverbrennung entstandene Kohlendioxid wird aufgefangen und beim Tanken zuhause der Photosynthesemaschine wieder zur Verfügung gestellt. Diese Maschine wird übrigens wesentlich effizienter sein, als es die Pflanzenwelt je sein kann. Denn es werden keine schon erzeugten, hochwertigen Kohlenwasserstoffverbindungen für einen Stoffwechsel, v. a. bei Nacht, wieder verbraucht. Es scheint die Lösung gefunden in einer Zeit, in der die Großeltern ihren Enkelkindern von weißem Pulver, das früher vom Himmel fiel, erzählen und von dem Spaß, den sie in dieser weißen Pracht hatten. Durch diese Photosynthesemaschine, die in der Nähe jeder Garage steht, werden globale Machtzentren überflüssig. Dies wollten sich die ehemaligen Machthaber zunächst nicht gefallen lassen. Der Druck der mittlerweile weit mehr als zehn Milliarden Menschen auf der Erde half, dass die neue Entwicklung der dezentralen und friedlichen Energieversorgung nicht mehr aufzuhalten war. Eine nun heile Welt? Mit Nichten. Das Wasser der abgeschmolzenen Polkappen hat viele

---

ursprüngliche Agrarstandorte im Wasser versinken lassen. Das Hungerproblem ist größer denn je, trotz der zwei Ernten pro Jahr, die nun auch in den früheren gemäßigten Breiten möglich sind. Natur- und Klimakatastrophen führen ständig zu Ernteausschlägen. Die Photosynthesemaschine jedoch arbeitet über den ganzen Globus verteilt mit den entsprechenden Folgen. Im Jahr 2200 ist die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre auf kritische ein bis zwei Prozent gesunken. Viele Pflanzen sind vom Aussterben bedroht, weil ihre Photosynthese nicht mehr funktioniert. Die geringe Kohlendioxidkonzentration vermindert den Treibhauseffekt dermaßen, dass Forscher prognostizieren, ihre Kinder könnten es erleben, „zu Fuß“ von Neuseeland nach Feuerland auf dem Eis gelangen zu können. Die Lösung zum Anheben der Kohlendioxidkonzentration scheint in fossilen Energieträgern gefunden, die ja nur verbrannt werden müssten. Die meisten Lagerstätten sind jedoch längst erschöpft und deren Kohlenstoff im neuen, anthropogenen Kohlenstoffkreislauf gebunden.

Unsere Erde kann spätestens seit der Industrialisierung nicht mehr als unerschöpfliche Quelle jeglicher Rohstoffe und Senke mit unendlichen Kapazitäten für Zivilisationsabfälle und Emissionen angesehen werden. Jegliches menschliche Handeln hat mit fortschreitender Zeit immer größere Einflüsse auf die gesamten Lebensbedingungen auf der mittlerweile globalisierten Erde. Je früher deswegen massiv und überlegt gehandelt wird, desto geringer wird letztendlich die Gefahr, dass die Menschheit doch einmal in einer Sackgasse endet.

---



## 8 Literatur

- ABL. EG (Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft) (1957): Vertrag zur Gründung der Europäischen Wirtschaftsgemeinschaft vom 25.3.1957, S. 165-1147.
- ABL. EG (Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft) (2001a): Richtlinie 2001/77/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen im Elektrizitätsbinnenmarkt vom 27. 10. 2001, S. L 283/33 - L283/47.
- ABL. EG (Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft) (2001b): Verordnung (EG) Nr. 761/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. März 2001 über die freiwillige Beteiligung von Organisationen an einem Gemeinschaftssystem für das Umweltmanagement und die Umweltbetriebsprüfung (EMAS) vom 21. 4. 2004, S. L 114/1 - L114/29.
- ABL. EG (2003a): Richtlinie 2003/30/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Förderung der Verwendung von Biokraftstoffen oder anderen erneuerbaren Kraftstoffen im Verkehrssektor vom 8. 5. 2003, S. L 123/42 - L123/46.
- ABL. EG (2003b): Richtlinie 2003/96/EG des Rates zur Restrukturierung der gemeinschaftlichen Rahmenvorschriften zur Besteuerung von Energieerzeugnissen und elektrischem Strom vom 31.10.2003, S. L 283/51 - L 283/70.
- ABL. EG (Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft) (2009): Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG vom 5. 9. 2009, S. L 140/16 - L 140/62.
- AG ENERGIEBILANZEN (2005): Primärenergieverbrauch. <http://www.ag.energiebilanzen.de> (Abrufdatum: 1. 6. 2005).
- AG ENERGIEBILANZEN (2011): Primärenergieverbrauch. <http://www.ag.energiebilanzen.de> (Abrufdatum: 22. 10. 2011).
- AGRA-EUROPE (Unabhängiger Europäischer Presse- und Informationsdienst für Agrarpolitik und Agrarwirtschaft) (Hrsg.) (verschiedene Jahrgänge): Meldungen über Bioenergie. verschiedene Jahrgänge (verschiedene Nummern), Bonn, Berlin - Brüssel - Paris - Madrid - Wien.
- AICHERNIG, C. (2004): Das Güssing-Projekt. In: FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V.: Biomasse-Vergasung - Der Königsweg für eine effiziente Strom- und Kraftstoffbereitstellung?, Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe" Band 24, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, S. 225-233.
-

- AID (Auswertungs- und Informationsdienst für Landwirtschaft und Forsten e.V.) (Hrsg.) (1997): Agrarmarktordnungen in der Europäischen Union und Agrarmärkte in Deutschland. Bonn.
- ALTHAPP, A. (2004): Kraftstoff aus Biomasse mit dem Carbo-V-Vergasungsverfahren. In: SPECHT, M.; ZUBERBÜHLER, U.; ZIMMER, U., ZENTRUM FÜR SONNENENERGIE- UND WASSERSTOFF-FORSCHUNG; STADERMANN, G., FORSCHUNGSVERBUND SONNENENERGIE (HRSG.): ForschungsVerbund Sonnenenergie Fachtagung. Regenerative Kraftstoffe. Entwicklungstrends, Forschungs- und Entwicklungsansätze, Perspektiven. 13.-14. 11. 2003 im ZSW in Stuttgart, Berlin, S. 218-227.
- ASUE (Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e. V.) (Hrsg.) (2005): BHKW-Kenndaten 2005 - Module, Anbieter, Kosten. ASUE, Frankfurt am Main.
- ASUE (Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e. V.) (Hrsg.) (2007): Bioerdgas: Regenerative Energie mit Zukunft - Standortbestimmung für Energieversorger. ASUE, Kaiserslautern.
- BANDI, A. (2004): Verfahrensübersicht: Gasreinigungsverfahren. In: SPECHT, M.; ZUBERBÜHLER, U.; ZIMMER, U., ZENTRUM FÜR SONNENENERGIE- UND WASSERSTOFF-FORSCHUNG; STADERMANN, G., FORSCHUNGSVERBUND SONNENENERGIE (HRSG.): ForschungsVerbund Sonnenenergie Fachtagung. Regenerative Kraftstoffe. Entwicklungstrends, Forschungs- und Entwicklungsansätze, Perspektiven. 13.-14. 11. 2003 im ZSW in Stuttgart, Berlin, S. 124-131.
- BANNERT, M. (2004): Weltweite "Strategien" für Klimaschutz und nachhaltige Energienutzung. Energy - Die Zeitschrift der Energieverwertungsagentur H. 1, S. 21-23.
- BARTH, F.; MÜHLBAUER, P.; NIKOL, F.; WÖRLE, K. (1990): Mathematische Formeln und Definitionen. Bayerischer Schulbuch-Verlag, 5. Auflage, München.
- BDI; VIK; VDEW; VDN; ARE; VKU (Bundesverband der Deutschen Industrie e.V., Verband der Industrieellen Energie- und Kraftwirtschaft e.V., Verband der Elektrizitätswirtschaft e.V., Verband der Netzbetreiber e.V., Arbeitsgemeinschaft regionaler Energieversorgungs-Unternehmen e.V., Verband kommunaler Unternehmen e.V.) (2001): Verbändevereinbarung über Kriterien zur Bestimmung von Netznutzungsentgelten für elektrische Energie und über Prinzipien der Netznutzung. <http://www.vdn-berlin.de> (Abrufdatum: 25.1.2007).
- BECKSCHULTE VERFAHRENSTECHNIK GMBH (2001): Schüttguttabelle. [http://www.bv-net.de/deutsch/080\\_service/08600\\_schuettguttabelle.htm](http://www.bv-net.de/deutsch/080_service/08600_schuettguttabelle.htm) (Abrufdatum: 23.4.2008).
- BEHRENDT, F.; NEUBAUER, Y.; SCHULZ-TÖNNIES, K.; WILMES, B.; ZOBEL, N. (2006): Direktverflüssigung von Biomasse - Reaktionsmechanismen und Produktverteilungen. Technische Universität Berlin, Institut für Energietechnik, Fachgebiet Energieverfahrenstechnik und Umwandlungstechniken regenerativer Energien, Berlin.
- BERG, M.; BRODMANN, U.; OTT, W. (2003): Vision 2050: Nachhaltige Energieversorgung und Energienutzung in der Schweiz. Bundesamt für Energie, Zürich.
- BERGER, R.; HEIN, K.R.G. (2004): Verfahrensübersicht: Synthesegaserzeugung aus Biomasse. In: SPECHT, M.; ZUBERBÜHLER, U.; ZIMMER, U., ZENTRUM FÜR SONNENENERGIE- UND WASSERSTOFF-FORSCHUNG; STADERMANN, G., FORSCHUNGSVERBUND SONNENENERGIE (HRSG.): ForschungsVerbund Sonnenenergie Fachtagung. Regenerative Kraftstoffe. Entwicklungstrends, Forschungs- und Entwicklungsansätze, Perspektiven. 13.-14. 11. 2003 im ZSW in Stuttgart, Berlin, S. 114-123.
-

- BFR (Bundesinstitut für Risikobewertung) (2006): Chemikalienbewertung. <http://www.bfr.bund.de> (Abrufdatum: 6. 3. 2006).
- BGBL. (Bundesgesetzblatt) Teil 1 (1955): Landwirtschaftsgesetz vom 5.9.1955, S. 565.
- BGBL. (Bundesgesetzblatt) Teil 1 (1990): Gesetz über die Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien in das öffentliche Netz (Stromeinspeisungsgesetz) vom 7.12.1990, S. 2633.
- BGBL. (Bundesgesetzblatt) Teil 1 (1992): Mineralölsteuergesetz vom 21.12.1992, S. 2150-2185 (1993 I S. 169, 2000 I S. 147).
- BGBL. Teil 1 (1997): Gesetz zur Neuordnung der Steinkohlesubventionen vom 17.12.1997, S. 1638-1639.
- BGBL. (Bundesgesetzblatt) Teil 1 (1998): Gesetz zur Neuregelung des Energiewirtschaftsrechts vom 24.4.1998, S. 730-734.
- BGBL. (Bundesgesetzblatt) Teil 1 (2000): Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG) vom 29.3.2000, S. 305-309.
- BGBL. (Bundesgesetzblatt) Teil 1 (2002a): Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung vom 19.3.2002, S. 1092-1096.
- BGBL. (Bundesgesetzblatt) Teil 1 (2002b): Gesetz zur Änderung des Mineralölsteuergesetzes und anderer Gesetze vom 29.6.2002, S. 2778-2781.
- BGBL. (Bundesgesetzblatt) Teil 1 (2002c): Gesetz zur Ausführung der Verordnung (EG) Nr. 761/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. März 2001 über die freiwillige Beteiligung von Organisation an einem Gemeinschaftssystem für das Umweltmanagement und die Umweltbetriebsprüfung (EMAS) (Umweltaudit - UAG) vom 10.9.2002, S. 3491-3502.
- BGBL. (Bundesgesetzblatt) Teil 1 (2004): Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich vom 21.7.2004, S. 1918-1930.
- BGBL. Teil 1 (2005a): Gesetz zur Einsparung von Energie in Gebäuden (Energieeinsparungsgesetz - EnEG) vom 7. 9. 2004, S. 2684.
- BGBL. (Bundesgesetzblatt) Teil 1 (2005b): Verordnung über die Entgelte für den Zugang zu Gasversorgungsnetzen (Gasnetzentgeltverordnung - GasNEV) vom 25. 7. 2005, S. 2197.
- BGBL. (Bundesgesetzblatt) Teil 1 (2006a): Gesetz zur Einführung der Biokraftstoffquote durch Änderung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes und zur Änderung energie- und stromsteuerrechtlicher Vorschriften (Biokraftstoffquotengesetz -BioKraftQuG) vom 18.12.2006, S. 3180-3188.
- BGBL. (Bundesgesetzblatt) Teil 1 (2006b): Gesetz zur Neuregelung der Besteuerung von Energieerzeugnissen und zur Änderung des Stromsteuergesetzes vom 15.7.2006, S. 1534-1561.
- BGBL. (Bundesgesetzblatt) Teil 1 (2006c): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung - DüV) vom 13.1.2006, S. 34-43.
- BGBL. (Bundesgesetzblatt) Teil 1 (2007): Verordnung über die Anreizregulierung der Energieversorgungsnetze (Anreizregulierungsverordnung - ARegV) vom 29. 10. 2007, S. 2529.
-

- BGBL. Teil 1 (2008a): Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG) vom 25.10.2008, S. 2074-2100.
- BGBL. (Bundesgesetzblatt) Teil 1 (2008b): Gesetz zur Förderung der Kraft-Wärme-Kopplung vom 25.10.2008, S. 2101-2109.
- BGBL. Teil 1 (2009): Gesetz zur Einsparung von Energie in Gebäuden (Energieeinsparungsgesetz - EnEG) vom 28. 3. 2009, S. 643.
- BGBL. (Bundesgesetzblatt) Teil 1 (2010a): Verordnung über den Zugang zu Gasversorgungsnetzen (Gasnetzzugangsverordnung - GasNZV) vom 3. 9. 2010, S. 1261.
- BGBL. (Bundesgesetzblatt) Teil 1 (2010b): Verordnung über die Entgelte für den Zugang zu Gasversorgungsnetzen (Gasnetzentgeltverordnung - GasNEV) vom 3. 9. 2010, S. 1261.
- BGBL. (Bundesgesetzblatt) Teil 1 (2011): Gesetz zur Neuregelung des Rechtsrahmens für die Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien vom 28.7.2011, S. 1634-1678.
- BGVV (Bundesinstitut für gesundheitlichen Verbraucherschutz und Veterinärmedizin) (Hrsg.) (2001): Tätigkeitsbericht 2000/2001. Berlin.
- BICKEL, P.; FRIEDRICH, R.; DROSTE-FRANKE, B.; BACHMANN, T. M.; GREBMAN, A.; RABL, A.; HUNT, A.; MARAKANDYA, A.; TOL, R.; HURLEY, F.; NAVRUD, S.; HIRSCHBERG, S.; BURGHERR, P.; HECK, T.; TORFS, R.; NOCKER, L. DE; VERMOOTE, S.; INTPANIS, L.; TIDBLAD, J. (2005): Externe Externalities of Energy Methodology 2005 Update. European Commission, Luxemburg.
- BIOPETROL INDUSTRIES AG (Hrsg.) (2006): Geschäftsbericht 2005 - Wachstum mit Qualität. Zug, Schweiz.
- BIOPETROL INDUSTRIES AG (Hrsg.) (2007): Geschäftsbericht 2006. Zug, Schweiz.
- BIOPETROL INDUSTRIES AG (Hrsg.) (2008): Geschäftsbericht 2007 - Visionen für eine bessere Umwelt. Zug, Schweiz.
- BMELV (Hrsg.) (2006): Statistisches Jahrbuch über Ernährung Landwirtschaft und Forsten 2006. Landwirtschaftsverlag GmbH Münster-Hiltrup, 50. Jahrgang, Münster.
- BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz) (Hrsg.) (2009a): Nationaler Biomasseaktionsplan für Deutschland - Beitrag der Biomasse für eine nachhaltige Energieversorgung. Berlin.
- BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz) (2009b): Nationaler Biomasseaktionsplan für Deutschland - Beitrag der Biomasse für eine nachhaltige Energieversorgung - Anhang. [http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/broschuere\\_biomasseaktionsplan\\_anhang.pdf](http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/broschuere_biomasseaktionsplan_anhang.pdf) (Abrufdatum: 24. 10. 2011).
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (Hrsg.) (1997): Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung im Juni 1992 in Rio de Janeiro - Dokumente - Agenda 21. BMU, Bonn.
- BMU (2000): Nationales Klimaschutzprogramm. Umwelt H. Sonderteil Nr. 11, S. 1-16.
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (Hrsg.) (2002): Erneuerbare Energien und nachhaltige Entwicklung. Förderüberblick - Ansprechpartner und Adressen. Berlin.

- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (Hrsg.) (2004a): Klimaschutz - Global und Lokal. Herausforderung für das 21. Jahrhundert. Berlin.
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (Hrsg.) (2004b): Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland. Berlin.
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (Hrsg.) (2006): Erneuerbare Energien in Zahlen - nationale und internationale Entwicklung. Stand: Mai 2006, Berlin.
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (Hrsg.) (2007): Entwicklung der erneuerbare Energien im Jahr 2006 in Deutschland. Stand: 21. Februar 2007, Berlin.
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (Hrsg.) (2011a): Erneuerbare Energien in Zahlen - nationale und internationale Entwicklung. Stand: Juni 2011, Berlin.
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2011b): Internationale Klimapolitik. [http://www.bmu.de/klimaschutz/internationale\\_klimapolitik/doc/37650.php](http://www.bmu.de/klimaschutz/internationale_klimapolitik/doc/37650.php) (Abrufdatum: 22. 10. 2011).
- BMVEL (Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft) (Hrsg.) (2001): Agrarbericht der Bundesregierung 2001. Berlin.
- BMVEL (Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft) (Hrsg.) (2003): Ernährungs- und agrarpolitischer Bericht der Bundesregierung 2003. Berlin.
- BMVEL (Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft) (Hrsg.) (2004a): Ernährungs- und agrarpolitischer Bericht der Bundesregierung 2004. Berlin.
- BMVEL (Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft) (Hrsg.) (2004b): Statistisches Jahrbuch über Ernährung Landwirtschaft und Forsten 2004. Landwirtschaftsverlag GmbH Münster-Hiltrup, 48. Jahrgang, Münster.
- BMVEL (Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft) (Hrsg.) (2005a): Agrarpolitischer Bericht der Bundesregierung 2005. Berlin.
- BMVEL (Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft) (Hrsg.) (2005b): Meilensteine der Agrarpolitik - Umsetzung der europäischen Agrarreform in Deutschland. Berlin.
- BMWA (Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit) (2005): Energiedaten - Nationale und internationale Entwicklung. <http://www.bmwi.de/> (Abrufdatum: 17. 11. 2005).
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie) (Hrsg.) (2001): Energiepolitische und gesamtwirtschaftliche Bewertung eines 40%-Reduktionsszenarios. Berlin.
- BMWi (2008): Energiedaten - Nationale und internationale Entwicklung. <http://www.bmwi.de/> (Abrufdatum: 24. 4. 2008).
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie) (2011): Energiedaten - Nationale und internationale Entwicklung. <http://www.bmwi.de/> (Abrufdatum: 22. 10. 2011).
- BOLHAR-NORDENKAMPF, M.; JÖRG, K. (2004): Gasreinigung - Stand der Technik. In: FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V.: Biomasse-Vergasung - Der Königsweg für eine effiziente Strom- und Kraftstoffbereitstellung?, Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe" Band 24, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, S. 84-107.
-

- BOUKIS, B.; DIEM, V.; GALLA, U.; D'JESUS, P.; DINJUS, E. (2004): Wasserstofferzeugung durch hydrothermale Vergasung. In: SPECHT, M.; ZUBERBÜHLER, U.; ZIMMER, U., ZENTRUM FÜR SONNENENERGIE- UND WASSERSTOFF-FORSCHUNG; STADERMANN, G., FORSCHUNGSVERBUND SONNENENERGIE (HRSG.): ForschungsVerbund Sonnenenergie Fachtagung. Regenerative Kraftstoffe. Entwicklungstrends, Forschungs- und Entwicklungsansätze, Perspektiven. 13.-14. 11. 2003 im ZSW in Stuttgart, Berlin, S. 165-175.
- BOUWMAN, A. F. (1996): Direct emission of nitrous oxide from agricultural soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 46 (1), S. 53-70.
- BOUWMAN, A. F.; BOUMANS, L. J. M.; BATJES, N. H. (2002a): Emissions of N<sub>2</sub>O and NO from fertilized fields: Summary of available measurement data. *Global Biogeochemical Cycles* 16 (4), S. 1058.
- BOUWMAN, A. F.; BOUMANS, L. J. M.; BATJES, N. H. (2002b): Modeling global annual N<sub>2</sub>O and NO emissions from fertilized fields. *Global Biogeochemical Cycles* 16 (4), S. 1080.
- BRANDES, W.; ODENING, M. (1992): Investition, Finanzierung und Wachstum in der Landwirtschaft. Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart.
- BRAUCH, G. (2002): Klimawandel, Umweltstress und Konflikt. In: BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (HRSG.): *Umweltpolitik Klimawandel und Konflikte - Verursacht der Klimawandel Konfliktpotenziale? Wie kann der internationale Klimaschutzprozess hierauf reagieren?*, Berlin, S. 11-110.
- BRENDLER, F.; GEBEL, D.; HANHART, H.; HEINRICH, C.; KLINGENHAGEN, G.; KRAMER, H.; WINKELHEIDE, E. (2005): Unkraut sicher fassen. In: *LANDWIRTSCHAFTLICHES WOCHEBLATT WESTFALEN-LIPPE: Praxis Pflanzenschutz - Experten geben Rat*, Landwirtschaftsverlag GmbH Münster-Hiltrup, Münster, S. 14-19.
- BRENDDÖRFER, M.; GRAF, T. (2005): Anlagentechnik der Ölabbpressung. In: *KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT (HRSG.): Dezentrale Ölsaatenverarbeitung*, KTBL-Schrift 427, KTBL, Darmstadt, S. 31-36.
- BRINK, A.; DAMHORST, H.; KRAMER, D.; ZWEHL, W. v. (1991): *Lineare und ganzzahlige Optimierung mit impac - Handbuch und Programmdiskette*. Verlag Franz Vahlen, München.
- BUNDESARBEITSKREIS FUTTERKONSERVIERUNG (Hrsg.) (2006): *Praxishandbuch Futterkonservierung: Silagebereitung, Siliermittel, Dosiergeräte, Silofolien*. DLG-Verlags-GmbH, 7. überarbeitete Auflage, Frankfurt am Main.
- CHOREN INDUSTRIES (2004): *Strom und Wärme aus Biomasse. Das Carbo-V-Verfahren*. Freiberg.
- CHOREN INDUSTRIES (2007): *Biomass to Liquids - Eine Technologie, deren Zeit gekommen ist*. 22. November 2007 - Tag der offenen Tür an der Beta-Anlage Freiberg. <http://www.choren.com/> (Abrufdatum: 28.8.2008).
- CHOREN INDUSTRIES (2011): *Pressemitteilungen*. <http://www.choren.com/> (Abrufdatum: 6. 11. 2011).
- CHOREN INDUSTRIES (2012): *Verbesserte Umweltbilanz*. <http://www.choren.com/> (Abrufdatum: 30.03.2012).
- CROPENERGIES AG (Hrsg.) (2007): *Geschäftsbericht 2006/2007*. Mannheim.
-

- DENA (Deutsche Energie-Agentur GmbH) (Hrsg.) (2006): Biomass to Liquid - BtL Realisierungsstudie. Zusammenfassung. Berlin.
- DIEPENBROCK, W.; PELZER, B.; RADTKE, J. (1995): Energiebilanz im Ackerbaubetrieb. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Arbeitspapier 211, Darmstadt.
- DIN (Deutsches Institut für Normung) (Hrsg.) (1997): DIN EN ISO 14040 Umweltmanagement: Ökobilanz - Prinzipien und allgemeine Anforderungen. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- DIN (Deutsches Institut für Normung) (Hrsg.) (1998): DIN EN ISO 14041 Umweltmanagement: Ökobilanz - Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- DIN (Deutsches Institut für Normung) (Hrsg.) (2000a): DIN EN ISO 14042 Umweltmanagement: Ökobilanz - Wirkungsabschätzung. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- DIN (Deutsches Institut für Normung) (Hrsg.) (2000b): DIN EN ISO 14043 Umweltmanagement: Ökobilanz - Auswertung. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- DLG (Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e. V.) (Hrsg.) (2004): Die neue Betriebszweigabrechnung. DLG-Verlags-GmbH, 2. vollständig überarbeitete Neuauflage, Arbeiten der DLG, Bd. 197, Frankfurt am Main.
- DOERING, O. C. (1980): Accounting for energy in farm machinery and buildings. In: PIMENTEL, D. (HRSG.): Handbook of Energy Utilisation in Agriculture, CRC Press, Boca Raton, Florida, S. 9-14.
- DÖHLER, H.; DÄMMGEN, U.; EURICH-MENDEN, B.; OSTERBURG, B.; LÜTTICH, M.; BERG, W.; BERGSCHMIDT, A.; BRUNSCH, R. (2002): BMVEL/UBA-Ammoniak-Emissionsinventar der deutschen Landwirtschaft und Minderungsszenarien bis zum Jahre 2010. Umweltbundesamt, UBA Texte 05/02, Berlin.
- DOMSCHKE, W.; DREXL, A. (1995): Einführung in Operations Research. Springer-Verlag, 3. Auflage, Berlin.
- DOMSCHKE, W.; DREXL, A. (2005): Einführung in Operations Research. Springer-Verlag, 6. Auflage, Berlin.
- DREIER, T.; TZSCHEUTSCHLER, P. (2000): Ganzheitliche Systemanalyse für die Erzeugung und Anwendung von Biodiesel und Naturdiesel im Verkehrssektor. Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, Gelbes Heft 72, München.
- DVGW (Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V.) (Hrsg.) (2000): Gasbeschaffenheit. Technische Regel Arbeitsblatt 260, Bonn.
- DVGW (Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V.) (Hrsg.) (2004): Nutzung von Gasen aus regenerativen Quellen in der öffentlichen Gasversorgung. Technische Regel Arbeitsblatt 262, Bonn.
- EBERLE, M. (2006): Biodieselherstellung der Hallertauer Hopfenveredelungsgesellschaft (HHV). Mündliche Auskunft am 13.10.2006 in Mainburg.
- ECOINVENT (2007): Ecoinvent Data v2.0. Dübendorf.
- EDER, B.; SCHULZ, H. (2006): Biogas - Praxis. Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele, Wirtschaftlichkeit. ökobuch Verlag, 3. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, Staufen bei Freiburg.
-

- ELSTER, K.-H. (1978): Nichtlineare Optimierung. Mathematik für Ingenieure, Naturwissenschaftler, Ökonomen und sonstige Anwendungsorientierte Berufe. Band 15. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main.
- EOP BIODIESEL AG (European Oil Products Biodiesel AG) (Hrsg.) (2007): Geschäftsbericht 2006/2007. Mainz.
- ERICSSON, K.; NILSSON, L. (2006): Assessment of the potential biomass supply in Europe using a resource-focused approach. *Biomass and Bioenergy* 30 (1), S. 1-15.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2010): Die GAP bis 2020: Nahrungsmittel, natürliche Ressourcen und ländliche Gebiete – die künftigen Herausforderungen. [http://ec.europa.eu/agriculture/cap-post-2013/communication/index\\_de.htm](http://ec.europa.eu/agriculture/cap-post-2013/communication/index_de.htm) (Abrufdatum: 24. 10. 2011).
- EUROPEAN COMMISSION (2006): ExternE - Externalities of Energy. A Research Project of the European Commission. <http://www.externe.info/> (Abrufdatum: 10.5.2007).
- EUROSTAT (2008): Europa in Zahlen. <http://epp.eurostat.cec.eu.int/> (Abrufdatum: 24.4.2008).
- EYERER, P.; REINHARDT, H.-W. (2000): Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden - Wege zu einer ganzheitlichen Bilanzierung. Birkhäuser Verlag, Basel.
- FACHVERBAND BIOGAS E.V. (2007): Pressemitteilungen. <http://www.biogas.org> (Abrufdatum: 14.2.2007).
- FFE (Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.) (2005): Ergebnisse zur Ganzheitlichen Bilanzierung. <http://www.ffe.de> (Abrufdatum: 7.12.2005).
- FISCHER SCIENTIFIC (2008): Apparatus & Chemicals 2007/08 catalogue. <http://www.fisher.co.uk/> (Abrufdatum: 16.4.2008).
- FLAMME, S. (2002): Energetische Verwertung von Sekundärbrennstoffen in industriellen Anlagen - Ableitung von Maßnahmen zur umweltverträglichen Verwertung. Wuppertal.
- FLESSA, H.; BEESE, F.; BRUMME, R.; PRIESACK, E.; PRZEMECK, E.; LAY, J. P. (HRSG.) (1998): Freisetzung und Verbrauch der klimarelevanten Spurengase N<sub>2</sub>O und CH<sub>4</sub> beim Anbau nachwachsender Rohstoffe. Zeller Verlag, Osnabrück.
- FLESSA, H.; RUSER, R.; DORSCH, P.; KAMP, T.; JIMENEZ, M. A.; MUNCH, J. C.; BEESE, F. (2002): Integrated evaluation of greenhouse gas emissions (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) from two farming systems in southern Germany. *Agriculture Ecosystems & Environment* 91 (1-3), S. 175-189.
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.) (Hrsg.) (2002): Innovative Verfahren zur Wärme- und Stromerzeugung aus Biomasse. Landwirtschaftsverlag GmbH, Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe" 20, Münster.
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.) (Hrsg.) (2005a): Ergebnisse des Biogas-Messprogramms. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow.
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.) (Hrsg.) (2005b): Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung. 2. Auflage, Gülzow.
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.) (Hrsg.) (2005c): Leitfaden Bioenergie - Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. Gülzow.
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.) (Hrsg.) (2005d): Pflanzenöl als Kraftstoff in der Landwirtschaft - Erfahrungsberichte. Gülzow.
-

- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.) (Hrsg.) (2006a): Biokraftstoffe eine vergleichende Analyse. Gülzow.
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.) (Hrsg.) (2006b): Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe. FNR, Gülzow.
- FNR (2007a): Daten und Fakten zu nachwachsenden Rohstoffen. <http://www.fnr.de/>, <http://www.fnr.de/cms35/Daten-und-Fakten.64.0.html> (Abrufdatum: 12.3.2008).
- FNR (Hrsg.) (2007b): Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen. 2. völlig überarbeitete Auflage, Gülzow.
- FNR (Hrsg.) (2007c): Handbuch Herstellung von Rapsölkraftstoff in dezentralen Ölgewinnungsanlagen. Gülzow.
- FNR (Hrsg.) (2007d): Marktübersicht Hackschnitzel-Heizungen. 1. Auflage Oktober 2007, Gülzow.
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.) (Hrsg.) (2008): Biocrudeoil. Gülzower Fachgespräche Band 28, Gülzow.
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.) (Hrsg.) (2009): Biokraftstoffe - eine vergleichende Analyse. Gülzow.
- FRAUNHOFER IAO (Fraunhofer Institut Arbeitswirtschaft und Organisation) (2004): BUIS Lab. <http://www.buislab.iao.fraunhofer.de/> (Abrufdatum: 27.6.2007).
- FREIBAUER, A. (2002): Biogenic Greenhouse Gas Emissions from Agriculture in Europe – Quantification and Mitigation. Dissertation, Universität Hohenheim, Hohenheim.
- FREIBAUER, A.; KALTSCHMITT, M. (2003): Controls and models for estimating direct nitrous oxide emissions from temperate and sub-boreal agricultural mineral soils in Europe. *Biogeochemistry* 63 (1), S. 93-115.
- FRITSCH, U. R.; DEHOUST, G.; JENSEIT, W.; HÜNEKE, K.; RAUSCH, L.; SCHÜLER, D.; WIEGEMANN, K.; HEINZ, A.; HIEBEL, M.; ISING, M.; KABASCI, S.; UNGER, C.; THRÄN, D.; FRÖHLICH, N.; SCHOLWIN, F.; REINHARDT, G.; GÄRTNER, S.; PATYK, A.; BAUR, F.; BEMMANN, U.; GROß, B.; HEIB, M.; ZIEGLER, C.; FLAKE, M.; SCHMEHL, M.; SIMON, S. (2004): Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse. Öko-Institut e.V. - Institut für angewandte Ökologie, Freiburg, Darmstadt, Berlin.
- FRITSCH, U. R.; HÜNECKE, K.; SCHMIDT, K. (2007a): Möglichkeiten einer europäischen Biogaseinspeisungsstrategie - Eine Studie im Auftrag der Bundestagsfraktion Bündnis 90/Die Grünen - Teilbericht 2. Öko-Institut e.V. - Institut für angewandte Ökologie, Darmstadt.
- FRITSCH, U. R.; RAUSCH, L.; SCHMIDT, K. (2007b): Treibhausgasemissionen und Vermeidungskosten der nuklearen, fossilen und erneuerbaren Strombereitstellung. Öko-Institut e.V. - Institut für angewandte Ökologie, Darmstadt.
- GAILLARD, G.; CRETZAZ, P.; HAUSHEER, J. (1997): Umweltinventar der landwirtschaftlichen Inputs im Pflanzenbau. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, Tänikon.
- GAILLARD, G.; NEMECEK, T. (2002): Ökologische Beurteilung des Öko-Programms zur Extensivproduktion von Getreide und Raps mittels Ökobilanzierung. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau FAL Reckenholz, Zürich.
-

- GANGL, C. (2004): Ethanolherzeugung aus stärkehaltigen Rohstoffen für Treibstoffzwecke. Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur Wien, Department für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, Institut für Agrar- und Forstökonomie, Wien.
- GÄRTNER, S. O.; REINHARDT, G. A. (2003): Erweiterung der Ökobilanz für RME. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg.
- GEIGER, B.; HARDI, M.; BRÜCKL, O.; ROTH, H.; TZSCHEUTSCHELER, P. (2004): CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten im Kraftwerksbereich, bei den erneuerbaren Energien sowie bei nachfrageseitigen Energieeffizienzmaßnahmen. Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität München, München.
- GIEGRICH, J.; MAMPEL, U.; DUSCHA, M.; ZAZCYK, R.; OSORIO-PETERS, S.; SCHMIDT, T. (1995): Bilanzbewertung in produktbezogenen Ökobilanzen - Evaluation von Bewertungsmethoden, Perspektiven. In: UBA, UMWELTBUNDESAMT: Methodik der produktbezogenen Ökobilanzen - Wirkungsbilanz und Bewertung, UBA Texte 23/95, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Berlin, S. 1-137.
- GLENCK, E.; LAHNER, T.; ARENDT, M.; BRUNNER, P. H. (1997): Baurestmassen in Oberösterreich - Stoffbilanzen der Bauwirtschaft. Technische Universität Wien, Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft, Wien.
- GRAF, T.; BIERTÜMPFEL, A.; DEGNER, J.; GÖTZ, R.; ZORN, W. (2006): Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Sonnenblumen. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2. Auflage, Jena.
- GRAF, T.; REINHOLD, G. (2005): Betriebswirtschaftliche Aspekte der dezentralen Ölsaatenverarbeitung. In: KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT (HRSG.): Dezentrale Ölsaatenverarbeitung, KTBL-Schrift 427, KTBL, Darmstadt, S. 122-129.
- GREEN, M. B.; HARTLEY, G. S.; WEST, T. F. (1987): Chemicals for Crop Improvement and Pest Management. Pergamon Books Ltd., Third Edition,
- GREENPEACE, EREC (Greenpeace International, European Renewable Energy Council) (Hrsg.) (2007): Energy [R]evolution - A Sustainable World Energy Outlook.
- GRUNERT, M. (2006): "Bioethanol - Stand in Deutschland", Vortrag anlässlich der Fachveranstaltung "Getreide zur Ethanolproduktion" am 02.02.2006 in Nossen.
- GUINEÉ, J. B.; GORÉE, M.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G.; KLEIJN, R.; KONING, A. DE; OERS, L. VAN; WEGENER SLEESWIJK, A.; SUH, S.; UDO DE HAES, H. A.; BRUIJN, H. DE; DUIN, R. VAN; HUIJBREGTS, M. A. J. (2002): Life Cycle Assessment. An Operational Guide to the ISO Standards. Final Report. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- GÜNTHER, L. (2006): "Biomethanreinigung mit der drucklosen Wäsche zur Herstellung von Biomethan und Kohlendioxid", Vortrag anlässlich der Fachveranstaltung "Herstellung von Biomethan aus Biogas" am 26. und 27. 10. 2006 in Lutherstadt Wittenberg.
- HARDI, M. (2003): Methodenentwicklung für nachhaltige Energie- und Emissionsminderungsstrategien auf der Grundlage von Lebenszyklusanalysen. Dissertation, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität München, München.
- HARTMANN, H.; KALTSCHMITT, M. (HRSG.) (2002): Biomasse als erneuerbarer Energieträger. Eine technische, ökologische und ökonomische Analyse im Kontext der übrigen er-

- neuerbaren Energien. Landwirtschaftsverlag GmbH, 2. vollst. neubearb. Aufl., Münster.
- HARTMANN, H.; THUNEKE, K.; HÖLDRICH, A.; ROßMANN, P. (2003): Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow.
- HAZELL, P. B. R.; NORTON, R. D. (1986): Mathematical Programming for Economic Analysis in Agriculture. Macmillan Publishing Company, New York.
- HEINLOTH, K. (1993): Energie und Umwelt: Klimaverträgliche Nutzung von Energie. B.G. Teubner, Stuttgart.
- HENKE, J. M.; KLEPPER, G.; NETZEL, J. (2002): Steuerbefreiung für Biokraftstoffe: Ist Bioethanol wirklich eine klimapolitische Option? Kieler Arbeitspapier Nr. 1136, Kiel.
- HENNIGES, O. (2007): Die Bioethanolproduktion. Wettbewerbsfähigkeit in Deutschland unter Berücksichtigung der internationalen Konkurrenz. Josef Eul Verlag GmbH, 2. Auflage, Lohmar-Köln.
- HENRICH, E.; DINJUS, E. (2004): Das FZK-Konzept zur Kraftstoffherstellung aus Biomasse. In: FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V.: Biomasse-Vergasung - Der Königsweg für eine effiziente Strom- und Kraftstoffbereitstellung?, Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe" Band 24, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, S. 298-337.
- HENRICH, E.; DINJUS, E.; MEIER, D. (2004): Biomassenutzung durch Flugstrom-Druckvergasung von Pyrolyseprodukten. In: SPECHT, M.; ZUBERBÜHLER, U.; ZIMMER, U., ZENTRUM FÜR SONNENENERGIE- UND WASSERSTOFF-FORSCHUNG; STADERMANN, G., FORSCHUNGSVERBUND SONNENENERGIE (HRSG.): ForschungsVerbund Sonnenenergie Fachtagung. Regenerative Kraftstoffe. Entwicklungstrends, Forschungs- und Entwicklungsansätze, Perspektiven. 13.-14. 11. 2003 im ZSW in Stuttgart, Berlin, S. 302-307.
- HENRICHSMEYER, W.; WITZKE, H. P. (1994): Agrarpolitik Band 2 Bewertung und Willensbildung. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- HOFMANN, F.; PLÄTTNER, A.; LULIES, S.; SCHOLWIN, F.; S., KLINSKI.; DIESEL, K. (2006): Studie Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow.
- HOFMANN, J.; FREIER, U. (2006): "Labor- und Pilotuntersuchungen für Waschsysteme zur Herstellung von Biomethan", Vortrag anlässlich der Fachveranstaltung "Herstellung von Biomethan aus Biogas" am 26. und 27. 10. 2006 in Lutherstadt Wittenberg.
- HOFMANN, M. (1999): Modellvorhaben "Schnellwachsende Baumarten" - Zusammenfassender Abschlussbericht. Landwirtschaftsverlag GmbH, Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe" 13, Münden.
- IEA (International Energy Agency) (Hrsg.) (2004): World Energy Outlook. Organisation for Economic Cooperation and Development, Paris.
- IEA (2005): 2002 Energy Balances for World. <http://www.iea.org> (Abrufdatum: 17. 11. 2005).
- IEA (International Energy Agency) (2007): Global Renewable Energy Policies and Measures Database. <http://www.iea.org>, <http://www.iea.org/textbase/pamsdb/grindex.aspx> (Abrufdatum: 21.8.2007).
-

- IEA (International Energy Agency) (2011): 2008 Energy Balances for World. <http://www.iea.org> (Abrufdatum: 22. 10. 2011).
- IEA; OECD (International Energy Agency, Organisation for Economic Co-Operation and Development) (Hrsg.) (2003): Renewables Information 2003. Paris.
- IFU (Institut für Umweltinformatik Hamburg GmbH) (2007): Umberto. <http://www.umberto.de/> (Abrufdatum: 27.6.2007).
- IGELSPACHER, R. (2003): Ganzheitliche Systemanalyse zur Erzeugung und Anwendung von Bioethanol im Verkehrssektor. Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, Gelbes Heft 76, München.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (Hrsg.) (1995): Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios. Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (Hrsg.) (1996a): Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: The Reference Manual (Volume 3). Paris.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (Hrsg.) (1996b): Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: The Reporting Instructions (Volume 1). Paris.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (Hrsg.) (1996c): Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: The Workbook (Volume 2). Paris.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (Hrsg.) (1999): IPCC Special Report - Aviation and the Global Atmosphere - Summary for Policymakers. Genf.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (Hrsg.) (2001a): Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge University Press, Cambridge, New York.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (Hrsg.) (2001b): Climate Change 2001: The Scientific Basis - Summary for Policymakers. Cambridge University Press, Cambridge, New York.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (Hrsg.) (2006a): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Agriculture, Forestry and Other Land Use (Volume 4). Hayama.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (Hrsg.) (2006b): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Energy (Volume 2). Hayama.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (Hrsg.) (2006c): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: General Guidance and Reporting (Volume 1). Hayama.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (Hrsg.) (2006d): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Industrial Processes and Product Use (Volume 3). Hayama.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (Hrsg.) (2006e): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Waste (Volume 5). Hayama.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (Hrsg.) (2007): Climate Change 2007: IPCC Fourth Assessment Report (AR4) Working Group I Report "The Physical Science Basis". Cambridge University Press, Cambridge, New York.
-

- ISET (Institut für Solare Energieversorgungstechnik Verein an der Universität Kassel e. V.) (Hrsg.) (2008): Biogasaufbereitung zu Biomethan. ISET, Kassel.
- JAENISCH, D.; SOMMERFELD, D. (2005): Dezentrale Gewinnung und Nutzung des biogenen Kraftstoffes Rapsöl in einer Modellregion in Mecklenburg-Vorpommern. In: KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT (HRSG.): Dezentrale Ölsaatenverarbeitung, KTBL-Schrift 427, KTBL, Darmstadt, S. 155-164.
- JRC; CONCAWE; EUCAR (European Commission - Joint Research Centre; Conservation of Clean Air and Water in Europe (the Oil Companies' European Association for Environment, Health and Safety in Refining and Distribution); European Council for Automotive R&D) (Hrsg.) (2007a): Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context. <http://ies.jrc.ec.europa.eu/wtw.html> (Abrufdatum: 5.9.2007).
- JRC; CONCAWE; EUCAR (European Commission - Joint Research Centre; Conservation of Clean Air and Water in Europe (the Oil Companies' European Association for Environment, Health and Safety in Refining and Distribution); European Council for Automotive R&D) (Hrsg.) (2007b): Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context - WELL-to-TANK Report. JRC, Version 2c, March 2007, Brüssel.
- JUNGKUNST, H. F.; FREIBAUER, A.; NEUFELDT, H.; BARETH, G. (2006): Nitrous oxide emissions from agricultural land use in Germany - a synthesis of available annual field data. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift Für Pflanzenernährung Und Bodenkunde* 169 (3), S. 341-351.
- KAISER, E. A.; KOHRS, K.; KUCKE, M.; SCHNUG, E.; HEINEMEYER, O.; MUNCH, J. C. (1998): Nitrous oxide release from arable soil: Importance of N-fertilization, crops and temporal variation. *Soil Biology & Biochemistry* 30 (12), S. 1553-1563.
- KAISER, E. A.; RUSER, R. (2000): Nitrous oxide emissions from arable soils in Germany - An evaluation of six long-term field experiments. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift Für Pflanzenernährung Und Bodenkunde* 163 (3), S. 249-259.
- KALIES, M.; SCHRÖDER, G.; BOHNENSCHÄFER, W.; FRÖHLICH, N.; MÜLLER, M.; REICHMUTH, M. (2007): Schlüsseldaten Klimagasemissionen. Welchen Beitrag kann die Biomasse zum Klimaschutz leisten? Institut für Energetik und Umwelt, Leipzig.
- KALTSCHMITT, M. (1992): Biogas - Potentiale und Kosten. KTBL, Darmstadt.
- KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H. (HRSG.) (2001): Energie aus Biomasse - Grundlagen, Technik und Verfahren. Springer-Verlag, Berlin.
- KALTSCHMITT, M.; REINHARDT, G. A. (HRSG.) (1997): Nachwachsende Energieträger - Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft GmbH, Braunschweig, Wiesbaden.
- KALTSCHMITT, M.; STREICHER, W.; WIESE, A. (HRSG.) (2006): Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. Springer-Verlag, 4. Auflage, Berlin.
- KARL, J. (2004): Wirbelschichtvergasung - Stand der Technik. In: FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V.: Biomasse-Vergasung - Der Königsweg für eine effiziente Strom- und Kraftstoffbereitstellung?, Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe" Band 24, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, S. 71-83.
- KEPPLER, S.; DEGEN, W.; KRINKE, S.; RÜGER, D.; BAITZ, M. (2005): Life Cycle Analysis von SunDiesel. In: FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V.: Synthetische Bio-

- kraftstoffe - Technik, Potenziale, Perspektiven, Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe" Band 25, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, S. 149-169.
- KFW (Kreditanstalt für Wiederaufbau) (2011): Programmübersicht. <http://www.kfw.de>, <http://www.kfw.de/kfw/de/Inlandsfoerderung/Programmuebersicht/index.jsp> (Abrufdatum: 6. 11. 2011).
- KIRCHGEBNER, M. (1997): Tierernährung - Leitfaden für Studium, Beratung und Praxis. DLG-Verlags-GmbH, 10., neubearbeitete Auflage, Frankfurt am Main.
- KLEINHAPPL, M. (2004): Festbett-Vergasung - Stand der Technik. In: FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V.: Biomasse-Vergasung - Der Königsweg für eine effiziente Strom- und Kraftstoffbereitstellung?, Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe" Band 24, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, S. 45-70.
- KLÖPFFER, W.; KURTH, S.; RENNER, I.; SCHÜLER, D. (2004): Entwicklung eines Modells zur Berücksichtigung der Risiken durch nicht bestimmungsgemäße Betriebszustände von Industrieanlagen im Rahmen von Ökobilanzen (Vorstudie). Umweltbundesamt, UBA Texte 34/04, Berlin.
- KLÖPFFER, W.; RENNER, I. (1995): Methodik der Wirkungsbilanz im Rahmen von Produkt-Ökobilanzen unter Berücksichtigung nicht oder nur schwer quantifizierbarer Umwelt-Kategorien. In: UMWELTBUNDESAMT: Methodik der produktbezogenen Ökobilanzen - Wirkungsbilanz und Bewertung, UBA Texte 23/95, Gesellschaft für Consulting und Analytik im Umweltbereich (C.A.U. GmbH), Berlin, S. 1-80.
- KLÖPFFER, W.; RENNER, I.; TAPPESER, B.; ECKELKAMP, C.; DIETRICH, R. (1999a): Life Cycle Assessment gentechnisch veränderter Produkte als Basis für eine umfassende Beurteilung möglicher Umweltauswirkungen. Umweltbundesamt GmbH, Monographien Band 111, Wien.
- KLÖPFFER, W.; RENNER, I.; TAPPESER, B.; ECKELKAMP, C.; DIETRICH, R.; LINDENTHAL, T.; MÜLLER, W. (1999b): Lebenszyklusanalyse Gentechnik - Materialband zur Monographie M-111 des Umweltbundesamtes. Umweltbundesamt GmbH, Berichte BE 166, Wien.
- KÖBERLE, E. (1999): Maßnahmen zur Verbesserung der Biogasqualität. Entschwefelung von Biogas in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. In: Erneuerbare Energien in der Landwirtschaft. Jahrbuch 2. Tarmstedter Forum 1999, Schönbach Druck GmbH, Erzhausen, S. 61.
- KOPETZ, H. G. (1991): Nachhaltigkeit als Wirtschaftsprinzip. Österreichischer Agrarverlag, Wien.
- KOPETZ, H. G. (2000): Zukunft grüne Energie - Kurswechsel für Land- und Energiewirtschaft in Europa. Österreichischer Agrarverlag, Leopoldsdorf, Österreich.
- KOPETZ, H. G. (2002): Das Jahrhundertprojekt - Solare Energiewirtschaft statt Naturkatastrophen. Ökosoziales Forum Österreich, Wien.
- KRÄNZLEIN, T. (2005): Mitarbeiter an der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART. Telefonische Auskunft am 16.3.2005.
- KREWITT, W.; MAYERHOFER, P.; FRIEDRICH, R.; TRUKENMÜLLER, A.; HECK, T.; GREBMAN, A.; RAPTIS, F.; KASPAR, F.; SACHAU, J.; RENNINGS, K.; DIEKMANN, J.; PRAETORIUS, B. (1997): ExternE National Implementation Germany. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart, Stuttgart.
-

- KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft) (Hrsg.) (2004): Betriebsplanung Landwirtschaft 2004/05. 19. Auflage, Darmstadt.
- KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft) (Hrsg.) (2005): Gasausbeuten in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Darmstadt.
- KTBL; ATB (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim) (Hrsg.) (2006): Energiepflanzen - Daten für die Planung des Energiepflanzenanbaus. KTBL, Darmstadt.
- LBP (Bayerische Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau) (Hrsg.) (1997): Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland. 6. überarb. Aufl., Freising.
- LEIBLE, L.; KÄLBER, S.; KAPPLER, G. (2005): Entwicklung von Szenarien über die Bereitstellung von land- und forstwirtschaftlicher Biomasse in zwei baden-württembergischen Regionen zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen. Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) Forschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe.
- LEIBLE, L.; KÄLBER, S.; KAPPLER, G.; LANGE, S.; NIEKE, E.; PROPESCH, P.; WINTZER, D.; FÜRNIß, B. (2006): Kraftstoffe, Wärme oder Strom aus Stroh und Waldrestholz - ein systematischer Vergleich. Technikfolgenabschätzung - Theorie und Praxis 15 (1), S. 61-72.
- LfL (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft - Institut für Ländliche Strukturentwicklung, Betriebswirtschaft und Agrarinformatik) (2006): Deckungsbeiträge und Kalkulationsdaten. <http://www.lfl.bayern.de/ilb/db/> (Abrufdatum: 4.9.2006).
- LfL (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft) (Hrsg.) (2007): Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland. LfL, 8. überarbeitete Auflage, Freising.
- LfL TIERERNÄHRUNG (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft - Institut für Tierernährung und Futterwirtschaft) (Hrsg.) (2007): Jahresbericht 2006. LfL, Poing-Grub.
- LWF (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft) (Hrsg.) (2005): Anbau von Energiewäldern. Merkblatt Nr. 19, Freising.
- MACHAT, M.; WERNER, K. (2007): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix. Umweltbundesamt, UBA Texte 01/07, Dessau.
- MARECHAL, F.; FAVRAT, D.; JOCHEM, E. (2005): Energy in the perspective of the sustainable development: The 2000 W society challenge. Resources Conservation and Recycling 44 (3), S. 245-262.
- MARHEINEKE, T.; KREWITT, W.; NEUBARTH, J.; FRIEDRICH, R.; VOB, A. (2000): Ganzheitliche Bilanzierung der Energie- und Stoffströme von Energieversorgungstechniken. Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Band 74, Stuttgart.
- MCCARL, B. A.; SPREEN, T. H. (2004): Applied Mathematical Programming using Algebraic Systems. Texas A&M University, Draft Textbook, Texas A&M University.
- MEADOWS, D.; MEADOWS, D.; RANDERS, J. (1992): Die neuen Grenzen des Wachstums - Die Lage der Menschheit: Bedrohung und Zukunftschancen. Deutsche Verlags-Anstalt, 5. Auflage, Stuttgart.
- MEADOWS, D.; MEADOWS, D.; ZAHN, E.; MILLING, P. (1972): Die Grenzen des Wachstums - Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart.
-

- MEADOWS, D.; RANDERS, J.; MEADOWS, D. (2006): Grenzen des Wachstums. Das 30 - Jahre - Update. Hirzel Verlag, Stuttgart.
- MEIER, D. (2004): Pyrolyseöle als Zwischenprodukte bei der Kraftstofferzeugung. In: SPECHT, M.; ZUBERBÜHLER, U.; ZIMMER, U., ZENTRUM FÜR SONNENENERGIE- UND WASSERSTOFF-FORSCHUNG; STADERMANN, G., FORSCHUNGSVERBUND SONNENENERGIE (HRSG.): ForschungsVerbund Sonnenenergie Fachtagung. Regenerative Kraftstoffe. Entwicklungstrends, Forschungs- und Entwicklungsansätze, Perspektiven. 13.-14. 11. 2003 im ZSW in Stuttgart, Berlin, S. 156-164.
- MOSIER, A.; KROEZE, C.; NEVISON, C.; OENEMA, O.; SEITZINGER, S.; VAN CLEEMPUT, O. (1998): Closing the global N<sub>2</sub>O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle - OECD/IPCC/IEA phase II development of IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory methodology. Nutrient Cycling in Agroecosystems 52 (2-3), S. 225-248.
- MT-ENERGIE (Hrsg.) (2007a): MT-Biomethan. Rockstedt.
- MT-ENERGIE (Hrsg.) (2007b): Vorläufige Wirtschaftlichkeitsberechnung zum Betrieb einer Gasaufbereitungsanlage. Rockstedt.
- MÜHLEN, H.-J.; SCHMID, C. (2004): Der Blaue Turm - Wasserstoff aus Biomasse. In: FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V.: Biomasse-Vergasung - Der Königsweg für eine effiziente Strom- und Kraftstoffbereitstellung?, Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe" Band 24, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, S. 240-249.
- MWV (Mineralölwirtschaftsverband e.V.) (2008): Mineralölzahlen. <http://www.mwv.de> (Abrufdatum: 24.4.2008).
- NEMECEK, T.; HUGUENIN, O. (2002): Beurteilung von Graslandsystemen. In: EIDGENÖSSISCHE FORSCHUNGSANSTALT FÜR AGRARÖKOLOGIE UND LANDBAU: Ökobilanzen - Beitrag zu einer nachhaltigen Landwirtschaft, FAL-Tagung vom 18. Januar 2002, Schriftenreihe der FAL 38, FAL, Zürich, S. 16-18.
- NEMECEK, T.; HUGUENIN-ELIE, O.; DUBOIS, D.; GAILLARD, G. (2005): Ökobilanzierung von Anbausystemen im schweizerischen Acker- und Futterbau. Agroscope FAL, Schriftenreihe der FAL 58, Zürich.
- NITZSCHKE, M. (2003): Hintergrundpapier zur aktuellen Diskussion um die Förderung von Strom aus Erneuerbaren Energien und den Umlagemechanismus des EEG. <http://www.bee-ev.de/> (Abrufdatum: 5.2.2006).
- ÖBERTHÜR, S.; TÄNZLER, D.; CARIUS, A. (2002): Klimawandel und Konfliktprävention: Die Relevanz für den Internationalen Klimaschutzprozess. In: BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT: Umweltpolitik Klimawandel und Konflikte - Verursacht der Klimawandel Konfliktpotenziale? Wie kann der internationale Klimaschutzprozess hierauf reagieren?, Berlin, S. 111-146.
- ÖKO-INSTITUT (Institut für angewandte Ökologie e.V.) (2004): GEMIS - Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme 4.2, Darmstadt.
- ÖKO-INSTITUT (Institut für angewandte Ökologie e.V.) (2005): GEMIS - Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme 4.3, Darmstadt.
- PATYK, A.; REINHARDT, G. (1997): Düngemittel - Energie- und Stoffstrombilanzen. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden.
-

- PATYK, A.; REINHARDT, G. A.; JUNGK, N. C. (2000): Bioenergy for Europe: Which ones fit best? - A Comparative Analysis for the Community. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg.
- PE INTERNATIONAL (2007): GaBi Software - Product Sustainability. <http://www.gabi-software.com> (Abrufdatum: 27.6.2007).
- PFÄNDER, H.-G.; WEBER, W.; BURGHause, F. (1995): Lagern von Getreide. BLV Verlagsgesellschaft mbH, dlz Sonderheft Nr. 2, München.
- PIMENTEL, D. (1980): Energy Inputs for the Production, Formulation, Packaging, and Transportation of Various Pesticides. In: PIMENTEL, D. (HRSG.): Handbook Of Energy Utilization In Agriculture, CRC Press, Boca Raton, Florida, S. 45-48.
- QUACK, D. (2001): Einfluss von Energiestandard und konstruktiven Faktoren auf die Umweltauswirkungen von Wohngebäuden - eine Ökobilanz. Demonstrationsprojekt: Niedrigenergiehäuser Heidenheim. Institut für angewandte Ökologie (Öko-Institut e.V.), Freiburg.
- QUIRIN, M.; GÄRTNER, S. O.; PEHNT, M.; REINHARDT, G. A. (2004): CO<sub>2</sub>-neutrale Wege zukünftiger Mobilität durch Biokraftstoffe - Eine Bestandsaufnahme. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg.
- RAMESOHL, S.; ARNOLD, K.; KALTSCHMITT, M.; SCHOLWIN, F.; PLÄTTNER, A.; KALIES, M.; LULIES, S.; SCHRÖDER, G.; ALTHAUS, W.; URBAN, W.; BURMEISTER, F. (2006): Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse. Untersuchungen im Auftrag von BGW und DVGW. Band 1: Gesamtergebnisse und Schlussfolgerungen. Wuppertal Institut für Klima Umwelt Energie, Wuppertal.
- RAT FÜR NACHHALTIGE ENTWICKLUNG (2003): Perspektiven der Kohle in einer nachhaltigen Energiewirtschaft - Leitlinien einer modernen Kohlepolitik und Innovationsförderung. Berlin.
- REHBINDER, E.; SCHMIHING, C. (2000): Ökobilanzen als Instrumente des Umweltrechts. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- REINHARDT, G. (1993): Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzierung nachwachsender Rohstoffe: theoretische Grundlagen und Fallstudie Raps. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden.
- REINHARDT, G.; GÄRTNER, S.; PATYK, A.; RETTENMAIER, N. (2006): Ökobilanzen zu BTL: Eine ökologische Einschätzung. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg.
- RENNER, I.; KLÖPPFER, W. (2005): Untersuchung der Anpassung von Ökobilanzen an spezifische Erfordernisse biotechnischer Prozesse und Produkte. Umweltbundesamt, UBA Texte 02/05, Berlin.
- ROBERT KIND GMBH (2008): Preisliste Chemikalien 2007/2008. <http://www.robert-kind-gmbh.de/>, <http://www.quandtpharma.de/kind/listen/Chemikalienpreisliste2008.pdf> (Abrufdatum: 16.4.2008).
- RÖHRICHT, C. (2002): Topinambur - Anbau und Verwendung. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Leipzig.
- RÖHRICHT, C. (2006): Miscanthus sinensis - Anbau und Verwertung von Chinaschilf. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2. Auflage, Leipzig.
-

- RÖHRICHT, C.; HERRMANN, C. (2007a): Sudangras - Anbau und Verwertung. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Leipzig.
- RÖHRICHT, C.; HERRMANN, C. (2007b): Zuckerhirse - Anbau und Verwertung. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Leipzig.
- RÖHRICHT, C.; RUSCHER, K. (2006): Schnellwachsende Baumarten - Anbau von Pappel und Weide auf Kurzumtriebsplantagen. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2. Auflage, Leipzig.
- RUBIK, F.; ANKELE, K.; HELLENBRANDT, S. (1995): Entwicklung und Umsetzung eines Konzeptes zur vergleichenden Dokumentation der Ergebnisse produktbezogener Ökobilanzen. In: UMWELTBUNDESAMT: Standardberichtsbogen für produktbezogene Ökobilanzen, UBA Texte 24/95, Berlin, S. 1-131.
- RUDLOFF, M. (2004): ChorenFuel aus dem Carbo-V-Vergaser. In: FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V.: Biomasse-Vergasung - Der Königsweg für eine effiziente Strom- und Kraftstoffbereitstellung?, Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe" Band 24, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, S. 234-239.
- RÜGGERBERG, T. (2004): Das deutsche COORETEC-Konzept: Wege zum emissionsfreien Kraftwerk auf Basis Kohle und Gas. Energy - Die Zeitschrift der Energieverwertungsagentur 3 S. 9-10.
- SCHARMER, K. (2001): Biodiesel - Energie- und Umweltbilanz Rapsölmethylester. Union zur Förderung von Öl- und Proteinpflanzen e. V., Bonn.
- SCHEIBE, U.; NEITZEL, H. (1997): Materialien zu Ökobilanzen und Lebensweganalysen - Aktivitäten und Initiativen des Umweltbundesamtes. Umweltbundesamt, UBA Texte 26/97, Berlin.
- SCHMID, M.; NEFTEL, A.; FUHRER, J. (2000): Lachgasemissionen aus der Schweizer Landwirtschaft. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Schriftenreihe der FAL 33, Zürich.
- SCHMITZ, N.; HENKE, J. M.; KLEPPER, G.; WILKENING, C. L.; NOLTE, B.; KALIES, M.; KALTSCHMITT, M. (2005): Innovationen bei der Bioethanolerzeugung. Landwirtschaftsverlag GmbH, FNR Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe" 26, Münster.
- SCHMITZ, N.; WILKENING, L.; WILKENING, C. L.; HÖRING, K.; JATZKE, H.; KLEPPER, G. (2003): Bioethanol in Deutschland. Landwirtschaftsverlag GmbH, Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe" 21, Münster.
- SCHNEIDER, L. (1998): Stromgestehungskosten von Großkraftwerken - Entwicklungen im Spannungsfeld von Liberalisierung und Ökosteuern. Öko-Institut e.V., Freiburg.
- SCHOLWIN, F.; MICHEL, J.; SCHRÖDER, G.; KALIES, M. (2006): Ökologische Analyse einer Biogasnutzung aus nachwachsenden Rohstoffen. Institut für Energetik und Umwelt, Leipzig.
- SCHONERT, M.; MOTZ, G.; MECKEL, H.; DETZEL, A.; GIEGRICH, J.; OSTERMAYER, A.; SCHORB, A.; SCHMITZ, S. (2002): Ökobilanz für Getränkeverpackungen II / Phase 2. UBA, Umweltbundesamt, UBA Texte 51/02, Berlin.
- SCHÖPE, M. (2006): Volkswirtschaftliche Effekte der Erzeugung von Biodiesel zum Einsatz als Kraftstoff. ifo Schnelldienst 59. Jg., H. 17/2006, S. 21-30.
- SCHULZ, H.; EDER, B. (2001): Biogas Praxis, Grundlagen Planung Anlagenbau Beispiele. Ökobuch Verlag, 2. überarbeitete Auflage, Staufen bei Freiburg.
-

- SCHULZ, W. (2004): Untersuchung zur Aufbereitung von Biogas zur Erweiterung der Nutzungsmöglichkeiten. Bremer Energie Institut, Aktualisierung einer im Juni 2003 vorgelegten gleichnamigen von Wolfgang Schulz, Maren Hille unter Mitarbeit von Wolfgang Tentscher durchgeführten Untersuchung, Bremen.
- SCHÜTTE, A. (2004): Biomasse als Energieträger zur Stromerzeugung und Kraftstoffbereitstellung. In: FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V.: Biomasse-Vergasung - Der Königsweg für eine effiziente Strom- und Kraftstoffbereitstellung?, Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe" Band 24, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, S. 7-16.
- SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) (Hrsg.) (1993): Guidelines for Life Cycle Assessment: A Code of Practice. SETAC Europe, Brüssel.
- SIMON, S. (2006): Biomassepotenziale zur Energieerzeugung aus der Landwirtschaft in Deutschland und Bayern sowie ausgewählten neuen EU-Mitgliedsstaaten. Endbericht zum Teilprojekt I des Forschungsvorhabens "Potenziale der Biomasse für Energieerzeugung und landwirtschaftliche Einkommen" (N/03/40). Freising - Weihenstephan.
- SIMON, S. (2007): Modellierung nachhaltiger Bioenergiepotenziale aus der Landwirtschaft für Deutschland, Polen, Tschechien und Ungarn. Dissertation, Technische Universität München, Freising - Weihenstephan.
- SPECHT, M.; MARQUARD-MÖLLENSTEDT, T.; SICHLER, P.; STÜRMER, B.; ZUBERBÜHLER, U. (2006): Der AER-Prozess: Neues thermochemisches Vergasungsverfahren zur Erzeugung von Erdgassubstitut aus biogenen Festbrennstoffen. In: OSTBAYERISCHES TECHNOLOGIE-TRANSFER-INSTITUT E. V. (OTTI): 15. Symposium Bioenergie 23./24. November 2006, Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e. V. (OTTI), Regensburg, S. 148-155.
- SPECHT, M.; ZUBERBÜHLER, U.; BANDI, A. (2004): Kraftstoffe aus erneuerbaren Ressourcen - Potentiale, Herstellung, Perspektiven. In: SPECHT, M.; ZUBERBÜHLER, U.; ZIMMER, U., ZENTRUM FÜR SONNENENERGIE- UND WASSERSTOFF-FORSCHUNG; STADERMANN, G., FORSCHUNGSVERBUND SONNENENERGIE (HRSG.): ForschungsVerbund Sonnenenergie Fachtagung. Regenerative Kraftstoffe. Entwicklungstrends, Forschungs- und Entwicklungsansätze, Perspektiven. 13.-14. 11. 2003 im ZSW in Stuttgart, Berlin, S. 10-59.
- STEHFEST, E.; BOUWMAN, L. (2006): N<sub>2</sub>O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 74 (3), S. 207-228.
- STEINHAUSER, H.; LANGBEHN, C.; PETERS, U. (1992): Einführung in die landwirtschaftliche Betriebslehre - Allgemeiner Teil. Eugen Ulmer GmbH & Co, 5. Neubearb. Auflage, Stuttgart.
- STUCKI, S.; BIOLLAZ, S.; VOGEL, F. (2004): Vom Holz zum Methan. In: SPECHT, M.; ZUBERBÜHLER, U.; ZIMMER, U., ZENTRUM FÜR SONNENENERGIE- UND WASSERSTOFF-FORSCHUNG; STADERMANN, G., FORSCHUNGSVERBUND SONNENENERGIE (HRSG.): ForschungsVerbund Sonnenenergie Fachtagung. Regenerative Kraftstoffe. Entwicklungstrends, Forschungs- und Entwicklungsansätze, Perspektiven. 13.-14. 11. 2003 im ZSW in Stuttgart, Berlin, S. 210-217.
- SWISS CENTRE FOR LIFE CYCLE INVENTORIES (2007): Ecoinvent Centre. <http://www.ecoinvent.org/> (Abrufdatum: 27.6.2007).
-

- THOMMEN, J.-P.; ACHLEITNER, A.-K. (1998): Allgemeine Betriebswirtschaftslehre - Umfassende Einführung aus managementorientierter Sicht. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH, 2. Auflage, Wiesbaden.
- THRÄN, D.; SEIFFERT, M.; MÜLLER-LANGER, F.; PLÄTTNER, A.; VOGEL, A. (2007): Möglichkeiten einer europäischen Biogaseinspeisungsstrategie - Eine Studie im Auftrag der Bundestagsfraktion Bündnis 90/Die Grünen - Teilbericht 1. Institut für Energetik und Umwelt, Leipzig.
- THRÄN, D.; WEBER, M.; SCHEUERMANN, A.; FRÖHLICH, N.; ZEDDIES, J.; HENZE, A.; THOROE, C.; SCHWEINLE, J.; FRITSCH, U. R.; JENSEIT, W.; RAUSCH, L.; SCHMIDT, K. (2005): Nachhaltige Biomassenutzungsstrategien im europäischen Kontext. Institut für Energetik und Umwelt, Leipzig.
- TLL (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft) (Hrsg.) (2007a): Anbautelegramm für Sudangras. TLL, Jena.
- TLL (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft) (Hrsg.) (2007b): Anbautelegramm für Zucker-/Futterhirse. TLL, Jena.
- UBA (Umweltbundesamt) (Hrsg.) (2005): Deutsches Treibhausgasinventar 1990 - 2003. Nationaler Inventarbericht 2005. Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen. UBA Texte 20/05, Dessau.
- UBA (Umweltbundesamt) (Hrsg.) (2006): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen 2006. Nationaler Inventarbericht zum deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2004. UBA Texte 20/05, Dessau.
- UBA; ÖKO-INSTITUT (Umweltbundesamt, Institut für angewandte Ökologie e.V.) (2004): Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente (ProBas). <http://www.probas.umweltbundesamt.de/> (Abrufdatum: 20. 10. 2004).
- UDO DE HAES, H. A. (1996): Towards a Methodology for Life Cycle Impact Assessment. SETAC-Europe, Brussels.
- UDO DE HAES, H. A.; JOLLIET, O.; FINNVEDEN, G.; HAUSCHILD, M.; KREWITT, W.; MÜLLER-WENK, R. (1999a): Best Available Practice Regarding Impact Categories and Category Indicators in Life Cycle Impact Assessment. International Journal of Life Cycle Assessment 4 (2), S. 66-74.
- UDO DE HAES, H. A.; JOLLIET, O.; FINNVEDEN, G.; HAUSCHILD, M.; KREWITT, W.; MÜLLER-WENK, R. (1999b): Best Available Practice Regarding Impact Categories and Category Indicators in Life Cycle Impact Assessment. International Journal of Life Cycle Assessment 4 (3), S. 167-174.
- UFOP (Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V.) (Hrsg.) (2005): Nachwachsende Rohstoffe - Biokraftstoffe & Energie aus Biomasse - Auszüge aus dem UFOP-Bericht 2004/2005. Berlin.
- UN (United Nations) (Hrsg.) (1998): Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change vom 11.12.1997. Kyoto.
- UNDP; UNDESA; WEC (United Nations Development Programme, United Nations Department of Economics and Social Affairs, World Energy Council) (Hrsg.) (2000): World Energy Assessment - Energy and the Challenge of Sustainability. UNDP, New York.
- UNFCCC (Secretariat of the United Nations Framework Convention on Climate Change) (2006): Kyoto Protocol - Status of Ratification. <http://unfccc.int/> (Abrufdatum: 5.5.2006).
-

- UNRUH, D.; ROHDE, M.; SCHAUB, G. (2004): Fischer-Tropsch Synthese von Kohlenwasserstoffen ausgehend von Biomasse - In-situ H<sub>2</sub>O-Abscheidung und Verbesserung der Kohlenstoff-Nutzung. In: SPECHT, M.; ZUBERBÜHLER, U.; ZIMMER, U., ZENTRUM FÜR SONNENENERGIE- UND WASSERSTOFF-FORSCHUNG; STADERMANN, G., FORSCHUNGS-VERBUND SONNENENERGIE (HRSG.): ForschungsVerbund Sonnenenergie Fachtagung. Regenerative Kraftstoffe. Entwicklungstrends, Forschungs- und Entwicklungsansätze, Perspektiven. 13.-14. 11. 2003 im ZSW in Stuttgart, Berlin, S. 186-199.
- VDI (Verein Deutscher Ingenieure) (Hrsg.) (1991): Technikbewertung - Begriffe und Grundlagen, VDI Richtlinie 3780. VDI-Gesellschaft Energietechnik, Düsseldorf.
- VDI (Verein Deutscher Ingenieure) (Hrsg.) (1997): Kumulierter Energieaufwand - Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden, VDI Richtlinie 4600. VDI-Gesellschaft Energietechnik, Düsseldorf.
- VDN (Verband der Netzbetreiber e.V.) (Hrsg.) (2006): Daten und Fakten Stromnetze in Deutschland 2006. VDN, Berlin.
- VERBIO (Vereinigte BioEnergie AG) (Hrsg.) (2007): Geschäftsbericht 2006. Hamburg.
- VIEBAHN, P.; PATYK, A.; FRITSCH, U. R.; BEER, M.; CORRADINI, R.; CIROTH, A.; BLES, M.; MAYER-SPOHN, O.; MACHAREY, U.; SCHNETTLER, A.; SMOLKA, T.; FISCHER, M.; SCHULLER, O.; GROBE BÖCKMANN, T.; WAGNER, H.-J.; MAYER, H. (2007): Erstellung der Grundlagen für einen harmonisierten und fortschreibbaren Datensatz des deutschen Strommixes. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- VOGEL, A.; BOLHAR-NORDENKAMPF, M.; KALTSCHMITT, M.; HOFBAUER, H. (2006): Teil 1: Technologische und verfahrenstechnische Untersuchungen. In: FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V.: Analyse und Evaluierung der thermo-chemischen Vergasung von Biomasse, Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe" Band 29, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, S. 5-354.
- VOGEL, A.; KALTSCHMITT, M.; BOLHAR-NORDENKAMPF, M. (2004): Vergasung zur Kraftstoffbereitstellung - Grundsätzliche konzeptionelle Überlegungen. In: FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V.: Biomasse-Vergasung - Der Königsweg für eine effiziente Strom- und Kraftstoffbereitstellung?, Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe" Band 24, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, S. 268-297.
- VON OHEIMB, R. (1987): Indirekter Energieeinsatz im agrarischen Erzeugerbereich in der BRD. In: Energie und Agrarwirtschaft, KTBL Schrift 320, Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, S. 50-91.
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderung) (Hrsg.) (2003a): Sondergutachten: Über Kyoto hinaus denken - Klimaschutzstrategien für das 21. Jahrhundert. WBGU, Berlin.
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderung) (Hrsg.) (2003b): Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- WCED (World Commission on Environment and Development) (Hrsg.) (1987): Our Common Future. Oxford University Press, Oxford, New York.
- WECKS, M. (2006): "Wertstoffrückgewinnung bei der Biogasreinigung", Vortrag anlässlich der Fachveranstaltung "Herstellung von Biomethan aus Biogas" am 26. und 27. 10. 2006 in Lutherstadt Wittenberg.
-

- WELLINGER, A.; EDELMANN, W.; FAVRE, R.; SEILER, B.; WOSCHITZ, D. (1991): Biogas-Handbuch. Grundlagen – Planung – Betrieb landwirtschaftlicher Anlagen. Verlag Wirz AG, 2. Auflage, Aarau.
- WERNER, A.; VETTER, A.; REINHOLD, G. (2006): Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Energieholz. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena.
- WETTERMANN, M. (2006): "Verdichter für die Biogas-/Biomethanreinigung- und Erdgaseinspeisung", Vortrag anlässlich der Fachveranstaltung "Herstellung von Biomethan aus Biogas" am 26. und 27. 10. 2006 in Lutherstadt Wittenberg.
- WIDMANN, B. A. (2005): Hintergründe und Zielsetzung der dezentralen Ölsaatenverarbeitung. In: KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT (HRSG.): Dezentrale Ölsaatenverarbeitung, KTBL-Schrift 427, KTBL, Darmstadt, S. 13-20.
- WILLNER, T. (2005a): Entwicklungsstand und Perspektive der katalytischen Direktverflüssigung fester Biomasse. In: LANDWIRTSCHAFTSKAMMER SCHLESWIG-HOLSTEIN: Marktfucht-Report 2005, S. 22-25.
- WILLNER, T. (2005b): Herstellung flüssiger Kraftstoffe aus fester Biomasse durch katalytische und hydrierende Direktverflüssigung. In: OSTBAYERISCHES TECHNOLOGIE-TRANSFER-INSTITUT E. V. (OTTI): 14. Symposium Bioenergie 24./25. November 2005, Regensburg, Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e. V. (OTTI), Regensburg, S. 206-211.
- WILLNER, T. (2006): DoS-Verfahren zur Biomasseverflüssigung. Projektbeschreibung. Hochschule für Angewandte Wissenschaft Hamburg, Hamburg.
- WILLNER, T.; HJETTING, S.; MEIER, D. (2004): Einstufige katalytische Verflüssigung fester Biomassen - Charakterisierung der Produktöle durch GC/MS-Untersuchungen. In: DGKM-Fachbereichstagung "Energetische Nutzung von Biomassen", Velen, S. 235-241.
- WILLNOW, A. (2004): Öko-Audit als ein Instrument der ökologieorientierten Unternehmensführung. Die neue EG-Öko-Audit-Verordnung (EMAS II): Neue Anforderungen an das Umweltmanagement. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Chemnitz.
- WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT AGRARPOLITIK BEIM BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (2007): Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung – Empfehlungen an die Politik. [http://www.bmelv.de/cln\\_044/nn\\_751706/SharedDocs/downloads/14-WirUeberUns/Beiraete/Agrarpolitik/GutachtenWBA.html](http://www.bmelv.de/cln_044/nn_751706/SharedDocs/downloads/14-WirUeberUns/Beiraete/Agrarpolitik/GutachtenWBA.html) (Abrufdatum: 10.4.2008).
- WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT FÜR AGRARPOLITIK BEIM BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (2010): Gutachten: EU-Agrarpolitik nach 2013, Plädoyer für eine neue Politik für Ernährung, Landwirtschaft und ländliche Räume. <http://www.bmelv.de/SharedDocs/Downloads/Ministerium/Beiraete/Agrarpolitik/GutachtenGAP.html> (Abrufdatum: 24. 10. 2011).
- WMO; UNEP (World Meteorological Organization, United Nations Environment Programme) (Hrsg.) (2004): 16 Years of Scientific Assessment in Support of the Climate Convention. Genf.
- WÖHE, G.; DÖRING, U. (2002): Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. Verlag Franz Vahlen, 21. Neubearb. Auflage, München.
-

- WÖHLKEN, E. (1991): Einführung in die landwirtschaftliche Marktlehre. Verlag Eugen Ulmer, 3. überarb. Auflage, Stuttgart.
- WRI (World Resources Institute) (2003): CAIT - Climate Analysis Indicator Tool. <http://cait.wri.org/> (Abrufdatum: 5.5.2006).
- ZAH, R.; BÖNI, H.; GAUCH, M.; HISCHIER, R.; LEHMANN, M.; WÄGER, P. (2007): Ökobilanz von Energieprodukten: Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen. Bundesamt für Energie, Bundesamt für Umwelt und Bundesamt für Landwirtschaft, Bern.
- ZEDDIES, J. (2006): Rohstoffverfügbarkeit für die Produktion von Biokraftstoffen in Deutschland und in der EU-25. Institut für Landwirtschaftliche Betriebslehre, Fachgebiet: Analyse, Planung und Organisation der landwirtschaftlichen Produktion, Agrarökonomische Forschung - Agricultural Economic Research, Forschungsbericht 6/2006, Hohenheim/Stuttgart.
- ZUBERBÜHLER, U.; SPECHT, M.; BANDI, A.; MARQUARD-MÖLLENSTEDT, T. (2004): H<sub>2</sub>-reiches Synthesegas aus Biomasse: Der AER-Prozess. In: SPECHT, M.; ZUBERBÜHLER, U.; ZIMMER, U., ZENTRUM FÜR SONNENENERGIE- UND WASSERSTOFF-FORSCHUNG; STADERMANN, G., FORSCHUNGSVERBUND SONNENENERGIE (HRSG.): ForschungsVerbund Sonnenenergie Fachtagung. Regenerative Kraftstoffe. Entwicklungstrends, Forschungs- und Entwicklungsansätze, Perspektiven. 13.-14. 11. 2003 im ZSW in Stuttgart, Berlin, S. 176-185.
-



## 9 Anhang

### Anhangtabellen

Anhangtabelle 1: Trenderträge des Jahres 2005 sowie Ansprüche an Saatgut und Nährstoffe verschiedener Kulturen.....	200
Anhangtabelle 2: Ableitung der spezifischen Pflanzenschutzmittel-Wirkstoffmengen für einzelne landwirtschaftliche Ackerkulturen bei Wirkstoffkosten von 40 €/kg .....	202
Anhangtabelle 3: Schütt- bzw. Lagerungsdichte verschiedener Biomasse-Rohstoffe sowie spezifische Lagerungsverluste.....	209
Anhangtabelle 4: Input-Output-Tabelle zu ausgewählten Biomasse-Nutzungs-Pfaden zur Bereitstellung von Wärme 1 .....	210
Anhangtabelle 5: Input-Output-Tabelle zu ausgewählten Biomasse-Nutzungs-Pfaden zur Bereitstellung von Wärme 2 .....	211
Anhangtabelle 6: Input-Output-Tabelle zu ausgewählten Biomasse-Nutzungs-Pfaden zur Bereitstellung von elektrischem Strom 1.....	212
Anhangtabelle 7: Input-Output-Tabelle zu ausgewählten Biomasse-Nutzungs-Pfaden zur Bereitstellung von elektrischem Strom 2.....	213
Anhangtabelle 8: Input-Output-Tabelle zu ausgewählten Biomasse-Nutzungs-Pfaden zur Bereitstellung von elektrischem Strom 3.....	214
Anhangtabelle 9: Input-Output-Tabelle zu ausgewählten Biomasse-Nutzungs-Pfaden zur Bereitstellung von Biokraftstoffen 1 .....	215
Anhangtabelle 10: Input-Output-Tabelle zu ausgewählten Biomasse-Nutzungs-Pfaden zur Bereitstellung von Biokraftstoffen 2 .....	216
Anhangtabelle 11: Ökobilanzielle Kennzahlen zu Betriebsmitteln und Substituten.....	226
Anhangtabelle 12: Ökobilanzielle Kennzahlen zu Werkstoffen .....	227
Anhangtabelle 13: Lagerungskosten, kumulierter Energieaufwand sowie Treibhausgasemissionen von Lagerungssystemen zur Lagerung von verschiedenen Biomasse-Rohstoffen.....	232

### Anhangabbildungen

Anhangabbildung 1: Ableitung spezifischer Gewichte landwirtschaftlicher Nutzfahrzeuge und Maschinen ausgehend von den Anschaffungskosten.....	204
---	-----

---

Anhangabbildung 2: Abschätzung des Baustoff- bzw. Werkstoffbedarfs zur Erstellung von runden Behältern .....	205
Anhangabbildung 3: Abschätzung des Baustoff- bzw. Werkstoffbedarfs zur Erstellung von gemauerten Gebäuden .....	206
Anhangabbildung 4: Abschätzung des Baustoff- bzw. Werkstoffbedarfs zur Erstellung von Gebäuden aus Holz- bzw. Stahlkonstruktionen .....	207
Anhangabbildung 5: Abschätzung des Baustoff- bzw. Werkstoffbedarfs zur Erstellung von Wegen sowie Flachlagern .....	208
Anhangabbildung 6: Spezifisches Investitionsvolumen und spezifisches Gewicht von Biomasseheizanlagen (Hackschnitzelkessel) .....	217
Anhangabbildung 7: Spezifische Investitionsvolumina von Biomasseheizwerken und Biomasseheizkraftwerken .....	218
Anhangabbildung 8: Spezifisches Investitionsvolumen von Biogasanlagen zur Rohbiogaserzeugung .....	219
Anhangabbildung 9: Spezifisches Investitionsvolumen von Biogasanlagen zur Rohbiogaserzeugung sowie spezifische Investitionsvolumina BHKW's .....	220
Anhangabbildung 10: Elektrische Wirkungsgrade BHKW's sowie spezifischer Arbeitszeitbedarf für den Betrieb einer Biogasanlage .....	221
Anhangabbildung 11: Spezifische Investitionsvolumina für Anlagen zur Biogasaufbereitung und Einspeisung ins Erdgasnetz sowie der spezifische Arbeitszeitbedarf .....	222
Anhangabbildung 12: Spezifische Investitionsvolumina sowie elektrischer Leistungsbedarf dezentraler Ölpresen .....	223
Anhangabbildung 13: Spezifisches Investitionsvolumen von Biodieselanlagen sowie spezifischer Arbeitszeitbedarf der Biodieselproduktion .....	224
Anhangabbildung 14: Spezifisches Investitionsvolumen von Bioethanolanlagen sowie spezifischer Arbeitszeitbedarf der Bioethanolproduktion .....	225
Anhangabbildung 15: Ableitung der Korrelationen zwischen KEA und zugehöriger Treibhausgasemissionen für mineralische Düngemittel sowie Pflanzenschutzmittel .....	228
Anhangabbildung 16: Ableitung der Preise für Silomais und Hackschnitzeln von Kurzumtriebsplantagen mittels bereinigtem Deckungsbeitragsvergleich zu Winterweizen .....	229
Anhangabbildung 17: Transportkosten, kumulierter Energieaufwand sowie Treibhausgasemissionen von Transportsystemen zum Transport von verschiedenen Biomasse-Rohstoffen in Abhängigkeit von der Transportentfernung .....	230
Anhangabbildung 18: Energiebilanz ausgewählter Biomasse-Umwandlungspfade zur Wärmegewinnung .....	233
Anhangabbildung 19: Treibhausgasbilanz ausgewählter Biomasse-Umwandlungspfade zur Wärmegewinnung .....	234
Anhangabbildung 20: Treibhausgas-Vermeidungskosten ausgewählter Biomasse-Umwandlungspfade zur Wärmegewinnung .....	235

---

Anhangabbildung 21: Beschäftigungseffekte ausgewählter Biomasse-Umwandlungspfade zur Wärmegegewinnung .....	236
Anhangabbildung 22: Einkommenseffekte ausgewählter Biomasse-Umwandlungspfade zur Wärmegegewinnung .....	237
Anhangabbildung 23: Energiebilanz ausgewählter Biomasse-Umwandlungspfade zur Gewinnung von elektrischem Strom .....	238
Anhangabbildung 24: Treibhausgasbilanz ausgewählter Biomasse-Umwandlungspfade zur Gewinnung von elektrischem Strom .....	239
Anhangabbildung 25: Treibhausgas-Vermeidungskosten ausgewählter Biomasse-Umwandlungspfade zur Gewinnung von elektrischem Strom .....	240
Anhangabbildung 26: Beschäftigungseffekte ausgewählter Biomasse-Umwandlungspfade zur Gewinnung von elektrischem Strom .....	241
Anhangabbildung 27: Einkommenseffekte ausgewählter Biomasse-Umwandlungspfade zur Gewinnung von elektrischem Strom .....	242
Anhangabbildung 28: Energiebilanz ausgewählter Biomasse-Umwandlungspfade zur Gewinnung von Biokraftstoffen .....	243
Anhangabbildung 29: Treibhausgasbilanz ausgewählter Biomasse-Umwandlungspfade zur Gewinnung von Biokraftstoffen .....	244
Anhangabbildung 30: Treibhausgas-Vermeidungskosten ausgewählter Biomasse-Umwandlungspfade zur Gewinnung von Biokraftstoffen .....	245
Anhangabbildung 31: Beschäftigungseffekte ausgewählter Biomasse-Umwandlungspfade zur Gewinnung von Biokraftstoffen .....	246
Anhangabbildung 32: Einkommenseffekte ausgewählter Biomasse-Umwandlungspfade zur Gewinnung von Biokraftstoffen .....	247
Anhangabbildung 33: Vergleich „RegEnOpt“-Ergebnisse mit Literaturdaten bezüglich kumulierem Energieaufwand je Einheit Endenergieträger .....	248
Anhangabbildung 34: Vergleich „RegEnOpt“-Ergebnisse mit Literaturdaten bezüglich Treibhausgasemissionen je Einheit Endenergieträger .....	249
Anhangabbildung 35: LP-Ergebnisse Szenario 10% LF mit Untergrenzen für Biokraftstoffe .....	250
Anhangabbildung 36: LP-Ergebnisse Szenario 10% LF ohne Untergrenzen für Biokraftstoffe .....	251
Anhangabbildung 37: LP-Ergebnisse Szenario 40% LF mit Untergrenzen für Biokraftstoffe .....	252
Anhangabbildung 38: LP-Ergebnisse Szenario 40% LF ohne Untergrenzen für Biokraftstoffe .....	253
Anhangabbildung 39: LP-Ergebnisse Szenario 100% LF mit Untergrenzen für Biokraftstoffe .....	254
Anhangabbildung 40: LP-Ergebnisse Szenario 100% LF ohne Untergrenzen für Biokraftstoffe .....	255

---

**Anhangtabelle 1: Trenderträge des Jahres 2005 sowie Ansprüche an Saatgut und Nährstoffe verschiedener Kulturen**

Kultur Erntegut	Trend- ertrag <sup>1)</sup> t FM/ha	HNV <sup>2)</sup> 1 : ___	TM- Gehalt %	Energiegehalt in der TM MJ/kg TM	Saatgut/ Pflanzgut Einheiten/ha	Nährstoffentzüge		
						N kg/t FM	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> kg/t FM	K <sub>2</sub> O kg/t FM
<b>Winterweizen</b>								
Korn	7,7	0,8	86%	17,0	180 kg	18,0	8,0	6,0
Stroh	6,2		85%	17,2		5,0	3,0	14,0
GPS	34		35%	17,1		5,6	2,3	4,7
<b>Sommerweizen</b>								
Korn	5,8	0,8	86%	17,0	180 kg	18,0	8,0	6,0
Stroh	4,6		85%	17,2		5,0	3,0	14,0
GPS	26		35%	17,1		5,6	2,3	4,7
<b>Wintergerste</b>								
Korn	6,6	0,7	86%	17,0	220 kg	17,0	8,0	6,0
Stroh	4,6		85%	17,5		5,0	3,0	17,0
GPS	27		35%	17,1		5,6	2,3	4,7
<b>Sommergerste</b>								
Korn	4,9	0,7	86%	17,0	160 kg	14,0	8,0	6,0
Stroh	3,4		85%	17,5		5,0	3,0	1,7
GPS	21		35%	17,1		5,6	2,3	4,7
<b>Hafer</b>								
Korn	4,9	1,1	86%	18,1	130 kg	15,0	8,0	6,0
Stroh	5,4		85%	17,2		5,0	3,0	1,7
GPS	25		35%	17,1		5,6	2,3	4,7
<b>Winterroggen</b>								
Korn	5,6	0,9	86%	17,1	120 kg	15,0	8,0	6,0
Stroh	5,1		85%	17,4		5,0	3,0	2,0
GPS	26		35%	17,1		5,6	2,3	4,7
<b>Triticale</b>								
Korn	6,0	0,9	86%	16,9	160 kg	18,0	8,0	6,0
Stroh	5,4		85%	17,1		5,0	3,0	1,7
GPS	28		35%	17,0		5,6	2,3	4,7
<b>Körnermais</b>								
Korn	9,3	1,0	86%	17,9	2,2 Einh.	15,0	8,0	5,0
Stroh	9,3		85%	17,7		9,0	2,0	20,0
CCM	21		60%	17,1		10,0	4,1	3,6
<b>Winteraps</b>								
Korn	3,7	1,7	91%	26,5	4,0 kg	33,5	18,0	1,0
Stroh	6,2		85%	17,1		7,0	3,5	23,5
<b>Sonnenblumen</b>								
Korn	2,3	2,0	91%	27,0	4,5 kg	29,0	16,0	24,0
Stroh	4,6		85%	15,8		10,0	8,0	45,0

Fortsetzung Anhangtabelle 1:

Kultur Erntegut	Trend- ertrag <sup>1)</sup> t FM/ha	HNV <sup>2)</sup> 1 : __	TM- Gehalt %	Energiegehalt in der TM MJ/kg TM	Saatgut/ Pflanzgut Einheiten/ha	Nährstoffentzüge			
						N kg/t FM	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> kg/t FM	K <sub>2</sub> O kg/t FM	
<b>Kartoffeln</b>									
Knolle	43	0,2	23%	16,3	2.800 kg	3,5	1,4	6,0	
Kraut	9		85%	15,7		2,0	0,0	3,6	
<b>Topinambur</b>									
Knolle	33	1,0	20%	16,5	1.600 kg	2,5	2,1	6,3	
Kraut	34		30%	17,5		2,4	2,0	6,0	
<b>Zuckerrüben</b>									
Rübe	60	0,7	23%	16,3	1,1 Einh.	1,8	1,0	2,5	
Blatt	42		20%	15,7		0,4	1,1	0,7	
<b>Silomais</b>									
GPS	44		33%	17,5	2,2 Einh.	4,3	1,8	5,1	
<b>Luzerne</b>									
Heu	8,0		85%	17,4	30 kg	23,4	5,5	25,5	
GPS	20		35%	16,5		9,6	2,3	10,5	
Grün	34		20%	14,1		5,5	1,3	6,0	
<b>Futtergräser</b>									
Heu	8,4		85%	17,4	24 kg	20,4	6,8	27,6	
GPS	20		35%	16,5		8,4	2,8	11,4	
Grün	36		20%	14,1		4,8	1,6	6,5	
<b>Miscanthus</b>									
Heu	18		85%	17,6	10.000 Stk.	5,8	2,1	10,2	
GPS	47		32%	17,2		2,2	0,8	3,9	
Grün	75		20%	17,1		1,4	0,5	2,4	
<b>Hirse</b>									
Heu	16		85%	17,6	20 kg	12,1	2,8	12,1	
GPS	44		32%	17,2		4,6	1,0	4,5	
Grün	70		20%	17,1		2,9	0,7	2,8	
<b>Sudangras</b>									
Heu	16		85%	17,6	20 kg	11,3	5,2	16,4	
GPS	44		28%	17,2		3,7	1,7	5,4	
Grün	70		20%	17,1		2,7	1,2	3,9	
<b>Pappel</b>									
Holz	20		50%	18,5	10.000 Stk.	1,9	1,1	1,7	

<sup>1)</sup> Trenderträge nach EUROSTAT von 1991 bis 2005, Erträge von Stroh, Kraut, Blatt, GPS und CCM geschätzt aus Ertrag Korn, Knolle, Rübe, HNV und TM-Gehalte

<sup>2)</sup> HNV: Haupternteprodukt-Nebenprodukt-Verhältnis

Quelle: eigene Darstellung nach EUROSTAT 2008, LFL 2006, LFL 2007, KALTSCHMITT und HARTMANN 2001, S. 264, GRAF, et al. 2006, RÖHRICHT und HERMANN 2007ab, RÖHRICHT und RUSCHER 2006, RÖHRICHT 2006, RÖHRICHT 2002, TLL 2007ab, WERNER, et al. 2006, KTBL und ATB 2006

**Anhangtabelle 2: Ableitung der spezifischen Pflanzenschutzmittel-Wirkstoffmengen für einzelne landwirtschaftliche Ackerkulturen bei Wirkstoffkosten von 40 €/kg**

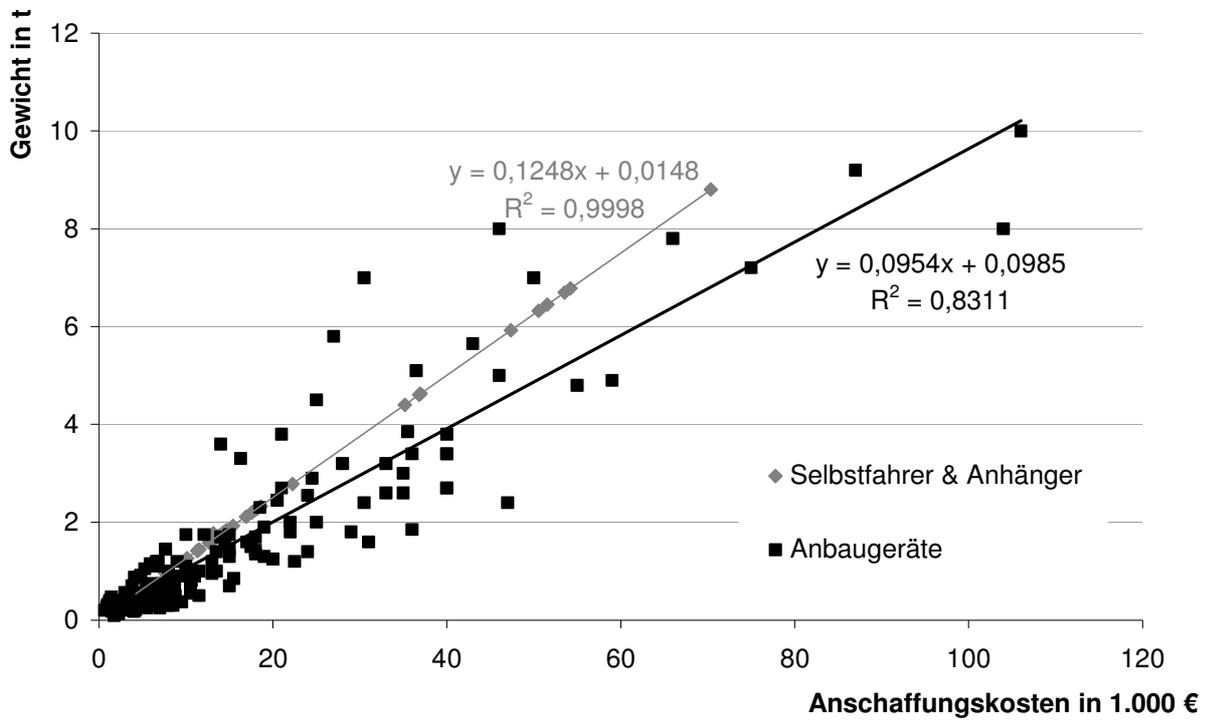
Kultur Wirkstoffklasse	Pflanzenschutzintensität			Pflanzenschutzintensität		
	niedrig	mittel	hoch	niedrig	mittel	hoch
	€/ha			kg WS/ha		
<b>Winterweizen</b>						
Herbizide	29	42	54	0,72	1,04	1,34
Fungizide	40	60	84	0,99	1,48	2,08
Wachstumsregler	2	4	12	0,05	0,10	0,30
Insektizide u. sonst. Pflanzenschutz	0	4	8	0,00	0,10	0,20
<b>Wintergerste</b>						
Herbizide	27	38	51	0,67	0,94	1,26
Fungizide	27	45	68	0,67	1,11	1,68
Wachstumsregler	4	6	10	0,10	0,15	0,25
Insektizide u. sonst. Pflanzenschutz	0	0	2	0,00	0,00	0,05
<b>Sommergerste</b>						
Herbizide	24	37	44	0,59	0,92	1,09
Fungizide	20	36	52	0,49	0,89	1,29
Wachstumsregler	0	2	4	0,00	0,05	0,10
Insektizide u. sonst. Pflanzenschutz	0	1	2	0,00	0,02	0,05
<b>Winterroggen</b>						
Herbizide	32	43	55	0,79	1,06	1,36
Fungizide	16	32	48	0,40	0,79	1,19
Wachstumsregler	7	12	15	0,17	0,30	0,37
Insektizide u. sonst. Pflanzenschutz	0	0	1	0,00	0,00	0,02
<b>Hafer</b>						
Herbizide	26	35	46	0,64	0,87	1,14
Fungizide	0	0	6	0,00	0,00	0,15
Wachstumsregler	0	1	1	0,00	0,02	0,02
Insektizide u. sonst. Pflanzenschutz	0	0	2	0,00	0,00	0,05
<b>Triticale</b>						
Herbizide	28	41	57	0,69	1,01	1,41
Fungizide	13	30	54	0,32	0,74	1,34
Wachstumsregler	5	7	8	0,12	0,17	0,20
Insektizide u. sonst. Pflanzenschutz	0	0	2	0,00	0,00	0,05
<b>Körnermais</b>						
Herbizide	46	71	94	1,14	1,76	2,33
Fungizide	0	0	0	0,00	0,00	0,00
Wachstumsregler	0	0	0	0,00	0,00	0,00
Insektizide u. sonst. Pflanzenschutz	0	0	0	0,00	0,00	0,00
<b>Ackerbohnen</b>						
Herbizide	49	58	71	1,21	1,43	1,76
Fungizide	0	3	9	0,00	0,07	0,22
Wachstumsregler	0	0	0	0,00	0,00	0,00
Insektizide u. sonst. Pflanzenschutz	3	9	13	0,07	0,22	0,32
<b>Körnererbsen</b>						
Herbizide	49	63	71	1,21	1,56	1,76
Fungizide	0	0	7	0,00	0,00	0,17
Wachstumsregler	0	0	0	0,00	0,00	0,00
Insektizide u. sonst. Pflanzenschutz	1	3	4	0,02	0,07	0,10

Fortsetzung Anhangtabelle 2:

Kultur Wirkstoffklasse	Pflanzenschutzintensität €/ha			Pflanzenschutzintensität kg WS/ha		
	niedrig	mittel	hoch	niedrig	mittel	hoch
<b>Winterraps</b>						
Herbizide	62	62	77	1,53	1,53	1,90
Fungizide	0	19	35	0,00	0,47	0,87
Wachstumsregler						
Insektizide u. sonst. Pflanzenschutz	11	14	19	0,27	0,35	0,47
Ackerschnecken	0	8	11	0,00	0,20	0,27
<b>Sommerraps</b>						
Herbizide	13	22,9	27,7	0,32	0,57	0,69
Fungizide	0	0	0	0,00	0,00	0,00
Insektizide u. sonst. Pflanzenschutz	0	9,1	9,1	0,00	0,23	0,23
<b>Sonnenblumen</b>						
Herbizide	40	55	66	0,99	1,36	1,63
Fungizide	0	0	0	0,00	0,00	0,00
Wachstumsregler	0	0	0	0,00	0,00	0,00
Insektizide u. sonst. Pflanzenschutz	0	9	15	0,00	0,22	0,37
<b>Zuckerrüben</b>						
Herbizide	125	179	225	3,09	4,43	5,57
Fungizide	0	14	32	0,00	0,35	0,79
Wachstumsregler	0	0	0	0,00	0,00	0,00
Insektizide u. sonst. Pflanzenschutz	0	3	5	0,00	0,07	0,12
<b>Speisekartoffeln</b>						
Herbizide	57	81	96	1,41	2,00	2,37
Fungizide	93	158	217	2,30	3,91	5,37
Wachstumsregler	0	0	0	0,00	0,00	0,00
Insektizide u. sonst. Pflanzenschutz	10	12	17	0,25	0,30	0,42
<b>Stärkekartoffeln</b>						
Herbizide	57	81	96	1,41	2,00	2,37
Fungizide	93	158	217	2,30	3,91	5,37
Wachstumsregler	0	0	0	0,00	0,00	0,00
Insektizide u. sonst. Pflanzenschutz	10	12	17	0,25	0,30	0,42

Quelle: eigene Berechnungen nach LFL 2006, BMELV 2006 und BRENDLER et al. 2005

Anhangabbildung 1: Ableitung spezifischer Gewichte landwirtschaftlicher Nutzfahrzeuge und Maschinen ausgehend von den Anschaffungskosten



Quellen: eigene Darstellung nach KTBL 2004

## Anhangabbildung 2: Abschätzung des Baustoff- bzw. Werkstoffbedarfs zur Erstellung von runden Behältern

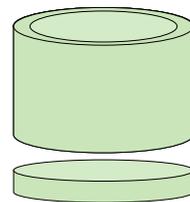
**Rundbehälter: Stahlbeton u. U. isoliert, Betonboden, Betondeckel oder Foliendach, oder komplett Stahlausfertigung**

Arbeitsvolumen gesamt zu Innenvolumen je Behälter

$$V_{IB} = V_A \cdot F_R \cdot N_B^{-1}$$

Rundbehälter, oben offen

$$V_{WS} = \left( \sqrt{\frac{V_{IB}}{\pi \cdot h}} + W \right)^2 \cdot \pi \cdot W + \left( \sqrt{\frac{V_{IB}}{\pi \cdot h}} + W \right)^2 \cdot \pi \cdot h - \frac{V_{IB}}{\pi \cdot h} \cdot \pi \cdot h$$



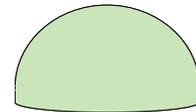
Deckel, rund und flach

$$V_{WS} = \left( \sqrt{\frac{V_{IB}}{\pi \cdot h}} + W \right)^2 \cdot \pi \cdot W$$



Deckel, Halbkugel

$$V_{WS} = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left[ \left( \sqrt{\frac{V_{IB}}{\pi \cdot h}} + W \right)^3 - \left( \sqrt{\frac{V_{IB}}{\pi \cdot h}} \right)^3 \right]$$




---

$V_{IB}$ :	Innenvolumen je Rundbehälter
$V_A$ :	Arbeitsvolumen
$F_R$ :	Faktor Reservevolumen
$N_B$ :	Anzahl der Behälter
$V_{WS}$ :	Volumen Werkstoff(e)
$h$ :	Innenhöhe Behälter
$W$ :	Wandstärke
$\pi$ :	3,14159265

Allgemeine Zylinder- und Kugelgeometrie

$$V_{Zylinder} = r^2 \cdot \pi \cdot h \quad V_{Kugel} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3$$

---

$V$ :	Volumen
$r$ :	Radius
$h$ :	Höhe
$\pi$ :	3,14159265

Quelle: eigene Darstellung nach BARTH, et al 1990

**Anhangabbildung 3: Abschätzung des Baustoff- bzw. Werkstoffbedarfs zur Erstellung von gemauerten Gebäuden**

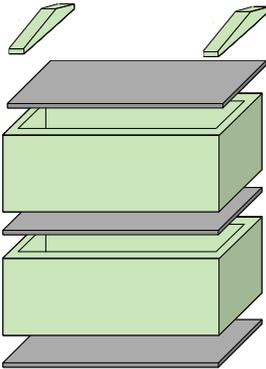
**Gebäude: gemauert, u. U. mehrstöckig mit Betondecken**

Bodenplatte und Decken  $V_{WS,B\&D} = l \cdot b \cdot D_{B\&D} \cdot (I + N_D)$



Wände inkl. Giebel Gebäude gemauert

$$V_{WS,W} = l \cdot b \cdot (h - N_D \cdot D_{B\&D}) - (l - 2 \cdot D_W) \cdot (b - 2 \cdot D_W) \cdot (h - N_D \cdot D_{B\&D}) + (b^2 \cdot (2 \cdot \cos \alpha)^{-1} \cdot \sin \alpha \cdot D_W)$$



Dachstuhl – einfache Kalkulation

$$V_{WS,DS} = l \cdot b \cdot (\cos \alpha)^{-1} \cdot D_{DS}$$



Träger-, Balkenkonstruktion für Stützen, Binder/Sparren und Latten

Trägerbauformen Holzbalken Stahl, Doppel-T-Träger

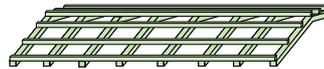
Fläche Querschnitt Träger, Sparren, Latte

$$A_{T,WS} = b_T \cdot t_T - ((b_T - D_{T,WS}) \cdot (t_T - 2 \cdot D_{T,WS}))$$

$$D_{T,WS} \leq b \cap D_{T,WS} \leq \frac{1}{2} t$$

Dachstuhl – Binder/Sparren

$$V_{WS,DS,B} = A_{T,WS} \cdot b \cdot (2 \cdot \cos \alpha)^{-1} \cdot (l \cdot D_T^{-1} + I) \cdot 2$$



Dachstuhl – Lattung

$$V_{WS,DS,L} = A_{T,WS} \cdot l \cdot (2 \cdot b \cdot (2 \cdot \cos \alpha)^{-1} \cdot D_L^{-1} + I)$$

Dacheindeckung

$$V_{WS,DE} = l \cdot b \cdot (\cos \alpha)^{-1} \cdot D_{DE}$$



$V_{WS,B\&D}$ :	Volumen Werkstoff(e) Bodenplatte und Decken	$A_{T,WS}$ :	Fläche Querschnitt Träger, Sparren, Latte
$V_{WS,W}$ :	Volumen Werkstoff(e) Wände inkl. Giebel	$b_T$ :	Breite Träger
$V_{WS,T}$ :	Volumen Werkstoff(e) Träger	$t_T$ :	Tiefe Träger (Außenabstand der T's)
$V_{WS,DS}$ :	Volumen Werkstoff(e) Dachstuhl	$D_{T,WS}$ :	Materialstärke Träger, Sparren, Latte
$V_{WS,DS,B}$ :	Volumen Werkstoff(e) Dachstuhl, Binder/Sparren	$D_T$ :	Abstand stehende Stützen
$V_{WS,DS,L}$ :	Volumen Werkstoff(e) Dachstuhl, Lattung	$T_S$ :	Einbautiefe stehende Stützen im Fundament
$V_{WS,DE}$ :	Volumen Werkstoff(e) Dacheindeckung	$N_T$ :	Anzahl liegende Trägerreihen
$l$ :	Länge des Gebäudes, außen	$D_L$ :	Abstand Latten
$b$ :	Breite des Gebäudes, außen		
$h$ :	Traufhöhe des Gebäudes		
$N_D$ :	Anzahl der Decken		
$D_{B\&D}$ :	Stärke Bodenplatte und Decken		
$D_W$ :	Wandstärke		
$D_{DS}$ :	Mittlere Dicke des Dachstuhls (umgelegt auf die Dachfläche)		
$D_{DE}$ :	Stärke der Dacheindeckung		
$\alpha$ :	Winkel der Dachneigung		

Quelle: eigene Darstellung nach BARTH, et al 1990

### Anhangabbildung 4: Abschätzung des Baustoff- bzw. Werkstoffbedarfs zur Erstellung von Gebäuden aus Holz- bzw. Stahlkonstruktionen

#### Halle: Trägerkonstruktion und Verschalung mit Holz oder Blech

Bodenplatte und Decken  $V_{WS,B\&D} = l \cdot b \cdot D_{B\&D} \cdot (1 + N_D)$



Träger-, Balkenkonstruktion für Stützen, Binder/Sparren und Latten

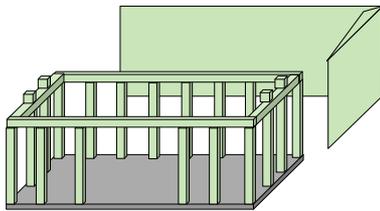
Trägerbauformen  Holzbalken  Stahl, Doppel-T-Träger

Fläche Querschnitt Träger, Sparren, Latte

$$A_{T,WS} = b_T \cdot t_T - ((b_T - D_{T,WS}) \cdot (t_T - 2 \cdot D_{T,WS})) \quad D_{T,WS} \leq b \cap D_{T,WS} \leq \frac{1}{2} t$$

Volumen der Träger-, Balkenkonstruktion

$$V_{WS,T} = A_{T,WS} \cdot (2 \cdot (l + b) \cdot D_T^{-1} \cdot (h + T_S) + 2 \cdot (l + b) \cdot N_T + (b^2 \cdot (2 \cdot \cos \alpha)^{-1} \cdot \sin \alpha \cdot D_T^{-1}))$$

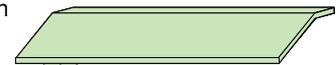


Volumen Wandverkleidung

$$V_{WS,W} = (2 \cdot (l + b) \cdot h + b^2 \cdot (2 \cdot \cos \alpha)^{-1} \cdot \sin \alpha) \cdot D_W$$

Dachstuhl – einfache Kalkulation

$$V_{WS,DS} = l \cdot b \cdot (\cos \alpha)^{-1} \cdot D_{DS}$$

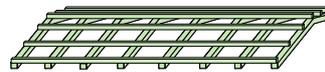


Dachstuhl – Binder/Sparren

$$V_{WS,DS,B} = A_{T,WS} \cdot b \cdot (2 \cdot \cos \alpha)^{-1} \cdot (l \cdot D_T^{-1} + 1) \cdot 2$$

Dachstuhl – Lattung

$$V_{WS,DS,L} = A_{T,WS} \cdot l \cdot (2 \cdot b \cdot (2 \cdot \cos \alpha)^{-1} \cdot D_L^{-1} + 1)$$



Dacheindeckung

$$V_{WS,DE} = l \cdot b \cdot (\cos \alpha)^{-1} \cdot D_{DE}$$



$V_{WS,B\&D}$ :	Volumen Werkstoff(e) Bodenplatte und Decken	$A_{T,WS}$ :	Fläche Querschnitt Träger, Sparren, Latte
$V_{WS,W}$ :	Volumen Werkstoff(e) Wände inkl. Giebel	$b_T$ :	Breite Träger
$V_{WS,T}$ :	Volumen Werkstoff(e) Träger	$t_T$ :	Tiefe Träger (Außenabstand der T's)
$V_{WS,DS}$ :	Volumen Werkstoff(e) Dachstuhl	$D_{T,WS}$ :	Materialstärke Träger, Sparren, Latte
$V_{WS,DS,B}$ :	Volumen Werkstoff(e) Dachstuhl, Binder/Sparren	$D_T$ :	Abstand stehende Stützen
$V_{WS,DS,L}$ :	Volumen Werkstoff(e) Dachstuhl, Lattung	$T_S$ :	Einbautiefe stehende Stützen im Fundament
$V_{WS,DE}$ :	Volumen Werkstoff(e) Dacheindeckung	$N_T$ :	Anzahl liegende Trägerreihen
$l$ :	Länge des Gebäudes, außen	$D_L$ :	Abstand Latten
$b$ :	Breite des Gebäudes, außen		
$h$ :	Traufhöhe des Gebäudes		
$N_D$ :	Anzahl der Decken		
$D_{B\&D}$ :	Stärke Bodenplatte und Decken		
$D_W$ :	Wandstärke		
$D_{DS}$ :	Mittlere Dicke des Dachstuhls (umgelegt auf die Dachfläche)		
$D_{DE}$ :	Stärke der Dacheindeckung		
$\alpha$ :	Winkel der Dachneigung		

Quelle: eigene Darstellung nach BARTH, et al 1990

### Anhangabbildung 5: Abschätzung des Baustoff- bzw. Werkstoffbedarfs zur Erstellung von Wegen sowie Flachlagern

#### Wege, Flachlager

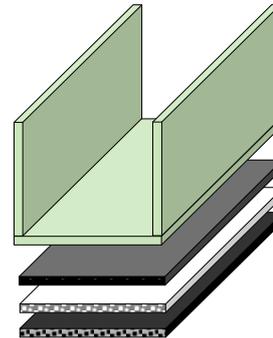
Weg, Unterbau, einzelne Schicht

$$V_{WS,S} = l \cdot b \cdot D_S$$



Flachlager, Stahlbeton

$$V_{WS,F} = l \cdot b \cdot D_S + 2 \cdot l \cdot h \cdot D_W$$




---

$V_{WS,S}$ :	Volumen Werkstoff(e) Schicht
$V_{WS,F}$ :	Volumen Werkstoff(e) Flachlager
$l$ :	Länge, außen
$b$ :	Breite, außen
$h$ :	Wandhöhe
$D_S$ :	Stärke Schicht
$D_W$ :	Wandstärke

Quelle: eigene Darstellung nach BARTH, et al 1990

---

**Anhangtabelle 3: Schütt- bzw. Lagerungsdichte verschiedener Biomasse-Rohstoffe sowie spezifische Lagerungsverluste**

<b>Bezeichnung</b>	<b>Lagerungsdichte kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Lagerverluste Masse %/a</b>
Getreidekorn	750	1,0%
Rapssaat	725	0,4%
Körnermais	750	20,0%
Silomais lose	400	
Maissilage verdichtet	820	11,6%
Grünschnitt frisch lose	340	
Grünschnitt angewelkt lose	500	
Grassilage verdichtet	650	11,6%
Grünschnitt Heu lose	90	2,0%
Grünschnitt angewekt Ballen	500	11,6%
Grünschnitt Heu Ballen	165	2,0%
Stroh lose 85%TS	59	2,0%
Stroh Quaderballen 85%TS	143	2,0%
Stroh Rundballen 85%TS	144	2,0%
CCM	730	5,8%
GPS gehäckselt	613	11,6%
Sonnenblumensaat	510	0,4%
Kartoffeln	700	
Zuckerrüben	700	
Gülle	1.000	0,0%
Gärrest	1.000	0,0%
Holzpellets 90%TS	552	1,0%
Strohpellets 90%TS	551	1,0%
Laubholzhackschnitzel 50%TS	463	10,0%
Laubholzhackschnitzel 65%TS	356	5,0%
Laubholzhackschnitzel 85%TS	272	2,0%
Nadelholzhackschnitzel 50%TS	330	10,0%
Nadelholzhackschnitzel 65%TS	254	5,0%
Nadelholzhackschnitzel 85%TS	194	2,0%
Laubholz Scheite 50%TS	789	10,0%
Laubholz Scheite 65%TS	607	5,0%
Laubholz Scheite 85%TS	464	2,0%
Nadelholz Scheite 50%TS	552	10,0%
Nadelholz Scheite 65%TS	425	5,0%
Nadelholz Scheite 85%TS	325	2,0%
Rapsschrot	510	1,0%
Sonnenblumenschrot	360	1,0%
Trockenschnitzel	300	1,0%

Quelle: eigene Darstellung nach BECKSCHULTE VERFAHRENSTECHNIK GMBH 2001, BUNDESARBEITSKREIS FUTTERKONSERVIERUNG 2006, HARTMANN UND KALTSCHMITT 2002

**Anhangtabelle 4: Input-Output-Tabelle zu ausgewählten Biomasse-Nutzungs-Pfaden zur Bereitstellung von Wärme 1**

<b>Biomasse-Rohstoff</b>	Pappel-Holz	Pappel-Holz	Pappel-Holz	Pappel-Holz	Winterweizen-Korn	Winterweizen-Korn	Winterweizen-Korn	Winterweizen-Korn	Winterweizen-Stroh	Winterweizen-Stroh
<b>Endenergieträger</b>	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme
<b>Bezeichnung</b>	FBSI-15 kWh-(Pappel-Holz)-W-DE-2005-SL	FBSI-50 kWh-(Pappel-Holz)-W-DE-2005-SL	FBSI-100 kWh-(Pappel-Holz)-W-DE-2005-SL	FBSI-250 kWh-(Pappel-Holz)-W-DE-2005-SL	FBSI-15 kWh-(Winterweizen-Korn)-W-DE-2005-SL	FBSI-50 kWh-(Winterweizen-Korn)-W-DE-2005-SL	FBSI-100 kWh-(Winterweizen-Korn)-W-DE-2005-SL	FBSI-250 kWh-(Winterweizen-Korn)-W-DE-2005-SL	FBSI-15 kWh-(Winterweizen-Stroh)-W-DE-2005-SL	FBSI-50 kWh-(Winterweizen-Stroh)-W-DE-2005-SL
<b>Input</b>										
<b>Bereitstellung Biomasse</b>										
Saatgut	10.000	10.000	10.000	10.000	180	180	180	180	31	31
Dünger N	68	68	68	68	169	169	169	169	62	62
Dünger P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	22	22	22	22	62	62	62	62	18	18
Dünger K <sub>2</sub> O	34	34	34	34	46	46	46	46	86	86
Pflanzenschutz					2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
Diesel	21	21	21	21	95	95	95	95	6	6
Mechanisierung (A/A)	33	33	33	33	110	110	110	110	26	26
Anbaumittelfang	1	2	4	11	1	4	7	18	1	4
Transport	5	5	8	10	2	4	5	10	2	4
<b>Bestandteile Anlage</b>	Heizkessel, Heizraum, Lagerraum	Heizkessel, Heizraum, Lagerraum	Heizkessel, Einhausung, Lagerraum	Heizkessel, Einhausung, Lagerraum	Heizkessel, Heizraum, Lagerraum	Heizkessel, Heizraum, Lagerraum	Heizkessel, Einhausung, Lagerraum	Heizkessel, Einhausung, Lagerraum	Heizkessel, Heizraum, Lagerraum	Heizkessel, Heizraum, Lagerraum
<b>Betriebsmittel Anlage</b>	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)
<b>Output</b>										
<b>Endenergieträger</b>	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme
Anzahl Einheiten	30.000	100.000	200.000	500.000	30.000	100.000	200.000	500.000	30.000	100.000
Bezugseinheit	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
<b>Koppelprodukte</b>										

<sup>1)</sup> BE: Getreide, Raps; kg; Mais, Rüben: Einheit; Pappel: Stück Setzlinge

Quelle: eigene Darstellung



**Anhangtabelle 6: Input-Output-Tabelle zu ausgewählten Biomasse-Nutzungs-Pfaden zur Bereitstellung von elektrischem Strom 1**

<b>Biomasse-Rohstoff</b>	Pappel-Holz	Pappel-Holz	Winterweizen-Stroh	Winterweizen-Stroh	Rind-Gülle	Rind-Gülle	Rind-Gülle	Rind-Gülle	Rind-Gülle	Rind-Gülle
<b>Endenergieträger</b>	el. Strom	el. Strom	el. Strom	el. Strom	el. Strom	el. Strom	el. Strom	el. Strom	el. Strom	el. Strom
<b>Bezeichnung</b>	FBS1-1.000 kWel-(Pappel-Holz)-eS-DE-2005-SL	FBS1-1.000 kWel-(Pappel-Holz)-eS+W-DE-2005-SL	FBS1-1.000 kWel-(Winterweizen-Stroh)-eS-DE-2005-SL	FBS1-1.000 kWel-(Winterweizen-Stroh)-eS+W-DE-2005-SL	BG-50 kWel-(Rind-Gülle)-eS-DE-2005-SL	BG-100 kWel-(Rind-Gülle)-eS-DE-2005-SL	BG-250 kWel-(Rind-Gülle)-eS-DE-2005-SL	BG-500 kWel-(Rind-Gülle)-eS-DE-2005-SL	BG-1.000 kWel-(Rind-Gülle)-eS-DE-2005-SL	BG-500 kWel-(Rind-Gülle)-eS+W-DE-2005-SL
<b>Input</b>										
<b>Bereitstellung Biomasse</b>										
Saatgut	10.000 BE <sup>1)</sup> /ha	10.000								
Dünger N	68 kg/ha	68	31	31						
Dünger P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	22 kg/ha	22	18	18						
Dünger K <sub>2</sub> O	34 kg/ha	34	86	86						
Pflanzenschutz	21 l/ha	21	6	6						
Mechanisierung (AIA)	33 €/ha	33	26	26						
Anbauumfang	310 ha	310	637	637						
Transport	50 km	50	30	30	1	2	3	5	10	5
<b>Bestandteile Anlage</b>	Kraftwerk, Fermwärmeleitu ng, Lagerraum	Kraftwerk, Fermwärmeleitu ng, Lagerraum	Kraftwerk, Fermwärmeleitu ng, Lagerraum	Kraftwerk, Fermwärmeleitu ng, Lagerraum	Biogasanlage, Fermenter, Technikraum, BHKW	Biogasanlage, Fermenter, Technikraum, BHKW	Biogasanlage, Fermenter, Technikraum, BHKW	Biogasanlage, Fermenter, Technikraum, BHKW	Biogasanlage, Fermenter, Technikraum, BHKW	Biogasanlage, Fermenter, Technikraum, BHKW
<b>Betriebsmittel Anlage</b>	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil), Heizöl leicht	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil), Heizöl leicht	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)
<b>Output</b>										
<b>Endenergieträger</b>	el. Strom	el. Strom	el. Strom	el. Strom	el. Strom	el. Strom	el. Strom	el. Strom	el. Strom	el. Strom
Anzahl Einheiten	6.000.000 kWhel	6.000.000 kWhel	6.000.000 kWhel	6.000.000 kWhel	375.000 kWhel	750.000 kWhel	1.875.000 kWhel	3.750.000 kWhel	7.500.000 kWhel	3.750.000 kWhel
<b>Koppelprodukte</b>	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme

<sup>1)</sup> BE: Getreide, Raps; kg: Mais, Rüben; Einheit: Pappel; Stück Setzlinge

Quelle: eigene Darstellung

Anhangtabelle 7: Input-Output-Tabelle zu ausgewählten Biomasse-Nutzungs-Pfaden zur Bereitstellung von elektrischem Strom 2

<b>Biomasse-Rohstoff</b>	Silomais-GPS	Silomais-GPS	Silomais-GPS	Silomais-GPS	Silomais-GPS	Winterweizen-GPS	Winterweizen-GPS	Winterweizen-GPS	Winterweizen-Korn	Winterweizen-Korn	Grünland-GPS
<b>Endenergieträger</b>	el. Strom	el. Strom	el. Strom	el. Strom	el. Strom	el. Strom	el. Strom	el. Strom	el. Strom	el. Strom	el. Strom
<b>Bezeichnung</b>	BG-100 kWel- (Silomais-GPS)-eS-DE-2005-SL	BG-250 kWel- (Silomais-GPS)-eS-DE-2005-SL	BG-500 kWel- (Silomais-GPS)-eS-DE-2005-SL	BG-1.000 kWel- (Silomais-GPS)-eS-DE-2005-SL	BG-500 kWel- (Silomais-GPS)-eS+W-DE-2005-SL	BG-500 kWel- (Silomais-GPS)-eS-DE-2005-SL	BG-500 kWel- (Silomais-GPS)-eS+W-DE-2005-SL	BG-500 kWel- (Winterweizen-Korn)-eS-DE-2005-SL	BG-500 kWel- (Winterweizen-Korn)-eS+W-DE-2005-SL	BG-500 kWel- (Winterweizen-Korn)-eS+W-DE-2005-SL	BG-500 kWel- (Grünland-GPS)-eS-DE-2005-SL
<b>Input</b>											
<b>Bereitstellung Biomasse</b>											
Saatgut	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Dünger N	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78
Dünger P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>											
Dünger K <sub>2</sub> O											
Pflanzenschutz	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Diesel	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101
Mechanisierung (ATA)	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160
Anbauumfang	64	140	255	468	255	394	394	394	470	470	565
Transport	8	10	15	20	15	10	10	10	10	10	10
<b>Bestandteile Anlage</b>											
Biogasanlage, Fermenter, Technikraum, BHKW, Lagerraum	Biogasanlage, Fermenter, Technikraum, BHKW, Lagerraum	Biogasanlage, Fermenter, Technikraum, BHKW, Lagerraum	Biogasanlage, Fermenter, Technikraum, BHKW, Lagerraum	Biogasanlage, Fermenter, Technikraum, BHKW, Lagerraum	Biogasanlage, Fermenter, Technikraum, BHKW, Lagerraum	Biogasanlage, Fermenter, Technikraum, BHKW, Lagerraum	Biogasanlage, Fermenter, Technikraum, BHKW, Lagerraum	Biogasanlage, Fermenter, Technikraum, BHKW, Lagerraum	Biogasanlage, Fermenter, Technikraum, BHKW, Lagerraum	Biogasanlage, Fermenter, Technikraum, BHKW, Lagerraum	Biogasanlage, Fermenter, Technikraum, BHKW, Lagerraum
<b>Betriebsmittel Anlage</b>											
el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil), Heizöl leicht	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)
<b>Output</b>											
<b>Endenergieträger</b>	el. Strom	el. Strom	el. Strom	el. Strom	el. Strom	el. Strom	el. Strom	el. Strom	el. Strom	el. Strom	el. Strom
Anzahl Einheiten Bezugsseinheit	750.000 kWhel	1.875.000 kWhel	3.750.000 kWhel	7.500.000 kWhel	3.750.000 kWhel	3.750.000 kWhel	3.750.000 kWhel	3.750.000 kWhel	3.750.000 kWhel	3.750.000 kWhel	3.750.000 kWhel
<b>Koppelprodukte</b>											
				Wärme							Wärme

1) BE: Getreide, Raps; kg: Mais, Rüben; Einheit: Pappel; Stück Setzlinge

Quelle: eigene Darstellung

**Anhangtabelle 8: Input-Output-Tabelle zu ausgewählten Biomasse-Nutzungs-Pfaden zur Bereitstellung von elektrischem Strom 3**

<b>Biomasse-Rohstoff</b>	Grünland-GPS	Grünland Intensiv-GPS	Grünland Intensiv-GPS
<b>Endenergieträger</b>	el. Strom	el. Strom	el. Strom
<b>Bezeichnung</b>	BG-500 kWel- (Grünland-GPS); Grünland eS+W-DE-2005- SL	BG-500 kWel- (Grünland Intensiv-GPS)- eS-DE-2005-SL	BG-500 kWel- (Grünland Intensiv-GPS)- eS+W-DE-2005- SL
<b>Input</b>			
<b>Bereitstellung Biomasse</b>			
Saatgut	BE <sup>1)</sup> /ha	95	95
Dünger N	kg/ha	73	95
Dünger P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	kg/ha		
Dünger K <sub>2</sub> O	kg/ha		
Pflanzenschutz	kg WS/ha	95	95
Diesel	l/ha	137	137
Mechanisierung (AIA)	€/ha	565	377
Anbauumfang	ha	10	8
Transport	km		
<b>Bestandteile Anlage</b>			
	Biogasanlage, Fernwärmeleitu ng, Fermenter, Technikraum, BHKW, Lagerraum	Biogasanlage, Fermenter, Technikraum, BHKW, Lagerraum	Biogasanlage, Fernwärmeleitu ng, Fermenter, Technikraum, BHKW, Lagerraum
<b>Betriebsmittel Anlage</b>			
	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)
<b>Output</b>			
<b>Endenergieträger</b>	el. Strom	el. Strom	el. Strom
Anzahl Einheiten Bezugseinheit	3.750.000 kWhe	3.750.000 kWhe	3.750.000 kWhe
<b>Koppelprodukte</b>	Wärme	Wärme	Wärme

<sup>1)</sup> BE: Getreide, Raps; kg, Mais, Rüben; Einheit; Pappel; Stück Setzlinge

Quelle: eigene Darstellung

**Anhangtabelle 9: Input-Output-Tabelle zu ausgewählten Biomasse-Nutzungs-Pfaden zur Bereitstellung von Biokraftstoffen 1**

<b>Biomasse-Rohstoff</b>	Rind-Gülle	Rind-Gülle	Rind-Gülle	Silomais-GPS	Grünland Intensiv-GPS	Winterraps-Korn	Winterraps-Korn	Winterraps-Korn	Winterraps-Korn	Winterraps-Korn	
<b>Endenergieträger</b>	Methan	Methan	Methan	Methan	Methan	Pflanzenöl	Pflanzenöl	Pflanzenöl	Pflanzenöl	Ethanol	
<b>Bezeichnung</b>	BG-2 MWel-eq DWW-(Rind-Gülle)-Methan-DE-2005-SL	BG-2 MWel-eq PSA-(Rind-Gülle)-Methan-DE-2005-SL	BG-2 MWel-eq BCM-(Rind-Gülle)-Methan-DE-2005-SL	BG-2 MWel-eq BCM-(Silomais-GPS)-Methan-DE-2005-SL	BG-2 MWel-eq BCM-(Grünland Intensiv-GPS)-Methan-DE-2005-SL	PÖI-dezentral 100kg/h-(Winterraps-Korn)-Pflanzenöl-DE-2005-SL	PÖI-dezentral 25kg/h-(Winterraps-Korn)-Pflanzenöl-DE-2005-SL	PÖI-dezentral 100kg/h-(Winterraps-Korn)-Pflanzenöl-DE-2005-SL	PME-100T t Erdgas DDGS-(Winterraps-Korn)-Ethanol-DE-2005-SL	EIOH-100T t Erdgas DDGS-(Winterraps-Korn)-Ethanol-DE-2005-SL	EIOH-100T t Braunkohle DDGS-(Winterraps-Korn)-Ethanol-DE-2005-SL
<b>Input</b>											
<b>Bereitstellung Biomasse</b>											
Saatgut				2	78				4	4	180
Dünger N									94	94	103
Dünger P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>									24	24	23
Dünger K <sub>2</sub> O									14	14	17
Pflanzenschutz				1,8					1,7	1,7	2,1
Diesel				101					103	103	103
Mechanisierung (AfA)				160					133	133	130
Anbauumfang				956					78	311	42.871
Transport	10	10	10	30	25				200	200	200
<b>Bestandteile Anlage</b>											
	Biogasanlage inkl. Gasreinigung DWW, lokal, Fermenter	Biogasanlage inkl. Gasreinigung lokal, Fermenter	Biogasanlage inkl. Gasreinigung lokal, Fermenter	Biogasanlage inkl. Gasreinigung lokal, Fermenter	Biogasanlage inkl. Gasreinigung lokal, Fermenter	Ölpresse, Technikraum, Lagerraum	Ölpresse, Technikraum, Lagerraum	Ölpresse, Technikraum, Lagerraum	Ölmühle, RME-"Raффinerie", Lagerraum	Ethanol-Anlage, Lagerraum	Ethanol-Anlage, Lagerraum
<b>Betriebsmittel Anlage</b>											
	el. Strom Mix alle Nutzer Sauerstoff flüssig	el. Strom Mix alle Nutzer Sauerstoff flüssig	el. Strom Mix alle Nutzer Amine, Sauerstoff flüssig	el. Strom Mix alle Nutzer Amine, Sauerstoff flüssig	el. Strom Mix alle Nutzer Amine, Sauerstoff flüssig	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil), (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil), (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil), (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil), (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil), (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil), (Mix1 DE fossil)
<b>Output</b>											
<b>Endenergieträger</b>	Methan	Methan	Methan	Methan	Methan	Pflanzenöl	Pflanzenöl	Pflanzenöl	Pflanzenöl	Ethanol	Ethanol
Anzahl Einheiten Bezugsinheit	4.223.431 Nm <sup>3</sup>	4.223.431 Nm <sup>3</sup>	4.223.431 Nm <sup>3</sup>	4.223.431 Nm <sup>3</sup>	4.223.431 Nm <sup>3</sup>	368.800	92.200	368.800	112.359.551	125.944.584	125.944.584
<b>Koppelprodukte</b>											
						Soja-Äquivalent Rapspresskuchen	Soja-Äquivalent Rapspresskuchen	Soja-Äquivalent Rapspresskuchen	synthetisches Glycerin 100%ig, DDGS Weizen Soja-Äquivalent Rapsextraktions schrot	Soja-Äquivalent Rapspresskuchen	Soja-Äquivalent DDGS Weizen

<sup>1)</sup> BE: Getreide, Raps: kg, Mais, Rüben: Einheit, Pappel: Stück Setzlinge

Quelle: eigene Darstellung

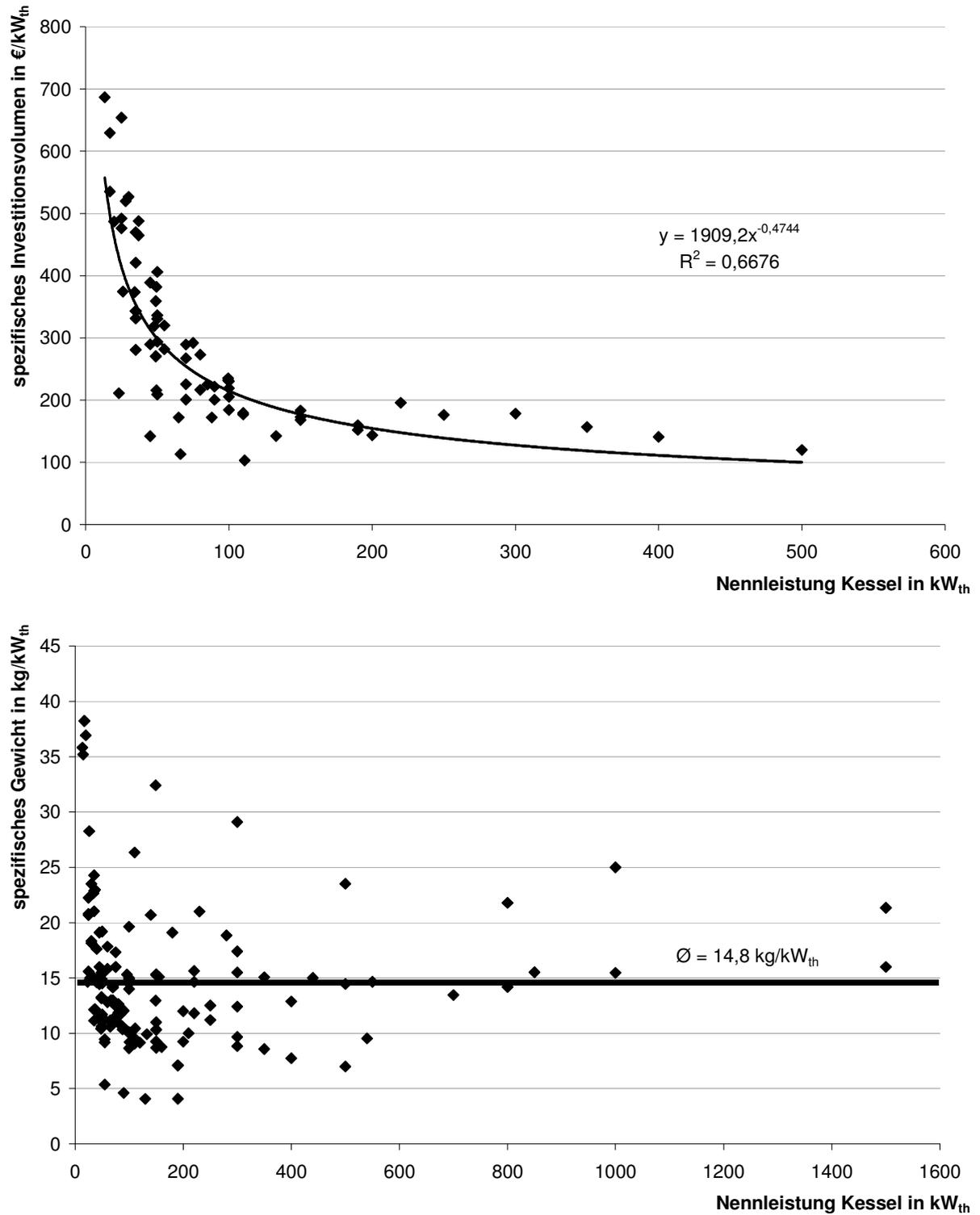
**Anhangtabelle 10: Input-Output-Tabelle zu ausgewählten Biomasse-Nutzungs-Pfaden zur Bereitstellung von Biokraftstoffen 2**

<b>Biomasse-Rohstoff</b>	Zuckerrüben- Rübe	Zuckerrüben- Ethanol	Zuckerrüben- Rübe	Ethanol	Pappel-Holz	Pappel-Holz	Pappel-Holz	Pappel-Holz
<b>Endenergieträger</b>					BTL	BTL	BTL	BTL
<b>Bezeichnung</b>	EIOH-100T t Erdgas Trockenschnitz el- (Zuckerrüben- Rübe)-Ethanol- DE-2005-SL	EIOH-250T t Braunkohle Nassschnittzel- (Zuckerrüben- Rübe)-Ethanol- DE-2005-SL	BTL-Choren- Ziel-(Pappel- Holz)-BTL-DE- 2005-SL	BTL-Choren- Ziel-(Pappel- Holz)-BTL-DE- 2005-SL	BTL-Choren- MIN-(Pappel- Holz)-BTL-DE- 2005-SL	BTL-FZK - Ziel- (Pappel-Holz)- BTL-DE-2005- SL	BTL-FZK - Ziel- (Pappel-Holz)- BTL-DE-2005- SL	BTL-FZK - MIN- (Pappel-Holz)- BTL-DE-2005- SL
<b>Input</b>								
<b>Bereitstellung Biomasse</b>								
Saatgut	1	1	500	500	500	500	500	500
Dünger N	87	87	68	68	68	68	68	68
Dünger P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	22	22	22	22	22	22	22	22
Dünger K <sub>2</sub> O	55	55	34	34	34	34	34	34
Pflanzenschutz	4,4	4,4	21	21	21	21	21	21
Diesel	130	130	33	33	33	33	33	33
Mechanisierung (AIA)	179	179	108.870	108.870	108.870	113.818	120.675	120.675
Anbaumfang	19.722	49.305	100.160	100.160	100.160	113.818	120.675	120.675
Transport	200	300	100	100	100	20	20	20
<b>Bestandteile Anlage</b>								
Ethanol- Anlage, Lagerraum	Ethanol- Anlage, Lagerraum	Ethanol-Anlage, Lagerraum	BTL-Anlage	BTL-Anlage	BTL-Anlage	64 Schnellpyrolyse- Anlagen, BTL- Anlage	64 Schnellpyrolyse- Anlagen, BTL- Anlage	64 Schnellpyrolyse- Anlagen, BTL- Anlage
<b>Betriebsmittel Anlage</b>								
el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil), Dampf Erdgas 40- 250 °C nth=85%	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil), Dampf Braunkohle 40- 250 °C nth=85%	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil), Natronlauge 48% in H <sub>2</sub> O, Methanol, Amine	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil), Natronlauge 48% in H <sub>2</sub> O, Methanol, Amine	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil), Natronlauge 48% in H <sub>2</sub> O, Methanol, Amine	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil), Natronlauge 48% in H <sub>2</sub> O, Methanol, Amine	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil), Natronlauge 48% in H <sub>2</sub> O, Methanol, Amine	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil), Natronlauge 48% in H <sub>2</sub> O, Methanol, Amine	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil), Natronlauge 48% in H <sub>2</sub> O, Methanol, Amine
<b>Output</b>								
<b>Endenergieträger</b>								
Anzahl Einheiten Bezugseinheit	125.944.584   	Ethanol   314.861.461   	Ethanol   256.410.256   	Ethanol   256.410.256   	Ethanol   256.410.256   	BTL   256.410.256   	BTL   256.410.256   	BTL   256.410.256   
<b>Koppelprodukte</b>								
WWäq- Rübertrockens chinitzel	WWäq- Rübertrockens chinitzel	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)

<sup>1)</sup> BE: Getreide, Raps; kg; Mais, Rüben; Einheit; Pappel: Stück Setzlinge

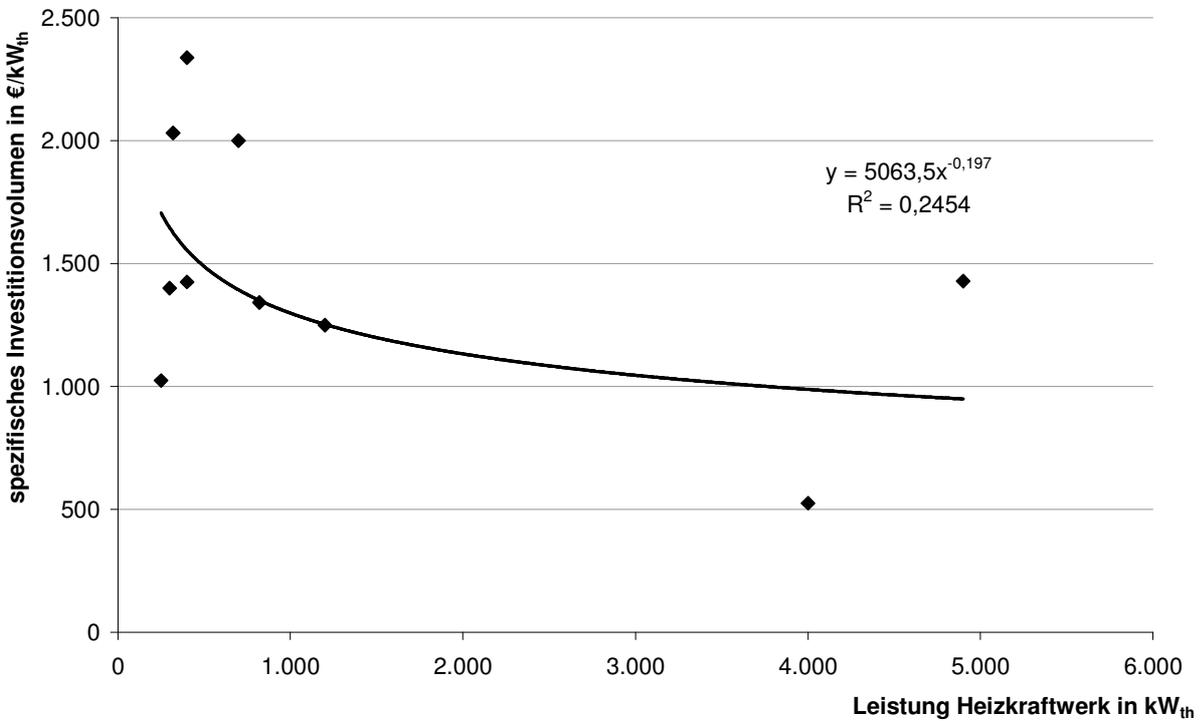
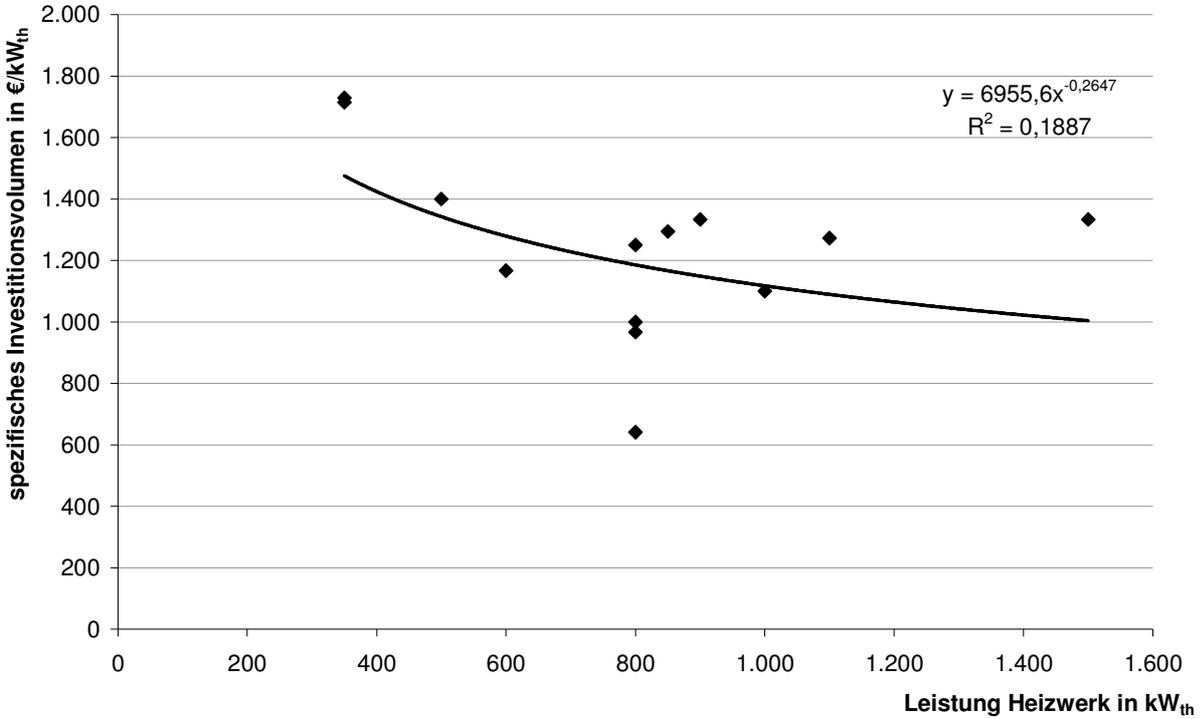
Quelle: eigene Darstellung

Anhangabbildung 6: Spezifisches Investitionsvolumen und spezifisches Gewicht von Biomasseheizanlagen (Hackschnitzelkessel)



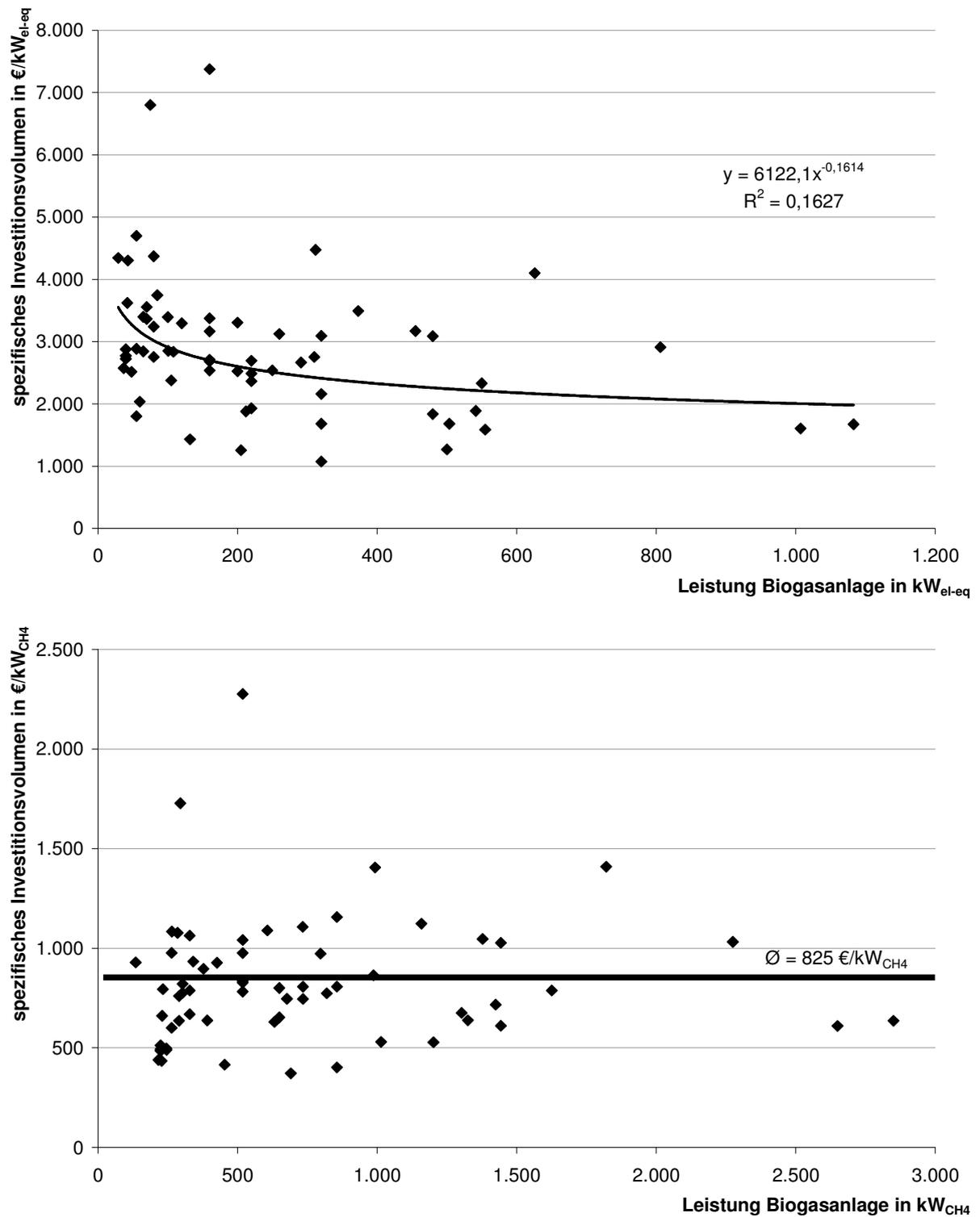
Quellen: eigene Darstellung nach FNR 2007d

Anhangabbildung 7: Spezifische Investitionsvolumina von Biomasseheizwerken und Biomasseheizkraftwerken



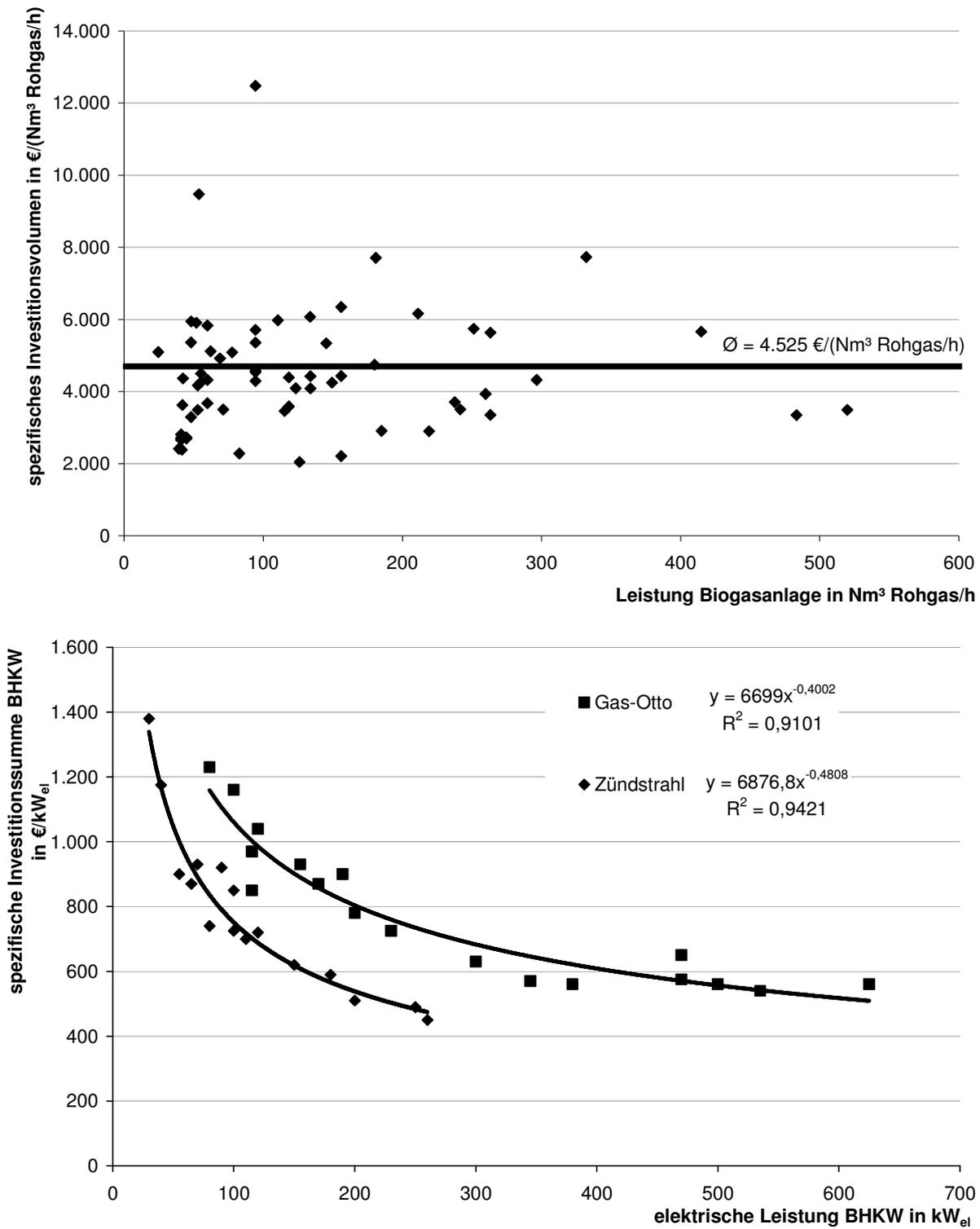
Quellen: eigene Darstellung nach AGRA-EUROPE verschiedene Jahrgänge

Anhangabbildung 8: Spezifisches Investitionsvolumen von Biogasanlagen zur Rohbiogaserzeugung



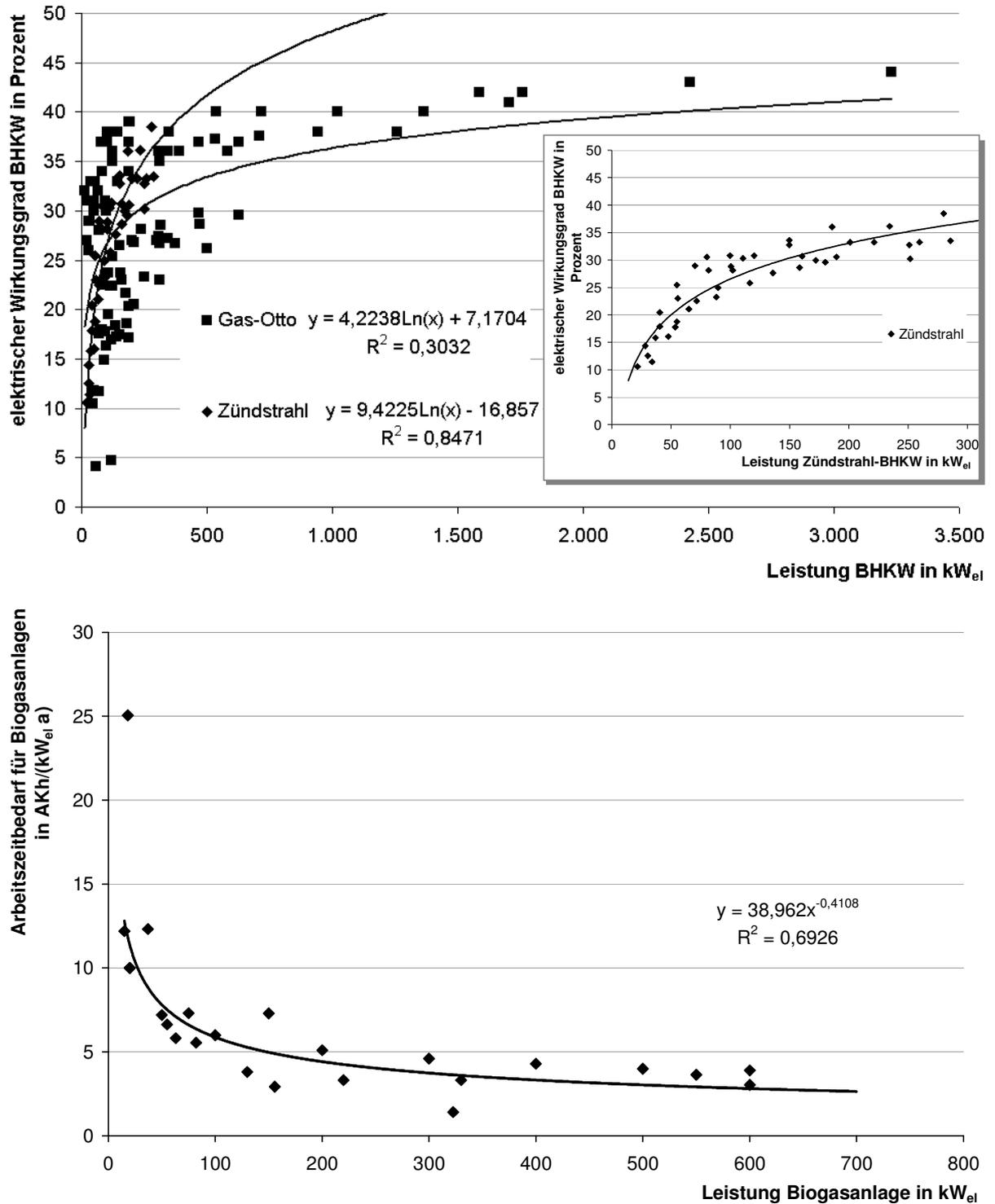
Quellen: eigene Darstellung nach FNR 2005a; FNR 2005b; HOFMANN et al. 2006; ASUE 2005

Anhangabbildung 9: Spezifisches Investitionsvolumen von Biogasanlagen zur Rohbiogaserzeugung sowie spezifische Investitionsvolumina BHKW's



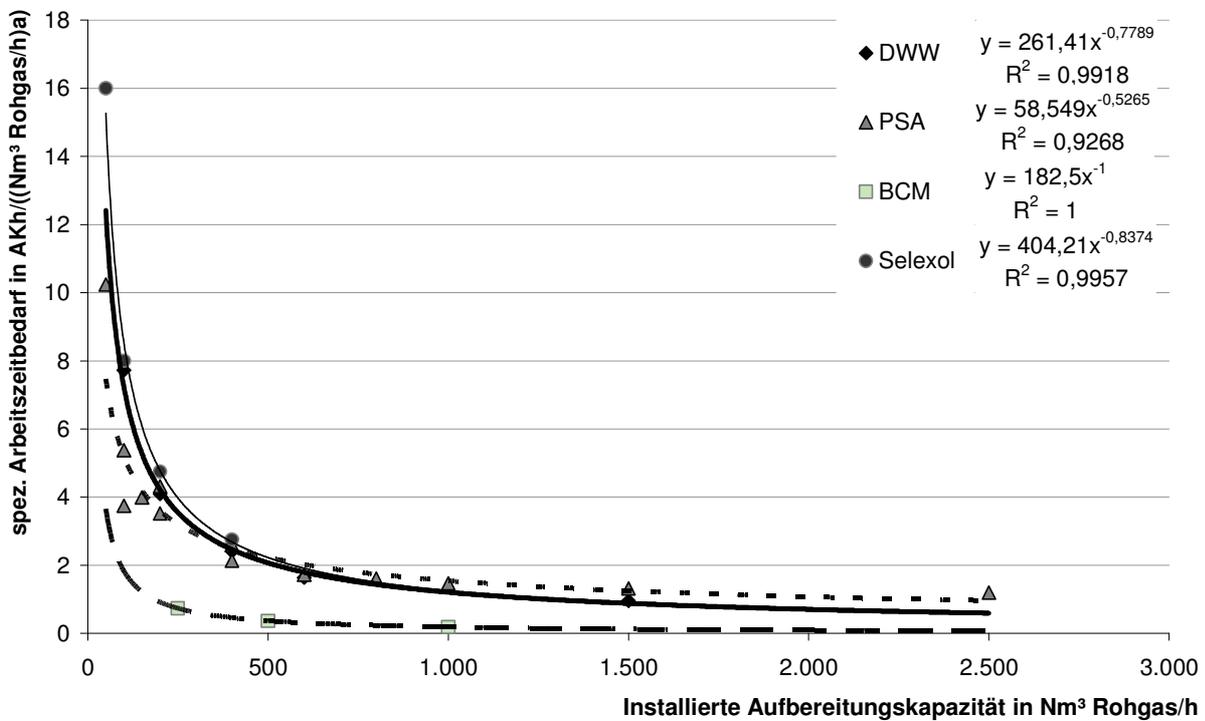
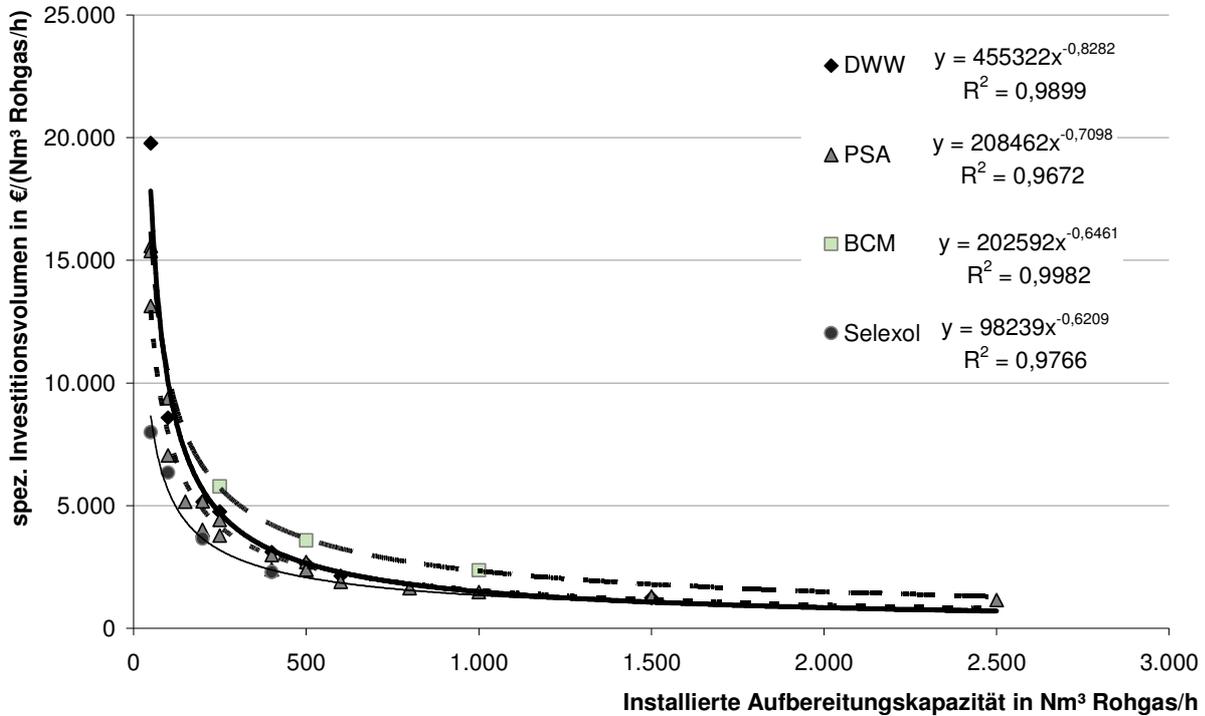
Quellen: eigene Darstellung nach FNR 2005a; FNR 2005b; HOFMANN et al. 2006; ASUE 2005

Anhangabbildung 10: Elektrische Wirkungsgrade BHKW's sowie spezifischer Arbeitszeitbedarf für den Betrieb einer Biogasanlage



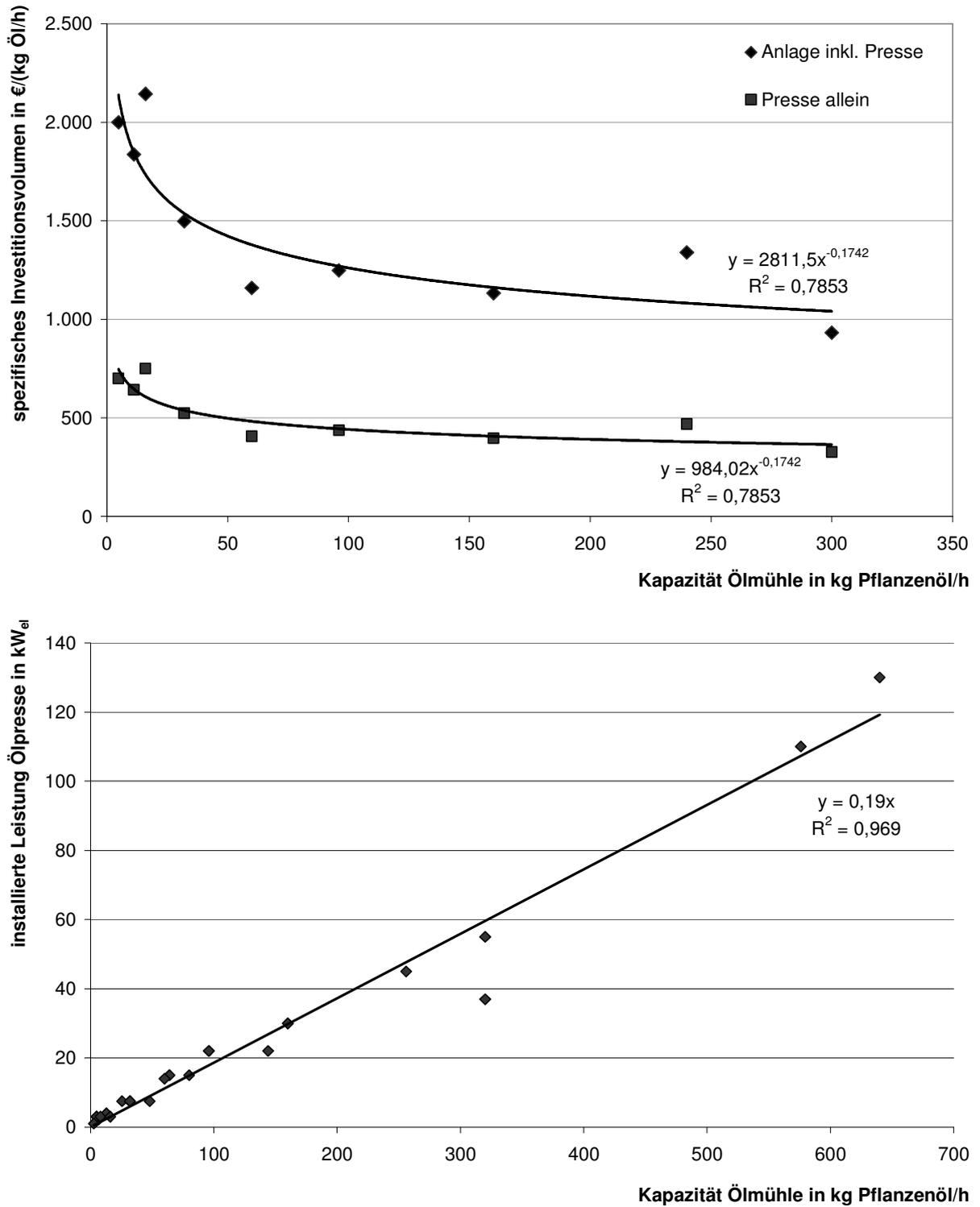
Quellen: eigene Darstellung nach FNR 2005b; ASUE 2005

Anhangabbildung 11: Spezifische Investitionsvolumina für Anlagen zur Biogasaufbereitung und Einspeisung ins Erdgasnetz sowie der spezifische Arbeitszeitbedarf



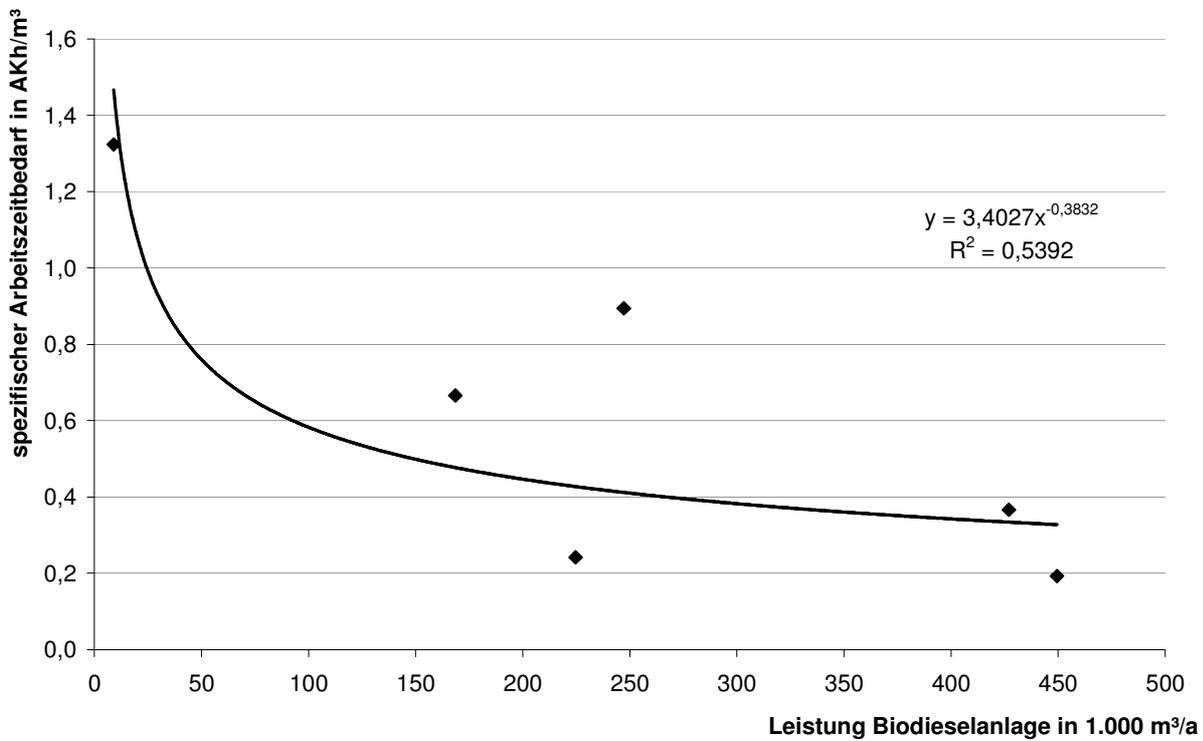
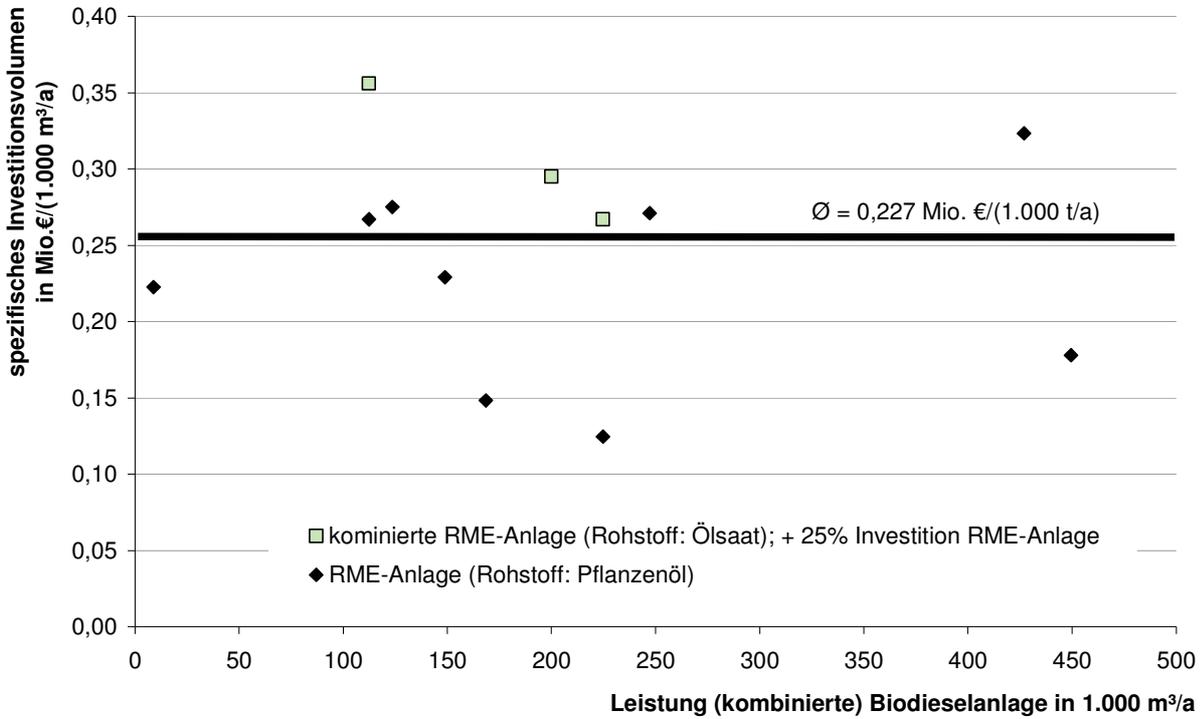
Quellen: eigene Darstellung nach ASUE 2007; HOFMANN et al. 2006; MT-ENERGIE 2007ab; SCHULZ 2004

Anhangabbildung 12: Spezifische Investitionsvolumina sowie elektrischer Leistungsbedarf dezentraler Ölpresen



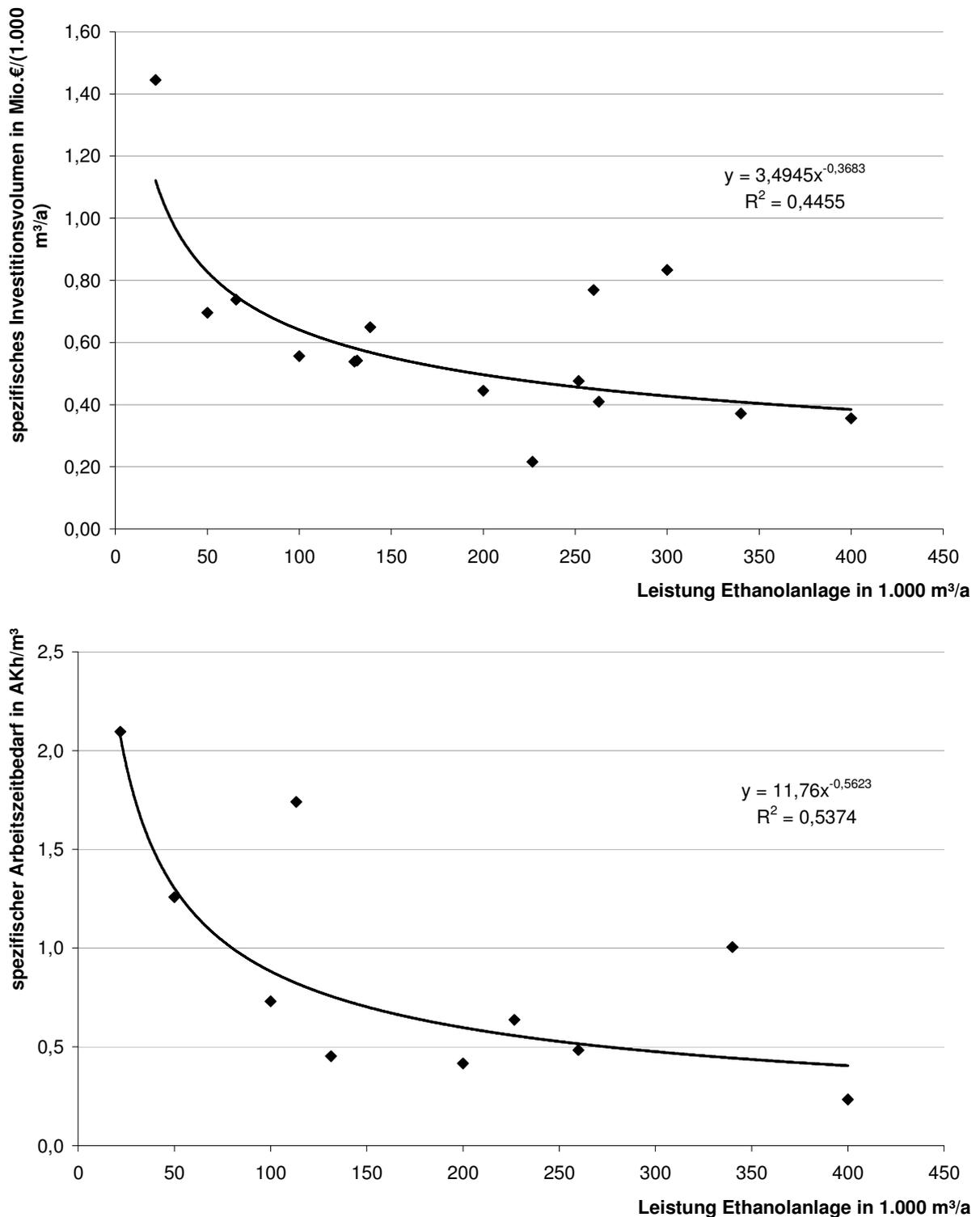
Quellen: eigene Darstellung nach BRENNDÖRFER, GRAF 2005; GRAF, REINHOLD 2005; FNR 2007c

Anhangabbildung 13: Spezifisches Investitionsvolumen von Biodieselanlagen sowie spezifischer Arbeitszeitbedarf der Biodieselproduktion



Quellen: eigene Darstellung nach AGRA-EUROPE verschiedene Jahrgänge; BIOPETROL INDUSTRIES AG 2006, 2007, 2008; EBERLE 2006; EOP BIODIESEL AG 2007; HENNIGES 2007; VERBIO 2007

Anhangabbildung 14: Spezifisches Investitionsvolumen von Bioethanolanlagen sowie spezifischer Arbeitszeitbedarf der Bioethanolproduktion



Quellen: eigene Darstellung nach CROPENERGIES 2007; GANGL 2004; HENNIGES 2007; SCHMITZ et al. 2003; VERBIO 2007

Anhangtabelle 11: Ökobilanzielle Kennzahlen zu Betriebsmitteln und Substituten

Bezeichnung	Bezugs- einheit	Bereitstellungs- kosten netto €/BE	kumulierter Energieaufwand MJ/BE	Treibhausgas- emissionen kg CO <sub>2</sub> eq/BE	Quelle
Benzin Super bleifrei 95	l	1,02	43,0	2,80	ECOINVENT 2007
Diesel Konsument	l	0,90	45,6	3,09	ECOINVENT 2007
Heizöl leicht	l	0,44	45,6	3,09	ECOINVENT 2007
Erdgas Mix alle Verbraucher	kWh	0,04	4,5	0,28	ECOINVENT 2007
el. Strom Mix alle Nutzer (Mix1 DE fossil)	kWh/el	0,14	12,1	0,72	ECOINVENT 2007
Dünger N	kg	0,62	49,1	7,47	PATYK, A. and REINHARDT, G. 1997
Dünger P2O5	kg	0,59	17,7	1,18	PATYK, A. and REINHARDT, G. 1997
Dünger K2O	kg	0,29	10,5	0,66	PATYK, A. and REINHARDT, G. 1997
PSM Herbizid	kg	42,00	287,0	5,86	KALTSCHMITT, M. and REINHARDT, G. A. (HRSG.) 1997
PSM Fungizid	kg	42,00	195,0	3,98	KALTSCHMITT, M. and REINHARDT, G. A. (HRSG.) 1997
PSM Insektizid	kg	42,00	236,0	4,82	KALTSCHMITT, M. and REINHARDT, G. A. (HRSG.) 1997
PSM Wachstumsregler	kg	42,00	137,0	2,80	IGELSPACHER, R. 2003
PSM Sonstiges	kg	42,00	236,0	4,82	KALTSCHMITT, M. and REINHARDT, G. A. (HRSG.) 1997
Produktionsenergie landw. Maschinen 95%Stahl 5%Gummi FAT	kg	0,00	104,0	15,85	GAILLARD, G., CRETIAZ, P. and HAUSHEER, J. 1997
Produktionsenergie landw. Maschinen 100%Stahl FAT	kg	0,00	78,0	11,61	GAILLARD, G., CRETIAZ, P. and HAUSHEER, J. 1997
Sojaschrot	kg	0,21	27,1	1,31	ECOINVENT 2007
Soja-Äquivalent Rapspresskuchen	kg	0,17	21,9	1,06	KIRCHGEBNER, M. 1997
Soja-Äquivalent Rapsextraktionsschrot	kg	0,17	20,8	1,01	KIRCHGEBNER, M. 1997
Soja-Äquivalent DDGS Weizen	kg	0,16	20,6	1,00	LFL TIERERNÄHRUNG 2007
Dampf Braunkohle 40-250 °C nih=85%	kg	0,00	3,8	0,27	eigene Berechnungen
Dampf Erdgas 40-250 °C nih=85%	kg	0,03	3,3	0,15	eigene Berechnungen
Hexan	kg	10,00	61,6	0,92	ECOINVENT 2007
Methanol	kg	0,25	38,0	0,77	ECOINVENT 2007
Amine	kg	10,00	94,3	3,73	ECOINVENT 2007
Natronlauge 48% in H2O	kg	0,50	18,1	0,78	ECOINVENT 2007
Phosphorsäure 85%ig	kg	5,00	30,0	1,47	ECOINVENT 2007
Sauerstoff flüssig	kg	0,50	9,7	0,41	ECOINVENT 2007
synthetisches Glycerin 100%ig	kg	0,35	209,3	9,00	SCHARMER, K. 2001

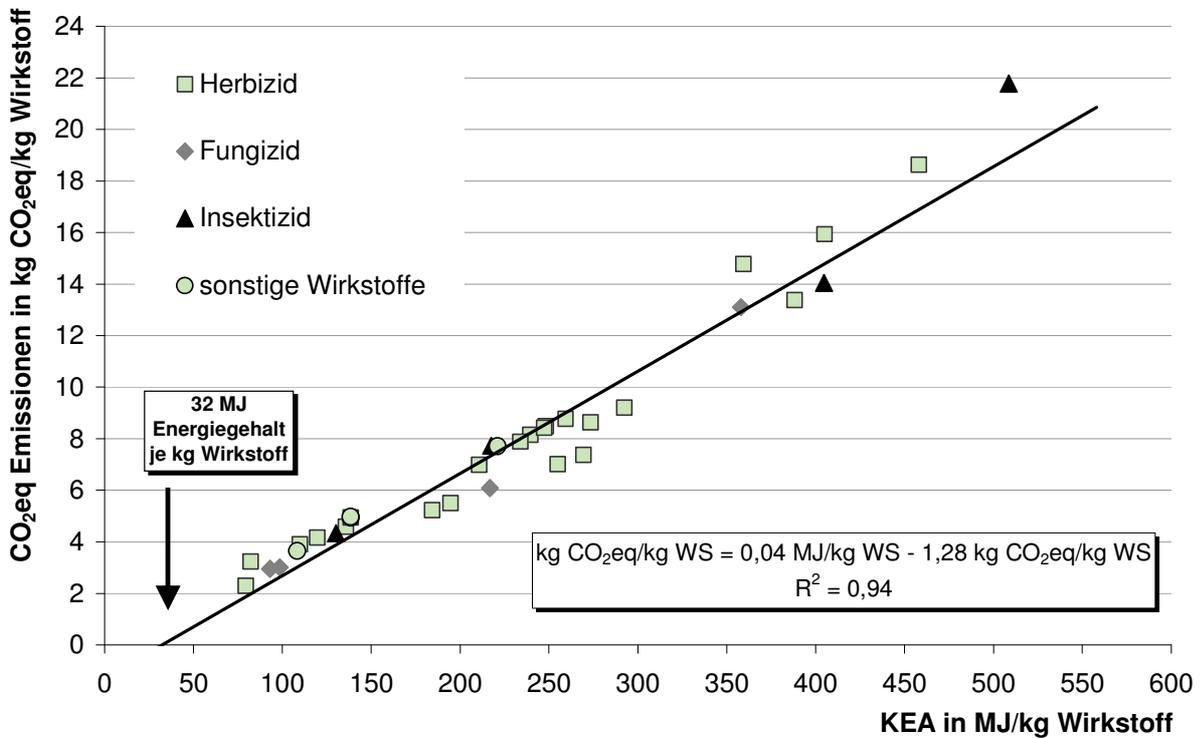
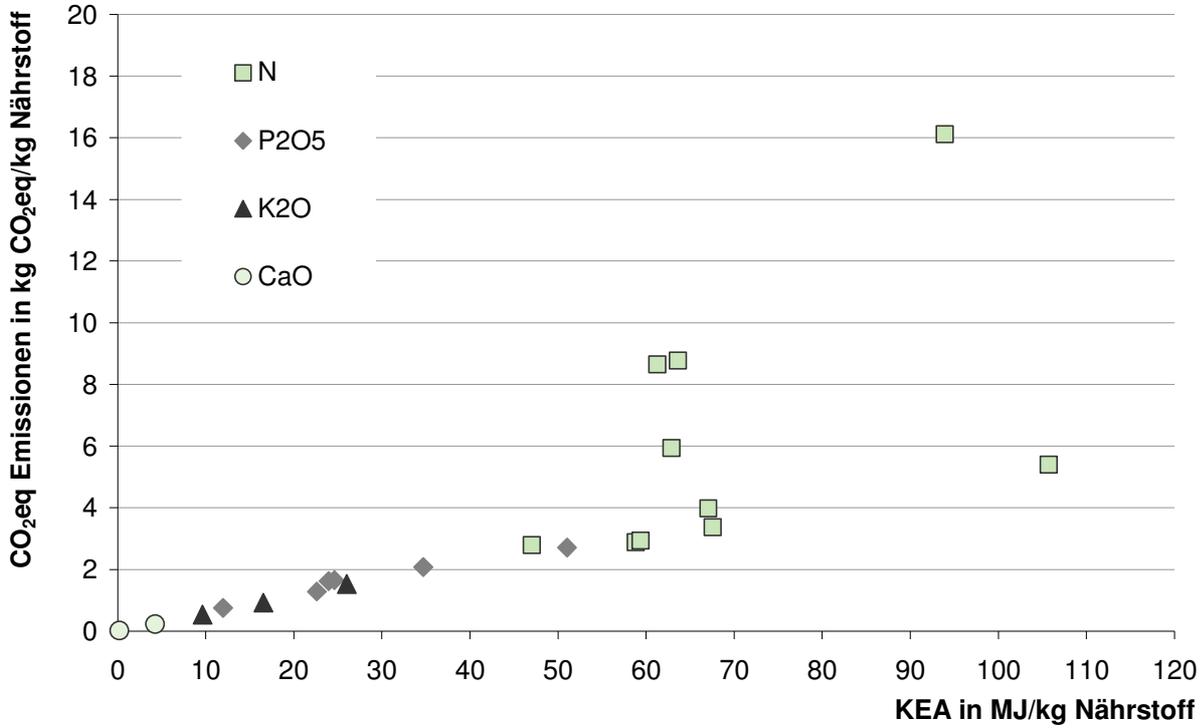
Quelle: eigene Darstellung

Anhangtabelle 12: Ökobilanzielle Kennzahlen zu Werkstoffen

Bezeichnung	Bezugs- einheit	kumulierter Energieaufwand	Treibhausgas- emissionen	Quelle
	BE	MJ/BE	kg CO <sub>2</sub> eq/BE	
Fahrzeug 95%Stahl, 5%Gummi FAT	kg	71,9	6,16	GALLARD, G., CRETITAZ, P. and HAUSHEER, J. 1997
Maschine 100% Stahl FAT	kg	71,4	8,52	GALLARD, G., CRETITAZ, P. and HAUSHEER, J. 1997
Stahl-Zementmix Raffinerie 9.000 kg/MW	kg	13,0	1,21	ÖKO-INSTITUT 2005
Stahl-Zementmix Kraftwerk 200.000 kg/MW	kg	7,9	0,74	ÖKO-INSTITUT 2005
Fernwärmeleitung 373,618 kg/km	kg	0,8	0,05	ÖKO-INSTITUT 2005
Gasleitung lokal 530.000 kg/km	kg	2,0	0,14	ÖKO-INSTITUT 2005
Mauer 30 cm, innen & außen verputzt 1 cm	kg	2,3	0,29	eigene Berechnungen
Stahl-Beton 80 V-% + Dämmung 20 V-%	kg	3,1	0,32	eigene Berechnungen
Bausand, Kies	kg	0,0	0,00	FFE 2005
Normalbeton (unbewehrt) frei Baustelle	kg	0,7	0,13	FFE 2005
Starbeton (Normbeton) frei Baustelle	kg	2,4	0,28	FFE 2005
Schwerbeton (bewehrt) frei Baustelle	kg	2,4	0,25	FFE 2005
Mauerziegel (LHZ)	kg	2,5	0,30	FFE 2005
Zementputz frei Baustelle	kg	1,4	0,26	FFE 2005
Dachziegel aus Ton	kg	4,2	0,30	FFE 2005
Technisch getrocknetes Nadeleischntholz ab Werk	kg	17,2	0,38	FFE 2005
Mittlerer Stabstahl	kg	27,7	2,56	FFE 2005
TPO-Folie	kg	97,4	3,96	FFE 2005
EPS-Dämmstoffplatten	kg	79,6	4,18	FFE 2005
PP-Spritzgußteil	kg	78,7	2,48	FFE 2005

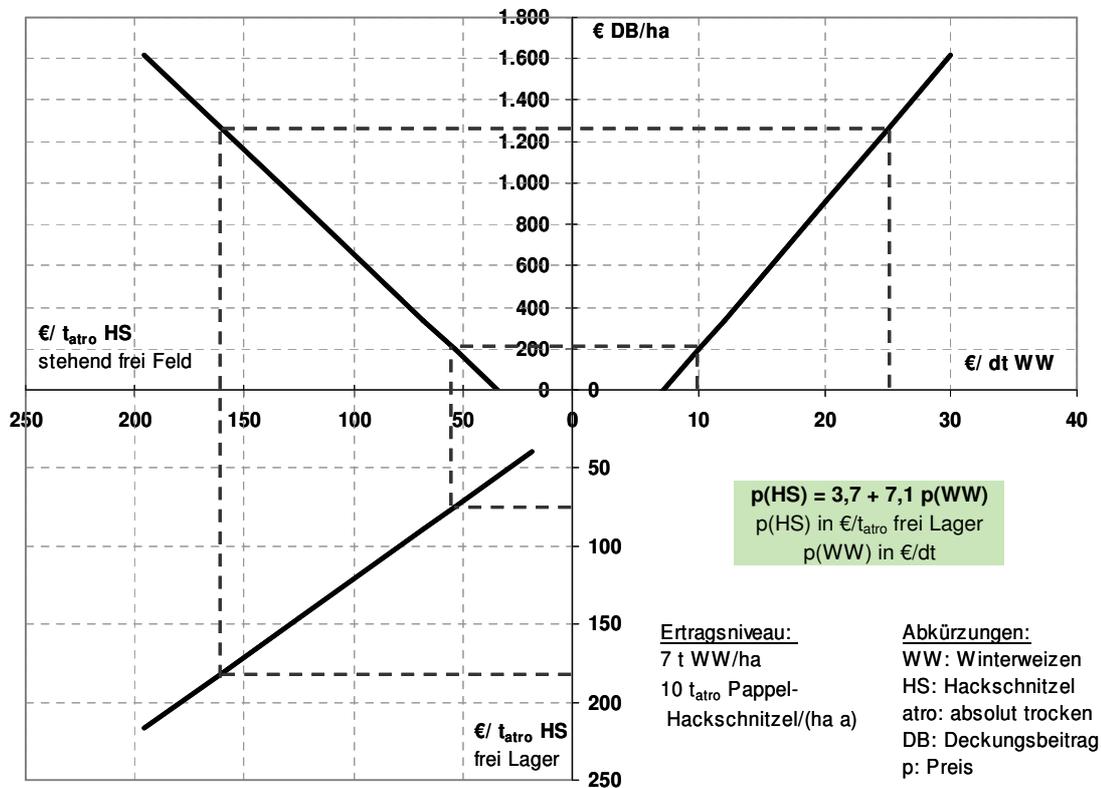
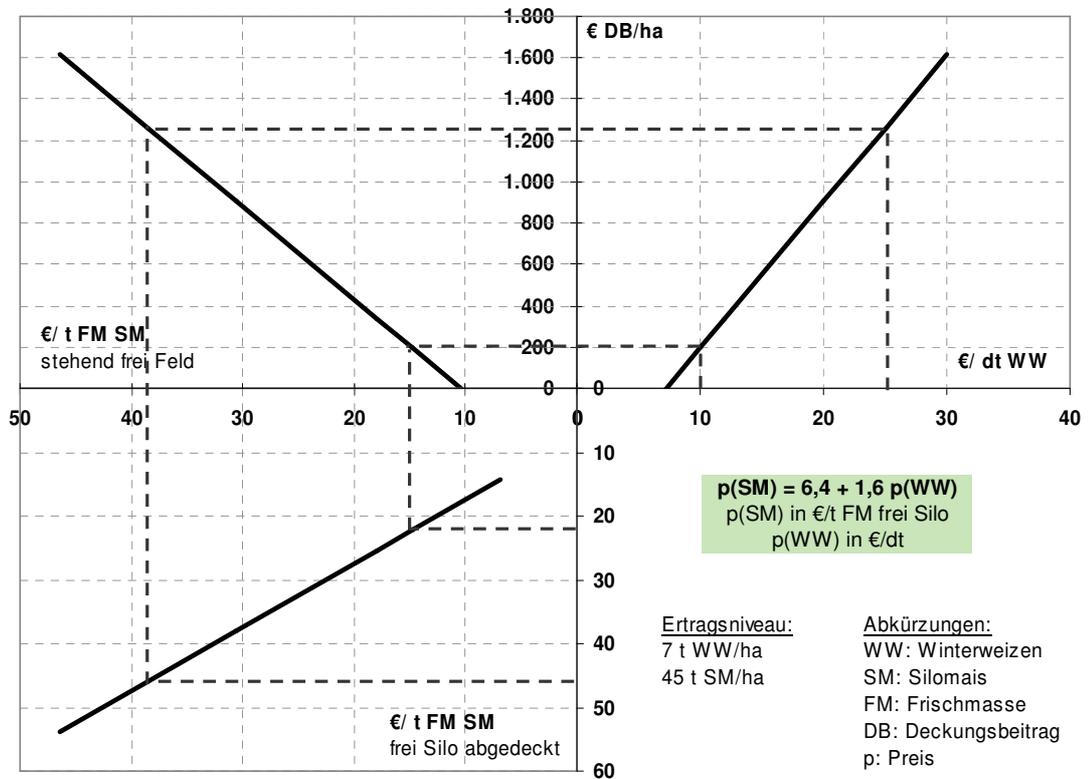
Quelle: eigene Darstellung

Anhangabbildung 15: Ableitung der Korrelationen zwischen KEA und zugehöriger Treibhausgasemissionen für mineralische Düngemittel sowie Pflanzenschutzmittel



Quellen: eigene Darstellung nach ECOINVENT 2007

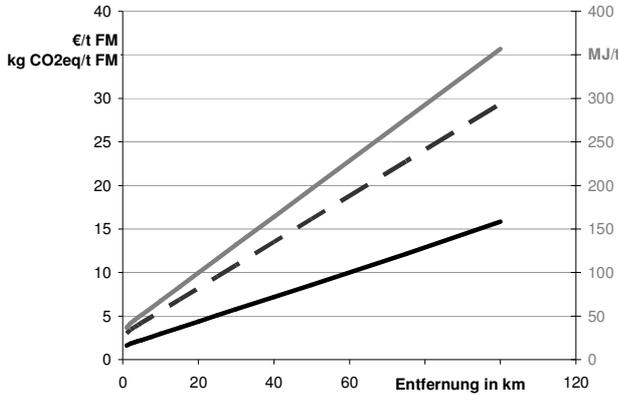
Anhangabbildung 16: Ableitung der Preise für Silomais und Hackschnitzeln von Kurzumtriebsplantagen mittels bereinigtem Deckungsbeitragsvergleich zu Winterweizen



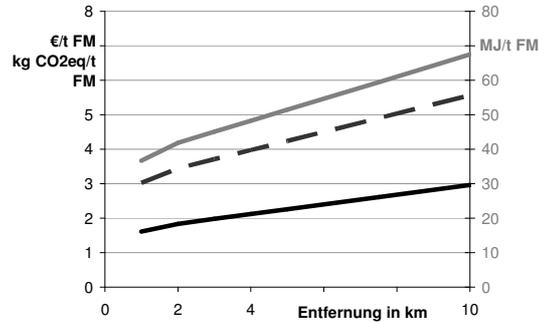
Quellen: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen

**Anhangabbildung 17: Transportkosten, kumulierter Energieaufwand sowie Treibhausgasemissionen von Transportsystemen zum Transport von verschiedenen Biomasse-Rohstoffen in Abhängigkeit von der Transportentfernung**

Transportgut und Transportsystem: Silomais lose, Häckselgutwagen 13t

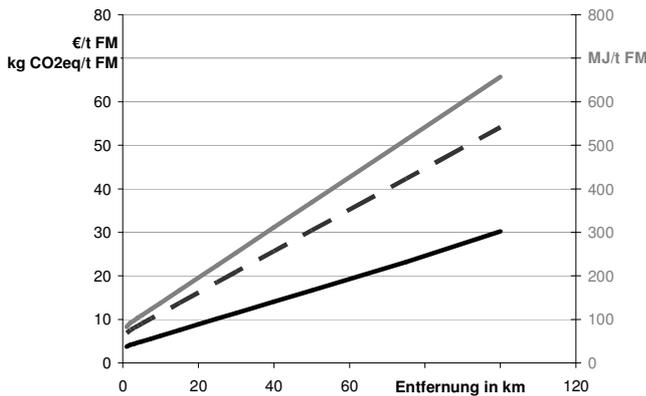


Detailausschnitt

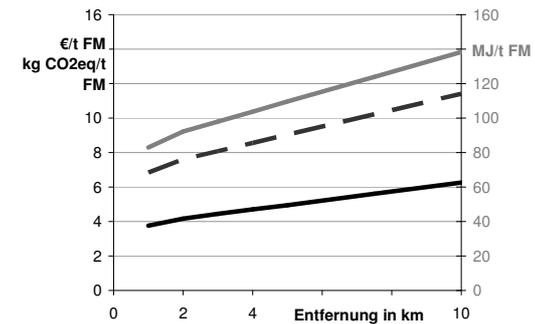


— Vollkosten in €/t  
 - - - Treibhausgasemissionen in kg CO2eq/t  
 — KEA in MJ/t

Transportgut und Transportsystem: Stroh Quaderballen 85%TS, 1\* 14t 2-Achs-3-Seit.Kipper

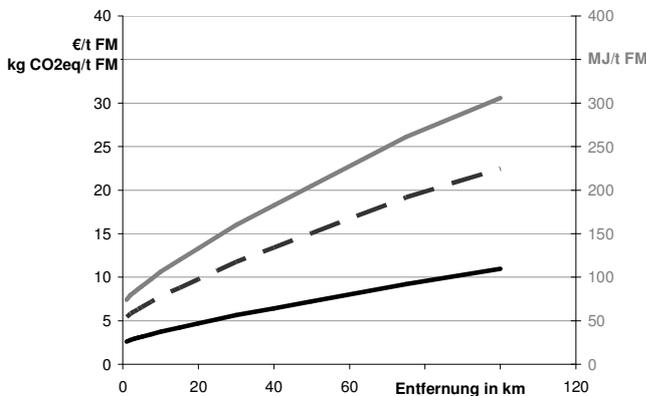


Detailausschnitt

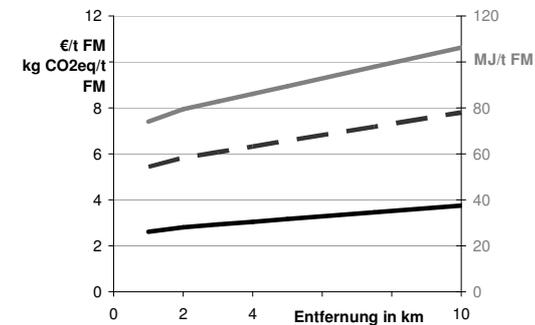


— Vollkosten in €/t  
 - - - Treibhausgasemissionen in kg CO2eq/t  
 — KEA in MJ/t

Transportgut und Transportsystem: Stroh Quaderballen 85%TS, LKW Sattel Tieflader



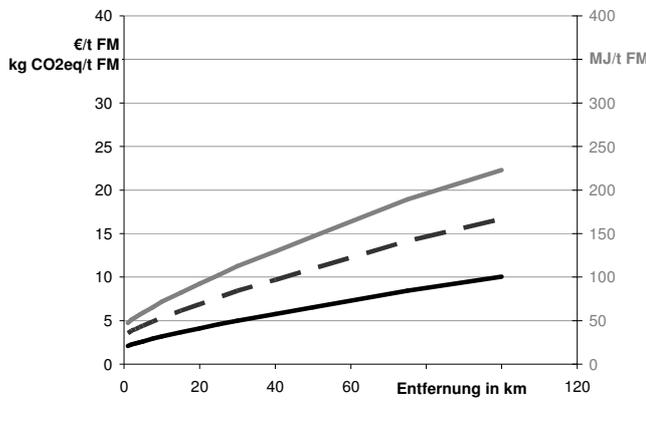
Detailausschnitt



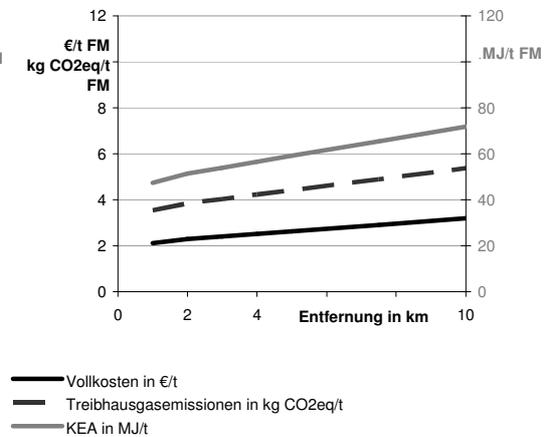
— Vollkosten in €/t  
 - - - Treibhausgasemissionen in kg CO2eq/t  
 — KEA in MJ/t

Fortsetzung Anhangabbildung 17:

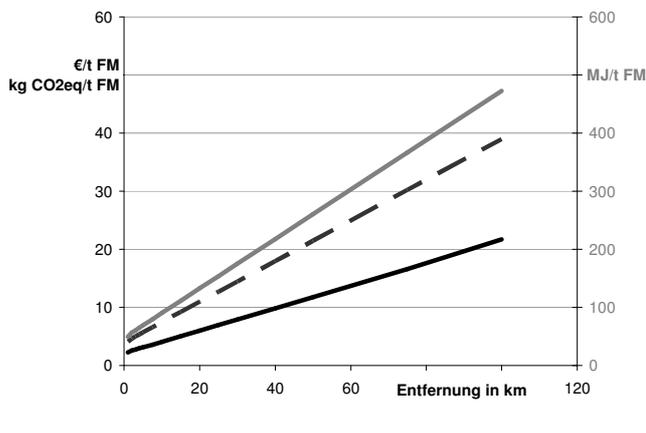
Transportgut und Transportsystem: Nadelholzhackschnittzel 85%TS, LKW Sattel Heckkipper



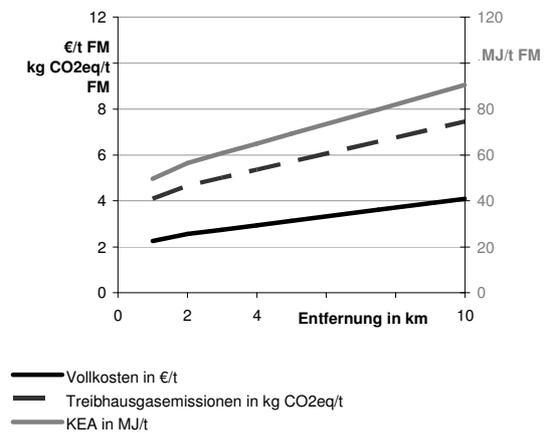
Detailausschnitt



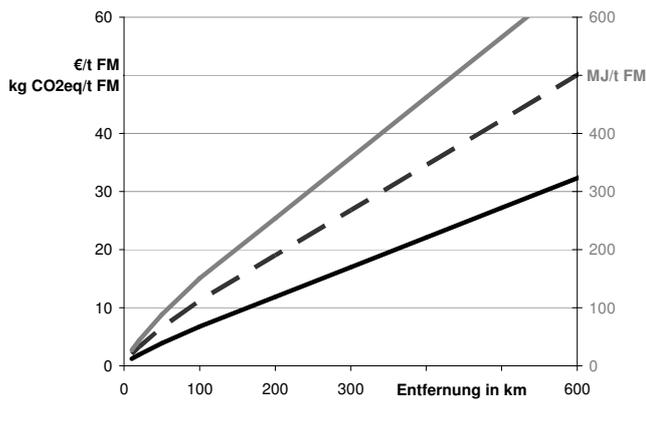
Transportgut und Transportsystem: Nadelholzhackschnittzel 85%TS, 1\* 14t 2-Achs-3-Seit.Kipper



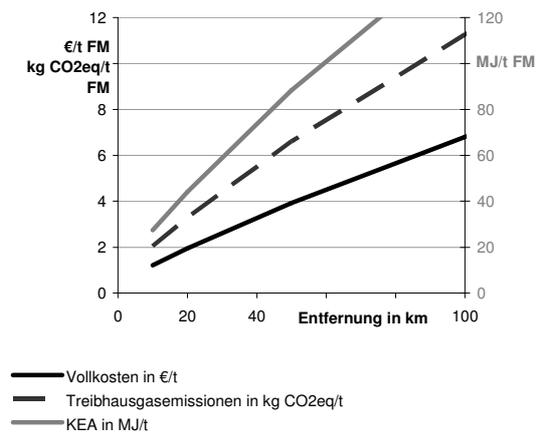
Detailausschnitt



Transportgut und Transportsystem: Zuckerrüben, LKW Sattel Heckkipper



Detailausschnitt



Quellen: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen

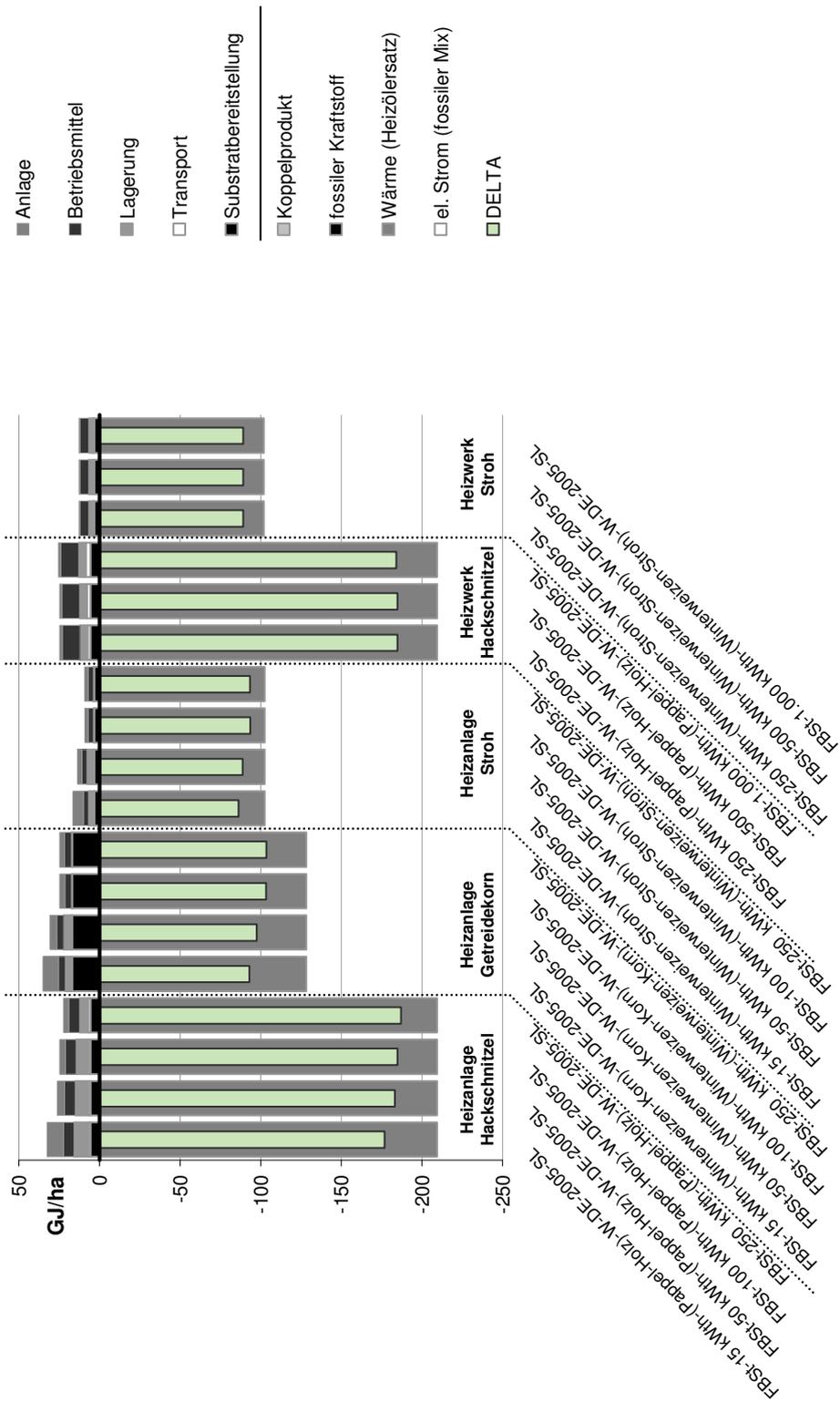
**Anhangtabelle 13: Lagerungskosten, kumulierter Energieaufwand sowie Treibhausgasemissionen von Lagerungssystemen zur Lagerung von verschiedenen Biomasse-Rohstoffen**

Lagerungsgut und Lagerungssystem	Vollkosten €/t <sup>1)</sup>	KEA MJ/t <sup>1)</sup>	Treibhausgas- emissionen kg CO <sub>2</sub> eq/t <sup>1)</sup>
Getreidekorn, Rieselgut-Silo 6 m <sup>3</sup> Polyester	49,97	690,5	48,57
Getreidekorn, Rieselgut-Silo 6 m <sup>3</sup> Stahl verzinkt	46,33	642,8	63,86
Getreidekorn, Rieselgut-Silo 12 m <sup>3</sup> Polyester	43,66	533,3	36,91
Getreidekorn, Rieselgut-Silo 12 m <sup>3</sup> Stahl verzinkt	35,63	496,0	49,11
Getreidekorn, Rieselgut-Silo 18 m <sup>3</sup> Polyester	40,45	651,1	52,32
Getreidekorn, Rieselgut-Silo 18 m <sup>3</sup> Stahl verzinkt	28,57	618,5	63,10
Getreidekorn, Rieselgut-Silo 25 m <sup>3</sup> Polyester	33,81	679,4	57,20
Getreidekorn, Rieselgut-Silo 25 m <sup>3</sup> Stahl verzinkt	26,97	650,0	66,97
Getreidekorn, Getreidesilo Blech, Betonfundament 1.000m <sup>3</sup>	11,04	28,8	2,67
Getreidekorn, Getreidesilo Blech, Betonfundament 1.000m <sup>3</sup> in	14,46	376,8	26,03
Getreidekorn, Bergehalle 3.000 m <sup>3</sup> BRI	3,70	81,1	5,04
Rapssaar, Getreidesilo Blech, Betonfundament 1.000m <sup>3</sup>	11,42	29,8	2,76
Rapssaar, Getreidesilo Blech, Betonfundament 1.000m <sup>3</sup> inkl. 1	14,95	389,8	26,93
Rapssaar, Bergehalle 1.500 m <sup>3</sup> BRI	3,82	88,5	5,35
Strohpellets 90%TS, Rieselgut-Silo 6 m <sup>3</sup> Polyester	68,01	939,9	66,12
Strohpellets 90%TS, Rieselgut-Silo 6 m <sup>3</sup> Stahl verzinkt	63,06	874,9	86,92
Strohpellets 90%TS, Rieselgut-Silo 12 m <sup>3</sup> Polyester	59,42	725,9	50,24
Strohpellets 90%TS, Rieselgut-Silo 12 m <sup>3</sup> Stahl verzinkt	48,50	675,1	66,85
Strohpellets 90%TS, Rieselgut-Silo 18 m <sup>3</sup> Polyester	55,05	886,2	71,22
Strohpellets 90%TS, Rieselgut-Silo 18 m <sup>3</sup> Stahl verzinkt	38,89	841,9	85,89
Strohpellets 90%TS, Rieselgut-Silo 25 m <sup>3</sup> Polyester	46,02	924,7	77,86
Strohpellets 90%TS, Rieselgut-Silo 25 m <sup>3</sup> Stahl verzinkt	36,70	884,8	91,15
Stroh Quaderballen 85%TS, Bergehalle 1.500 m <sup>3</sup> BRI	19,37	448,7	27,10
Stroh Quaderballen 85%TS, Bergehalle 3.000 m <sup>3</sup> BRI	19,37	425,4	26,45
Stroh Quaderballen 85%TS, Bergehalle 4.500 m <sup>3</sup> BRI	17,51	417,5	26,23
Stroh Quaderballen 85%TS, Bergehalle 9.000 m <sup>3</sup> BRI	17,51	401,5	25,78
Laubholz hackschnitzel 85%TS, HS-Bunker Mauer 50 m <sup>3</sup>	23,71	449,2	39,58
Laubholz hackschnitzel 85%TS, HS-Bunker Mauer 100 m <sup>3</sup>	20,76	414,1	35,45
Laubholz hackschnitzel 85%TS, HS-Bunker Mauer 250 m <sup>3</sup>	17,81	381,3	31,57
Laubholz hackschnitzel 85%TS, HS-Bunker Mauer 500 m <sup>3</sup>	14,86	270,4	22,78
Laubholz hackschnitzel 85%TS, HS-Bunker Mauer 1000 m <sup>3</sup>	13,39	255,1	20,98
Laubholz hackschnitzel 85%TS, HS-Bunker Mauer 2500 m <sup>3</sup>	13,39	241,3	19,36
Laubholz hackschnitzel 85%TS, HS-Bunker Mauer 5000 m <sup>3</sup>	11,91	234,3	18,53
Laubholz hackschnitzel 85%TS, Bergehalle 1.500 m <sup>3</sup> BRI	10,19	235,9	14,25
Laubholz hackschnitzel 85%TS, Bergehalle 3.000 m <sup>3</sup> BRI	10,19	223,6	13,90
Laubholz hackschnitzel 85%TS, Bergehalle 4.500 m <sup>3</sup> BRI	9,21	219,5	13,79
Laubholz hackschnitzel 85%TS, Bergehalle 9.000 m <sup>3</sup> BRI	9,21	211,1	13,55
Maissilage verdichtet, Siloplatte BGA 500kW 15.000 m <sup>3</sup>	1,05	21,4	2,31
Maissilage verdichtet, Flachsilo BGA 500kW 15.000 m <sup>3</sup>	1,53	34,8	3,78
GPS gehäckselt, Siloplatte BGA 500kW 15.000 m <sup>3</sup>	1,38	28,6	3,09
GPS gehäckselt, Flachsilo BGA 500kW 15.000 m <sup>3</sup>	2,03	46,6	5,06
Grassilage verdichtet, Siloplatte BGA 500kW 15.000 m <sup>3</sup>	1,31	27,0	2,91
Grassilage verdichtet, Flachsilo BGA 500kW 15.000 m <sup>3</sup>	1,92	43,9	4,77
Gülle, Gülle-, Gärrestlager 1.000 m <sup>3</sup>	3,31	71,5	7,81

<sup>1)</sup> die Werte beziehen sich jeweils auf die Tonne Frischmasse des jeweiligen Lagerungsgutes

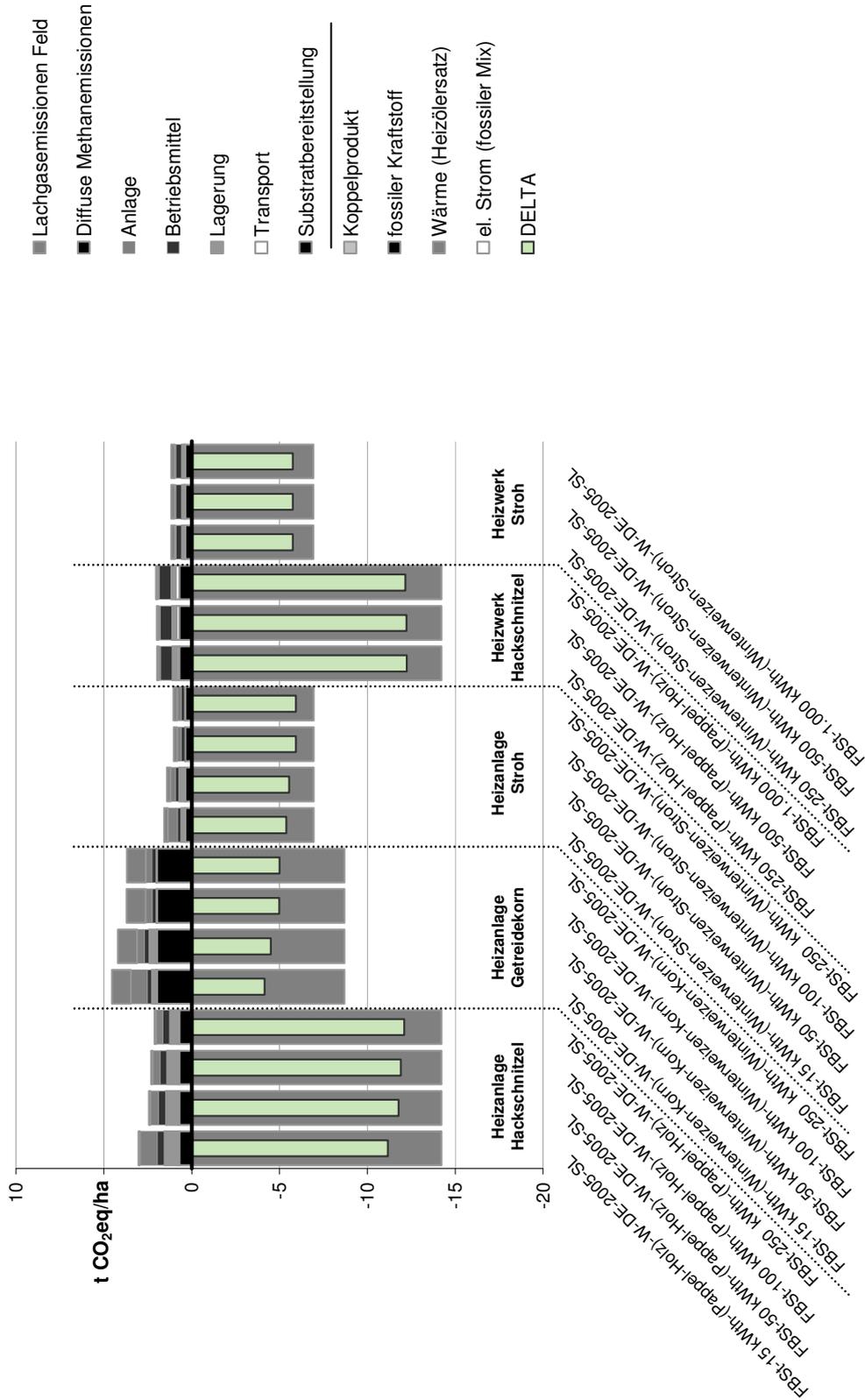
Quellen: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen

Anhangabbildung 18: Energiebilanz ausgewählter Biomasse-Umwandlungspfade zur Wärme-gewinnung



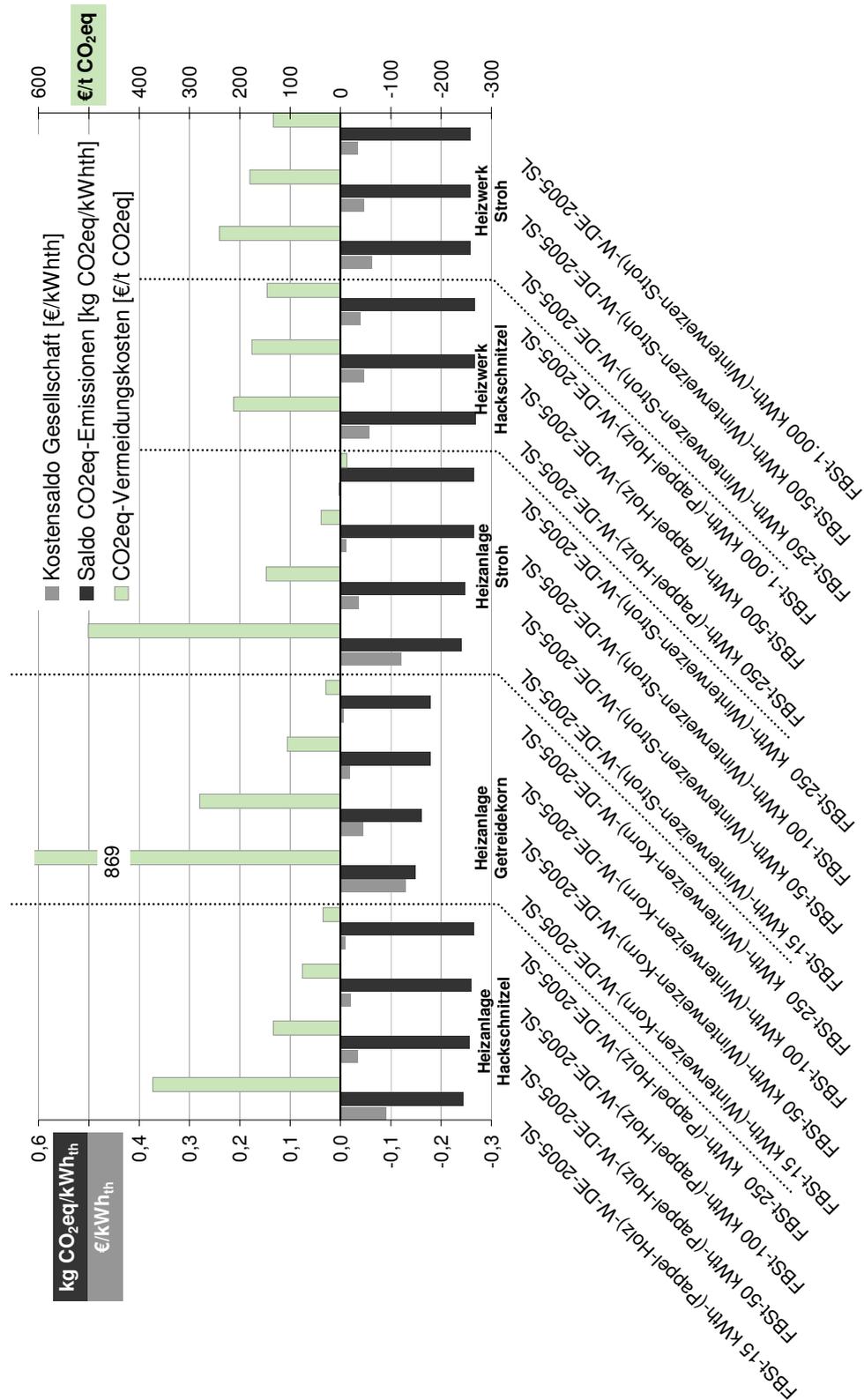
Quellen: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen

Anhangabbildung 19: Treibhausgasbilanz ausgewählter Biomasse-Umwandlungspfade zur Wärmegewinnung



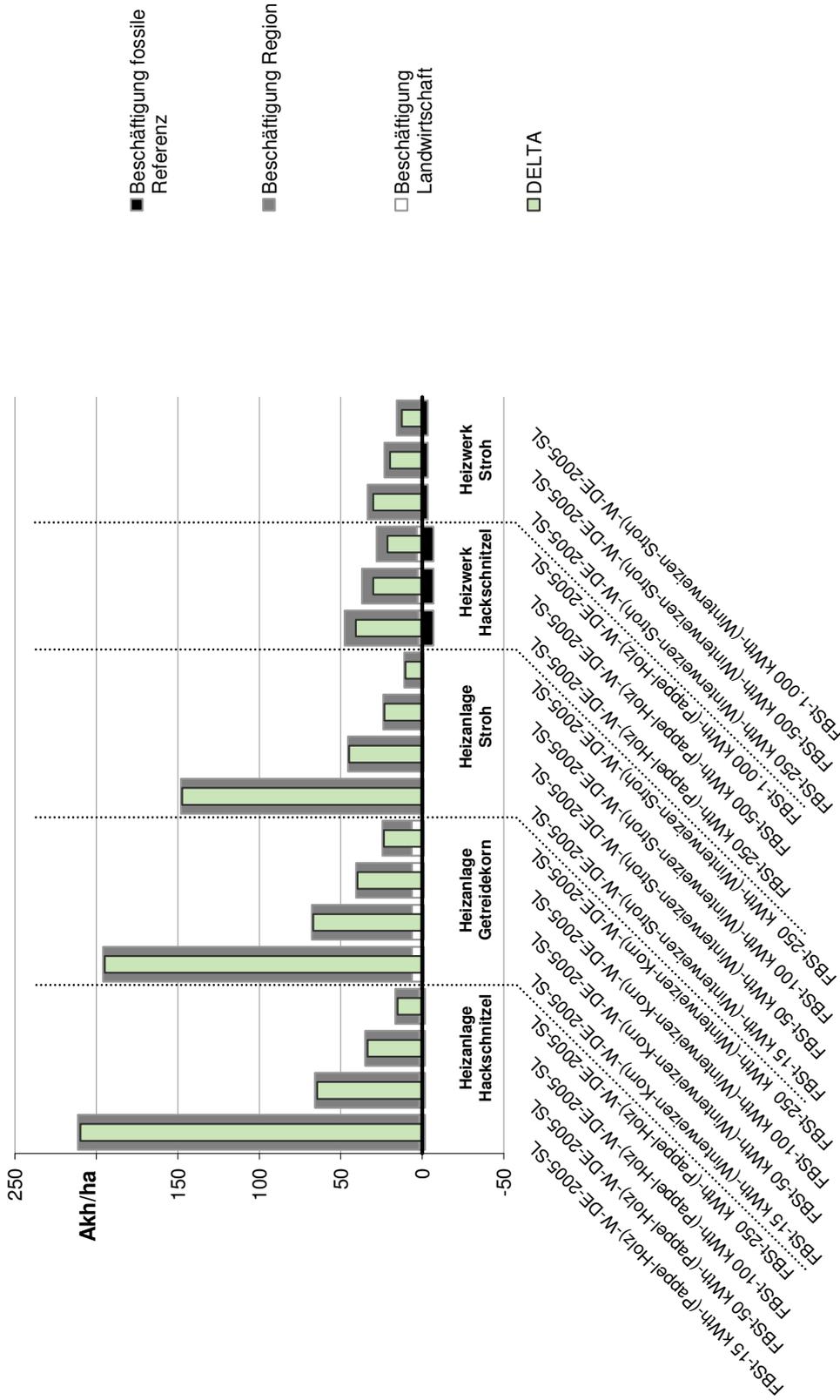
Quellen: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen

Anhangabbildung 20: Treibhausgas-Vermeidungskosten ausgewählter Biomasse-Umwandlungspfade zur Wärmegegewinnung



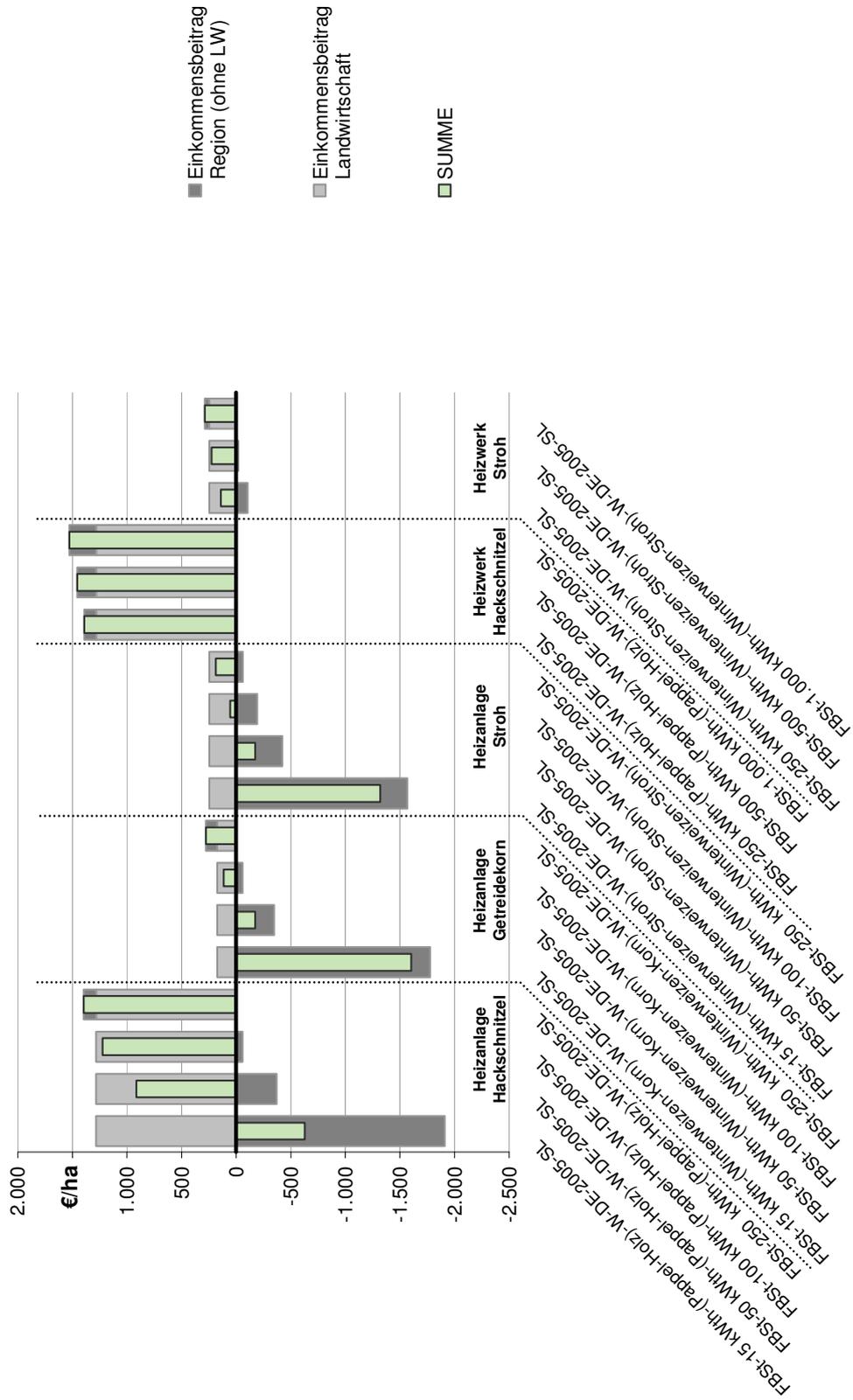
Quellen: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen

Anhangabbildung 21: Beschäftigungseffekte ausgewählter Biomasse-Umwandlungspfade zur Wärmegewinnung



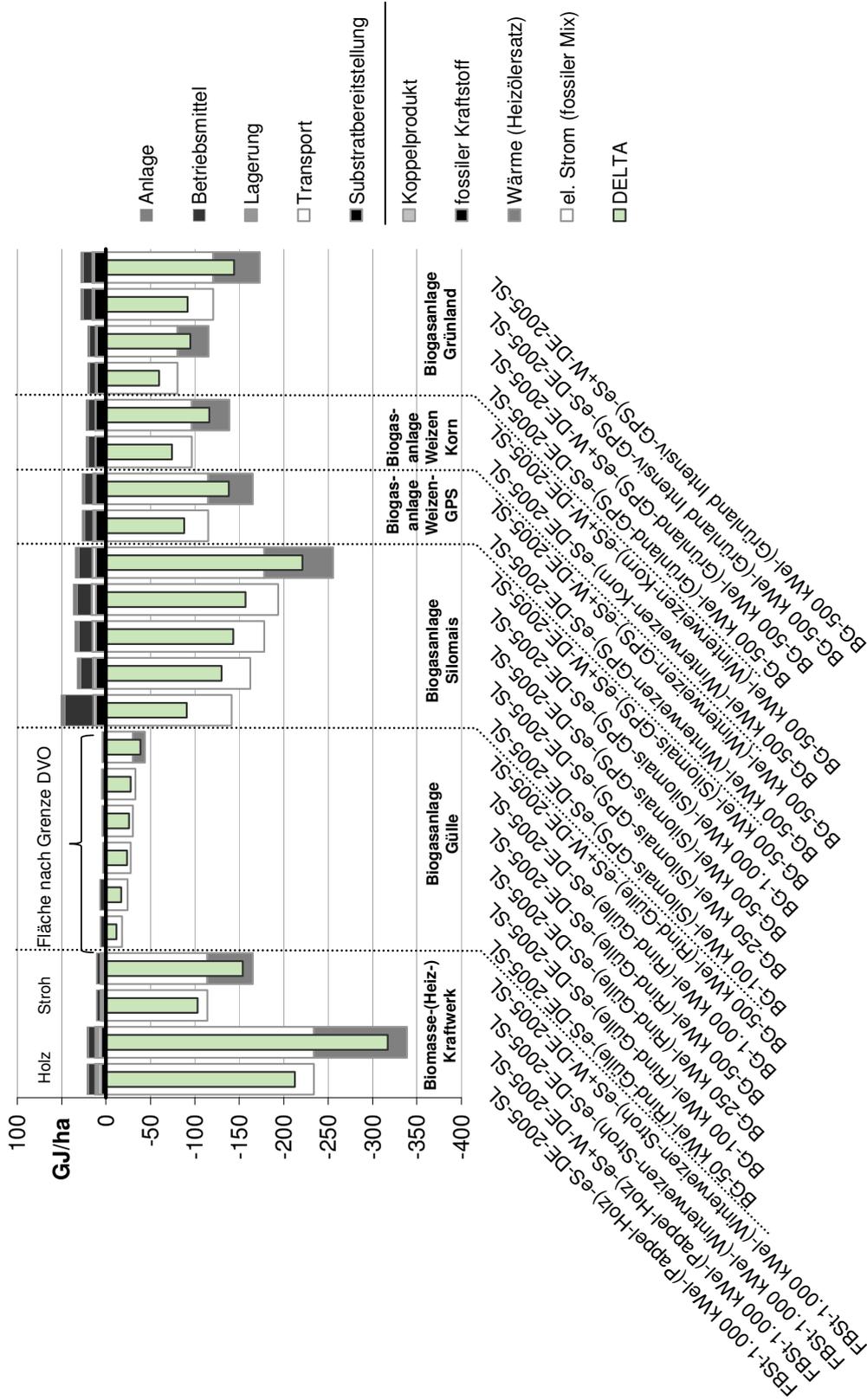
Quellen: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen

Anhangabbildung 22: Einkommenseffekte ausgewählter Biomasse-Umwandlungspfade zur Wärmegewinnung



Quellen: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen

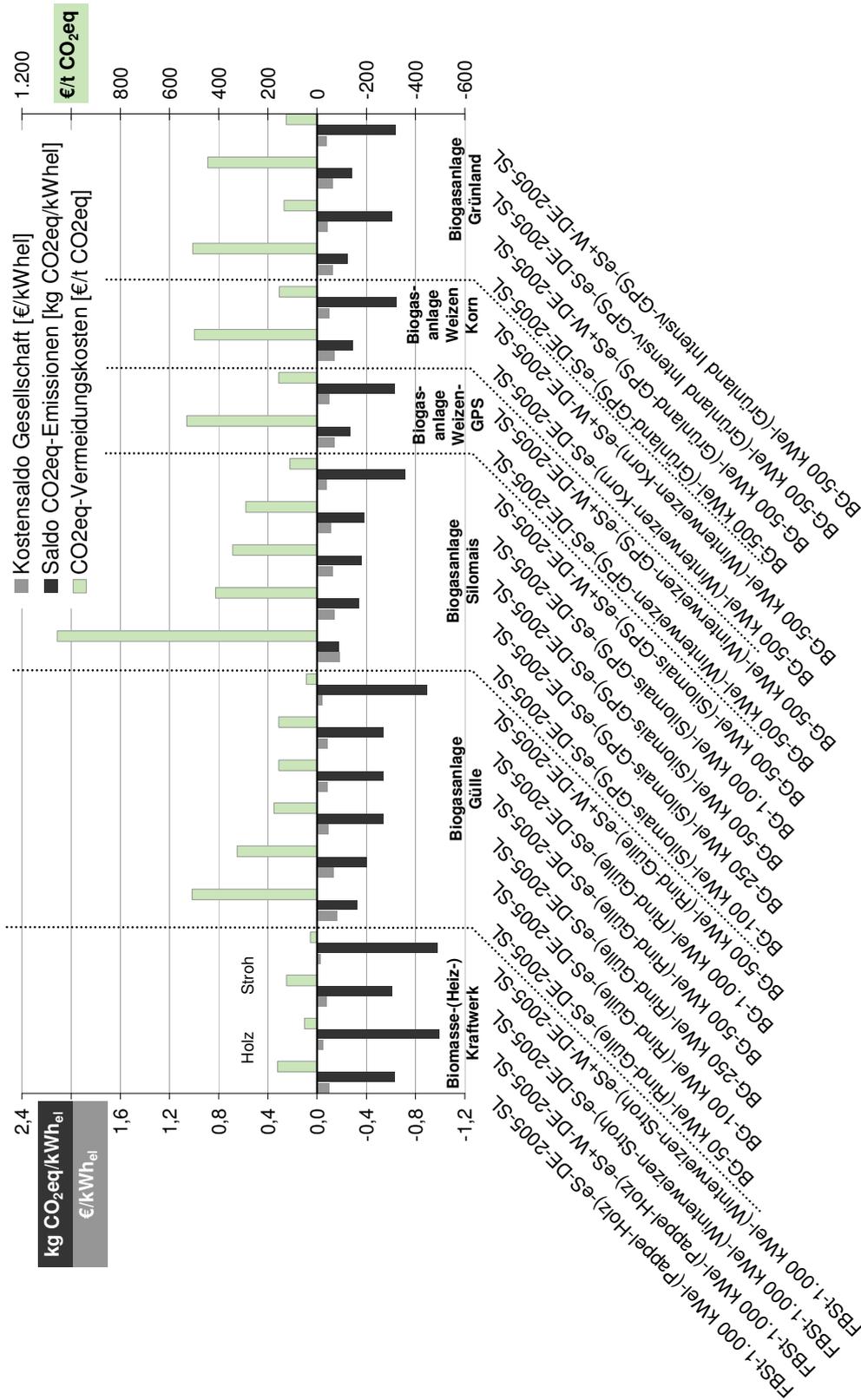
Anhangabbildung 23: Energiebilanz ausgewählter Biomasse-Umwandlungspfade zur Gewinnung von elektrischem Strom



Quellen: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen

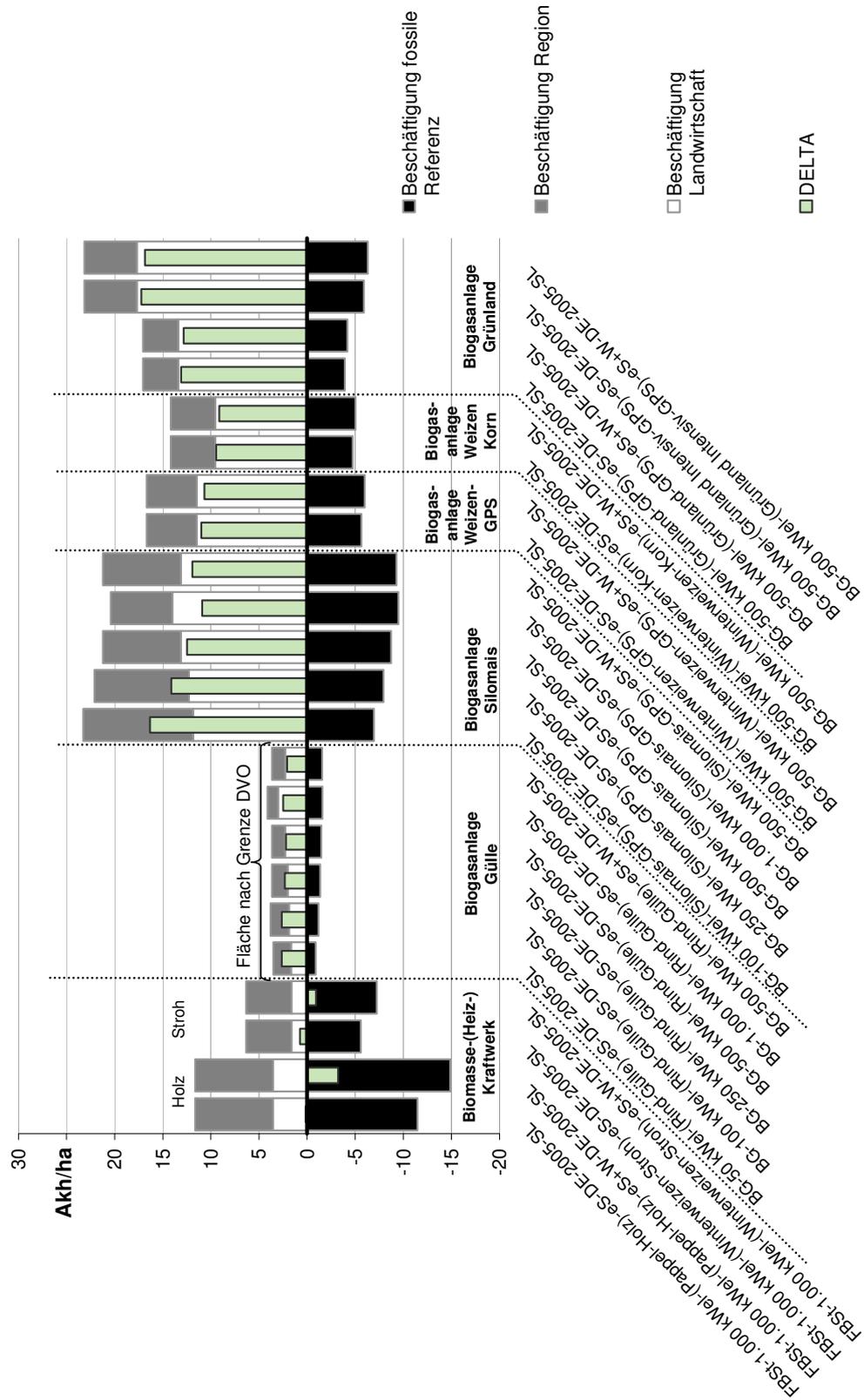


Anhangabbildung 25: Treibhausgas-Vermeidungskosten ausgewählter Biomasse-Umwandlungspfade zur Gewinnung von elektrischem Strom



Quellen: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen

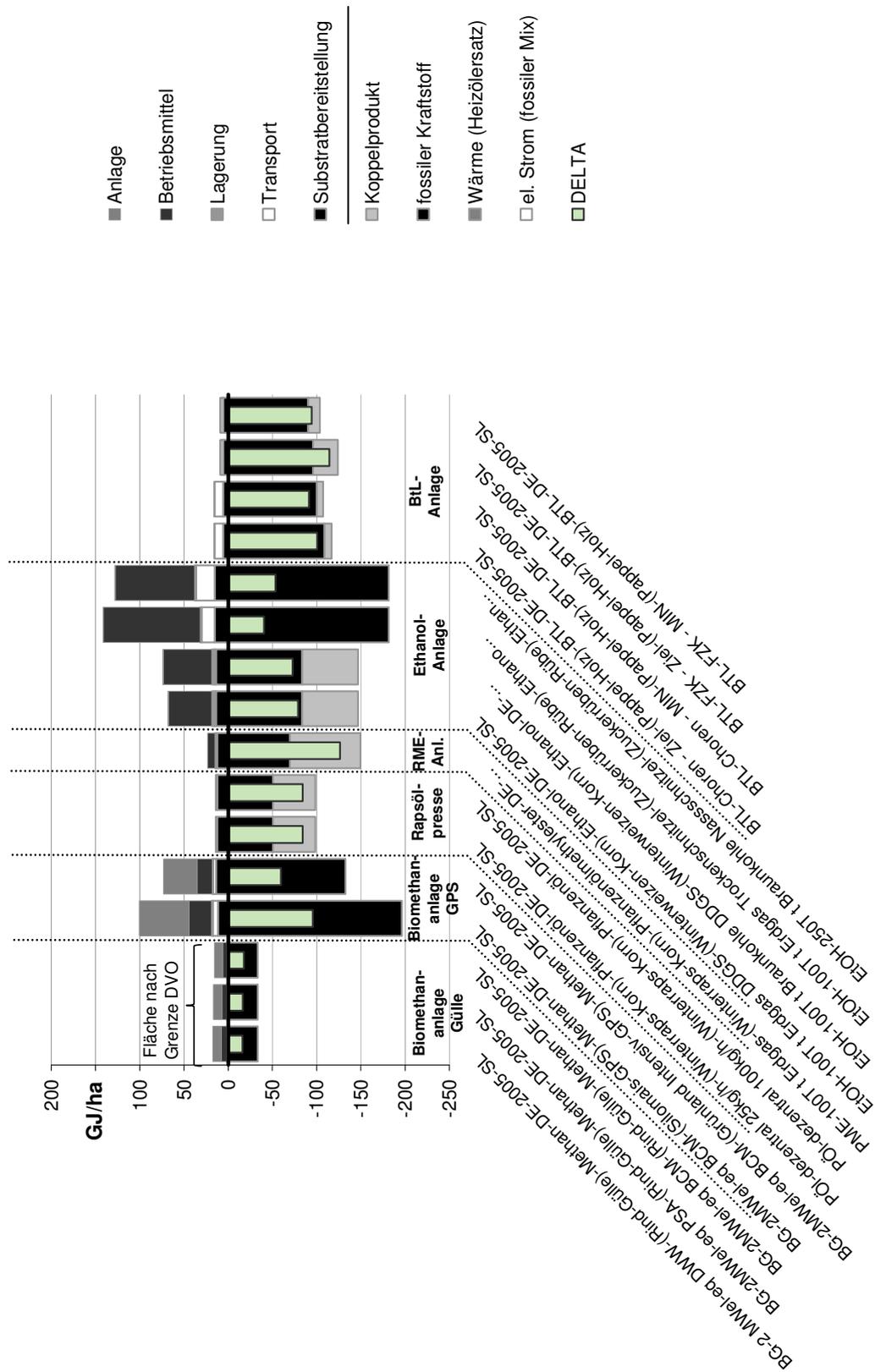
Anhangabbildung 26: Beschäftigungseffekte ausgewählter Biomasse-Umwandlungspfade zur Gewinnung von elektrischem Strom



Quellen: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen

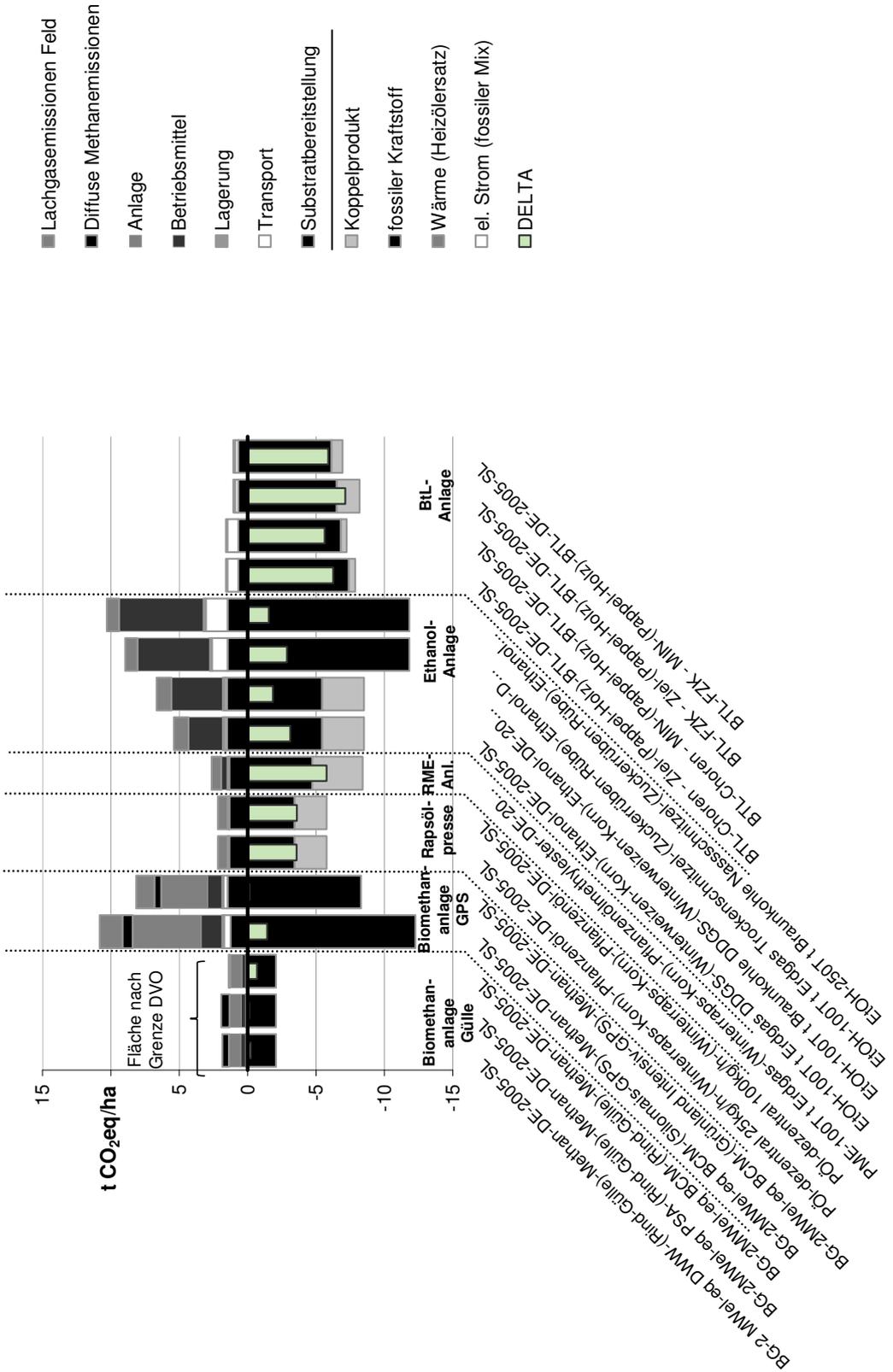


Anhangabbildung 28: Energiebilanz ausgewählter Biomasse-Umwandlungspfade zur Gewinnung von Biokraftstoffen



Quellen: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen

Anhangabbildung 29: Treibhausgasbilanz ausgewählter Biomasse-Umwandlungspfade zur Gewinnung von Biokraftstoffen

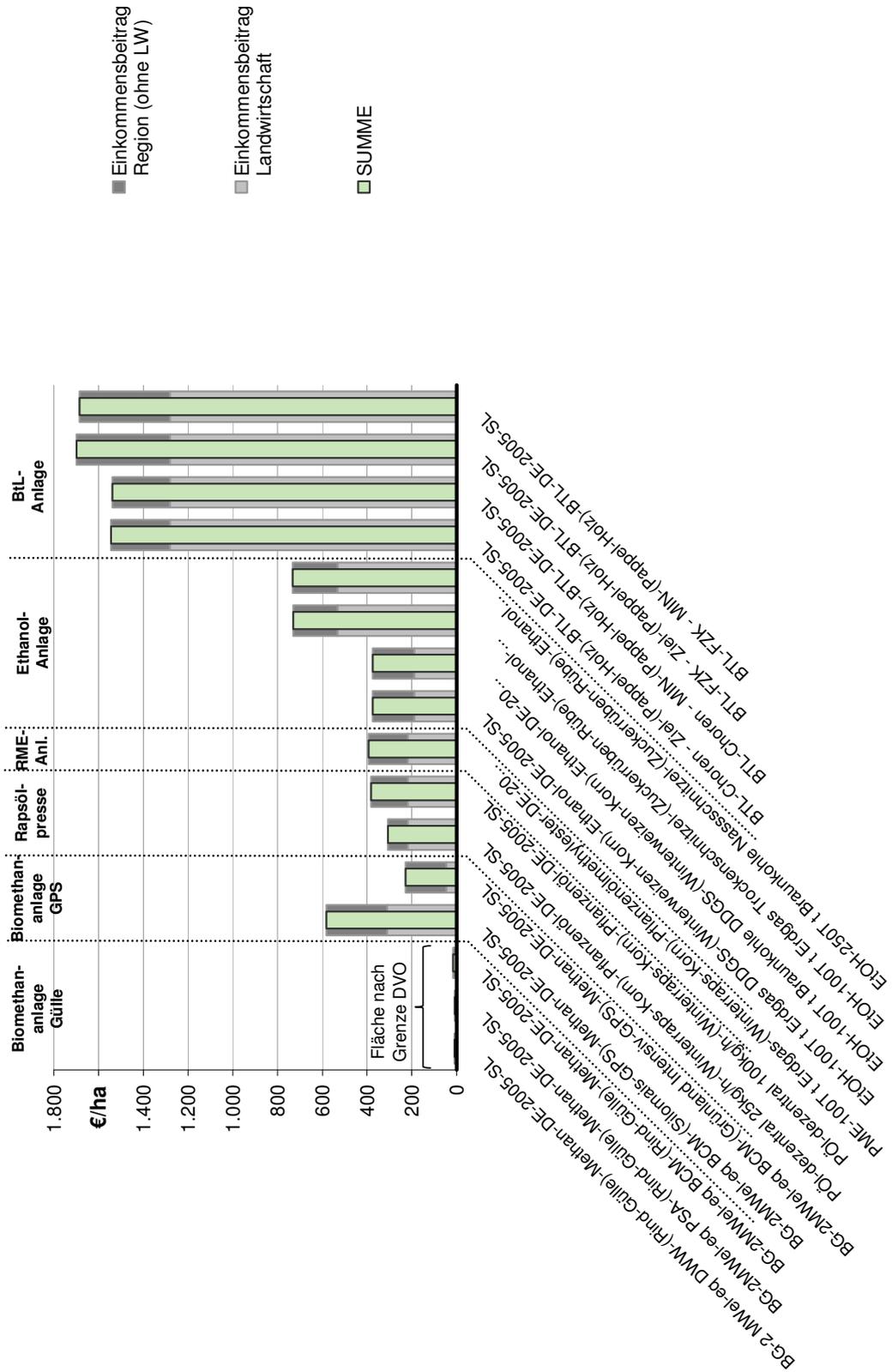


Quellen: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen





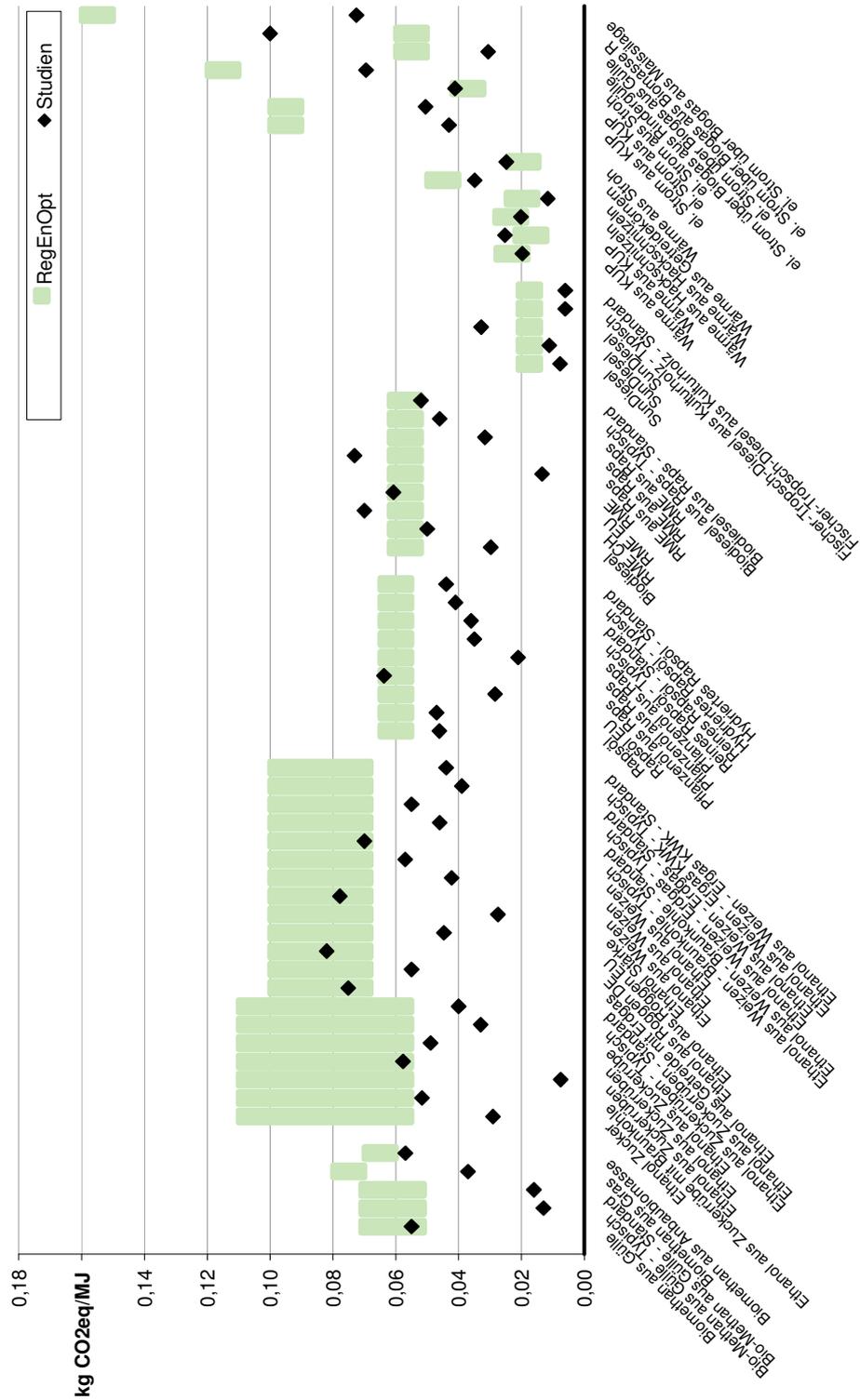
Anhangabbildung 32: Einkommenseffekte ausgewählter Biomasse-Umwandlungspfade zur Gewinnung von Biokraftstoffen



Quellen: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen



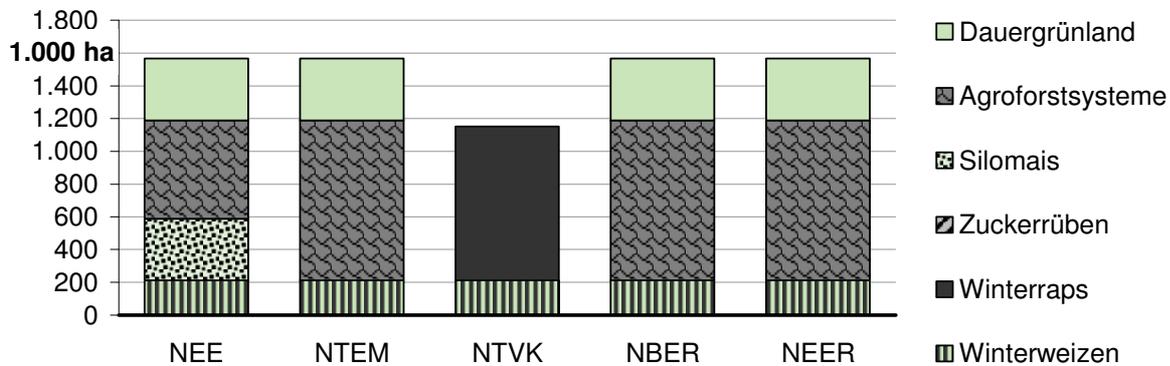
Anhangabbildung 34: Vergleich „RegEnOpt“-Ergebnisse mit Literaturdaten bezüglich Treibhausgasemissionen je Einheit Endenergieträger



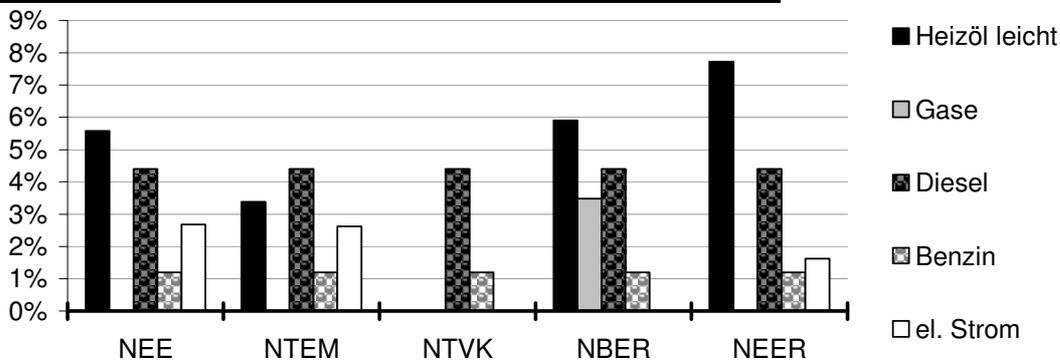
Quellen: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen nach ABI. EG 2009, DREIER und TZSCHEUTSCHLER 2000; FNR 2002; FRITSCHKE et al. 2007a; GÄRTNER und REINHARDT 2003; HARTMANN und KALTSCHMITT 2002; HENNIGES 2007 nach SCHMITZ et al. 2005; IGELSPACHER 2003; KALIES et al. 2007; KEPPLER et al. 2005; QUIRIN et al. 2004; SCHOLWIN et al. 2006; ZAH et al. 2007

Anhangabbildung 35: LP-Ergebnisse Szenario 10% LF mit Untergrenzen für Biokraftstoffe

**Energiebiomasseanbaustruktur**



**Substitution fossiler Energieträger durch Biomasse-Energieträger**



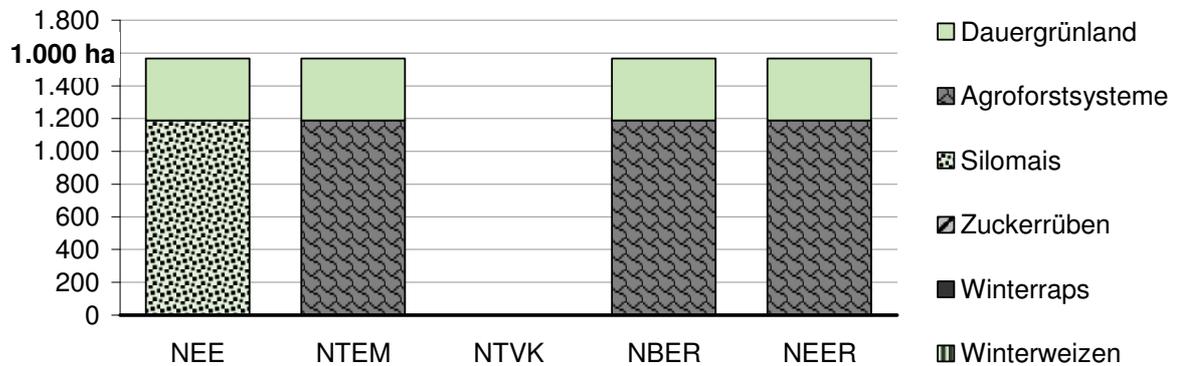
**Energieumwandlungspfade:**

<b>NEE:</b> (Netto-Energie-Einsparung)	BG-1.000 kWel-(Rind-Gülle)-eS+W-DE-2005-SL BG-1.000 kWel-(Silomais-GPS)-eS+W-DE-2005-SL BG-1.000 kWel-(Grünland Intensiv-GPS)-eS+W-DE-2005-SL EtOH-100T t Erdgas DDGS-(Winterweizen-Korn)-Ethanol-DE-2005-SL BTL-Choren - Ziel-(Pappel-Holz)-BTL-DE-2005-SL
<b>NTM:</b> (Netto-Treibhausgasemissions-Minderung)	FBSt-500 kWel-(Pappel-Holz)-eS-DE-2005-SL BG-1.000 kWel-(Rind-Gülle)-eS+W-DE-2005-SL BG-1.000 kWel-(Grünland Intensiv-GPS)-eS+W-DE-2005-SL EtOH-100T t Erdgas DDGS-(Winterweizen-Korn)-Ethanol-DE-2005-SL BTL-FZK - Ziel-(Pappel-Holz)-BTL-DE-2005-SL
<b>NTVK:</b> (Netto-Treibhausgas-Vermeidungskosten)	PME-200T t Braunk.-(Wintererbsen-Korn)-Pflanzenölmethylester-DE-2005-SL EtOH-100T t Erdgas DDGS-(Winterweizen-Korn)-Ethanol-DE-2005-SL
<b>NBER:</b> (Netto-Beschäftigungseffekte Region)	FBSt-15 kWth-(Pappel-Holz)-W-DE-2005-SL BG-2Mwel-eq PSA-(Rind-Gülle)-Methan-DE-2005-SL BG-1 MWel-eq PSA-(Grünland Intensiv-GPS)-Methan-DE-2005-SL EtOH-100T t Braunkohle Schlempe-(Winterweizen-Korn)-Ethanol-DE-2005-SL BTL-Choren - Ziel-(Pappel-Holz)-BTL-DE-2005-SL
<b>NEER:</b> (Netto-Einkommenseffekte Region)	FBSt-15 kWth-(Pappel-Holz)-W-DE-2005-SL BG-1 Mwel BCM-(Rind-Gülle)-eS+W-DE-2005-SL BG-1 Mwel BCM-(Grünland Intensiv-GPS)-eS+W-DE-2005-SL EtOH-100T t Braunkohle Schlempe-(Winterweizen-Korn)-Ethanol-DE-2005-SL BTL-FZK - Ziel-(Pappel-Holz)-BTL-DE-2005-SL

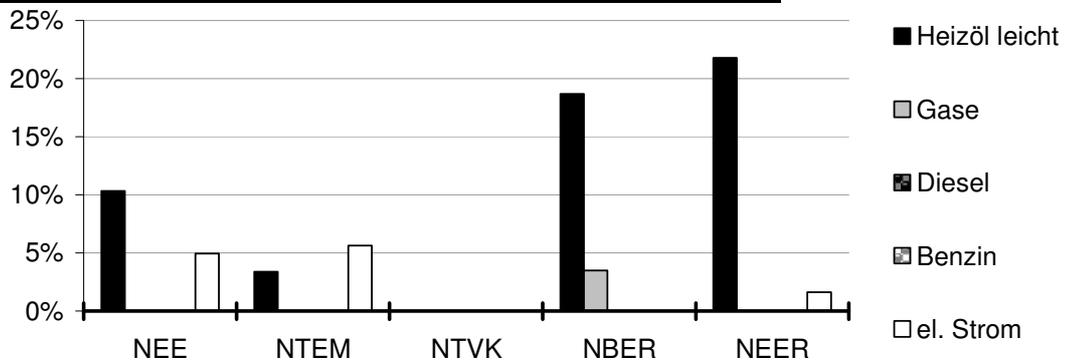
Quelle: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen

Anhangabbildung 36: LP-Ergebnisse Szenario 10% LF ohne Untergrenzen für Biokraftstoffe

**Energiebiomasseanbaustruktur**



**Substitution fossiler Energieträger durch Biomasse-Energieträger**



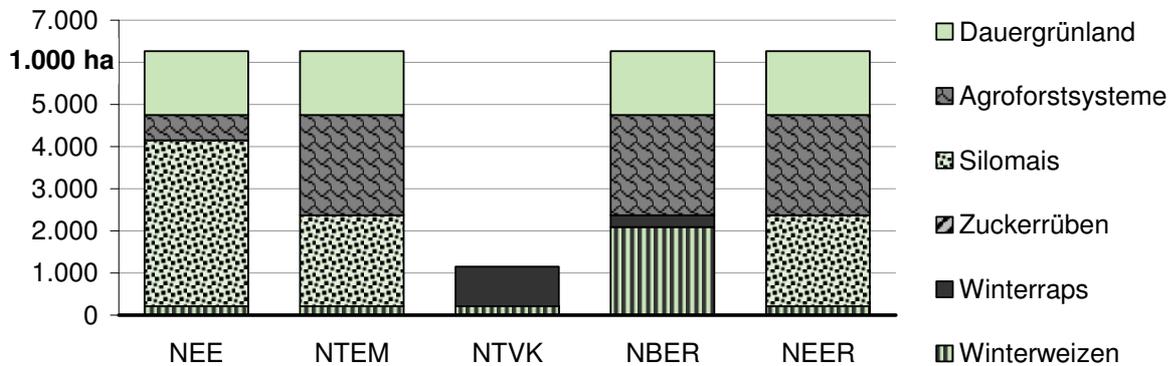
**Energieumwandlungspfade:**

<b>NEE:</b> (Netto-Energie-Einsparung)	BG-1.000 kWel-(Rind-Gülle)-eS+W-DE-2005-SL BG-1.000 kWel-(Silomais-GPS)-eS+W-DE-2005-SL BG-1.000 kWel-(Grünland Intensiv-GPS)-eS+W-DE-2005-SL
<b>NTM:</b> (Netto-Treibhausgasemissions-Minderung)	FBSt-500 kWel-(Pappel-Holz)-eS-DE-2005-SL BG-1.000 kWel-(Rind-Gülle)-eS+W-DE-2005-SL BG-1.000 kWel-(Grünland Intensiv-GPS)-eS+W-DE-2005-SL
<b>NTVK:</b> (Netto-Treibhausgas-Vermeidungskosten)	
<b>NBER:</b> (Netto-Beschäftigungseffekte Region)	FBSt-15 kWth-(Pappel-Holz)-W-DE-2005-SL BG-2MwEl-eq PSA-(Rind-Gülle)-Methan-DE-2005-SL BG-1 MwEl-eq PSA-(Grünland Intensiv-GPS)-Methan-DE-2005-SL
<b>NEER:</b> (Netto-Einkommenseffekte Region)	FBSt-15 kWth-(Pappel-Holz)-W-DE-2005-SL BG-1 MwEl BCM-(Rind-Gülle)-eS+W-DE-2005-SL BG-1 MwEl BCM-(Grünland Intensiv-GPS)-eS+W-DE-2005-SL

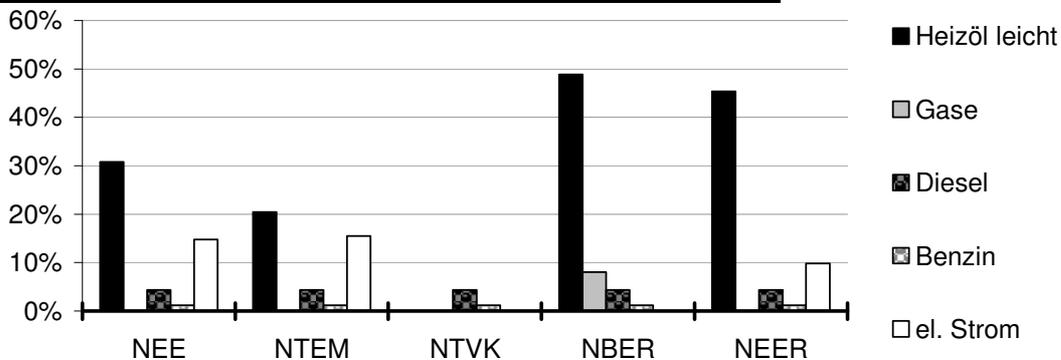
Quelle: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen

Anhangabbildung 37: LP-Ergebnisse Szenario 40% LF mit Untergrenzen für Biokraftstoffe

**Energiebiomasseanbaustruktur**



**Substitution fossiler Energieträger durch Biomasse-Energieträger**



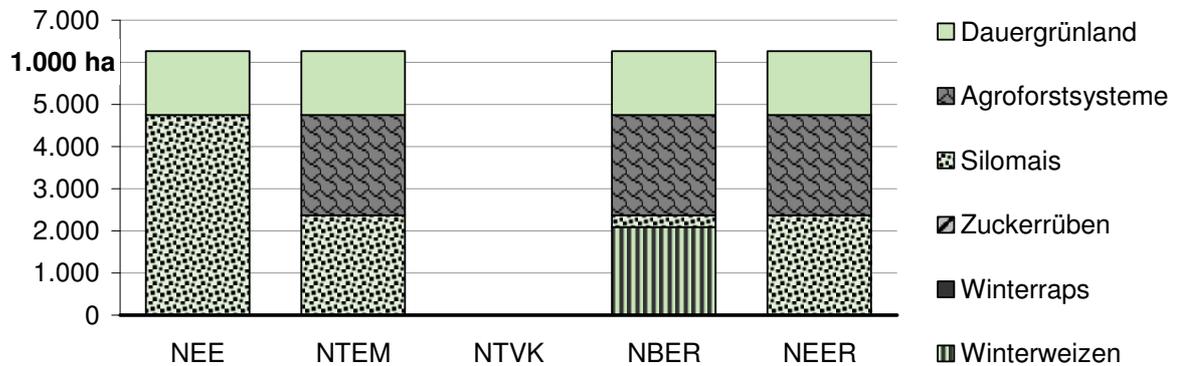
**Energieumwandlungspfade:**

<b>NEE:</b> (Netto-Energie-Einsparung)	BG-1.000 kWel-(Rind-Gülle)-eS+W-DE-2005-SL BG-1.000 kWel-(Silomais-GPS)-eS+W-DE-2005-SL BG-1.000 kWel-(Grünland Intensiv-GPS)-eS+W-DE-2005-SL EtOH-100T t Erdgas DDGS-(Winterweizen-Korn)-Ethanol-DE-2005-SL BTL-Choren - Ziel-(Pappel-Holz)-BTL-DE-2005-SL
<b>NTEM:</b> (Netto-Treibhausgasemissions-Minderung)	FBSt-500 kWel-(Pappel-Holz)-eS-DE-2005-SL BG-1.000 kWel-(Rind-Gülle)-eS+W-DE-2005-SL BG-1.000 kWel-(Silomais-GPS)-eS+W-DE-2005-SL BG-1.000 kWel-(Grünland Intensiv-GPS)-eS+W-DE-2005-SL EtOH-100T t Erdgas DDGS-(Winterweizen-Korn)-Ethanol-DE-2005-SL BTL-FZK - Ziel-(Pappel-Holz)-BTL-DE-2005-SL
<b>NTVK:</b> (Netto-Treibhausgas-Vermeidungskosten)	PME-200T t Braunk.-(Winterraps-Korn)-Pflanzenölmethylester-DE-2005-SL EtOH-100T t Erdgas DDGS-(Winterweizen-Korn)-Ethanol-DE-2005-SL
<b>NBER:</b> (Netto-Beschäftigungseffekte Region)	FBSt-15 kWth-(Pappel-Holz)-W-DE-2005-SL FBSt-15 kWth-(Winterweizen-Korn)-W-DE-2005-SL BG-2MWeI-eq PSA-(Rind-Gülle)-Methan-DE-2005-SL BG-1 MWeI-eq PSA-(Grünland Intensiv-GPS)-Methan-DE-2005-SL PME-100T t Erdgas-(Winterraps-Korn)-Pflanzenölmethylester-DE-2005-SL EtOH-100T t Braunkohle Schlempe-(Winterweizen-Korn)-Ethanol-DE-2005-SL BTL-Choren - Ziel-(Pappel-Holz)-BTL-DE-2005-SL
<b>NEER:</b> (Netto-Einkommenseffekte Region)	FBSt-15 kWth-(Pappel-Holz)-W-DE-2005-SL BG-1 MweI BCM-(Rind-Gülle)-eS+W-DE-2005-SL BG-1 MweI BCM-(Silomais-GPS)-eS+W-DE-2005-SL BG-1 MweI BCM-(Grünland Intensiv-GPS)-eS+W-DE-2005-SL EtOH-100T t Braunkohle Schlempe-(Winterweizen-Korn)-Ethanol-DE-2005-SL BTL-FZK - Ziel-(Pappel-Holz)-BTL-DE-2005-SL

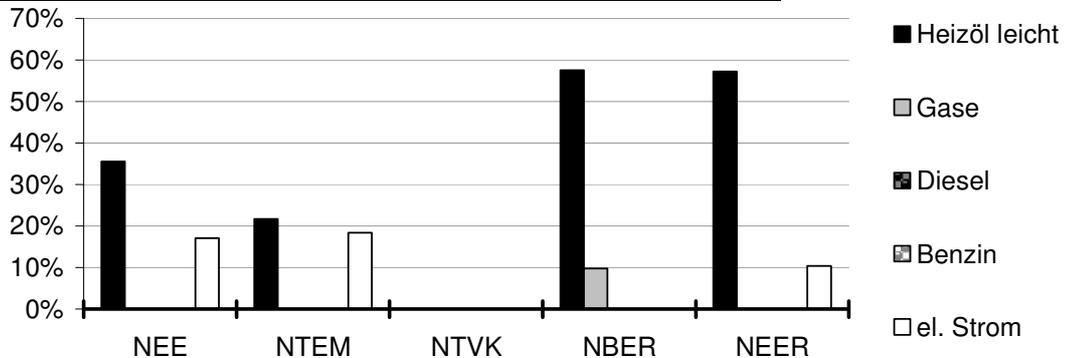
Quelle: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen

Anhangabbildung 38: LP-Ergebnisse Szenario 40% LF ohne Untergrenzen für Biokraftstoffe

**Energiebiomasseanbaustruktur**



**Substitution fossiler Energieträger durch Biomasse-Energieträger**



**Energieumwandlungspfade:**

**NEE:** (Netto-Energie-Einsparung)  
 BG-1.000 kWel-(Rind-Gülle)-eS+W-DE-2005-SL  
 BG-1.000 kWel-(Silomais-GPS)-eS+W-DE-2005-SL  
 BG-1.000 kWel-(Grünland Intensiv-GPS)-eS+W-DE-2005-SL

**NTM:** (Netto-Treibhausgasemissions-Minderung)  
 FBSt-500 kWel-(Pappel-Holz)-eS-DE-2005-SL  
 BG-1.000 kWel-(Rind-Gülle)-eS+W-DE-2005-SL  
 BG-1.000 kWel-(Silomais-GPS)-eS+W-DE-2005-SL  
 BG-1.000 kWel-(Grünland Intensiv-GPS)-eS+W-DE-2005-SL

**NTVK:** (Netto-Treibhausgas-Vermeidungskosten)

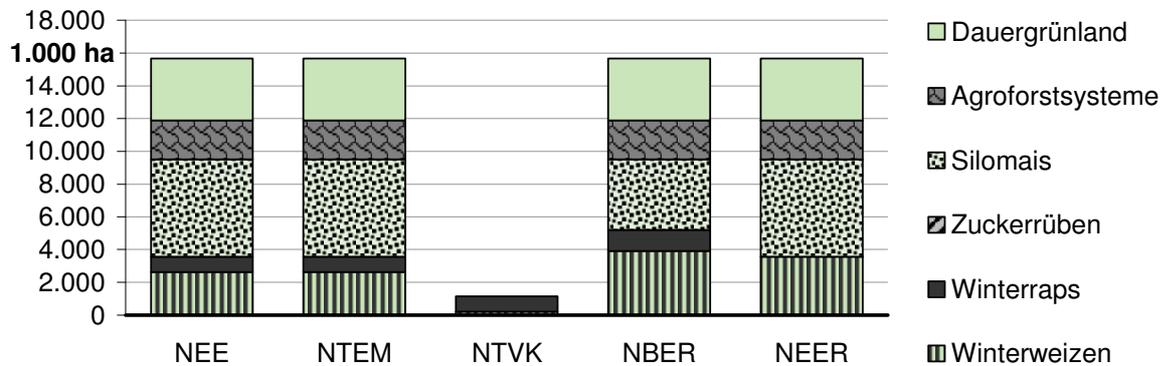
**NBER:** (Netto-Beschäftigungseffekte Region)  
 FBSt-15 kWth-(Pappel-Holz)-W-DE-2005-SL  
 FBSt-15 kWth-(Winterweizen-Korn)-W-DE-2005-SL  
 BG-2Mwel-eq PSA-(Rind-Gülle)-Methan-DE-2005-SL  
 BG-1 Mwel-eq PSA-(Silomais-GPS)-Methan-DE-2005-SL  
 BG-1 Mwel-eq PSA-(Grünland Intensiv-GPS)-Methan-DE-2005-SL

**NEER:** (Netto-Einkommenseffekte Region)  
 FBSt-15 kWth-(Pappel-Holz)-W-DE-2005-SL  
 BG-1 Mwel BCM-(Rind-Gülle)-eS+W-DE-2005-SL  
 BG-1 Mwel BCM-(Silomais-GPS)-eS+W-DE-2005-SL  
 BG-1 Mwel BCM-(Grünland Intensiv-GPS)-eS+W-DE-2005-SL

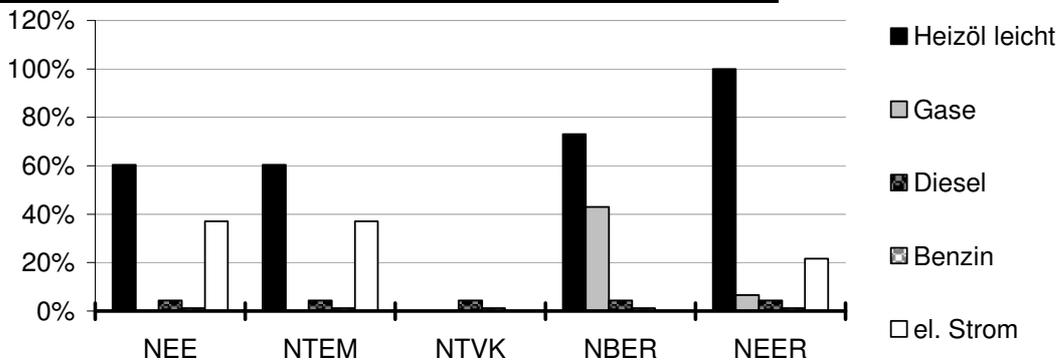
Quelle: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen

Anhangabbildung 39: LP-Ergebnisse Szenario 100% LF mit Untergrenzen für Biokraftstoffe

**Energiebiomasseanbaustruktur**



**Substitution fossiler Energieträger durch Biomasse-Energieträger**



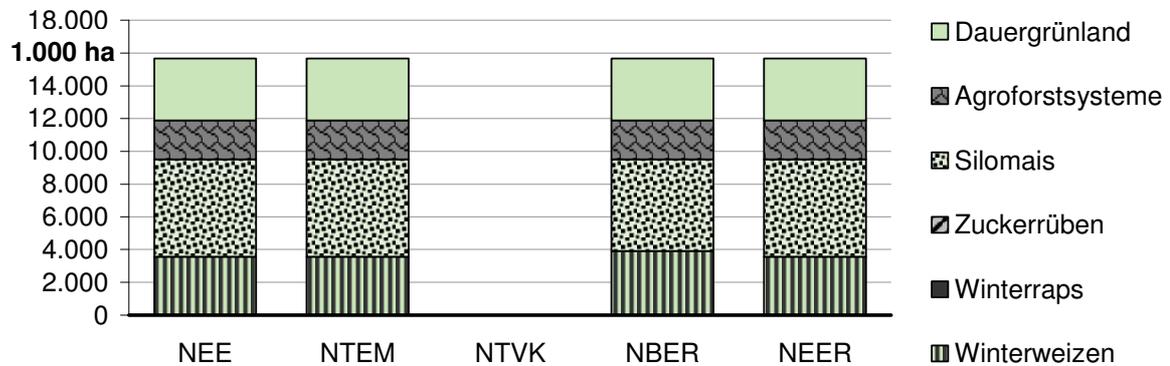
**Energieumwandlungspfade:**

<b>NEE:</b> (Netto-Energie-Einsparung)	FBSt-500 kWel-(Pappel-Holz)-eS-DE-2005-SL BG-1.000 kWel-(Rind-Gülle)-eS+W-DE-2005-SL BG-1.000 kWel-(Silomais-GPS)-eS+W-DE-2005-SL BG-1.000 kWel-(Winterweizen-GPS)-eS+W-DE-2005-SL BG-1.000 kWel-(Grünland Intensiv-GPS)-eS+W-DE-2005-SL PME-200T t Erdgas-(Winterraps-Korn)-Pflanzenölmethylester-DE-2005-SL EtOH-100T t Erdgas DDGS-(Winterweizen-Korn)-Ethanol-DE-2005-SL
<b>NTM:</b> (Netto-Treibhausgasemissions-Minderung)	FBSt-500 kWel-(Pappel-Holz)-eS-DE-2005-SL BG-1.000 kWel-(Rind-Gülle)-eS+W-DE-2005-SL BG-1.000 kWel-(Silomais-GPS)-eS+W-DE-2005-SL BG-1.000 kWel-(Winterweizen-GPS)-eS+W-DE-2005-SL BG-1.000 kWel-(Grünland Intensiv-GPS)-eS+W-DE-2005-SL PME-200T t Erdgas-(Winterraps-Korn)-Pflanzenölmethylester-DE-2005-SL EtOH-100T t Erdgas DDGS-(Winterweizen-Korn)-Ethanol-DE-2005-SL
<b>NTVK:</b> (Netto-Treibhausgas-Vermeidungskosten)	PME-200T t Braunk.-(Winterraps-Korn)-Pflanzenölmethylester-DE-2005-SL EtOH-100T t Erdgas DDGS-(Winterweizen-Korn)-Ethanol-DE-2005-SL
<b>NBER:</b> (Netto-Beschäftigungseffekte Region)	FBSt-15 kWth-(Pappel-Holz)-W-DE-2005-SL FBSt-15 kWth-(Winterweizen-Korn)-W-DE-2005-SL BG-2MwEl-eq PSA-(Rind-Gülle)-Methan-DE-2005-SL BG-1 MWel-eq PSA-(Silomais-GPS)-Methan-DE-2005-SL BG-1 MWel-eq PSA-(Grünland Intensiv-GPS)-Methan-DE-2005-SL PÖl-dezentral 25kg/h-(Winterraps-Korn)-Pflanzenöl-DE-2005-SL EtOH-100T t Braunkohle Schlempe-(Winterweizen-Korn)-Ethanol-DE-2005-SL
<b>NEER:</b> (Netto-Einkommenseffekte Region)	FBSt-15 kWth-(Pappel-Holz)-W-DE-2005-SL FBSt-15 kWth-(Winterweizen-Korn)-W-DE-2005-SL BG-1 MwEl BCM-(Rind-Gülle)-eS+W-DE-2005-SL BG-1 MwEl BCM-(Silomais-GPS)-eS+W-DE-2005-SL BG-1 MwEl BCM-(Grünland Intensiv-GPS)-eS+W-DE-2005-SL BG-1 MwEl-eq BCM-(Silomais-GPS)-Methan-DE-2005-SL EtOH-100T t Braunkohle Schlempe-(Winterweizen-Korn)-Ethanol-DE-2005-SL BTL-FZK - Ziel-(Pappel-Holz)-BTL-DE-2005-SL

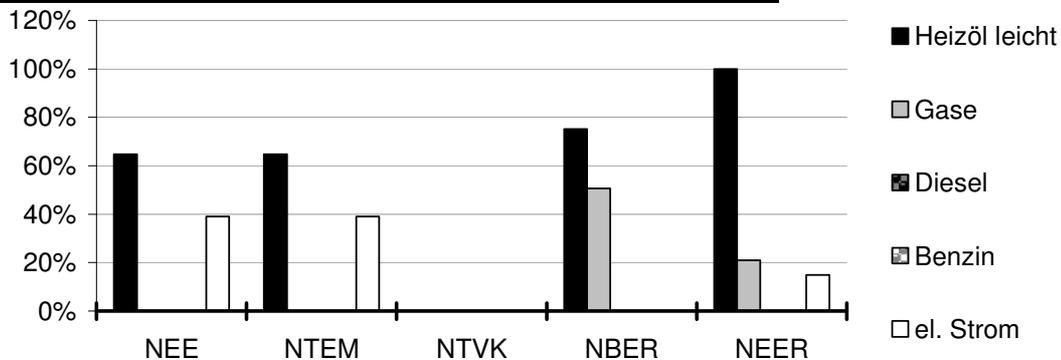
Quelle: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen

Anhangabbildung 40: LP-Ergebnisse Szenario 100% LF ohne Untergrenzen für Biokraftstoffe

**Energiebiomasseanbaustruktur**



**Substitution fossiler Energieträger durch Biomasse-Energieträger**



**Energieumwandlungspfade:**

<b>NEE:</b> (Netto-Energie-Einsparung)	FBSt-500 kWel-(Pappel-Holz)-eS-DE-2005-SL BG-1.000 kWel-(Rind-Gülle)-eS+W-DE-2005-SL BG-1.000 kWel-(Silomais-GPS)-eS+W-DE-2005-SL BG-1.000 kWel-(Winterweizen-GPS)-eS+W-DE-2005-SL BG-1.000 kWel-(Grünland Intensiv-GPS)-eS+W-DE-2005-SL
<b>NTM:</b> (Netto-Treibhausgasemissions-Minderung)	FBSt-500 kWel-(Pappel-Holz)-eS-DE-2005-SL BG-1.000 kWel-(Rind-Gülle)-eS+W-DE-2005-SL BG-1.000 kWel-(Silomais-GPS)-eS+W-DE-2005-SL BG-1.000 kWel-(Winterweizen-GPS)-eS+W-DE-2005-SL BG-1.000 kWel-(Grünland Intensiv-GPS)-eS+W-DE-2005-SL
<b>NTVK:</b> (Netto-Treibhausgas-Vermeidungskosten)	
<b>NBER:</b> (Netto-Beschäftigungseffekte Region)	FBSt-15 kWth-(Pappel-Holz)-W-DE-2005-SL FBSt-15 kWth-(Winterweizen-Korn)-W-DE-2005-SL BG-2Mwel-eq PSA-(Rind-Gülle)-Methan-DE-2005-SL BG-1 Mwel-eq PSA-(Silomais-GPS)-Methan-DE-2005-SL BG-1 Mwel-eq PSA-(Grünland Intensiv-GPS)-Methan-DE-2005-SL
<b>NEER:</b> (Netto-Einkommenseffekte Region)	FBSt-15 kWth-(Pappel-Holz)-W-DE-2005-SL FBSt-15 kWth-(Winterweizen-Korn)-W-DE-2005-SL BG-1 Mwel BCM-(Rind-Gülle)-eS+W-DE-2005-SL BG-1 Mwel BCM-(Silomais-GPS)-eS+W-DE-2005-SL BG-1 Mwel-eq BCM-(Silomais-GPS)-Methan-DE-2005-SL BG-1 Mwel-eq BCM-(Grünland Intensiv-GPS)-Methan-DE-2005-SL

Quelle: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen



# Kurzportrait

von

## Stefan Berenz

Dipl. Ing. agr. (Univ.)



26. März 2012

## Der bisherige Lebensweg

