



**WBGU**

WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG  
GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN

# ***materialien***

**Franziska Müller-Langer, Anastasios  
Perimenis, Sebastian Brauer, Daniela Thrän,  
Martin Kaltschmitt:  
Technische und ökonomische Bewertung von  
Bioenergie-Konversionspfaden**

**Externe Expertise für das WBGU-Hauptgutachten  
"Welt im Wandel: Zukunftsfähige Bioenergie und  
nachhaltige Landnutzung"**

**Berlin 2008**

Externe Expertise für das WBGU-Hauptgutachten

"Welt im Wandel: Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung"

Berlin: WBGU

ISBN 978-3-9396191-21-9

Verfügbar als Volltext im Internet unter [http://www.wbgu.de/wbgu\\_jg2008.html](http://www.wbgu.de/wbgu_jg2008.html)

Autoren: Franziska Müller-Langer, Anastasios Perimenis, Sebastian Brauer, Daniela Thrän, Martin Kaltschmitt

Titel: Technische und ökonomische Bewertung von Bioenergie-Konversionspfaden

Leipzig, Berlin 2008

Veröffentlicht als Volltext im Internet unter [http://www.wbgu.de/wbgu\\_jg2008\\_ex06.pdf](http://www.wbgu.de/wbgu_jg2008_ex06.pdf)

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen  
Geschäftsstelle  
Reichpietschufer 60–62, 8. OG.  
10785 Berlin

Telefon	(030) 263948 0
Fax	(030) 263948 50
E-Mail	<a href="mailto:wbgu@wbgu.de">wbgu@wbgu.de</a>
Internet	<a href="http://www.wbgu.de">http://www.wbgu.de</a>

Alle WBGU-Gutachten können von der Internetwebsite <http://www.wbgu.de> in deutscher und englischer Sprache herunter geladen werden.

**Deutsches  
BiomasseForschungsZentrum**  
gemeinnützige GmbH

**German Biomass Research Centre**



**EXPERTISE  
ZUR  
TECHNISCHEN UND ÖKONOMISCHEN  
BEWERTUNG VON BIOENERGIE-  
KONVERSIONSPFADEN**

Expertise im Auftrag des WBGU  
Ergänzte Endfassung

Franziska Müller-Langer

Anastasios Perimenis

Sebastian Brauer

Daniela Thrän

Martin Kaltschmitt

2008

**Auftraggeber:**                    **Stiftung Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI)**  
– Abteilung Einkauf –  
Postfach 12 01 61  
27515 Bremerhaven

**Ansprechpartner:**                **Deutsches BiomasseForschungsZentrum  
gemeinnützige GmbH**  
Torgauer Straße 116  
04347 Leipzig

Tel.:            +49-341-2434-112

Fax:            +49-341-2434-133

E-Mail:        info@dbfz.de

Internet:      www.dbfz.de

**Prof. Dr.-Ing. Martin Kaltschmitt**

Tel.:            +49-341-2434-113

Fax:            +49-341-2434-133

E-Mail:        martin.kaltschmitt@dbfz.de

**Dipl.-Ing. Franziska Müller-Langer**

Tel.:            +49-341-2434-423

Fax:            +49-341-2434-133

E-Mail:        franziska.mueller-langer@dbfz.de

---

Alleingeschafterin des DBFZ Deutsches BiomasseForschungsZentrum gemeinnützige GmbH ist die Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV).  
Vertreter der Alleingeschafterin: Staatssekretär Gert Lindemann

Aufsichtsrat:  
Dr. Günther Jikeli, BMELV, Vorsitzender  
Reinhard Kaiser, BMU, stellvertr. Vorsitzender  
Anita Domschke, SMUL  
Dr. Bernd Rittmeier, BMVBS  
Karl Wollin, BMBF

Geschäftsführung:  
Prof. Dr.-Ing. Martin Kaltschmitt (wiss.)  
Susanne Palmke (admin.)

Handelsregister: Amtsgericht Leipzig HRB 23991  
Sitz und Gerichtsstand Leipzig  
Steuernummer: 232/124/01072  
Ust.-IdNr. DE 259357620  
Deutsche Kreditbank AG  
Konto-Nr.: 1001210689  
BLZ 120 300 00

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 <i>Hintergrund und Zielstellung der Expertise</i> .....	1
1.2 <i>Vorgehensweise</i> .....	1
<b>2 Übersicht der untersuchten Bioenergiebereitstellungsketten</b> .....	<b>2</b>
2.1 <i>Prinzipielle Bereitstellungspfade</i> .....	2
2.2 <i>Bioenergiebereitstellungsketten</i> .....	5
2.2.1 <i>Biokraftstoffe</i> .....	6
2.2.2 <i>Wärme</i> .....	7
2.2.3 <i>Kraft-Wärme-Kopplung</i> .....	7
<b>3 Technische Analyse und Bewertung</b> .....	<b>8</b>
3.1 <i>Methodischer Ansatz</i> .....	8
3.1.1 <i>Bilanzgrenzen und Datengrundlage</i> .....	8
3.1.2 <i>Allokationsverfahren</i> .....	9
3.2 <i>Ergebnisse und Fazit</i> .....	10
3.2.1 <i>Flächenerträge für Rohstoffe und Endenergie</i> .....	11
3.2.2 <i>Energiebilanzen und Gesamtwirkungsgrade</i> .....	13
<b>4 Ökonomische Analyse und Bewertung</b> .....	<b>17</b>
4.1 <i>Methodischer Ansatz</i> .....	17
4.1.1 <i>Kostenkalkulationsmodell</i> .....	17
4.1.2 <i>Annahmen und Datengrundlage</i> .....	19
4.2 <i>Ergebnisse und Fazit</i> .....	23
4.2.1 <i>Gestehungskosten der Bioenergiebereitstellungspfade</i> .....	23
4.2.2 <i>THG-Vermeidungskosten</i> .....	26
4.2.3 <i>Haushaltsspezifische Mehrkosten</i> .....	29
4.2.4 <i>Haushaltsspezifische THG-Minderungsmengen</i> .....	32
<b>5 Gesamtbewertung und Schlussfolgerungen</b> .....	<b>33</b>
<b>Literatur- und Referenzverzeichnis</b> .....	<b>37</b>
<b>Anhang</b> .....	<b>43</b>

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Ack.	Ackerland
BHKW	Blockheizkraftwerk
BtL	Biomass to Liquid
BWL	Brennstoffwärmeleistung
Degr	Degradiertes (Land)
DIN	Deutsche Industrienorm
DT	Dampfturbine
EE	Endenergie
e-Pkw	Elektro-Pkw
el	elektrisch
Erück	Ernterückstände
EtOH	Bioethanol
EU	Europäische Union
FAME	Fatty acid methyl ester
FFA	Freie Fettsäuren
FFB	Frischfruchtbündel
FM	Frische Masse
FT	Fischer-Tropsch-Diesel
FWL	Feuerungswärmeleistung
Ges	Gesamt
Getr	Getreide
GT	Gasturbine
GuD	Gas- und Dampfturbine
HE	Hilfsenergie
Heiz.KW	Heizkraftwerk
HHS	Holzhackschnitzel
HP	Hauptprodukt
Hyd	Wasserstoff
KKW	Kohlekraftwerk
Klfeuer	Kleinfeuerungsanlage
KUP	Kurzumtriebsplantage
KP	Kuppelprodukte
KWK	Kraft-Wärme- Kopplung
Lkw	Lastkraftwagen
Pkw	Personenkraftwagen
PME	Palmöl Methylester
PÖL	Pflanzenöl
PR	Produkt
RST	Rohstoff

RME	Rapsöl Methylester
SNG	Synthetic Natural Gas
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell (Brennstoffzelle)
THG	Treibhausgasemissionen
TS	Trockensubstanz
th	thermisch
ZuRo	Zuckerrohr

## 1 EINLEITUNG

### 1.1 Hintergrund und Zielstellung der Expertise

Der WBGU thematisiert in seinem Hauptgutachten 2008 „Nachhaltige Landnutzung und Bioenergie“ (Arbeitstitel) Strategien einer nachhaltigen globalen Landnutzung unter dem Einfluss des Klimawandels. Im Fokus des Gutachtens stehen die energetische Nutzung von Biomasse als klimapolitische Option sowie Energiesicherheit.

Die zu erstellenden Expertisen sollen den Hintergrund für die Bewertung der verschiedenen Nutzungsformen von Biomasse anhand der Nachhaltigkeitskriterien des WBGU dienen sowie möglicherweise auch (neben anderen Informationen) zur Abschätzung eines globalen nachhaltigen Biomassepotenzials herangezogen werden. Dafür ist es das Ziel der Expertise in Zusammenarbeit mit dem Öko-Institut e. V. aus Darmstadt (i) technische, (ii) ökonomische und (iii) ökologische Kennzahlen für abgestimmte, relevante Pfade (Settings respektive Bioenergiebereitstellungsketten) bereitzustellen und selbige Bioenergiebereitstellungsketten anhand dieser Kriterien mit Bezug auf die Leitfrage des Gutachtens im Rahmen der Leitplanken zu untersuchen. Die Leitfrage des Gesamtgutachtens des WBGU, an der sich die zu erstellenden Expertisen orientieren sollen, lautet: Wie ist globale Bioenergienutzung unter Beachtung der Landnutzungskonkurrenzen nachhaltig zu gestalten? Sie umfasst folgende Unterfragen:

- Welche Chancen bietet die Bioenergienutzung vor dem Hintergrund der Erwartungen aus den diversen Politikbereichen?
- Was kann Bioenergie zu einem nachhaltigen Energiesystem beitragen (Verringerung der THG-Emissionen)?
- Welche Risiken sind mit der Bioenergienutzung verbunden (vor allem angesichts von Landnutzungskonkurrenzen)?

### 1.2 Vorgehensweise

Im Vordergrund der Expertise steht dabei die Beantwortung der folgenden Fragen:

- Welche Konversionspfade für die Strom-, Wärme- und Kraftstoffgewinnung weisen die höchste Effizienz auf?
- Welche Konversionspfade versprechen die geringsten Gestehungskosten bzw. die niedrigsten CO<sub>2</sub>- respektive THG-Vermeidungskosten?
- Welche Technologien und Innovationen erweisen sich aus der Fragestellung heraus als besonders förderungswert?

Die Arbeitsinhalte und Vorgehensweise dafür ist unter Berücksichtigung der gemeinsam durch das Deutsches BiomasseForschungsZentrum gGmbH (ehemals Institut für Energetik und Umwelt gGmbH) und das Öko-Institut e. V. in nachfolgender Abb. 1 im Überblick dargestellt.

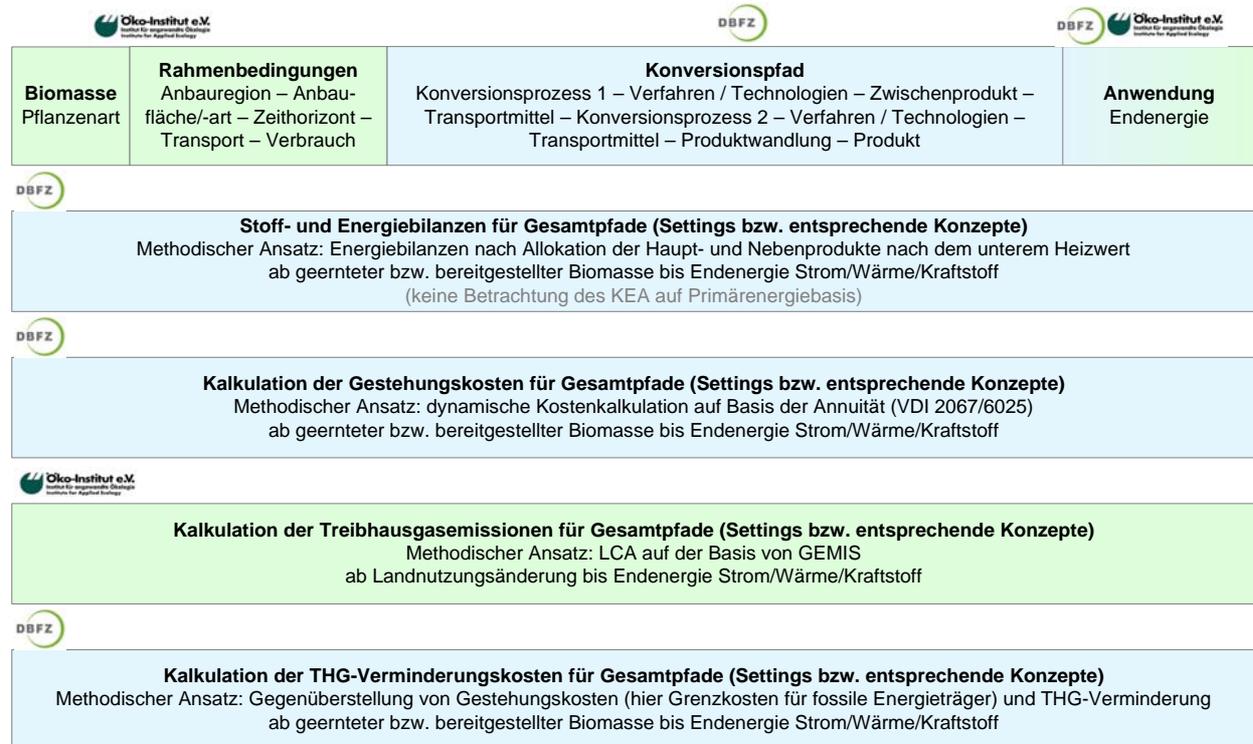


Abb. 1 Arbeitsinhalte und Vorgehensweise

## 2 ÜBERSICHT DER UNTERSUCHTEN BIOENERGIEBEREITSTELLUNGSKETTEN

### 2.1 Prinzipielle Bereitstellungspfade

Biomasse kann mit den unterschiedlichsten Verfahren gewonnen werden; ebenso vielfältig sind die Möglichkeiten der weiteren Verarbeitung und Umwandlung in feste, flüssige und gasförmige Bioenergieträger. Diese können dann in den verschiedenen energietechnischen Anlagen zu Wärme und Kraft für die Stromerzeugung oder zur Anwendung als Kraftstoff umgesetzt werden. Generell kann dabei eine Anbau- und Aufbereitungsphase bis zur Bereitstellung des Endenergieträgers – hier explizit die flüssigen Biobrennstoffe – und eine Nutzungsphase zur Bereitstellung des gewünschten Nutzens – hier explizit stationäre reine Wärmebereitstellung – unterschieden werden.

Die Mehrzahl der möglichen Produktionsrouten und damit verbunden die Optionen der Brennstoffverteilung und -nutzung sind in Abb. 2 veranschaulicht.

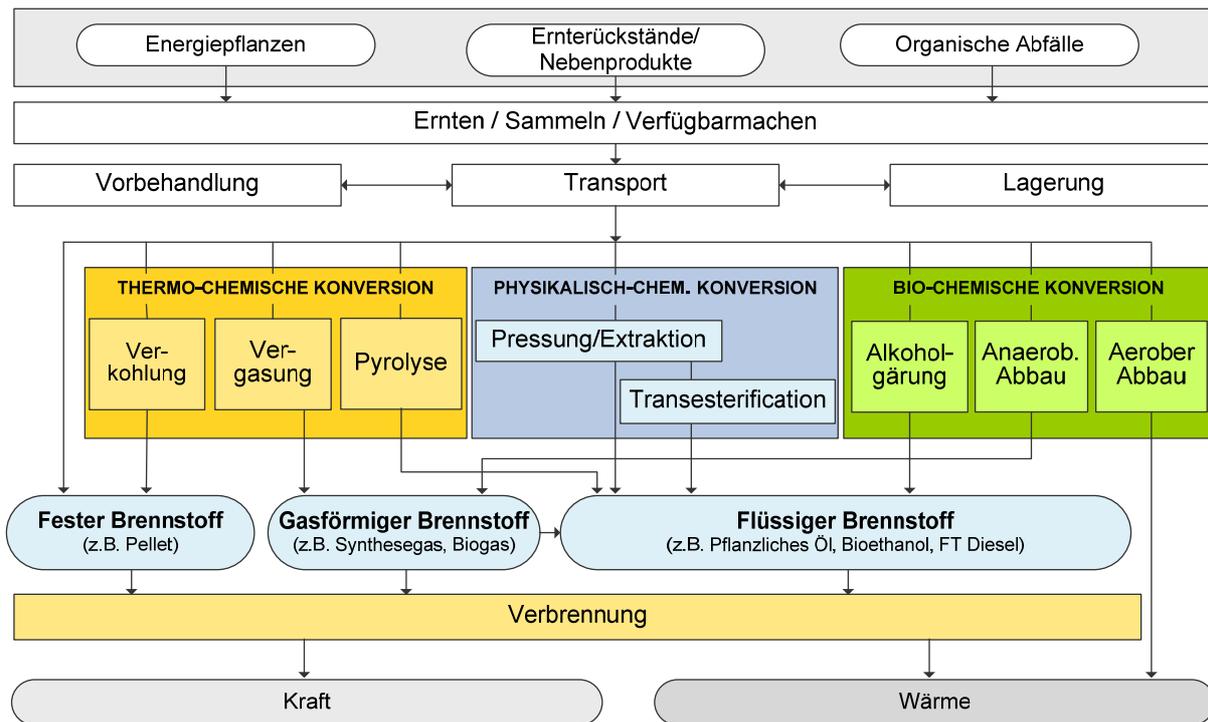


Abb. 2 Bereitstellungspfade zur Nutzenergiebereitstellung aus biogenen Energieträgern /1/

Je nach Art der Biomassekonversion („Veredelungsverfahren“) werden generell drei wesentliche Pfade unterschieden:

### Thermo-chemische Konversion

Durch eine thermo-chemische Konversion (Vergasung, Pyrolyse und Verkohlung) erfolgt die Umwandlung von zumeist festen Bioenergieträgern unter dem Einfluss von Wärme in flüssige und/oder gasförmige Sekundärenergieträger. Dabei sind für die Biobrennstoffherzeugung folgende Konversionsrouten von Bedeutung:

- Bei der Vergasung wird Biomasse bei Temperaturen von 600 bis 1.500 °C in brennbare Gase umgewandelt. Dabei wird dem Prozess ein sauerstoffhaltiges Vergasungsmittel zugeführt, durch das u. a. der in der Biomasse enthaltene Kohlenstoff in Kohlenstoffmonoxid umgewandelt werden kann. Dieses geschieht bei gleichzeitiger teilweiser Verbrennung des Einsatzmaterials, wodurch die erforderliche Prozesswärme bereitgestellt wird /1/. Das gewonnene Rohgas kann direkt zur Wärme- und Stromerzeugung eingesetzt werden. Zudem kann das erzeugte Rohgas durch weitere Umwandlungen (Gasreinigung und -konditionierung) auch in flüssige Sekundärenergieträger (z. B. Methanol, Fischer-Tropsch, Dimethylether, Synthetic Natural Gas, Wasserstoff) umgewandelt werden, die dann außer u. a. in Blockheizkraftwerken (BHKW) ggf. auch im Verkehrsbereich einsetzbar sind.
- Bei der Verflüssigung, der so genannten Pyrolyse, wird feste Biomasse unter möglichst hoher Ausbeute zu flüssigen Komponenten umgewandelt. Grundlage dafür ist die pyrolytische Zersetzung der organischen Stoffe bei hohen Temperaturen sowie unter

Sauerstoffabschluss. Während das Pyrolyseöl generell direkt genutzt werden könnte, ist das Pyrolyseslurry (d. h. Gemisch aus Pyrolyseöl und –koks) für eine anschließende Vergasung geeignet /6/.

- Die Verkohlung ist die Veredlung fester Bioenergieträger durch thermochemische Umwandlung zu einem hochwertigeren Festbrennstoff. Die Verkohlung ist grundsätzlich mit der Vergasung oder der Pyrolyse vergleichbar, wobei hier die Reaktionsbedingungen so gewählt werden, dass die Umwandlung mit einem möglichst hohen Feststoffanteil abgeschlossen wird. Die dadurch gewonnene verkohlte Biomasse kann anschließend in entsprechenden Anlagen zur Wärmebereitstellung eingesetzt werden, wobei auch die stoffliche Nutzung möglich ist.

### Physikalisch-chemische Erzeugung

Bei der physikalisch-chemischen Konversion handelt es sich um die Optionen der Brennstoffbereitstellung von biogenen Energieträgern auf Pflanzenölbasis. Der wesentliche Kernprozess besteht aus der Trennung der flüssigen von der festen Phase ölhaltiger Biomassen (z. B. Rapssaat, Sonnenblumensaat). Als primärer Endenergieträger entsteht ein flüssiger Biobrennstoff, der in zwei hauptsächliche Konversionsprozesse unterteilt werden kann:

- Die Trennung der flüssigen von der festen Phase wird durch mechanisches Pressen der ölhaltigen Pflanzensaat realisiert. Das gewonnene Pressrohöl wird je nach Qualitätsansprüchen an das Endprodukt entweder einer einfachen Reinigung unterzogen oder durch Raffination weiterverarbeitet. Der gewonnene ölhaltige, feste Pressrückstand (Presskuchen) kann entweder direkt als Futtermittel oder energetisch genutzt werden oder zur Erhöhung der Ölausbeute weiter verarbeitet werden. Hierbei wird unter Zuführung eines Lösemittels das enthaltene Öl nahezu komplett aus dem Pressrückstand gelöst. Der nun gewonnene ölfreie Pressrückstand (Extraktionsschrot) kann ähnlich wie der Presskuchen verwendet werden. Das Extraktionsrohöl wird üblicherweise mit dem Pressrohöl einer Raffination unterzogen. Das gewonnene Pflanzenöl kann in umgerüsteten mobilen oder stationären Antriebssystemen (d. h. in Blockheizkraftwerken) oder als Brennstoff für Feuerungsanlagen zur ausschließlichen Wärmeerzeugung verwendet werden /1/.
- Zur Verbesserung der Brennstoffeigenschaften kann das gewonnene Pflanzenöl bzw. pflanzliche und tierische Fette durch einen Ver- respektive Umesterungsprozess chemisch zu sog. Fettsäuremethylester (FAME) umgewandelt werden. Bei der Umesterung wird der dreiwertige Alkohol des Pflanzenöls, das Glycerin, durch drei einwertige Alkohole, wie Methanol, verdrängt. Hierdurch wird unter anderem die Viskosität des Pflanzenöls an die Eigenschaften konventioneller Kraftstoffe auf Mineralölbasis angepasst. Hierdurch wird im Gegensatz zu reinem Pflanzenöl auch der Einsatz in herkömmlichen Antriebssystemen (Dieselmotoren) ermöglicht /6/.

## Bio-chemische Erzeugung

Bei der bio-chemischen Konversion erfolgt die Umwandlung dafür geeigneter Bioenergieträger in Sekundärenergieträger durch den gezielten Einsatz von Mikroorganismen und damit durch biologische Prozesse. Für eine Brenn- respektive Kraftstoffproduktion sind dabei die nachfolgend aufgeführten Routen relevant:

- Durch alkoholische Gärung erfolgt die Konversion von zucker-, stärke- und zellulosehaltiger Biomasse. Hierbei werden die Kohlenhydrate der Biomassen mit Hilfe von Mikroorganismen gespalten und über mehrere Zwischenprodukte zu Ethanol umgewandelt. Während zuckerhaltige Biomasse direkt vergoren werden kann, müssen stärke- und zellulosehaltige Biomassen zunächst enzymatisch in Einfachzucker umgewandelt werden. Nach der Fermentation mit Hefe wird das in der sog. fermentierten Maische enthaltene Ethanol über Destillation, Rektifikation und Entwässerung (Absolutierung) gereinigt.
- Bei der anaeroben Fermentation (d. h. Vergärung unter Sauerstoffabschluss) findet die Konversion von organischen Substraten zu einem Gasmischung statt, das zu etwa zwei Dritteln aus Methan besteht. Die Vergärung besteht aus mehreren Teilprozessen, wobei organische Verbindungen durch säurebildende und methanbildende Bakterien abgebaut werden. Während Biogas für die KWK-Nutzung direkt genutzt werden kann, muss es für eine Einspeisung in das Erdgasnetz (z. B. für den Einsatz als Kraftstoff) durch Gasreinigung auf Erdgasqualität (Biomethan) aufbereitet werden /7/.

## 2.2 Bioenergiebereitstellungsketten

Die Abstimmung der zu untersuchenden Bioenergiekonversionsketten erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem WGBU sowie dem Öko-Institut e. V. Ausgehend von mehr als 125 zunächst vorgeschlagenen Bioenergiebereitstellungsketten werden die folgenden etwa 65 Bioenergiebereitstellungsketten im Rahmen dieser Expertise nach technischen und ökonomischen Kriterien untersucht. Dazu wurden die einzelnen Bioenergiebereitstellungsketten aufbauend auf der vorhandenen Datenbasis des Instituts für Energetik und Umwelt gGmbH mit konkreten praxisnahen Modellkonzepten entlang der Bereitstellungsketten hinterlegt (Anhang, Tab. 6), welche nachfolgend für die einzelnen Bereitstellungspfade mit jeweils deutlich unterschiedlichen Versorgungsaufgaben hinsichtlich der Nutzenergie kurz charakterisiert werden.

Die Abkürzungen zu den einzelnen untersuchten Bioenergiebereitstellungsketten setzen sich nach folgendem Schlüssel zusammen: Rohstoff (RST) – Zwischen-/Endprodukt (Energieträger) – Produktwandlung Zwischen-/Endprodukt – Zeithorizont (heute/2005 bzw. 2030). Eine zusammenfassende Übersicht der Bioenergiebereitstellungsketten kann dem Anhang, Tab. 5 entnommen werden.

### 2.2.1 Biokraftstoffe

Vordergründige Versorgungsaufgabe für die Produktion und Nutzung von Biokraftstoffen ist die Gewährleistung (individueller) Mobilität im Straßenverkehr in Form von per Kraftfahrzeug (hier Pkw) zurückgelegten Entfernungen. Für eine Einschätzung der relativen Vorzüglichkeit im Vergleich zu anderen Bioenergieoptionen werden in der Expertise 25 unterschiedliche Biokraftstoff- respektive Mobilitätsbereitstellungsketten (auf der Basis von Modellkonzepten für die Biokraftstoffproduktion mit einem Biokraftstoffoutput von 1,3 bis 220 MW<sub>KS</sub>) untersucht. Dies umfasst die Produktion und Bereitstellung von

- Bioethanol auf der Basis der alkoholischen Gärung von Mais, Zuckerrohr, Getreide und Stroh und dessen Einsatz in einem Ottomotor respektive FFV (FlexiFuel Vehicle) mit einem spezifischen Streckenkraftstoffverbrauch<sup>1</sup> von 2,75 MJ<sub>KS</sub>/km bei 26 % Gesamtfahrzeugwirkungsgrad für 2005 und 2,09 MJ<sub>KS</sub>/km bei 29 % für 2030,
- Pflanzenöle und Biodiesel auf der Basis der Extraktion und Ver-/Umesterung von Rapsaaten, Palmölfrüchten, Jatrophanüssen und Altspeiseölen respektive tierischen Fetten und dessen Einsatz in Dieselmotoren mit einem spezifischen Streckenkraftstoffverbrauch von 2,31 MJ<sub>KS</sub>/km bei 29 % Gesamtfahrzeugwirkungsgrad für 2005 und 1,93 MJ<sub>KS</sub>/km bei 32 % für 2030,
- Biomethan auf der Basis der anaeroben Fermentation von Maissilage, Grassilage, Rutenhirse, Gülle, Bioabfall zu Biogas, dessen Verstromung in einem BHKW zur Strombereitstellung für Elektromotoren mit einem spezifischen Streckenverbrauch von 0,95 MJ<sub>el</sub>/km bei 78 % Gesamtfahrzeugwirkungsgrad respektive Aufbereitung des Biogases zu Biomethan und Einsatz in einem Gas-Ottomotor (CNG-Pkw) mit einem spezifischen Streckenkraftstoffverbrauch von 2,75 MJ<sub>KS</sub>/km bei 26 % Gesamtfahrzeugwirkungsgrad für 2005 und 2,09 MJ<sub>KS</sub>/km bei 29 % für 2030,
- Biomethan auf der Basis der Biomassevergasung und Kraftstoffsynthese von Pappel respektive Weide und Restholz und Einsatz in einem Gas-Ottomotor (CNG-Pkw) mit einem spezifischen Streckenkraftstoffverbrauch von 2,09 MJ<sub>KS</sub>/km bei 29 % Gesamtfahrzeugwirkungsgrad für 2030,
- Fischer-Tropsch-Diesel auf der Basis Biomassevergasung und Kraftstoffsynthese von Pappel respektive Weide und Restholz und dessen Einsatz in Dieselmotoren mit einem spezifischen Streckenkraftstoffverbrauch von 1,93 MJ<sub>KS</sub>/km bei 32 % Gesamtfahrzeugwirkungsgrad für 2030,
- Biowasserstoff auf der Basis der Biomassevergasung von Restholz und dessen Einsatz in Brennstoffzellenantrieben mit einem spezifischen Streckenkraftstoffverbrauch von 1,36 MJ<sub>KS</sub>/km bei 39 % Gesamtfahrzeugwirkungsgrad für 2030,

<sup>1</sup> Die Angaben zum spezifischen Kraftstoffstreckenverbrauch (inkl. Berücksichtigung eines entsprechenden Fahrzeugzyklus für Pkw) beziehen sich auf die aktuelle GEMIS-Datenbank und wurden im Rahmen des Verbundvorhaben „Renewability – Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030“ ermittelt und validiert. Dabei wird für Otto- und Gasottofahrzeuge der gleiche Verbrauch unterstellt unter Berücksichtigung weitgehend analog Motoreffizienzen.

- Restholz auf der Basis der Biomasseverbrennung in einem Dampfturbine-Heizkraftwerk zur Strombereitstellung für Elektromotoren mit einem spezifischen Streckenverbrauch von  $0,95 \text{ MJ}_{\text{el}}/\text{km}$  bei 78 % Gesamtfahrzeugswirkungsgrad.

### 2.2.2 Wärme

Die Versorgungsaufgabe für die Bereitstellung von Wärme ist im Regelfall gleichzusetzen mit Raum- respektive Prozesswärme, wobei bei den hier betrachteten vier Bioenergiebereitstellungsketten die Bereitstellung von Raumwärme im Vordergrund steht. Die betrachteten Modellkonzepte umfassen Kleinf Feuerungsanlagen auf der Basis von Pellets mit einer Feuerungswärmeleistung von  $15 \text{ kW}_{\text{FWL}}$  (unterstellter Wirkungsgrad  $\eta_{\text{th}}$  je nach Rohstoff 70 bis zu 80 %). Rohstoffbasis für die Pelletproduktion sind für den heutigen Zeithorizont Restholz und Stroh, für den zukünftigen Zeithorizont Rutenhirse und Pappel respektive Weide aus Kurzumtriebsplantagen.

### 2.2.3 Kraft-Wärme-Kopplung

Der Einsatz von KWK-Anlagen dient im Regelfall der vordergründigen Versorgungsaufgabe der Stromproduktion und Bereitstellung unter Ausnutzung der anfallenden Wärme zu Bereitstellung von Raum- respektive Prozesswärme. Dazu werden 41 unterschiedliche KWK-Modellkonzepte im Leistungsbereich von  $0,45$  bis  $75 \text{ MW}_{\text{el}}$  (bis  $50 \text{ MW}_{\text{th}}$ ) untersucht, dies umfasst

- Dezentrale BHKW basierend auf Gas-Ottomotoren unter Einsatz von zuvor erzeugtem Biogas respektive Biomethan auf der Basis von Maissilage, Grassilage, Rutenhirse, Gülle, Bioabfall ( $\eta_{\text{el}}$  38 % und  $\eta_{\text{th}}$  44 %),
- Dezentrale BHKW basierend auf Dieselmotoren unter Einsatz von Rapsöl, Palmöl und Jatrophaöl ( $\eta_{\text{el}}$  38 % und  $\eta_{\text{th}}$  44 %),
- Brennstoffzelle (SOFC, solid oxide fuel cell; hier in Kombination mit einer Mikrogasturbine mit  $\eta_{\text{el}}$  48 % und  $\eta_{\text{th}}$  23 %) unter Einsatz von zuvor erzeugtem Biogas auf der Basis von Maissilage, Grassilage, Rutenhirse, Gülle, Bioabfall respektive unter Einsatz von Reingas aus der Biomassevergasung von Pappel respektive Weide und Restholz und anschließenden Gasreinigung,
- Gasturbine unter Einsatz von Reingas aus der Biomassevergasung von Pappel respektive Weide und Restholz und anschließenden Gasreinigung ( $\eta_{\text{el}}$  25 % und  $\eta_{\text{th}}$  55 %),
- Zentrales GuD Einsatz von zuvor erzeugtem Biomethan auf der Basis von Maissilage, Grassilage, Rutenhirse, Gülle, Bioabfall respektive unter Einsatz von Reingas aus der Biomassevergasung von Pappel respektive Weide und Restholz und anschließenden Gasreinigung ( $\eta_{\text{el}}$  43 % und  $\eta_{\text{th}}$  30 %),
- Zentrales Dampfturbinen-Heizkraftwerk unter Einsatz von Hackschnitzeln bzw. Häckselgut aus Pappel respektive Weide und Restholz sowie Stroh ( $\eta_{\text{el}}$  23 % und  $\eta_{\text{th}}$  60 %),

- Mitverbrennung in zentralem Steinkohlekraftwerk unter Einsatz von Pellets auf der Basis von Pappel respektive Weide und Restholz sowie Stroh ( $\eta_{el}$  45 %).

### 3 TECHNISCHE ANALYSE UND BEWERTUNG

Ziel der technischen Analyse und Bewertung ist es im Rahmen dieser Expertise, die unterschiedlichen Bioenergiebereitstellungsketten zunächst hinsichtlich der entlang der Konversionskette notwendigen Energieaufwendungen und daraus ableitend hinsichtlich ihrer Netto-Gesamteffizienzen (d. h. unter Berücksichtigung der jeweils anfallenden Kuppelprodukte) zu analysieren und gegenüberzustellen.

#### 3.1 Methodischer Ansatz

##### 3.1.1 Bilanzgrenzen und Datengrundlage

Die Bilanzierung spezifischer Energieaufwendungen der einzelnen Bioenergiebereitstellungsketten (vgl. Kapitel 2.2) erfolgt entlang der Bioenergiebereitstellungskette (d. h. ausgehend vom Rohstoffanbau, dem Rohstofftransport, den verschiedenen Konversionsschritten bis hin zum Produkttransport und der Produktwandlung in die Endenergieträger Wärme, Strom und Biokraftstoffe). Dazu werden die folgenden Bilanzgrenzen sowie Teilabschnitte der Bereitstellungskette unterstellt.

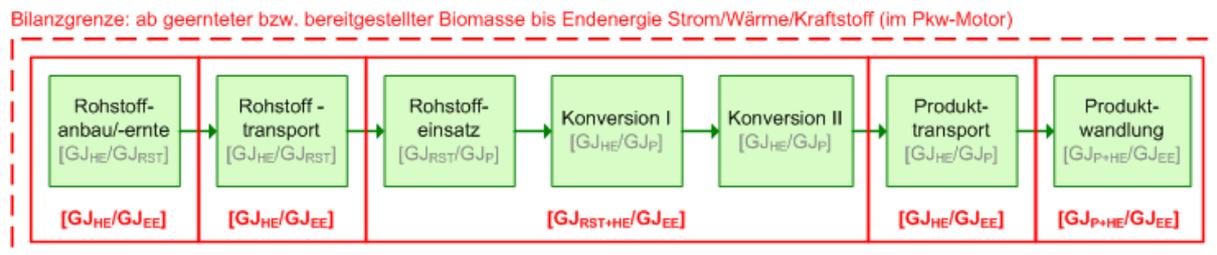


Abb. 3 Bilanzgrenzen der Bioenergiebereitstellungskette

Dies umfasst in einem ersten Schritt die Bilanzierung der Bereitstellungsketten bis zur Endenergie bezogen auf das jeweilige Hauptprodukt (z. B. Biokraftstoff). Darauf aufbauend wird in einem Folgeschritt die Produktwandlung für die jeweilige Versorgungsaufgabe (z. B. Strom, Wärme, Mobilität) bilanziert. Spezifisch für den Einsatz von Biokraftstoffen im Fahrzeug (hier Pkw bzw. elektrischer Pkw) wird der jeweilige spezifische Streckenverbrauch, welcher etwaige Energieverluste über das Fahrzeuggetriebe zur Umwandlung der mechanischen Energie und Fortbewegung (d. h. inklusive Reibungsverluste) über einen definierten Fahrzyklus (bestehend aus Fahrten inner- und außerorts sowie Autobahn) berücksichtigt. Entsprechende Leitungs- und Netzübertragungsverluste bei der Strom-, Wärme- und Kraftstoffdistribution zur Nutzung beim Endverbraucher werden aus Gründen der Vereinfachung nicht inkludiert.

Neben den charakteristischen Stoff- und Energieströmen der einzelnen spezifischen Modellkonzepte (Anhang, Tab. 6), die im wesentlichen auf der Datenbasis des Deutschen

BiomasseForschungsZentrums gGmbH (ehemals Instituts für Energetik und Umwelt gGmbH) beruhen, wurde mit dem Ziel einer einheitlichen Datenbasis für die technisch-ökonomische und ökologische Bilanzierung für die rohstoff- und produktspezifischen Stoffdaten und flächen-spezifischen Rohstoffertäge auf die *GEMIS*-Datenbank für Biobrennstoffe zurückgegriffen. Zusammenfassend ist das Vorgehen und die verwendeten Datengrundlagen unter Abb. 4 dargestellt.

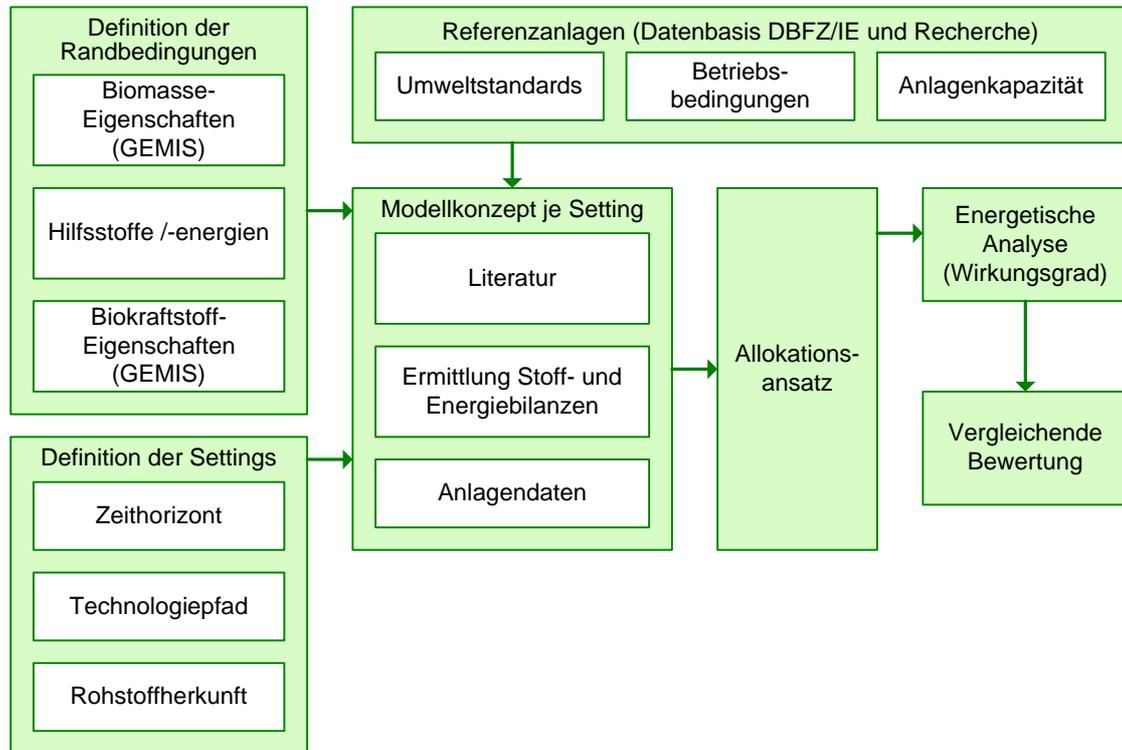


Abb. 4 Vorgehensweise und Datenbasis

### 3.1.2 Allokationsverfahren

Vor dem Hintergrund einheitlicher methodischer Vorgehensweisen bei der Bilanzierung der spezifischen Energieaufwendungen und der spezifischen Treibhausgasemissionen (siehe Abb. 1) erfolgt eine Verteilung der Energieaufwendungen zwischen den bereitgestellten Haupt- und Koppelprodukten. Dabei gibt es verschiedene Allokationsverfahren (z. B. Allokation nach dem unteren Heizwert, Wirkungsgradmethode, Finnische Methode) mit jeweils unterschiedlichen quantitativen Effekten auf die Ergebnisse, die prinzipiell zur Anwendung kommen können /5/. Der jeweilige Aufteilungsschlüssel richtet im Rahmen dieser Expertise nach der Art der anfallenden Haupt- und Kuppelprodukte, wobei bei den KWK-Bereitstellungsketten unterstellt wird, dass Strom jeweils das Hauptprodukt und Wärme das Kuppelprodukt darstellt.

Im Rahmen dieser Expertise erfolgt die Ermittlung der Allokationsfaktoren für entlang der Bilanzgrenzen (siehe Abb. 3 ) auf Basis der nachfolgend erläuterten Methoden:

- *Heizwertmethode*, wonach die Produkte der Masseströme der Haupt- und Kuppelprodukte (z. B. Naphtha, Presskuchen) und produktspezifischen unteren Heizwerte ins Verhältnis

zur Summe beider o. g. Produkte gesetzt und die Energieaufwendungen entsprechend der Quotienten aufgeteilt werden. Fallen Strom und/oder Wärme als Kuppelprodukte an, wie es bei einigen Biokraftstoffbereitstellungsketten der Fall ist, so werden diese als Strom- respektive Wärmeäquivalente berücksichtigt. Das Stromäquivalent wird für die Erzeugung von 1 kWh<sub>el</sub> Strom vereinfacht ein Mix aus jeweils 50 % Erdgas-GuD ( $\eta_{el}$  von 60 %) und Steinkohlekraftwerken ( $\eta_{el}$  von 44 %) angenommen. Als Wärmeäquivalent wird ein Erdgasbrennwertkessel ( $\eta_{th}$  von 95 %) zugrunde gelegt.

Gl. 1

$$AF = \frac{\dot{m}_{HP} \cdot H_{u,HP}}{\dot{m}_{HP} \cdot H_{u,HP} + \sum (\dot{m}_{KP,n} \cdot H_{u,KP,n}) + W_{el} \cdot F_{el-\ddot{A}qu} + W_{th} \cdot F_{th-\ddot{A}qu}}$$

$AF$  - Allokationsfaktor;  $\dot{m}_{HP}$  - Massestrom Hauptprodukt;  $H_{u,HP}$  - unterer Heizwert Hauptprodukt;  $\dot{m}_{KP,n}$  - Massestrom Koppelprodukt(e);  $H_{u,KP,n}$  - unterer Heizwert Koppelprodukt(e);  $W_{el}$  - Strom als Koppelprodukt;  $F_{el-\ddot{A}qu}$  - Stromäquivalent;  $W_{th}$  - Wärme als Nebenprodukt;  $F_{th-\ddot{A}qu}$  - Wärmeäquivalent

- *Wirkungsgradmethode*, wonach die Einzelwirkungsgrade der jeweiligen KWK-Technologie unter Berücksichtigung der energetischen Wertigkeit der Energieform für Strom und Wärme ins Verhältnis zur Summe beider Wirkungsgrade gesetzt und die Energieaufwendungen entsprechend der beiden Quotienten aufgeteilt werden.

Gl. 2

$$AF_{el} = \frac{2,5 \cdot \eta_{el}}{(2,5 \cdot \eta_{el} + 1 \cdot \eta_{th})}$$

$AF$  - Allokationsfaktor;  $\eta_{th}$  - Einzelwirkungsgrad Wärme;  $\eta_{el}$  - Einzelwirkungsgrad Strom

### 3.2 Ergebnisse und Fazit

Die Bewertung der technischen Aspekte erfolgt in dieser Expertise anhand der spezifischen Flächenerträge für die verschiedenen Anbaubiomassen, Energieaufwendungen entlang der Bereitstellungskette und der Gesamtwirkungsgrade. Die Ergebnisse der Bilanzierung werden nachfolgend im Vergleich für die verschiedenen Bioenergiebereitstellungsketten für Biokraftstoffe, Wärme und KWK vorgestellt und diskutiert mit dem Ziel einen Beitrag zur Beantwortung der o. g. Fragestellungen (vgl. Kapitel 1.2) zu leisten. Dabei wird unterstellt, dass die jeweiligen Versorgungsaufgaben (d. h. Bereitstellung von Raumwärme, Strom und Mobilität) jeweils im Energiesystem die gleiche Priorität haben. Die Einzelwerte zu den jeweiligen Diagrammen können dem Anhang entnommen werden.

### 3.2.1 Flächenerträge für Rohstoffe und Endenergie

Um mit Bezug auf eine effiziente Nutzung von Agrar- und Nutzflächen eine Vorzüglichkeit der jeweiligen eingesetzten Rohstoffe und daraus hergestellten und bereitgestellten Endenergie zu identifizieren, sind in Abb. 5 die flächenspezifischen Rohstoffträge bezogen auf  $t_{TS}/(\text{ha a})$  sowie die ermittelten flächenspezifische Endenergieerträge bezogen auf  $\text{GJ}_{EE}/(\text{ha a})$  dargestellt.

Mit Ausnahme von kommunal pro Kopf anfallender Bioabfall sowie Altspeiseöle/tierische Fette sowie Gülle kann den unterschiedlichen Anbau- und Anfallbiomassen ein typischer flächenspezifischer Rohstofftrag zugewiesen werden. Dieser ist für Restholz mit  $0,85 t_{TS}/(\text{ha a})$  am geringsten und für brasilianisches Zuckerrohr mit etwa  $44,2 t_{TS}/(\text{ha a})$  am höchsten. Weitere hinsichtlich des Flächenertrags vielversprechende Rohstoffe sind Maissilage ( $14,5 t_{TS}/(\text{ha a})$ ), Rutenhirse ( $13,5 t_{TS}/(\text{ha a})$ ), Grassilage ( $9,13 t_{TS}/(\text{ha a})$ )<sup>2</sup>, KUP, wie Pappel respektive Weide ( $8,3 t_{TS}/(\text{ha a})$ ) und (Weizen-)Stroh ( $8,1 t_{TS}/(\text{ha a})$ ). Ölpalmpflanzen erreichen etwa  $3,75 t_{TS}/(\text{ha a})$ , Getreide  $6,4 t_{TS}/(\text{ha a})$ , Ernterückstände  $5,2 t_{TS}/(\text{ha a})$ . Vergleichsweise ungünstig sind bezogen auf den Rohstoff Rapssaaten mit  $3,3 t_{TS}/(\text{ha a})$  und Jatrophanüsse mit  $3,9 t_{TS}/(\text{ha a})$  und  $2,11 t_{TS}/(\text{ha a})$  beim Ackerland und degradierten Land respektive.

Bei der Bewertung der flächenspezifischen Endenergieerträge sind stark vereinfacht nur die aus den spezifischen Rohstoffträgen resultierenden Erträge bezogen auf die Endenergien Kraftstoff im Pkw, Wärme und Strom berücksichtigt. Dabei schneiden die Bioenergiebereitstellungsketten besonders gut ab, die einerseits auf der Basis von Rohstoffen mit einem hohen flächenspezifischen Rohstofftrag (insbesondere bei der Nutzung von Ganzpflanzen) hergestellt werden und zudem entlang der Gesamtbereitstellungskette (insbesondere mit Bezug auf Konversion und Produktwandlung) über einen vergleichsweise hohen Gesamtwirkungsgrad respektive niedrige spezifischen Energieaufwendungen verfügen. Zudem zeigen sich die aus der Methodik für die Bilanzierung (ohne/mit Allokation) der Energieaufwendungen resultierenden Unterschiede. Während unter den Biokraftstoffoptionen bei der schon heute etablierten Ethanolproduktion auf Zuckerrohrbasis die höchsten Erträge erzielbar sind, gilt selbiges für den zukünftigen Einsatz von Strom aus Hirse-Biogasanlagen in Elektro-Pkw. Hohe Erträge sind ebenso durch den Einsatz von Maissilage in Biogasanlagen und von KUP in Bio-SNG-Anlagen zur Bereitstellung von Biomethan als Kraftstoff zu erwarten. Dies gilt weitgehend analog für die Wärmebereitstellung, wenn Pellets auf Basis von Hirse und KUP Anwendung finden. Gleichfalls hohe Erträge im KWK-Bereich werden durch die Biogas-/Biomethananwendungen auf der Basis von Hirse und Maissilage erzielt, wenngleich mit Bezug auf die Gesamteffizienz der Konversionsketten zukünftige Anwendungen (z. B. SOFC, GuD) nicht signifikant bessere Erträge aufweisen. Bioenergiebereitstellungsketten aller Versorgungsaufgaben auf der Basis von Restholz weisen hingegen die geringsten Flächenerträge auf. Diese und weitere Werte können der Ergebnisübersicht in Anhang entnommen werden.

<sup>2</sup> Hier berücksichtigt als Mix mit Gülle, der kein flächenspezifischer Ertrag zugewiesen werden kann. Die Erträge resultieren daher allein aus der Grassilage; gleiches gilt für die Ernterückstände.

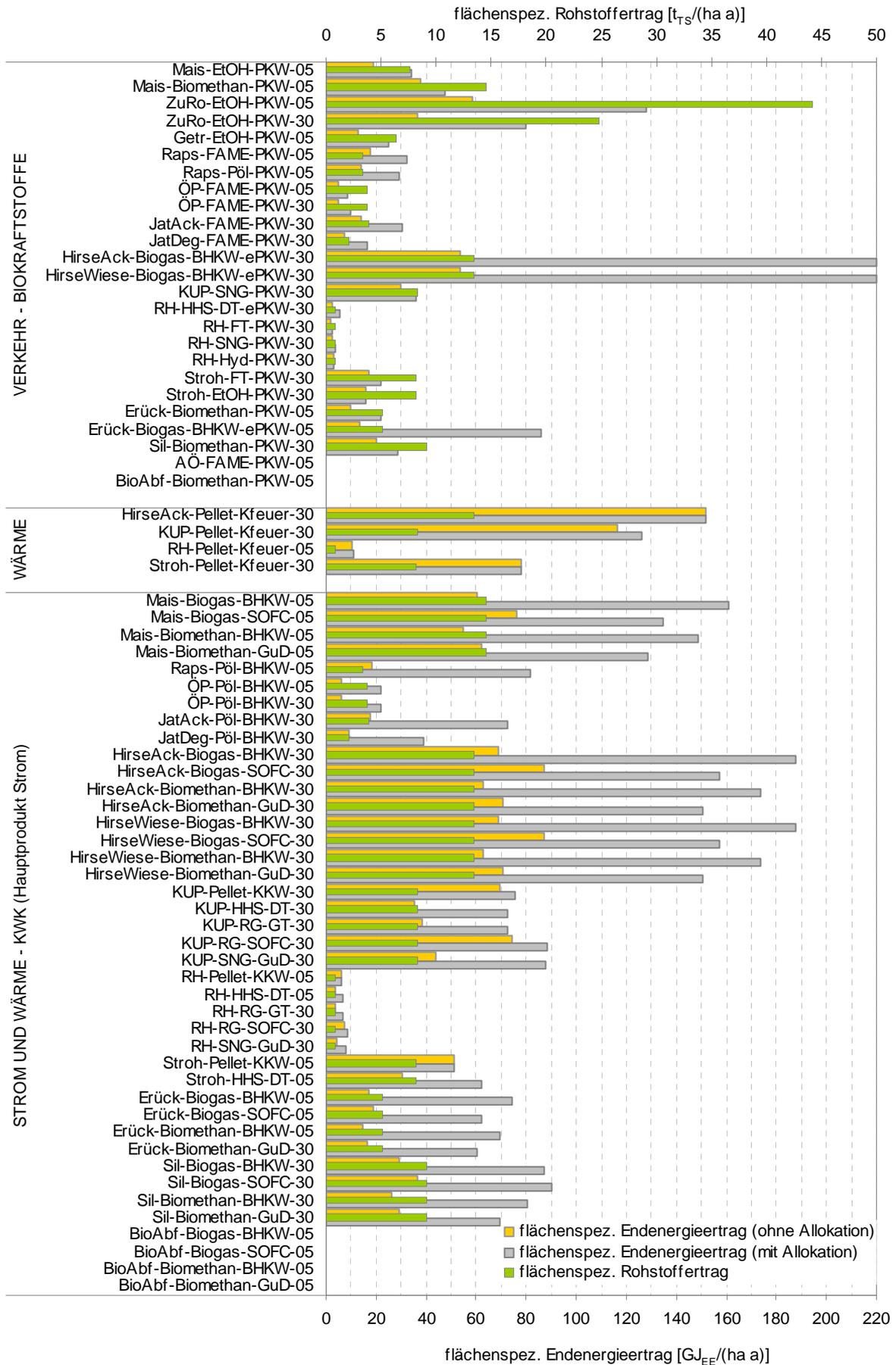


Abb. 5 Flächenspezifische Rohstoff- und Endenergieerträge

Rückschlüsse mit Bezug auf Flächennutzungskonkurrenzen können aus dieser Kennzahl nur sehr eingeschränkt gezogen werden, da in die Bewertung dieses Aspekte deutlich vielschichtiger Aspekte eine Rolle spielen (u. a. geographische und volkswirtschaftlichen Rahmenbedingungen).

### 3.2.2 Energiebilanzen und Gesamtwirkungsgrade

Die ermittelten Ergebnisse für die spezifischen Energieaufwendungen inklusive Berücksichtigung der Allokation (vgl. Kapitel 3.1.2) zeigt Abb. 6; darüber hinaus sind selbige im Anhang zu finden. Demnach liegen die energiespezifischen Aufwendungen je  $GJ_{EE}$  für den Einsatz von Biokraftstoff mit 1,2 bis 8,8  $GJ_{GES}/GJ_{EE}$  innerhalb einer großen Bandbreite mit Maximalwerten auf einem vergleichsweise hohen Niveau. Dieses ergibt sich jedoch aus den teils sehr komplexen Kraftstoffproduktionsverfahren sowie der anschließenden Berücksichtigung des effektiven Kraftstoffverbrauchs für die Bereitstellung von Endenergie in Form der Fortbewegung in einem Pkw (vgl. Kapitel 2.2.1). Im Regelfall günstiger sind systembedingt die Wärme- (1,3 bis 1,9  $GJ_{GES}/GJ_{EE}$ ) und KWK-Optionen (1,1 bis 2,9  $GJ_{GES}/GJ_{EE}$ ). Insgesamt stammt der überwiegende Teil der spezifischen Energieaufwendungen aus dem Rohstoffeinsatz bei der Konversion sowie aus der Produktwandlung, während aus bei Biomasseanbau und -verfügbarmachung sowie beim Transport der Rohstoffe und der Produkte nur in Einzelfällen zusätzliche Energieaufwendungen von Relevanz sind. Um eine unmissverständliche Darstellung zu gewährleisten, werden in Abb. 6 zum einen die Einzelbeiträge bis zur Bereitstellung des Brennstoffprodukts (bezogen auf  $GJ_{Produkt}$ ), zum anderen der Beitrag der Produktwandlung (bezogen auf  $GJ_{Endenergie}$ ) jeweils getrennt dargestellt.

In Abb. 6 ist der Gesamtwirkungsgrad und damit der Kehrwert der oben benannten spezifischen Gesamtenergieaufwendungen ersichtlich, vgl. Gl. 3:

$$\eta_{GES} = \frac{\text{Endenergie}}{\text{Gesamte Energieaufwendung}} = \frac{E_{EE}}{E_{GES}} = \frac{1}{E_{GES} / E_{EE}} \quad \text{Gl. 3}$$

Innerhalb der Biokraftstoffe weisen die Bioenergiebereitstellungsketten mit dem Einsatz von biogenem Strom in zukünftigen Elektro-Pkw eine besondere Vorzüglichkeit, deren Ursache zum einen in der effizienten Stromproduktion (vgl. auch KWK-Pfade) und zum anderen dem Einsatz dieses Stromes in modernen Elektromotor-Pkws liegt. Für den Einsatz in Verbrennungsmotoren werden ebenfalls vergleichsweise geringe Energieaufwendungen entlang der Gesamtkette erforderlich, wenn Biomethan auf Basis von Biogas und Bio-SNG oder Wasserstoff eingesetzt wird. Innerhalb der Bioenergiebereitstellungsketten für Verbrennungsmotoren den Einsatz von Pflanzenölen bzw. Biodiesel ist der direkte Rapsöleinsatz aus energetischer Sicht zu präferieren, bei Biodiesel ist es zunächst der Einsatz von Altpeiseölen und tierischen Fetten, der effizienter ist als der auf Basis von Palmöl, wiederum gefolgt von Rapsöl und letztlich Jatrophaöl. Die Aufwendungen zur Herstellung und Nutzung von Ethanol sind zumeist un-

günstiger als für Biodiesel, wobei der Einsatz von Zuckerrohr die vielversprechendste Variante und der für Stroh die energieaufwendigste Option darstellt, trotz der jeweils berücksichtigten Koppelprodukte.

Innerhalb der Wärmebereitstellungsketten resultieren die Unterschiede der spezifischen Aufwendungen im wesentlichen aus der Rohstoffkonversion; diese sind vergleichsweise hoch, wenn Hirsepellets zum Einsatz kommen und günstiger, wenn KUP-Pellets genutzt werden.

Innerhalb der KWK-Bereitstellungsketten werden je nach Bereitstellungskette und Produktwandlung deutliche Unterschiede sichtbar. Sonderfälle stellen dabei die bilanzierten Konversionsketten zur Konversion von Hackschnitzeln auf Pappel- respektive Weidebasis sowie Restholzbasis zu Strom in Dampfturbinenheizkraftwerken sowie Vergasungsanlagen mit nachgeschalteten Gasturbinen respektive SOFC dar. Für diese war eine aufgeschlüsselte Bilanzierung inklusive der bilanzgrenztechnischen Trennung von Konversion und Produktwandlung nur sehr eingeschränkt möglich, so dass diese als ein Block ausgewiesen werden. Aus energiebilanzieller Sicht wenig vorteilhaft ist die Mitverbrennung von Stroh- und Restholzpellets in heutigen Steinkohlekraftwerken zur reinen Stromerzeugung einzustufen. Unter den heutigen Optionen zur KWK-Bereitstellung erweisen sich neben dem Einsatz von Restholzhackschnitzel und Strohhäcksel in Dampfturbinenheizkraftwerken. Beim Vergleich der heutigen BHKW-Anwendungen schneiden rapsölbetriebene BHKW effizienter ab als Biogas- respektive Biomethan-BHKW. Je nach Rohstoff und Anwendung versprechen die zukünftigen Optionen zumeist Vorteile aus energetischer Sicht, wenngleich mit Bezug auf die hier betrachteten Modellfälle keine signifikanten Unterschiede zu erwarten sind. Günstige Option stellt hierbei die Verstromung von Rohgas aus Holz in SOFC mit kombinierten Mikrogasturbinen oder Gasturbinenkraftwerken dar. Vielversprechend ist ebenso der Einsatz von KUP in Dampfturbinenheizkraftwerken und in Form von Pellets zur zukünftigen Mitverbrennung in Steinkohlekraftwerken. Unter den zukünftigen Optionen auf der Basis von Biogas respektive Biomethan erreichen die SOFC- gegenüber den BHKW- und GuD-Anwendungen höhere Effizienzen; dabei macht sich der Aufwand der Biomethanaufbereitung in den Energiebilanzen bemerkbar.

Aufbauend auf den spezifischen Energieaufwendungen sind in Abb. 7 die Gesamtwirkungsgrade (sowohl ohne und mit Allokation) aufgeführt. Diese liegen für KWK-Konversionsketten (mit Allokation) in einer Bandweite von 40 % für die Mitverbrennung von Restholzpellets in Steinkohlekraftwerken bis hin zu 72 % für die BHKW-Nutzung von aus Hirse gewonnenem Biogas; von 53 bis 76 % für die mit Pellets betriebenen Kleinfeuerungsanlagen für die Wärmebereitstellungsketten und 11 bis 33 % beim Einsatz von Biokraftstoffen in Pkw mit Verbrennungsmotor respektive 36 bis 84 % beim Einsatz von biogenem Strom in zukünftigen Elektro-Pkw.

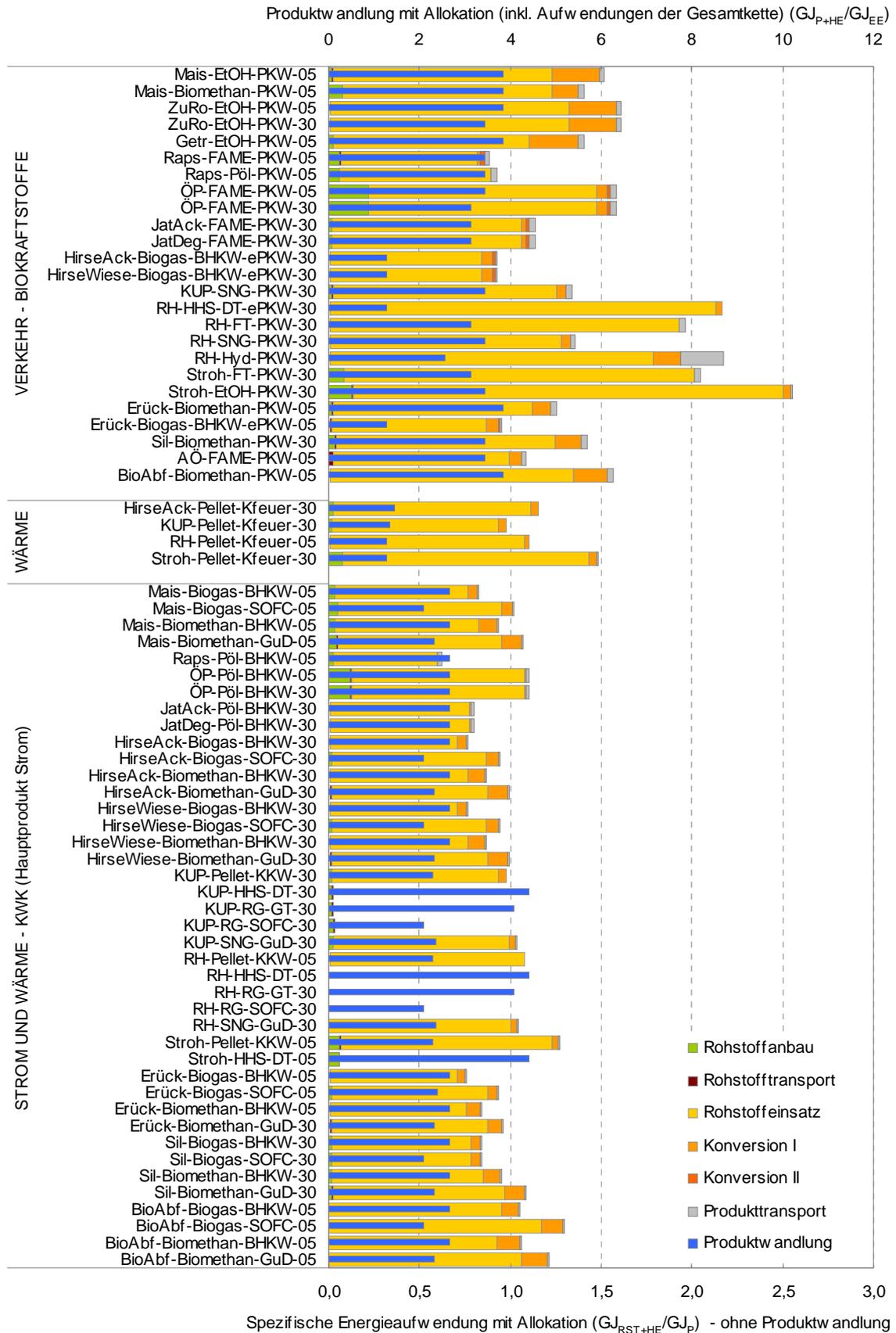


Abb. 6 Spezifische Energieaufwendungen (mit Allokation)

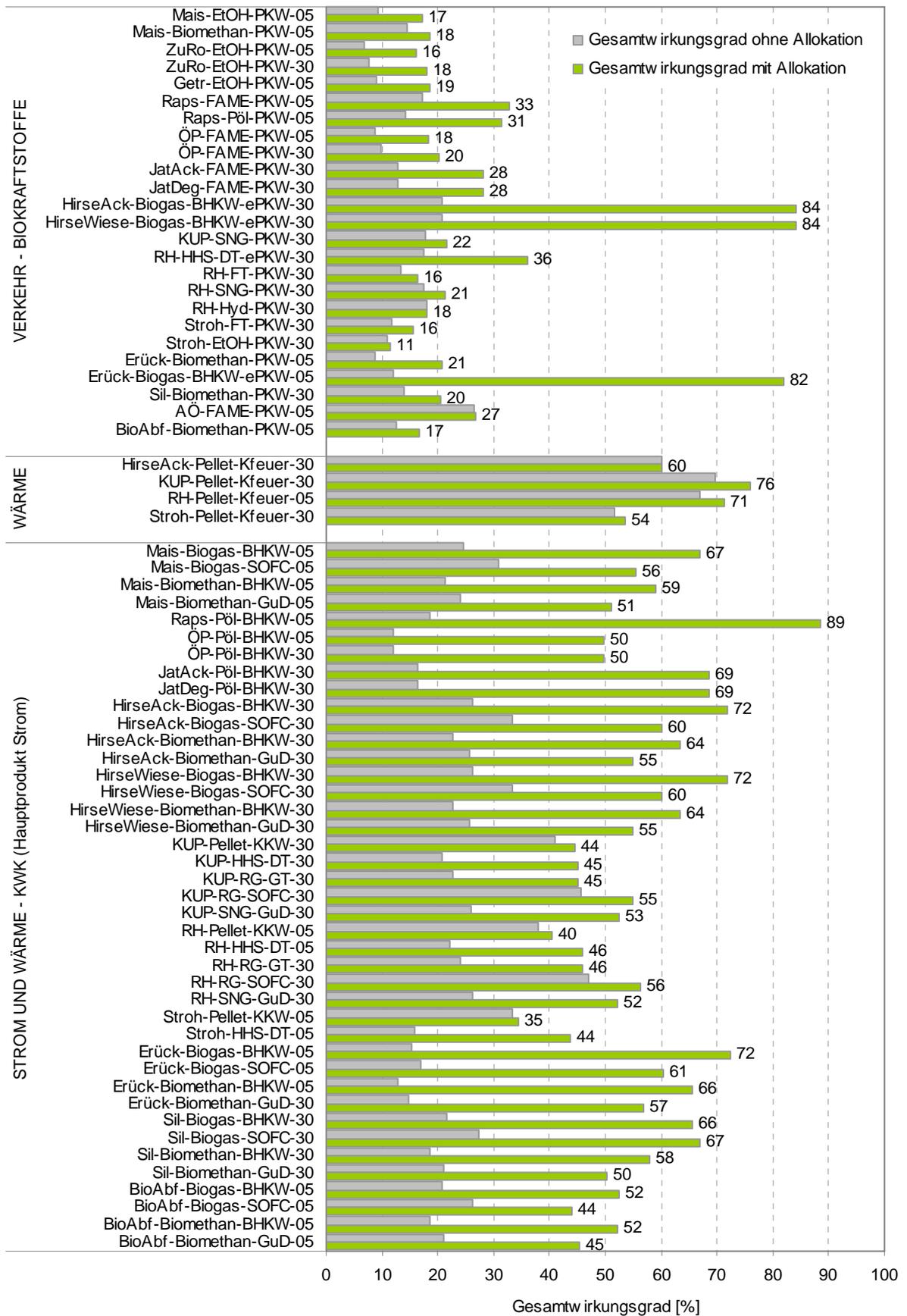


Abb. 7 Spezifische Gesamtwirkungsgrade

## 4 ÖKONOMISCHE ANALYSE UND BEWERTUNG

Konversionspfade auf der Basis von Biomasse müssen nicht nur hohen technischen und logistischen Anforderungen genügen; die daraus bereitgestellten Endenergieträger müssen zudem möglichst kostengünstig bereitgestellt werden. Diese Bereitstellungs-respektive Gesteuungskosten haben entscheidenden Einfluss auf das wirtschaftliche Substitutionspotential biogener Energieträger für fossile Energieträger. Nachfolgend wird zunächst der zugrunde gelegte methodische Ansatz für die Kalkulation der Gesteuungskosten und darauf aufbauend den THG-Vermeidungskosten erläutert. Anschließend werden die Ergebnisse der Analyse bewertet und die einzelnen untersuchten Bioenergiekonversionsketten entsprechend eingeordnet.

### 4.1 Methodischer Ansatz

#### 4.1.1 Kostenkalkulationsmodell

##### Gesteuungskosten

Für die Analyse der Gesteuungskosten als ökonomische Kenngröße für den Vergleich der unterschiedlichen Bioenergiekonversionsketten wird auf die Annuitätenmethode als ein dynamisches Partialmodell zurückgegriffen, wie es in der VDI 2067 respektive VDI 6025 für die Ermittlung der Wirtschaftlichkeit von Konversionsanlagen üblich ist. Dabei gelten Investitionen nur dann als wirtschaftlich, wenn sie die Wiedergewinnung der Anschaffungszahlungen und eine ausreichende Verzinsung des eingesetzten Kapitals erbringen. Für die Anwendung der VDI-Richtlinien im Bezug auf die Investition in eine Konversionsanlage wird davon ausgegangen, dass keine Rückflüsse für das Hauptprodukt (Wärme, Strom, Kraftstoff) entstehen. Die Gegenüberstellung der Bioenergiekonversionsketten erfolgt daher ausschließlich als Vergleich der aufzuwendenden Kosten, um den jeweiligen Endenergieträger bereitzustellen, wobei die Alternative vorteilhaft ist, welche die günstigsten spezifischen Gesteuungskosten ausweist. Für die Gewährleistung der Vergleichbarkeit der Bioenergiekonversionsketten wird die Bewertung dabei stets auf einen einheitlichen Bewertungszeitraum bezogen.

Die nach VDI 2067 vorgegebenen Kostengruppen sowie deren Einfließen in das Kostenkalkulationsmodell auf Basis der Annuitätenmethode sind in dargestellt. Demnach ergibt die Differenz aus der Einzahlungsannuität und der Summe der kapitalgebundenen, verbrauchsgebundenen, betriebsgebundenen und sonstigen Auszahlungsannuitäten die Gesamtannuität aller Zahlungen der Anlage. Diese dividiert durch die jährliche Produktion des jeweiligen Endenergieträgers ergibt die spezifischen Gesteuungskosten. Jede Bioenergiebereitstellungskette ist geeignet eine fossile Referenz (im jeweiligen Sektor Strom, Wärme, Kraftstoff) zu ersetzen. Dafür müssen u. U. Mehrkosten aufgewendet werden. Deren Bestimmung erfolgt in dieser Expertise durch Differenzbildung der spezifischen Gesteuungskosten von Bioenergie- und Referenzbereitstellungskette. Ein negatives Ergebnis kennzeichnet ein im Vergleich zur fossilen Referenz spezifisch günstigere Bioenergiebereitstellungskette.

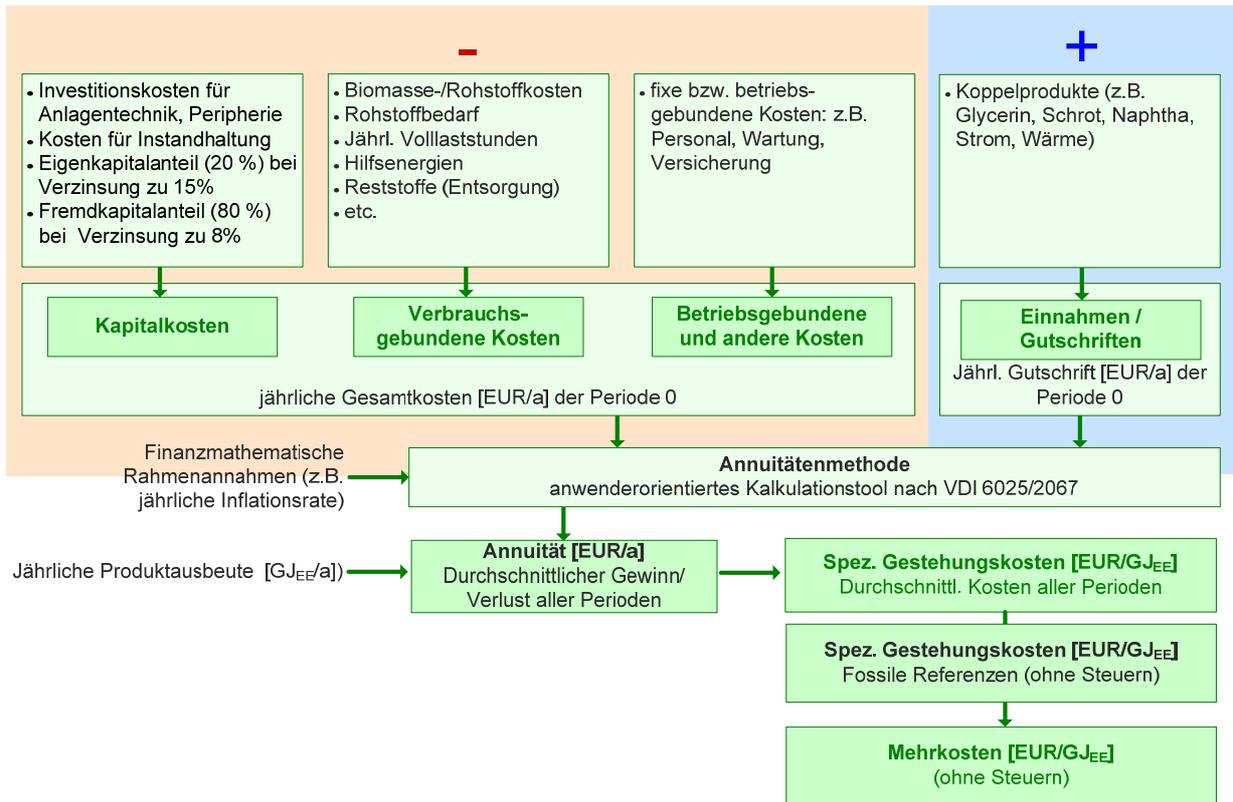


Abb. 8 Kalkulationsmodell für Ermittlung der spezifischen Gesteungskosten

### THG-Vermeidungskosten

Im nächsten Schritt erfolgt die Ermittlung der spezifischen THG<sup>3</sup>-Vermeidungskosten. Dabei sind – je nachdem, welcher Schwerpunkt in die Entscheidungsfindung für nachhaltige Technologien einfließt – der Analyse der spezifischen THG-Vermeidungskosten auf der Basis der volkswirtschaftlichen Kostenkonzeptes Grenzen gesetzt, deren Ursache in erster Linie in der Problematik der Datenbeschaffung (u. a. steuerrechtliche Aspekte, Subventionen, gesellschaftliche Ressourcen im Sinne von Programmkosten) und dem Vergleich unter einheitlichen Rahmenbedingungen liegt (vgl. u. a. /2/).

Im Rahmen dieser Expertise wird daher vereinfacht der folgende Ansatz (vgl. Gl. 4) zur Ermittlung der THG-Vermeidungskosten gewählt, wobei die untersuchten Bioenergiekonversionsketten jeweils einer fossilen Referenz gegenübergestellt werden.

<sup>3</sup> Die Erfassung der unterschiedlichen Treibhausgase (THG) erfolgt mittels CO<sub>2</sub>-Äquivalenten.

$$K_{THG,S} = \frac{K_S - K_{Ref}}{e_{Ref} - e_s} = \frac{\Delta K}{\Delta e} \quad \text{falls } \Delta e > 0$$

$K_{THG,S}$  - spezifische THG-Vermeidungskosten einer Konversionskette [EUR/kg<sub>CO<sub>2</sub>-Äq.</sub>];  $K_S$  - spezifische Gestehungskosten einer Bioenergiekonversionskette [EUR/GJ<sub>EE</sub>];  $K_{Ref}$  - spezifische Gestehungskosten der fossilen Referenz (unter Berücksichtigung der Grenzkosten für fossile Energieträger) [EUR/GJ<sub>EE</sub>];  $\Delta K$  - Mehrkosten der Bioenergiekonversionskette gegenüber einer fossilen Referenz [EUR/GJ<sub>EE</sub>];  $e_s$  - spezifische THG-Emissionen einer Bioenergiekonversionskette [kg<sub>CO<sub>2</sub>-Äq.</sub>/GJ<sub>EE</sub>];  $e_{Ref}$  - spezifische THG-Emissionen der Referenz [kg<sub>CO<sub>2</sub>-Äq.</sub>/GJ<sub>EE</sub>];  $\Delta e$  - spezifische THG-Vermeidung der Bioenergiekonversionskette gegenüber einer fossilen Referenz [kg<sub>CO<sub>2</sub>-Äq.</sub>/GJ<sub>EE</sub>]

Liegen die THG-Emissionen der Bioenergiekonversionskette höher als die der fossilen Referenz ( $\Delta e \leq 0$ ), werden keine THG-Vermeidungskosten berechnet. Die spezifischen THG-Vermeidungskosten stellen einen wichtigen Kennwert für den Vergleich der Bioenergiekonversionskette dar. Sie geben an, wieviel die Vermeidung einer definierten Menge Treibhausgase gegenüber dem entsprechenden Referenzsetting kostet.

### Mehrkosten eines Modellhaushalts

Mit dem Ziel einer besseren Vergleichbarkeit der Bioenergiekonversionsketten untereinander wird als weiterer Bezugspunkt der Bedarf an Elektrizität, Wärme und Mobilität eines Modellhaushalts verwendet. Die zugrunde liegenden Annahmen sind in Kapitel 4.1.2 dargestellt. Wird das Produkt aus dem jeweils zutreffenden Energiebedarf [GJ/a] und den energiespezifischen Mehrkosten für jede Bioenergiekonversionskette [EUR/GJ] berechnet, dann ergeben sich die jährlichen Mehrkosten des Modellhaushalts [EUR/a], wenn die jeweilige Bioenergiekonversionskette an Stelle des fossilen Referenzenergieträgers eingesetzt wird.

## 4.1.2 Annahmen und Datengrundlage

### Finanzmathematische Rahmenbedingungen

Grundlage für die vergleichende Gegenüberstellung der Bioenergiekonversionsketten sind die gegenwärtigen Rahmenbedingungen (Basisjahr 2005). Für alle Bioenergiekonversionsketten werden Investitionen in Neuanlagen bei einer kalkulatorischen Betrachtungsdauer von 15 Jahren unterstellt, die gleichzeitig Abschreibungsdauer ist. Für die kapital-, verbrauchs-, betriebsgebundenen und sonstigen Zahlungen wird eine durchschnittliche jährliche Inflationsrate von 2 % angesetzt. Spezifische Steuern (z. B. im Hinblick auf Abschreibungsraten) finden für die Ermittlung der Gestehungskosten keine Berücksichtigung. Gleiches gilt für jegliche Subventionen (z. B. Investitionszulagen, zinsgünstige Darlehen) und den Aufwand für die Anlageninbetriebnahme.

### Kapitalgebundene Kosten

Für die jeweiligen Bioenergiekonversionsketten werden mit Rücksichtnahme auf ein vereinfachtes und transparentes Vorgehen die folgenden anlagenspezifischen Gesamtinvestitionskosten (d. h. für eine schlüsselfertige Anlage nach Spezifikation) für das Basisjahr 2005 unterstellt (siehe Anhang). Bezogen auf diese Anfangsinvestition werden als jährliche Instandhaltungskosten jeweils 1,5 % in die Kalkulation einbezogen. Unter Berücksichtigung des im Regelfall marginalen Einflusses der Finanzierungsparameter (d. h. Kapitalanteile und deren Verzinsung) auf die Gestehungskosten werden einheitlich ein Eigenkapitalanteil von 20 % bei einer Verzinsung von 15 % sowie ein Fremdkapitalanteil von 80 % bei einem Tilgungszins von 8 % angenommen. Diese ergeben entsprechend die kapitalgebundenen Kosten.

Die bei den Investitionskosten betrachteten Anlagen unterscheiden sich prinzipbedingt zwischen den einzelnen Gruppen von Bioenergiekonversionsketten. Jeweils betrachtete Aggregate sind in Tab. 1 zusammengestellt, eine Übersicht der einzelnen Investitionskosten. Beim Vergleich der Investitionskosten untereinander ist dieser Unterschied zu beachten.

Tab. 1 *Betrachteter Investitionskostenumfang der untersuchten Bioenergiekonversionsketten*

Bioenergiekonversionsketten	Investitionskosten beinhalten folgende Aggregate
Wärme aus Kleinf Feuerungen	Kessel und Anbindungen
Kraftstoffproduktion	Produktionsanlage und Hilfsanlagen
KWK auf Basis Biogas	Biogasanlage, Stromerzeugung
KWK auf Basis Biomethan	Biogasanlage, Gasaufbereitung, Stromerzeugung
Mitverbrennung im Steinkohle-HKW	zusätzliche Aggregate und Anlagen zur Mitverbrennung von 10 % Biomasse

Aufgrund der beschriebenen Unterschiede weisen die spezifischen Investitionskosten der betrachteten Bioenergiekonversionsketten eine große Bandbreite auf. Diese reicht von 75 bis 13.200 EUR/kW<sub>EE</sub>.

### Verbrauchs-, Betriebs- und sonstige Kosten sowie Erlöse

Die bezogen auf das Basisjahr 2005 für die Kalkulation der spezifischen Gestehungskosten zugrunde gelegten Verbrauchs-, Betriebs- und sonstige Kosten sowie Erlöse sind in Abb. 9 übersichtlich zusammengefasst. Die darin unterstellten Kosten gelten ebenso für die Bioenergiekonversionsketten zum zukünftigen Zeithorizont 2030.

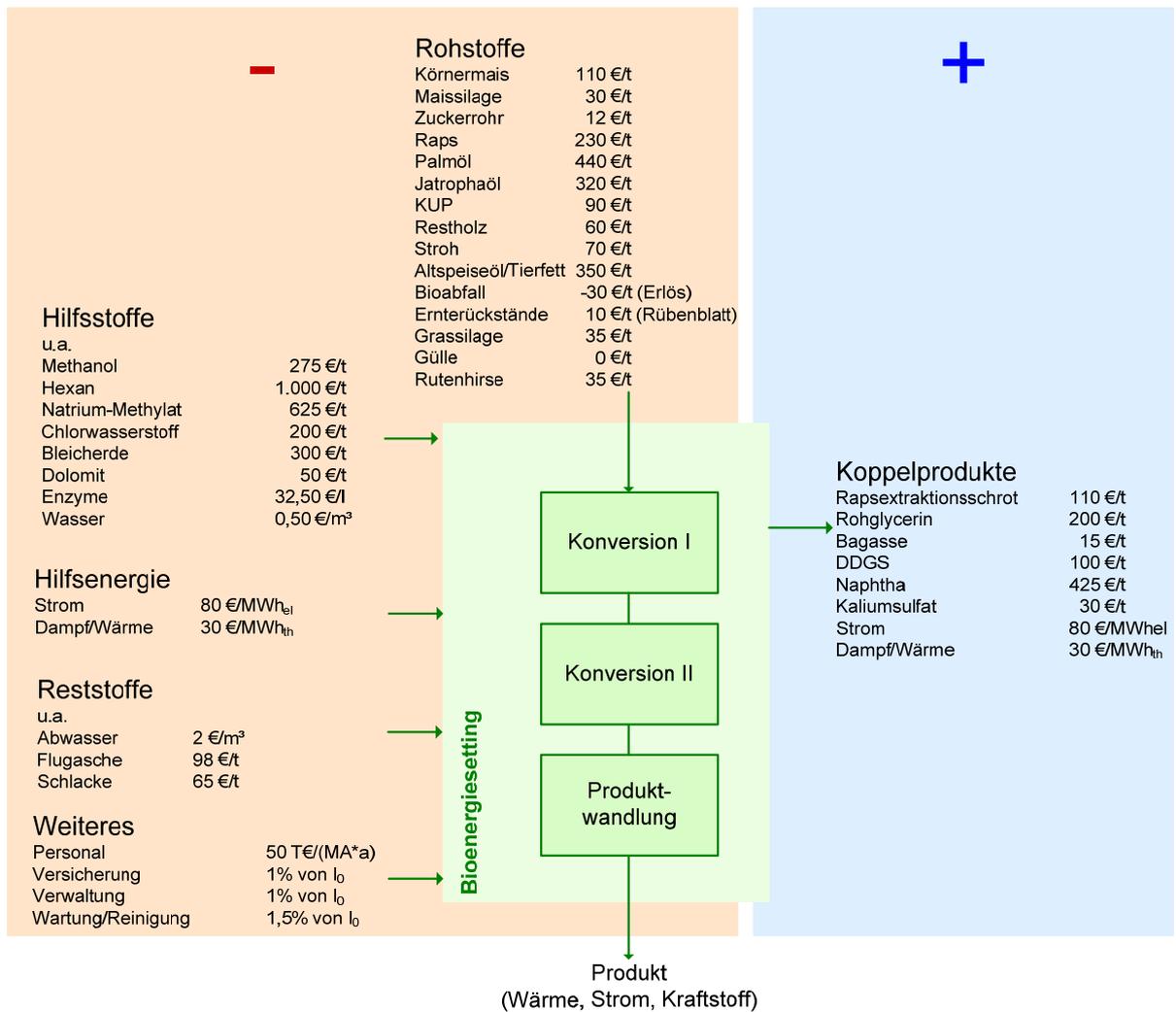


Abb. 9 Verbrauchs-, Betriebs- und sonstige Kosten sowie Erlöse

### Gestehungskosten fossiler Referenzketten

Um die Mehr- oder Minderkosten Bioenergiekonversionsketten gegenüber den fossilen Referenzsystemen (für die Ermittlung der THG-Vermeidungskosten) darstellen zu können, werden die in Tab. 2 zusammengefassten Gestehungskosten der Referenzen denen der Bioenergiekonversionsketten gegenübergestellt.

Tab. 2 *Gestehungskosten fossiler Referenzketten*

	Fossile Referenz	Gestehungskosten [EUR/GJ <sub>EE</sub> ]	Bemerkungen
<b>BIOKRAFTSTOFFE</b>			
Pflanzenöl, FAME, FT-Diesel, Bioethanol, Biomethan	Versorgungsmix aus Mineralöldiesel und Mineralölbenzin	10,43	60 % Mineralöldiesel, 40 % Mineralölbenzin (Super)
<b>WÄRME</b>			
aus Kleinfeuerungs- anlage (Pellets)	Versorgungsmix Erdgas/Heizöl	31,33	60 %Erdgas, 40 % Heizöl
<b>KWK</b>			
aus BHKW, SOFC, GuD, KKW, HKW	Versorgungsmix Kohle/Erdgas	17,11	80 % Kohlekraftwerke, 20 % GuD- Kraftwerke (Erdgas)

### Energiebedarf eines typischen Modellhaushalts

Die verwendeten Zahlen für den Energiebedarf einen Modellhaushalts finden sich in Tab. 3 und orientieren sich an statistischen Angaben für einen Drei-Personen-Haushalt in Deutschland.

Tab. 3: *Bedarf an Endenergie für einen Modellhaushalt*

Bedarfsart	Verwendeter Zahlenwert	Bemerkungen
Wärmebedarf	15.000 kWh <sub>th</sub> /a	
Elektrizitätsbedarf	4.000 kWh <sub>el</sub> /a	
Mobilität	15.000 km/a	1 PKW, Mix aus Diesel-/Benzinfahrzeugen (Anteile 40 %, 60 %), mittlere Leistungs- klasse

Um das Verhältnis der Nachfragearten zueinander zu verdeutlichen, sind in Abb. 10 die in die Einheit [GJ/a] umgerechneten Bedarfswerte als Anteile am Gesamtenergiebedarf des betrachteten Modellhaushalts dargestellt. Die Wärmenachfrage bildet mehr als die Hälfte des Gesamtenergiebedarfs, gefolgt von Mobilität (ca. 30 %) und Elektrizität (ca. 15 %). Die unterschiedlichen exergetischen Wertigkeiten der verschiedenen Energieformen bleiben bei dieser Betrachtung unberücksichtigt.

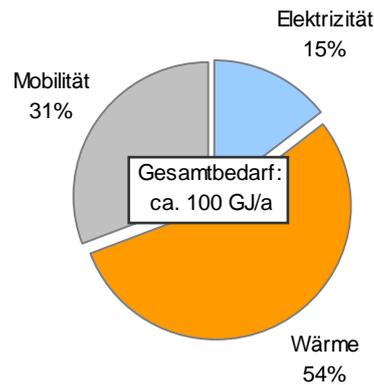


Abb. 10: Anteile von Wärme, Elektrizität und Mobilität am Energiebedarf des Modellhaushalts

## 4.2 Ergebnisse und Fazit

Die Bewertung der ökonomischen Aspekte erfolgt in dieser Expertise anhand der spezifischen Gesteungskosten, der Mehrkosten gegenüber der fossilen Referenzen und den sich ergebenden THG-Vermeidungskosten, die nachfolgend dargestellt und hinsichtlich ihrer relativen Vorzüglichkeit bewertet werden. Die Einzelwerte zu den jeweiligen Diagrammen können dem Anhang entnommen werden.

### 4.2.1 Gesteungskosten der Bioenergiebereitstellungspfade

Eine vergleichende Übersicht zu den spezifischen Gesteungskosten der untersuchten Bioenergiekonversionsketten zeigt Abb. 11, darüber hinaus kann eine Ergebnisaufschlüsselung dem Anhang entnommen werden. Demnach zeigen die Biokraftstoffkonversionsketten – anders als bei der technischen Bewertung – eine vergleichsweise kleine Kostenbandbreite von 12,0 bis 33,7 EUR/GJ<sub>EE</sub>. Das Kostenniveau für die Wärmebereitstellung liegt bei 44,1 bis 44,9 EUR/GJ<sub>EE</sub>, während die Gesteungskosten für Strom aus KWK-Anlagen bei 11,3 bis 119,6 EUR/GJ<sub>EE</sub> liegen.

Innerhalb der Biokraftstoffkonversionsketten ist die Bereitstellung von Biodiesel (FAME) bei 12,0 bis 16,0 EUR/GJ<sub>EE</sub> vergleichsweise günstig; während die kapitalgebundenen Kosten kaum ins Gewicht fallen, haben die Rohstoffkosten einen entscheidenden Einfluss. Dass die Produktion von Bioethanol sowohl kapital- als auch energieintensiver ist, spiegelt sich ebenso in den Gesteungskosten wieder, die in Größenordnungen von 14,7 bis 26,1 EUR/GJ<sub>EE</sub> sind. Dabei ist die Produktion von FT-Diesel nicht zuletzt aufgrund höherer Kapitalkosten kostenintensiver (22,9 bis 26,6 EUR/GJ<sub>EE</sub>) als Biomethan auf Bio-SNG (16,4 bis 20,0 EUR/GJ<sub>EE</sub>). Wasserstoff ist aufgrund der hohen Betriebsaufwendungen nochmals teurer (31,5 EUR/GJ<sub>EE</sub>). Je nach Einsatzstoff und damit verbundenem anlagentechnischem Aufwand (u. a. bei Bioabfallanlagen sehr hoch und damit kapitalintensiv; Kompensation durch Erlöse auf Rohstoffseite möglich) kann die Biomethanbereitstellung auf Biogasbasis zu Kosten von 21,1 bis 29,5 EUR/GJ<sub>EE</sub> erfolgen. Wird Strom für den Betrieb von Elektromotor-Pkw produziert, kostet dies 19,8 bis 37,9 EUR/GJ<sub>EE</sub>.

Innerhalb der betrachteten KWK-Konversionsketten zeigen die Erzeugung von Biogasstrom auf Basis von Gülle und Ernterückständen (11,2 EUR/GJ<sub>EE</sub>) sowie die Mitverbrennung von Pellets in Steinkohlekraftwerken die günstigen Stromgestehungskosten (11,3 bis 14,5 EUR/GJ<sub>EE</sub>), welche im letzteren Fall aus den Zusatzkosten für Anlageninvestition und -betrieb resultieren. Die Stromproduktion aus Biomethan in BHKW ist aufgrund der höheren Kostenaufwendungen für Anlage und Betrieb im Regelfall teurer (24,6 bis 68,1 EUR/GJ<sub>EE</sub>) als aus Biogas (19,81 bis 62,2 EUR/GJ<sub>EE</sub>), der günstigste Fall ist hier der Einsatz von Gülle und Ernterückständen, da hierfür nur sehr geringe Bereitstellungskosten anfallen. Ein Vergleich der unterschiedlichen KWK-Anlagen bei gleichem Rohstoff für die Biomethanproduktion zeigt, dass eine GuD-Anlage immer etwas teurer ist als ein BHKW, was aus den niedrigeren Investitionskosten, aber geringeren Wärmeausbeute und damit geringeren Erlösen resultiert. Maßgeblich durch die Rohstoffkosten werden ebenso die Gestehungskosten für Pflanzenöl-BHKW (41,4 bis 70,34 EUR/GJ<sub>EE</sub>) beeinflusst. Kommen Holzhackschnitzel oder Strohhäcksel in Dampfturbinenkraftwerken zum Einsatz, fallen Gestehungskosten von 37,9 bis 40,5 EUR/GJ<sub>EE</sub> an. Bei der kostenintensiveren Biomassevergasung und anschließenden Nutzung in Gasturbinen betragen die Gestehungskosten 64,3 bis 75,2 EUR/GJ<sub>EE</sub>, aufgrund der größeren Leistungsgröße der GT-Anlagen fällt der Einfluss der kapitalgebundenen Kosten zu Lasten höherer Rohstoffpreise vergleichsweise niedriger aus. Die höchsten Gestehungskosten ergeben sich aus dem Einsatz von SOFC in Kombination mit Mikrogasturbinen (83,5 bis 119,6 EUR/GJ<sub>EE</sub>); Ursache dafür sind die extrem hohen Investitionskosten bei einer kurzen Anlagenlebensdauer von etwa 5 Jahren.

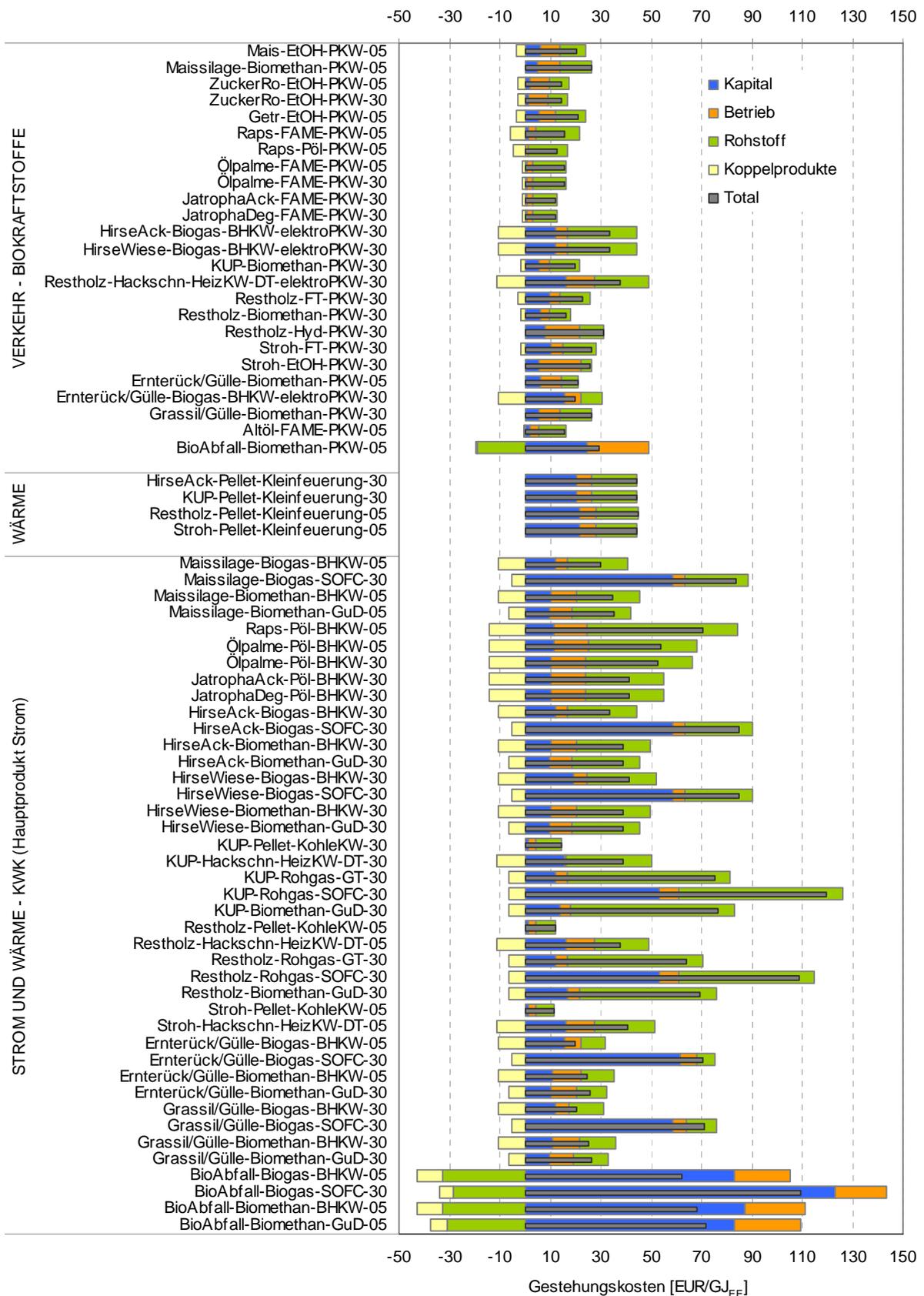


Abb. 11: Bioenergiegestehungskosten

### 4.2.2 THG-Vermeidungskosten

Eine Übersicht der ermittelten THG-Vermeidungskosten auf der Basis der durch das Öko-Institut bereitgestellten THG-Emissionen (ohne und mit Berücksichtigung von direkten bzw. direkten und indirekten Landnutzungsänderungseffekten, vgl. /76/) für die untersuchten Bioenergiekonversionsketten und fossilen Referenzen enthält Abb. 13.

Im Kraftstoffbereich ergeben sich ohne Berücksichtigung von Landnutzungsänderungen Vermeidungskosten im Bereich von 29 bis 408 EUR/t<sub>CO<sub>2</sub>-Äq.</sub>. Da die erreichten THG-Minderungsmengen aller Bioenergiekonversionsketten in einer relativ engen Bandbreite liegen, spiegeln die THG-Vermeidungskosten im Wesentlichen die Gestehungskosten wieder. So weist das Konzept eines elektrobetriebenen PKWs aufgrund höherer Gestehungskosten (zusätzlicher Energiewandlungsschritt Elektroenergie zu mechanischer Energie) Vermeidungskosten am oberen Ende der Bandbreite bis ca. 400 EUR/t<sub>CO<sub>2</sub>-Äq.</sub> auf. Etablierte und kostengünstige Bioenergiekonversionsketten wie Biodiesel aus Rapsöl können eine Verringerung der Vermeidungskosten bis ca. 40 EUR/t<sub>CO<sub>2</sub>-Äq.</sub> erreichen. Werden direkte und indirekte Landnutzungsänderungen berücksichtigt, ergeben sich mit Ausnahme der Reststoffnutzung im Allgemeinen höhere THG-Emissionen und damit auch höhere Vermeidungskosten. Auf eine Quantisierung der Erhöhung wird an dieser Stelle aufgrund weniger Daten verzichtet. Es ist darauf hinzuweisen, dass sich die Methodik der Erfassung von Landnutzungsänderungen (hier besonders indirekte Effekte) aktuell in der Entwicklung befindet. Bei der Konversion von Biomasse aus beispielsweise Kurzumtriebsplantagen (KUP) kann sich durch das hohe CO<sub>2</sub>-Speichervermögen der verwendeten Pflanzen ein Vorteil hinsichtlich der THG-Emissionen und damit eine Reduzierung der THG-Vermeidungskosten des betroffenen Kraftstoffpfades ergeben.

Konversionsketten zur biogenen Wärmebereitstellung weisen im Vergleich zu fossilen Heizungssystemen (auf Basis von Erdgas) 2005 THG-Vermeidungskosten von ca. 165 EUR/t<sub>CO<sub>2</sub>-Äq.</sub> (ohne Berücksichtigung von Landnutzungsänderungen) auf. Bis 2030 steigen diese auf etwa 175 EUR/t<sub>CO<sub>2</sub>-Äq.</sub>. Begründet liegt der Anstieg in der erwarteten zukünftigen Verbesserung des Emissionsverhaltens fossiler Heizungssysteme und den damit verbundenen verringerten THG-Minderungsmengen bei nur leicht abnehmenden Gestehungskosten.

Die Bandbreite der THG-Vermeidungskosten für die analysierten KWK-Konzepte umfasst Werte zwischen 12 und 445 EUR/t<sub>CO<sub>2</sub>-Äq.</sub> (ohne Berücksichtigung von Landnutzungsänderungen) und ist damit deutlich größer als für die Kraftstoffkonzepte. Die oben beschriebene maßgebliche Abhängigkeit der THG-Vermeidungskosten von den Gestehungskosten gilt hierbei analog, so liegen Bioenergiekonversionsketten, welche kapitalintensive Komponenten wie z. B. Brennstoffzellentechnologien oder Bioabfallverarbeitung enthalten, bezüglich der THG-Vermeidungskosten deutlich höher als vergleichbare Bioenergiekonversionsketten ohne diese Komponenten. Zusätzlich ist zu bemerken, dass die THG-Minderungsmengen der KWK-Konversionsketten über denen der Kraftstoffkonversionsketten liegen, was mit dem hohen Anteil der (emissionsreichen) Kohlekraftwerke in der fossilen Referenz zu begründen ist. Die THG-Minderungsmengen korrelieren nur bedingt mit den Mehrkosten der Bioenergiekon-

versionsketten gegenüber der fossilen Stromversorgung, bei nahezu gleichen Minderungs-  
mengen können deutlich unterschiedliche Mehrkosten vorliegen, vgl. dazu Abb. 12.

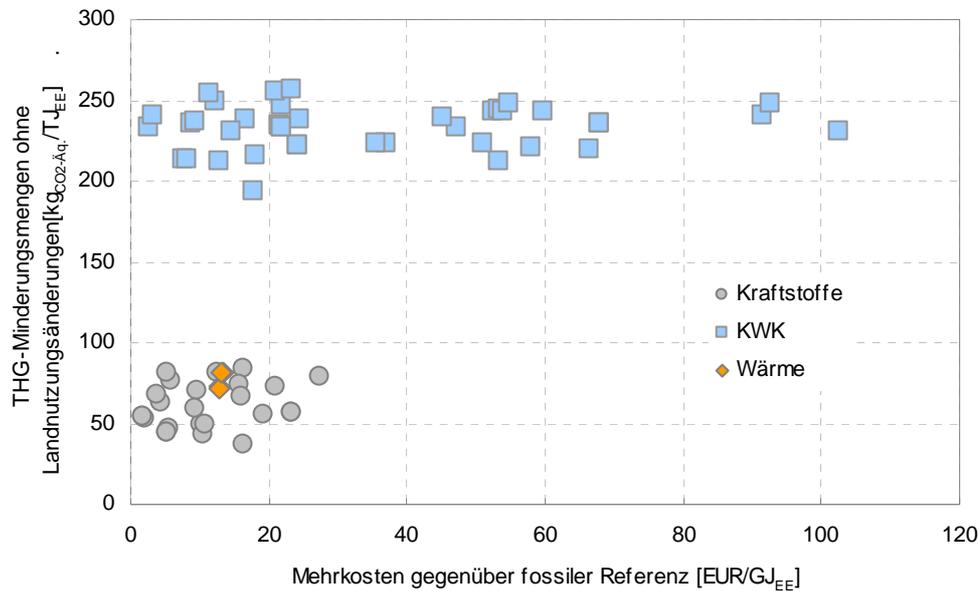


Abb. 12: Zusammenhang zwischen Mehrkosten und THG-Minderungsmengen für die betrachteten Wärme-, Kraftstoff- und KWK-Konversionsketten

Werden Landnutzungseffekte berücksichtigt, gelten die gleichen Aussagen wie bei den Bio-  
kraftstoffen. Sie führen im Allgemeinen zur teilweise massiven Erhöhung der THG-Vermeid-  
ungskosten, in Einzelfällen (z. B. KUP) auch zu einer Verringerung aus oben genannten  
Gründen.

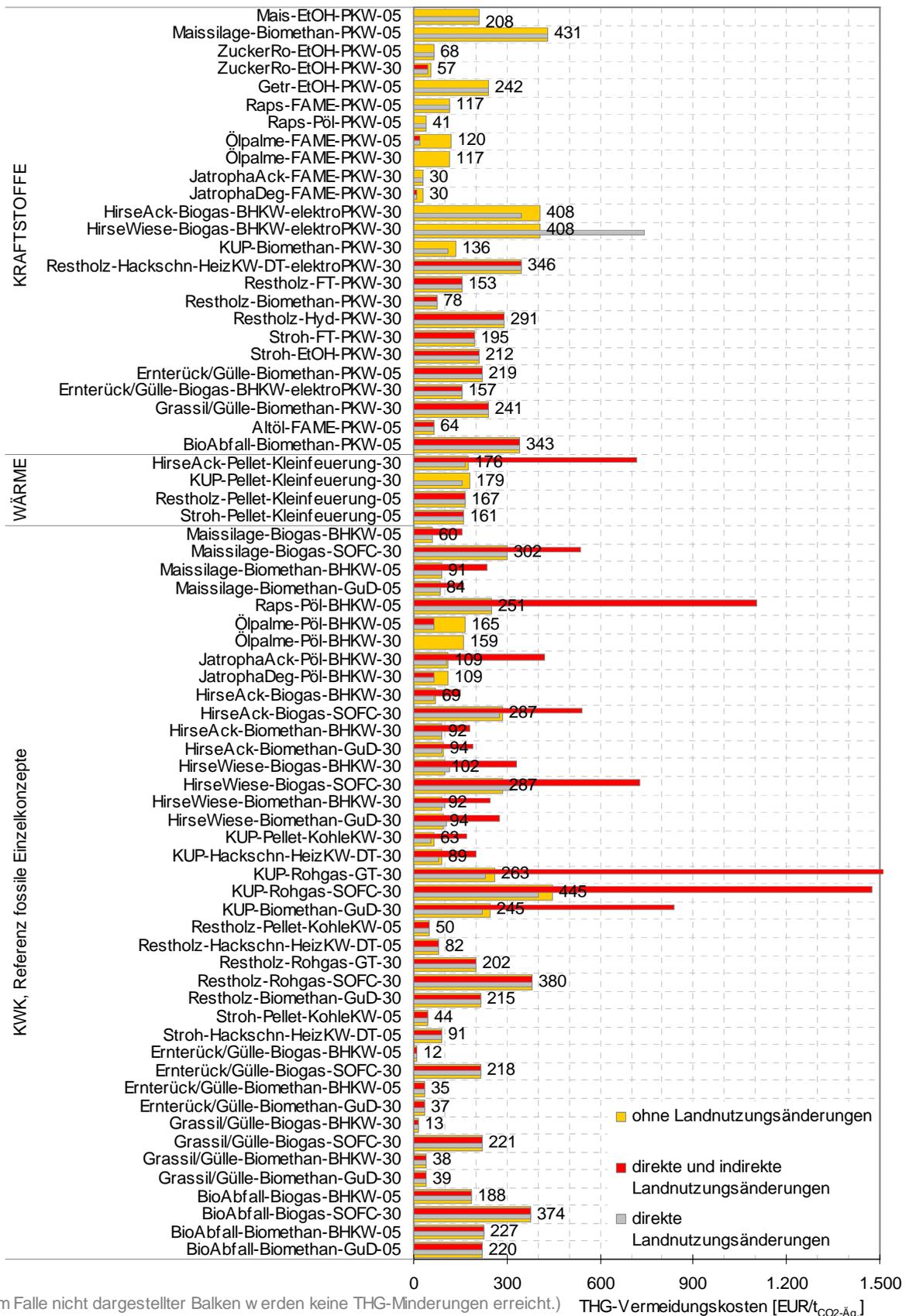


Abb. 13: THG-Vermeidungskosten der Endenergieträger Biokraftstoff, Wärme, Strom<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Hinweis: Abweichend hiervon ist im WBGU-Hauptgutachten im Wärme- und Stromsektor der Vergleich auf die Endenergie bezogen, im Verkehrssektor auf Fahrzeugkilometer.

THG-Vermeidungskosten können Anhaltspunkte für die Attraktivität der Emissionsminderung verschiedener Bioenergiekonversionspfade geben. Dennoch erlauben THG-Vermeidungskosten innerhalb umfassender Entscheidungsprozesse keine Aussagen zu den folgenden Kriterien /2//3/:

- THG-Minderungspotenziale der jeweiligen Bioenergiekonversionsketten sowie der zeitliche Rahmen ihrer Verfügbarkeit respektive Nutzbarmachung (erfordert u. a. Kenntnis des jeweiligen technischen Potenzials heute und zukünftig),
- mögliche technische Innovationseffekte und damit einhergehenden zukünftige Kostensenkungspotentiale bei einem frühzeitigen Einsatz von aus heutiger Sicht weniger attraktiver Bioenergiekonversionsketten (u. a. unterschiedliche technische Optimierungspotentiale einzelner Technologien),
- unterschiedliche Hemmnisse bei der Erschließung der mit den unterschiedlichen Bioenergiekonversionsketten einhergehenden THG-Minderungspotenziale (u. a. Transaktionshemmnisse, strukturelle Hemmnisse, Akzeptanzprobleme).

#### 4.2.3 Haushaltspezifische Mehrkosten

Um die unterschiedliche Nachfrage nach den Endenergiearten Elektrizität, Wärme und Mobilität zu berücksichtigen, werden entsprechend des Energiebedarfs eines definierten Modellhaushalts (siehe Kapitel 4.1.2) die anfallenden Mehrkosten bei Versorgung des Haushalts mit den Bioenergiekonversionsketten gegenüber den fossilen Referenzen ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abb. 14 zusammengestellt.

Bei den KWK-Bereitstellungsketten ist eine große Bandbreite festzustellen. Die Mehrkosten reichen von 39 bis hin zu ca. 1.475 EUR/a. Für 2005 existieren etablierte Konzepte mit sehr geringen Mehrkosten, beim Einsatz von Bioabfällen in Verbindung mit einer (kostenintensiven) Brennstoffzellentechnologie können bis sie jedoch bis auf ca. 1.333 EUR/a ansteigen. Bei den Bioenergiekonversionsketten mit den geringsten Mehrkosten für den Modellhaushalt handelt es sich um GuD- und BHKW-Konzepte., sowohl mit dem Zeithorizont 2005 als auch 2030.

Die Mehrkosten für die Wärmebereitstellung über die betrachteten Biokraftstoffketten gegenüber der Bereitstellung aus Erdgas/Heizöl liegen zwischen 706 und 730 EUR/a für 2005 bzw. bei einheitlich 691 EUR/a für 2030. Zukünftig ist also ein leichtes Absinken, begründet in reduzierten Gestehungskosten, zu erwarten.

Bei der Betrachtung der Kraftstoffbereitstellungsketten ist zu beachten, dass zusätzlich zu den Mehrkosten aus dem Kraftstoffwerb in einigen Konzepten Mehrkosten für die Anschaffung und den Unterhalt einer alternativen Fahrzeugtechnologie, welche für die Nutzung des produzierten Biokraftstoffs nötig ist, anfallen können. Konkret ist das für Konzepte mit Erdgas-, Elektro- und Brennstoffzellenantrieb der Fall. Biokraftstoffketten und verwendete fossile Referenzen sind in Tab. 4 zusammengefasst. Die spezifischen Fahrzeugkosten setzen sich

dabei zusammen aus: Investitions- bzw. Kapitalkosten für das Fahrzeug (Pkw), fixe Kosten (u. a. Instandhaltung und Reparatur von Kraftfahrzeugen) und variable Kosten (u. a. sonstige Dienstleistungen)<sup>5</sup>.

Tab. 4: *Verwendete und referenzierte Antriebskonzepte der Biokraftstoffkonversionsketten*

Biokraftstoff	Verwendetes Antriebskonzept	Referenz-Antriebskonzept (fossil)	Spezifische Fahrzeugkosten (Mehrkosten) [EURct/km]
Pflanzenöl	Dieselmotor	Dieselmotor	32 (2005) / 33 (2030) (nein)
FAME	Dieselmotor	Dieselmotor	32 / 33 (nein)
Fischer-Tropsch-Diesel	Dieselmotor	Dieselmotor	32 / 33 (nein)
Ethanol	Ottomotor	Ottomotor	39 / 39 (nein)
Biomethan	Erdgasmotor	Ottomotor	40 / 41 (ja)
Elektrizität	Elektromotor	Ottomotor-Dieselmotor-Mix	- / 47 (ja)
Wasserstoff/Biomethan	Brennstoffzelle	Ottomotor	- / 47 (ja)

Die fahrzeugspezifischen Mehrkosten führen bei den betroffenen Konversionsketten zu einem massiven Anstieg der für den Modellhaushalt anfallenden jährlichen Kosten (vgl. Abb. 14). Besonders ist das für die Konzepte mit Elektromotor für 2030 festzustellen, hier betragen die fahrzeugspezifischen Mehrkosten bis zum sechsfachen der aus dem Kraftstoffverbrauch resultierenden Mehrkosten gegenüber einer fossilen Versorgung. In Konsequenz führt das zu zusätzlichen Ausgaben von ca. 2.160 EUR/a. Ein ähnlicher Einfluss lässt sich beim Setting mit Brennstoffzellentechnologie feststellen; ebenso bei Konversionsketten mit Erdgasmotor, dort allerdings weniger ausgeprägt.

Lässt man diese (extrem teuren) Konzepte bei der Betrachtung temporär außen vor, ergibt sich eine Bandbreite der jährlichen Mehrkosten von ca. 45 bis zu 490 EUR. Am unteren Rand liegen dabei etablierte und zukünftige Biodieselskonzepte, am oberen Rand zukünftige Bereitstellungspfade von Ethanol aus Lignocellulose.

<sup>5</sup> Die spezifischen Fahrzeugkosten sind der GEMIS-Datenbank entnommen und wurden im Rahmen des Verbundvorhaben „Renewability – Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030“ ermittelt und validiert.

Mehrkosten eines Modellhaushalts gegenüber fossiler Referenz [EUR/a]

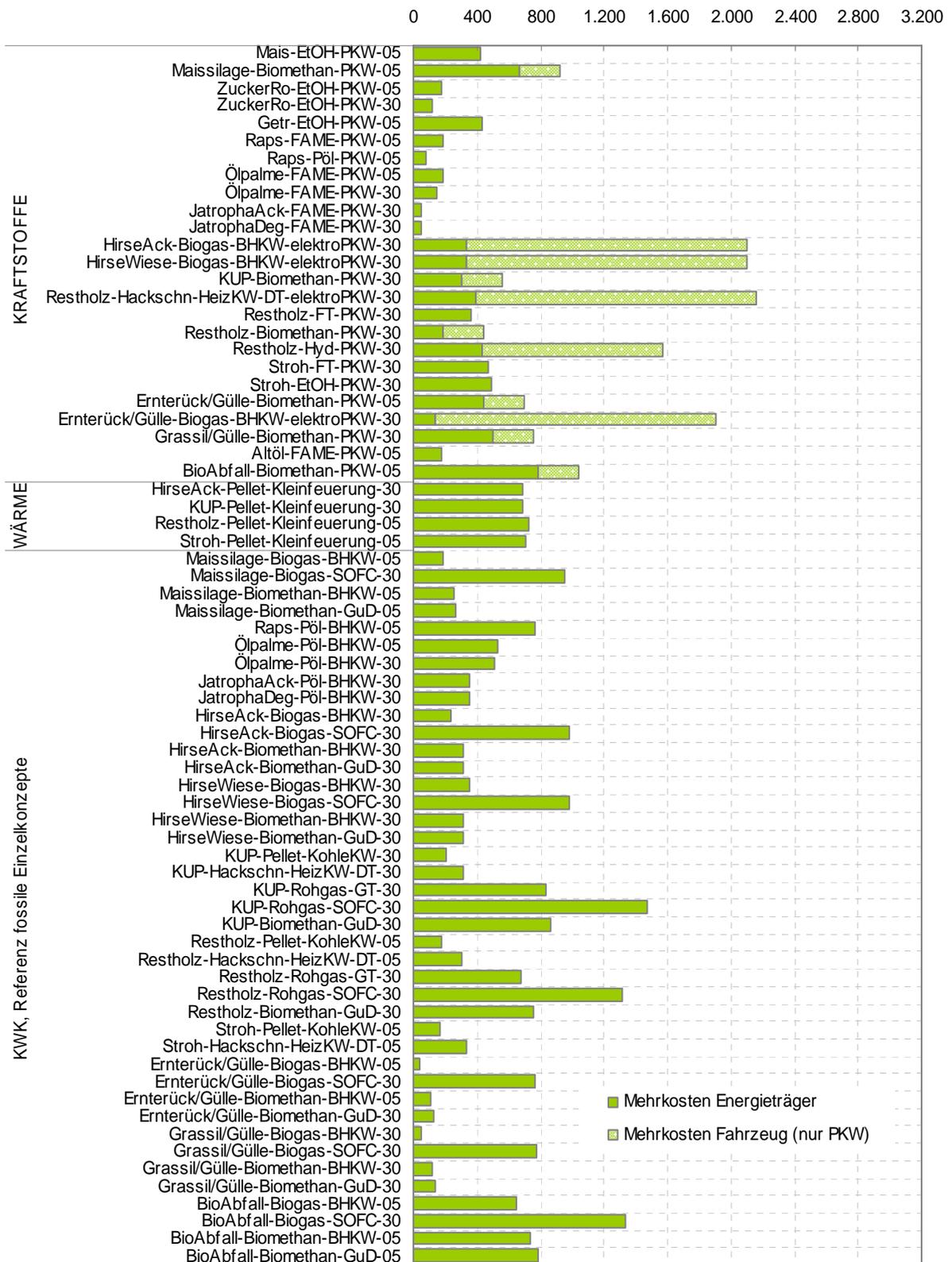


Abb. 14: Haushaltspezifische jährliche Mehrkosten

### 4.2.4 Haushaltspezifische THG-Minderungsmengen

Anhand der Energienachfrage des Modellhaushaltes lassen sich die jährlich eingesparten Mengen an THG für die einzelnen Bioenergiekonversionsketten in Referenz auf die fossile Versorgung berechnen. Durch Einsatz von Elektrizität, Wärme oder Kraftstoff aus Bioenergie können demnach pro Modellhaushalt jährlich ohne Berücksichtigung der Landnutzungsänderungseffekte jeweils zwischen 1,4 und 4,5 t<sub>THG</sub> eingespart werden. Werden Landnutzungsänderungen einbezogen, verschiebt sich das Bild analog der oben bestimmten THG-Vermeidungskosten der einzelnen Bioenergiekonversionsketten. Im Allgemeinen resultiert eine Verringerung der vermiedenen THG-Mengen, bei einzelnen Bioenergiekonversionsketten (Einsatzstoff KUP) ergibt sich aber auch ein Vorteil, d. h. höherer Minderungen der THG-Emissionen. Ein signifikanter Einfluss des Zeithorizontes ist nicht festzustellen, jeder Technologiepfad muss separat betrachtet werden.

In Abb. 15 sind die jährlichen Mehrkosten den erreichten THG-Minderungen (hier nur ohne Landnutzungsänderungen) gegenübergestellt; dabei ist festzustellen, dass die betrachteten KWK- und Wärmekonzepte generell höheres Minderungspotenzial als die betrachteten Kraftstoffkonversionsketten und geringeres als die Wärmekonversionsketten aufweisen.

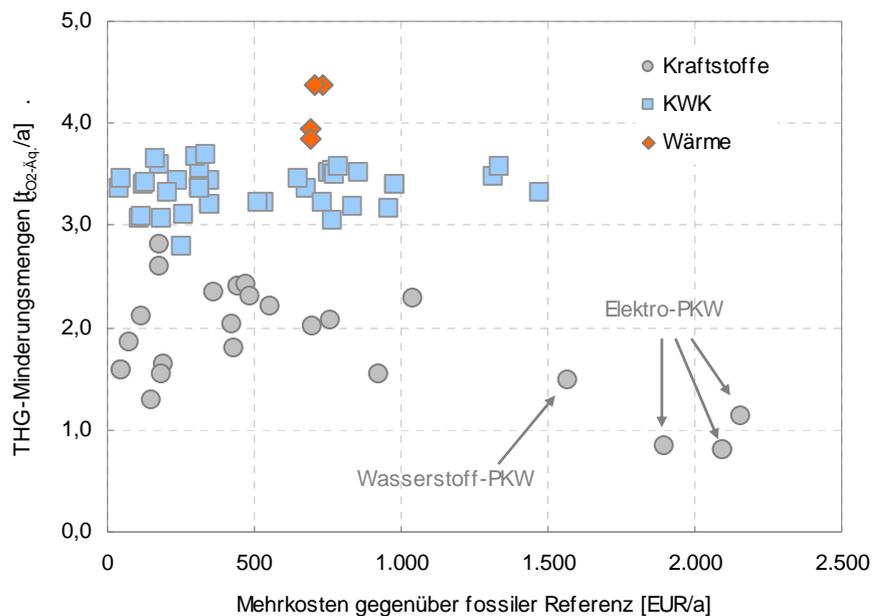


Abb. 15: Gegenüberstellungen von Mehrkosten und THG-Vermeidung für einen Modellhaushalt

Ein signifikanter und allgemein gültiger Zusammenhang zwischen den Größen kann nicht abgeleitet werden. Es kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass KWK-Konzepte existieren, welche bei gleichen oder geringeren Mehrkosten deutlich höhere THG-Minderungen im Vergleich zu einer fossilen Elektrizitätsversorgung erreichen können als Biokraftstoffkonversionsketten im Vergleich zu fossil basierter Mobilität. Bei mittleren Mehrkosten aufweisen die Wärmebereitstellungsketten gegenüber fossilen Heizungssystemen die höchsten

THG-Minderungen. Die haushaltspezifischen Mehrkosten für Kraftstoffe und Wärme liegen in einer engen Bandbreite, wenn man aufgrund fahrzeugspezifischer Mehrkosten extrem teure Konzepte wie Elektro- oder Wasserstofffahrzeuge außen vor lässt.

## 5 GESAMTBEWERTUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Biomasse kann zur Bereitstellung von Wärme-, Kraft-Wärme-gekoppeltem Strom (KWK) und Biokraftstoff genutzt werden; damit sind jeweils unterschiedliche Umwelteffekte verbunden. Unter Beachtung zunehmender Landnutzungskonkurrenzen und damit verbunden direkten und indirekten Landnutzungseffekten stellt sich daher die Frage, wie die globale Bioenergienutzung nachhaltig gestaltet werden kann. Auch wenn die Nutzungsoptionen Wärme, KWK und Kraftstoff nur eingeschränkt vergleichbar sind, können die Chancen der Bioenergie wie auch der potenzielle Beitrag zu einem nachhaltigen Energiesystem beschrieben werden. Dazu wurden in den Untersuchungen entsprechende Versorgungsaufgaben festgelegt (d. h. Bereitstellung von Raum- und Prozesswärme sowie Strom und Mobilität durch Zurücklegung von Entfernungen im Straßenverkehr). und diese auf einen typischen Modellhaushalt bezogen.

Darauf aufbauend wurden 70 ausgewählte heutige und zukünftige Bioenergiekonversionsketten hinsichtlich ihrer energetischen Effizienz und – bezugnehmend auf das Basisjahr 2005 – der damit verbundenen Gestehungs- und THG-Vermeidungskosten untersucht und bewertet, sowie weitere technische und ökonomische Aspekte diskutiert. Dazu wurde die Bioenergiebereitstellung in verschiedene Prozessschritte zerlegt (Biomasseanbau, -bereitstellung, -konversion, -nutzung) und die Bereitstellung von Koppelprodukten energetisch allokiert. Die dabei ermittelten Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- *Effizienz.* Hinsichtlich der Effizienz wurden die flächenspezifische Effizienz sowie die Wirkungsgrade des Gesamtsystems ermittelt.

Beim flächenspezifischen Produktertrag schneiden die Bioenergiekonversionsketten mit einem hohen flächenspezifischen Rohstofftertrag und niedrige spezifischen Energieaufwendungen (hier mit Allokation) entlang der Gesamtbereitstellungskette (insbesondere mit Bezug auf Konversion und Produktwandlung) günstiger ab; besonders vorteilhaft sind daher im relativen Vergleich Anwendungen auf der Basis von Hirse, KUP (Weide, Pappel) und Zuckerrohr.

Hinsichtlich des energetischen Gesamtwirkungsgrades ergeben sich für die betrachteten Nutzungspfade – inklusive der allokierten Energieaufwendungen – unterschiedliche Bandbreiten

- für den Mobilitätsbereich von 11 bis 33 % beim Einsatz von Biokraftstoffen in Pkw mit Verbrennungsmotor respektive 36 bis 84 % beim Einsatz von biogenem Strom in zukünftigen Elektro-Pkw,

- für die KWK-Strombereitstellung zwischen 40 % für die Mitverbrennung von Restholzpellets in Steinkohlekraftwerken bis hin zu 72 % die BHKW-Nutzung von aus Hirse gewonnenem Biogas,
  - für die Wärmebereitstellung von 53 bis 76 % für die mit Pellets betriebenen Kleinfeuerungsanlagen.
- *Kosten.* Als Kostengrößen wurden die spezifischen Gestehungskosten und Mehrkosten für einen Modellhaushalt mit definiertem jährlichem Wärme-, Strom- und Kraftstoffverbrauch gegenüber fossiler Referenz ermittelt. Da als Bezugsjahr das Jahr 2005 gewählt wurde, liegt den Berechnungen damit indirekt ein Rohölpreis von 50 USD/bbl. zu Grunde, was weniger als die Hälfte des gegenwärtigen Rohölpreises (ca. 120 USD/bbl) darstellt.

Dabei zeigen die verschiedenen Endenergieträger folgende Größenordnungen:

- Die Biokraftstoffgestehungskosten sind mit 12,0 bis 33,7 EUR/GJ<sub>EE</sub> vergleichsweise gering sind (zu präferierende Optionen aus Kostensicht sind Kraftstoffe der heutigen Generation, besonders Biodiesel und Ethanol auf Zuckerrohrbasis). Beim flächenspezifischen Produktertrag schneiden die Bioenergiekonversionsketten mit einem hohen flächenspezifischen Rohstofftertrag und niedrigen spezifischen Energieaufwendungen (hier mit Allokation) entlang der Gesamtbereitstellungskette (insbesondere mit Bezug auf Konversion und Produktwandlung) günstiger ab; besonders vorteilhaft sind daher im relativen Vergleich Anwendungen auf der Basis von Hirse, KUP (Weide, Pappel) und Zuckerrohr. Die haushaltspezifischen Mehrkosten für Mobilität spiegeln im Wesentlichen die Biokraftstoffgestehungskosten wieder, es ist jedoch die Besonderheit zu beachten, dass für einige Kraftstoffoptionen alternative Fahrzeugtechnologien anzuschaffen sind, was für den Haushalt zu erheblich höheren Mehrkosten (von bis 2.160 EUR/a für Elektro-Pkw) führen kann.
- Die Wärmebereitstellungskosten liegen unabhängig von der Art der Pellets im Bereich von 44,1 bis 44,9 EUR/GJ<sub>EE</sub>. Die Mehrkosten liegen in der Größenordnung von 690 bis 730 EUR/a. Die Mehrkosten der Wärmebereitstellung reduzieren sich jedoch bei steigenden Öl- und Gaspreisen erheblich, bei aktuellem Stand liegen eher Minderkosten vor.
- Für die Stromversorgung aus KWK liegen die Gestehungskosten auf einem Niveau von 11,3 bis 119,6 EUR/GJ<sub>EE</sub>, wobei die zu präferierenden Optionen die Mitverbrennung von Pellets in Steinkohlekraftwerken<sup>6</sup> darstellen sowie die Erzeugung von Biogasstrom auf Basis von (kostengünstigen) Ernterückständen und Gülle. Die haushaltsbezogenen Kosten reichen für heutige Anwendungen für vereinzelte Biogasanwendungen von vergleichsweise geringen Mehrkosten über ca. 108 EUR/a für mit Biomethan aus Gülle betriebene BHKW-Anlagen bis zu teils deutlich höhere

<sup>6</sup> Hinweis: Die Mitverbrennung von Pellets in Steinkohlekraftwerken bildet eine Ausnahme, da sie im Regelfall ohne KWK erfolgt. Die Gestehungskosten stellen hierbei bereits die Mehrkosten dar (vgl. Kapitel 4.2.2).

Mehrkosten bei den zukünftigen KWK-Optionen an; diese liegen teilweise bei über 1.330 EUR/a, z. B. wenn Brennstoffzellen kombiniert mit Mikrogasturbinen zum Einsatz kommen.

- *THG-Vermeidungskosten.* Der Blick auf die THG-Vermeidungskosten der Biokraftstoffkonversionsketten (zunächst ohne Berücksichtigung von Landnutzungsänderungen), macht einen ausgeprägten zeitlichen Bezug deutlich.
  - ≡ Im Mobilitätsbereich weisen etablierte Nutzungspfade aus Rapsöl sehr geringe Werte von bis zu 41 EUR/t<sub>CO<sub>2</sub>-Äq.</sub> auf, aufwendigere und zukünftig zu erwartende Lösungen sind in einer Bandbreite bis hin zu 430 EUR/t<sub>CO<sub>2</sub>-Äq.</sub> angesiedelt.
  - ≡ Die Wärmekonversionsketten beinhalten 2005 THG-Vermeidungskosten von ca. 160 EUR/t<sub>CO<sub>2</sub>-Äq.</sub>, bis 2030 wird – aufgrund schwer zu treffender Prognosen bei konstant angenommenen fossilen Referenzkosten- ein leichter Anstieg auf etwa 180 EUR/t<sub>CO<sub>2</sub>-Äq.</sub> prognostiziert.
  - ≡ Die KWK-Konzepte sind aufgrund der enormen technischen Vielfalt durch eine sehr große Bandbreite der THG-Vermeidungskosten von 12 bis hin zu 445 EUR/t<sub>CO<sub>2</sub>-Äq.</sub> gekennzeichnet. Es muss jede Technologie einzeln betrachtet werden, generelle Aussagen zu Zusammenhängen mit dem Zeithorizont oder Einsatzstoffen sind kaum abzuleiten.
  - ≡ Werden Landnutzungsänderungseffekte (direkt und indirekt) berücksichtigt, erhöhen sich die ermittelten THG-Vermeidungskosten in den meisten Bioenergiekonversionsketten, z. T. beträchtlich. Eine Ausnahme bilden zum Beispiel auf dem Anbau von KUP-Biomasse auf Ackerland basierende KWK-Konzepte. Aufgrund des hohen CO<sub>2</sub>-Speichervermögens der verwendeten Pflanzen ergibt sich ein Vorteil hinsichtlich der THG-Emissionen. Deshalb stellen diese Settings – neben den Optionen mit geringen Gestehungskosten (siehe oben) – eine zu präferierende Option dar.

Insgesamt zeigt die Gegenüberstellung, dass eine energieeffiziente Rohstoffbereitstellung ohne negative Landnutzungsänderungseffekte die wesentliche Voraussetzung für moderate THG-Vermeidungskosten darstellt. Weiterhin spielen die Konversionstechnologien wie auch die Art der produzierten Endenergie eine Rolle; dabei können sich sowohl für Kraftstoffe als auch für Wärme und KWK jeweils vergleichsweise günstige wie auch weniger günstige Konstellationen ergeben. Die Modellbetrachtungen zeigen damit deutlich, dass in Hinblick auf eine effiziente Bioenergiebereitstellung die Rahmenbedingungen entlang der Kette systematisch optimiert sein müssen und Vorzugspfade nur sehr eingeschränkt abgeleitet werden können. Die Chancen und Potenziale der Bioenergienutzung lassen sich daher weniger durch die Forcierung einzelner Technologien oder Anwendungsfelder als vielmehr durch die Definition von Qualitätskriterien und -standards entlang der Nutzungskette nachhaltig erschließen. Diese sollten sowohl die THG-Emissionen als auch die THG-Vermeidungskosten und - mit Blick auf die künftig zunehmend erwarteten Nutzungskonkurrenzen – die energetischen Verluste

limitieren. Wenn es auf diese Weise gelingt, die viel versprechenden Nutzungspfade in ihrer Anwendung zu unterstützen, kann der Beitrag der Bioenergie zu einer nachhaltigen Energieversorgung technologie- und anwendungsoffen maximiert. Hinsichtlich der ökologischen und insbesondere klimagasbedingten Risiken von direkten und indirekten Landnutzungsänderungen greift eine solcher Ansatz zu kurz; hier besteht Handlungsbedarf zur Gestaltung der landwirtschaftlichen Produktion bzw. der Landnutzung insgesamt, der durch die Steuerungsinstrumente im Bereich Bioenergie nicht erfolgreich erfüllt werden kann.

**LITERATUR- UND REFERENZVERZEICHNIS**

- /1/ KALTSCHMITT, M. & HARTMANN, H. (HRSG.): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2001
- /2/ MATTHES, F.C.: CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten – Konzept, Potentiale und Grenzen eines Instrumentes für politische Entscheidungen. Öko-Institut e. V. Freiburg, Darmstadt, Berlin 1998
- /3/ BEER, M.: CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten erneuerbare Energietechnologien, FFE-Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V., München 2006
- /4/ BOHNENSCHÄFER, W., EBERT, M., FAZIO, S., GÄRTNER, S., HÜLSMANN, CH., REINHARDT, R.: CO<sub>2</sub>-Minderungsmengen und -kosten bei einer Nutzung nachwachsender Rohstoffe im energetischen Bereich. Institut für Energetik und Umwelt (IE), Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU), Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft und des Projektträgers Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), Leipzig, Heidelberg, 2007 (Veröffentlichung in Vorbereitung)
- /5/ FRITSCH, U. R., RAUSCH, L.: Bestimmung spezifischer Treibhausgas-Emissionsfaktoren für Fernwärme. Endbericht zum F&E-Vorhaben FKZ 360 16 008 im Auftrag des Umweltbundesamts, Öko-Institut, Büro Darmstadt, November 2007
- /6/ HARTMANN, H., KALTSCHMITT, M.: Biomasse als erneuerbarer Energieträger – Eine technische, ökologische und ökonomische Analyse im Kontext der übrigen Erneuerbaren Energien; Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Band 3 (vollständige Neubearbeitung), Landwirtschaftsverlag, Münster, 2002
- /7/ FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. (HRSG.): Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung. Institut für Energetik und Umwelt gGmbH in Kooperation mit der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft und dem Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Leipzig, 2004
- /8/ WIDMANN, B., REMMELE, E.: Rapsölgewinnung in dezentralen Anlagen; Fachtagung "Biokraftstoffe und Landwirtschaft - Herstellung und Einsatz" Leipzig April 05
- /9/ WIDMANN, B. A.; THUNEKE, K.; REMMELE, E.: Pflanzenölbetrieben Blockheizkraftwerke – Leitpfaden, Bayrische Landesanstalt für Landtechnik, München-Weihenstephan, April 2002
- /10/ INSTITUT FÜR ENERGETIK UND UMWELT GGMBH ET AL.: Monitoring zur Wirkung des novellierten Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse. Endbericht. Leipzig, 2007
- /11/ FRITSCH, U.; HÜNEKE, K.; WIEGMANN, K.: Kriterien zur Bewertung des Pflanzenanbaus zur Gewinnung von Biokraftstoffen in Entwicklungsländern unter ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, Februar 2005
- /12/ MITTELBACH, M. & REMSCHMIDT C.: Biodiesel - The comprehensive handbook. Institute for Chemistry University Gray, 2004

- /13/ KINAST; J.A.: Production of Biodiesels from Multiple Feedstocks and Properties of Biodiesels and Biodiesel/Diesel Blends, Final Report, Report 1 in a series of 6, Gas Technology Institute, National Renewable Energy Laboratory, NREL/SR-510-31460, March 2003
- /14/ ZHANG, Y.: Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment *Bioresource Technology* 89 (2003) 1–16, 21 January 2003
- /15/ TYSON, S.K.: Brown Grease Feedstocks for Biodiesel, June 19, 2002
- /16/ BOERRIGTER, H. ET AL.: Production of FT transportation fuels from biomass; technical options, process analysis and optimisation and development potentials. Utrecht, Niederlande, 2003
- /17/ TIJMENSEN, M. ET AL.: Exploration of the possibilities for production of Fischer Tropsch liquids and power via biomass gasification, *Biomass and Bioenergy* 23, 2002
- /18/ HOFMANN, F.; PLÄTTNER, A.; LULIES, S.; SCHOLWIN, F.; KLINSKI, S.; DIESEL, K.; URBAN, W.; BURMEISTER, F.: Evaluierung der Möglichkeiten zur Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.; Leipzig 2006
- /19/ DEUTSCHE BIODIESEL GMBH & CO. KG (DBD): Emissionsprospekt – Biodiesel Kraftstoff der Zukunft. Herausgeber DBD, Berlin, Juni 2005
- /20/ EKBOM, T.; BERGLIN, N. & LÖGDBERG, S.: Black liquor gasification with motor fuel production – BLGMF II, A techno-economic feasibility study on catalytic Fischer-Tropsch synthesis for synthetic diesel production in comparison with methanol and DME as transport fuels. Nykomb Synergetics AB, STFi-Packforsk, KTH Royal Institute of Technology, Statoil, Structor Hulthén Stråth, Final Report, 2005
- /21/ ISING, M.: Der UMSICHT-Vergaser – Biomassevergasung für KWK im mittleren Leistungsbereich. Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe" Band 24, Münster, 2004
- /22/ SCHLEITZER, D.-K.: Ganzheitliche Systemanalyse der energetischen Nutzung biogener Vergasungsgase in Brennstoffzellen. UMSICHT-Schriftenreihe Band 40, Dortmund, 2002
- /23/ INSTITUT FÜR ENERGETIK UND UMWELT gGMBH: vorhandene Datenbasis, Leipzig, 2005/2006
- /24/ REMMELE, E. ET AL.: Pflanzenöl als Speiseöl, Treib-, Schmier- und Verfahrensstoff. Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing, 2005
- /25/ PRANKL, H., KRAMMER K., JANETSCHKE H., ROITMEIER, T.: Blockheizkraftwerke auf Pflanzenölbasis; Forschungsbericht der FJ-BLT Wieselburg, Heft 46 Wieselburg, 2006
- /26/ VASEN, N. U.A. (HRSG.): Biofuel-burning Microturbine, ETA Florenz, 2004. [www.bioturbine.org](http://www.bioturbine.org), 02.06.2006
- /27/ INITIATIVE BRENNSTOFFZELLE: verfügbare Informationen unter URL: <http://www.initiative-brennstoffzelle.de/de/live/start/11.html> (Zugriff: Mai 2007)
- /28/ ZENTRUM FÜR BRENNSTOFFZELLENTÉCHNIK GGMBH: Homepage des Zentrums für Brennstoffzellen-Technik ZBT gGmbH Duisburg, <http://www.zbt-duisburg.de/de/Technik/Grundlagen/>, Zugriff: Mai 2007)

- /29/ INSTITUT FÜR ENERGETIK UND UMWELT GGMBH: hausinterne Datenbasis, Leipzig, 2006/2007
- /30/ INSTITUT FÜR ENERGETIK UND UMWELT GGMBH: Biomassepellets im Kraftwerkssektor – Eine Marktanalyse. Studie im Auftrag der VGB-Forschungstiftung, Leipzig, Dezember 2006 (unveröffentlicht)
- /31/ RUDLOFF, M.: First commercial BtL production facility – the CHOREN  $\beta$ -plant Freiberg. Choren Industries, 15<sup>th</sup> European Biomass Conference, Berlin, May, 2007
- /32/ SUNMACHINE VERTRIEBSGESELLSCHAFT MBH: Vorläufiges Datenblatt mit garantierten Mindestwerten für Sunmachine – „Pellet“: Stand: 15.07.2005 der Sunmachine Vertriebsgesellschaft mbH, Wildpoldsried, URL: [www.sunmachine.com](http://www.sunmachine.com) (Zugriff: Juni 2007)
- /33/ HARTMANN, H. (HRSG.): Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen. Publikation des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) sowie der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe, 1.Auflage 2003
- /34/ TSCHÖKE H, HEINZE H.-E.: Einige unkonventionelle Betrachtungen zum Kraftstoffverbrauch von Pkw, Magdeburger Wissenschaftsjournal, 1-2/2001.
- /35/ FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V.: Handbuch: Herstellung von Rapsölkraftstoff in dezentralen Ölgewinnungsanlagen. November 2007
- /36/ JONGSCHAAP R.E.E. ET AL: Claims and facts on *Jatropha curcas* L., Plant Research International, Wageningen, Report 158, October 2007
- /37/ BERCHMANS H.J., HIRATA S.: Biodiesel production from crude *Jatropha curcas* L. seed oil with a high content of free fatty acids. *Bioresource Technology* 99 (2008) 1716-1721
- /38/ CHITRA P. ET AL: Biofuel and value-added products from *Jatropha curcas*. *Renewable Energy Akshay Urja*, Volume 1, Issue 4, July-August 2005
- /39/ EULER H., GORRIZ D.: Case Study “*Jatropha Curcas*”, commissioned by Global Facilitation Unit for underutilized species (GFU) and Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Frankfurt April 2004
- /40/ UNITED NATIONS DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS: Commission on sustainable development, Fifteenth Session, 30 April-11 May 2007, New York, Small scale production and use of liquid biofuels in Sub-Saharan Africa: Prospectives for sustainable development, Prepared by Energy and Transport Branch, Division for sustainable development, Background paper No. 2, DESA/DSD/2007/2
- /41/ FOIDL ET AL: *Jatropha Curcas* L. as a source for the production of biofuel in Nicaragua, *Bioresource Technology* 58, 77-82, 1996
- /42/ FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V.: Biokraftstoffe: Pflanzen Rohstoffe Produkte, 2007, 3. Auflage
- /43/ FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V.: Wasserstoff aus Biomasse, Gülzower Fachgespräche, Band 25, 17./18. Oktober 2006 in Glüchow
- /44/ FORSCHUNGSVERBUND SONNENENERGIE, WASSERSTOFF UND BRENNSTOFFZELLEN-ENERGIEFORSCHUNG IM VERBUND: Themen 2004, Jahrestagung des FVS 25-26.11.2004 in Berlin

- /45/ SCHWEIGER A. ET AL.: Thermodynamische Bewertung zur Integration einer SOFC mit Heißgasreinigung in ein Biomasse basierendes Vergasungssystem, 10. Symposium Energieinnovation, 13-15/2/2008, Graz Austria
- /46/ ATHANASIOU C. ET AL: From biomass to electricity through integrated gasification/SOFC system optimization and energy balance, International Journal of Hydrogen Energy 32 (2007) 337-342
- /47/ FOSTER WHEELER COMPANY: Pioneering CFB Technology, Brochure verfügbar unter URL : [www.fwc.com](http://www.fwc.com) (Zugriff : April 2008)
- /48/ OFFICIAL JOURNAL OF THE EUROPEAN UNION: Directive 2004/8/EC of the European Parliament and of the Council of 11 February 2004 on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market and amending Directive 92/42/EEC, 21/02/2004
- /49/ INSTITUTE FOR PROSPECTIVE TECHNOLOGICAL STUDIES: Potential for Hydrogen as a fuel for transport in the long term (2020-2030), Full Background Report, March 2004, European Commission, Joint Research Centre
- /50/ TRITTHART W.: Evaluation report on the experiences with the pilot application of biomass standards, WP 2.2 report from the CLEAN-E project, A report prepared as part of the EIE project "Clean Energy Network for Europe (CLEAN-E), Supported by Intelligent Energy Europe, January 2007
- /51/ FAAIJ A.: Modern Biomass Conversion Technologies, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change (2006) 11: 343-375
- /52/ FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE: Kraftstoff, Strom und Wärme aus Stroh und Waldrestholz – Eine systemanalytische Untersuchung, 2007
- /53/ IGELSPRACHER R.: Methode zur integrierten Bewertung von Prozessketten am Beispiel der Ethanolherzeugung aus Biomasse, Ife Schriftenreihe-Heft 51, 1. Auflage 2006
- /54/ IGELSPRACHER R.: Ganzheitliche Systemanalyse zur Erzeugung und Anwendung von Bioethanol im Verkehrssektor, Kurzfassung, Gefördert durch: Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, München, Juni 2003
- /55/ KRAXNER F.: Biomass for Bioenergy: The forest biomass power plant Vienna/Simmering, Inno Forest Case Study, July 2005
- /56/ ISING M.: Vergasung fester Biomasse - Bereits Stand der Technik?, Gülzower Fachgespräch „Energetische Nutzung von Biomasse durch Kraft-Wärme-Kopplung: Stand der Technik und Perspektiven für den ländlichen Raum“, Gülzow, 16-17 Mai 2000
- /57/ KIM S., DALE B.: Allocation Procedure in Ethanol Production System from Corn Grain, LCA Case Studies, Int J LCA (2002) Online first, verfügbar unter URL: [www.scientificjournals.com](http://www.scientificjournals.com) (Zugriff: März 2008)
- /58/ LEUTZE A.: Design Specifics og High Efficiency Biomass Power Plants for fresh wood from forestry exemplified at the 23MWe Biomass Power Plant Simmering Vienna/Austria, Siemens AG, Februar 2005
- /59/ BOLHAR-NORDENKAMPF M.: Arbeitsbericht der Projektgemeinschaft Biomassevergaugung, Hersteller und Marketbetrachtung der thermo-chemischen

- Umwandlung von Biomasse, Gefördert durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe
- /60/ PIMENTEL D., PATZEL T.: Ethanol Production: Energy and economic issues related to Us and Brazilian Sugarcane, Natural Resources Research, Vol. 16, No. 3, September 2007
- /61/ PIMENTEL D., PATZEL T.: Ethanol Production using Corn, Switchgrass and wood; Biodiesel Production using Soybean and Sunflower, Natural Resources Research, Vol. 14, No. 1, September 2005
- /62/ AICHERNIG C. ET AL: 5 years of operating experience with a 2MW CHP Plant based on wood gasification in Güssing Austria, verfügbar unter URL: [www.renet.at](http://www.renet.at) (Zugriff: März 2008)
- /63/ SHAPOURI H. ET AL.: The Energy Balance of Corn Ethanol: An Update, USDA, July 2002
- /64/ SPECHT M., ET AL: Thermochemische Biomassevergasung zur Poly-Generation von Strom, Wärme und Kraftstoff, Forschungsverbund Sonnenenergie, Themen 2006
- /65/ EBERHARD M., TARPENNING M.: The 21st Century Electric Car, White Paper Tesla Motors Inc, July 19, 2006, verfügbar unter URL: [www.teslamotors.com](http://www.teslamotors.com) (Zugriff: April 2008)
- /66/ UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE: The economic feasibility of ethanol production from sugar in the United States, July 2006
- /67/ INSTITUT FÜR ENERGETIK UND UMWELT GGMBH ET AL: Erläuterungspapier zum Entwurf der Biomassenachhaltigkeitsverordnung vom 05.12.2007, Leipzig 2008
- /68/ BOWEN A.: Techno-economic Analysis of Hydrogen Production by Gasification of Biomass, in: "Hydrogen, Fuel Cells and Infrastructure Technologies Program, 2003 Annual Progress Report", U.S. Department of Energy
- /69/ NORHEIM A., SKREIBERG O., HUSTAD J.: Electricity Generation from Producer gas – State of Technology – Fuel Cell , 2006 Presentation in the National Technical Norwegian University
- /70/ EUCAR, CONCAWE & JRC/IES: Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. Version 2c, March 2007, European Commission, Joint Research Centre, verfügbar unter URL: <http://ies.jrc.ec.europa.eu/WTW>
- /71/ L-B-SYSTEMTECHNIK GMBH: GM Well-to-Wheel Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emmissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems – A European Study, L-B-Systemtechnik GmbH, 27 September 2002, verfügbar unter URL: [www.lbst.de/gm-wtw](http://www.lbst.de/gm-wtw) (Zugriff: März 2008)
- /72/ QUIRIN, M.; GÄRTNER, S.O.; PEHNT, M. & REINHARDT, G.A.: CO<sub>2</sub>-Studie - CO<sub>2</sub>-neutrale Wege zukünftiger Mobilität durch Biokraftstoffe: Eine Bestandsaufnahme. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IFEU), Studie im Auftrag der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV), Heft 789, Frankfurt am Main, 2004
- /73/ VIK ENERGIE FÜR DIE INDUSTRIE: CO<sub>2</sub> Kennzeichnung von Strom aus KWK-Anlagen / Brennstoffzuordnung auf elektrische- und thermische Energie, Essen, September 2006

- /74/ FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V.: Leitfaden Bioenergie, Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen, 2005
- /75/ MINERALÖLWIRTSCHAFTSVERBAND E.V.: Rohölpreisentwicklung 1960-2007 (Jahresdurchschnitte). Hamburg, 2008 (Zugriff: Juli 2008)
- /76/ FRITSCHÉ, U. & WIEGMANN, K.: Treibhausgasbilanzen und kumulierter Primärenergieverbrauch von Bioenergie-Konversionspfaden unter Berücksichtigung möglicher Landnutzungsänderungen. Expertise im Auftrag des WBGU, ergänzte Endfassung, Darmstadt Juli/Oktober 2008

## ANHANG

Tab. 5 Übersicht zu den untersuchten Bioenergiekonversionsketten

Nr.	Abkürzung Setting	Rohstoff/Biomasse	Art der Anbaufläche	Herkunft Rohstoff	Zeit-horizont	Konversionsschritte	Produktwandlung
VERKEHR - BIOKRAFTSTOFFE							
1	Mais-EtOH-PKW-05	Maiskörner	Ackerland	Deutschland	2005	alkoholische Fermentation, Absolutierung	Ottomotor/FFV
6	Maissilage-Biomethan-PKW-05	Maissilage	Ackerland	Deutschland	2005	anaerobe Vergärung, Gasaufbereitung	Gas-Ottomotor
7	ZuckerRo-EtOH-PKW-05	Zuckerrohr	Ackerland	Brasilien	2005	alkoholische Fermentation, Absolutierung	Ottomotor/FFV
8	ZuckerRo-EtOH-PKW-30	Zuckerrohr	degradiertes Land	Brasilien	2030	alkoholische Fermentation, Absolutierung	Ottomotor/FFV
9	Getr-EtOH-PKW-05	Getreide	Ackerland	Deutschland	2005	alkoholische Fermentation, Absolutierung	Ottomotor/FFV
11	Raps-FAME-PKW-05	Raps	Ackerland	Deutschland	2005	Extraktion, Umesterung	Dieselmotor
12	Raps-Pöl-PKW-05	Raps	Ackerland	Deutschland	2005	Extraktion	Dieselmotor
14	Ölpalme-FAME-PKW-05	Ölpalme	Ackerland	Indonesien	2005	Extraktion, Umesterung	Dieselmotor
16	Ölpalme-FAME-PKW-30	Ölpalme	Rodung	Indonesien	2030	Extraktion, Umesterung	Dieselmotor
18	JatrophaAck-FAME-PKW-30	Jatropha	Ackerland	Indien	2030	Extraktion, Umesterung	Dieselmotor
20	JatrophaDeg-FAME-PKW-30	Jatropha	degradiertes Land	Indien	2030	Extraktion, Umesterung	Dieselmotor
26	HirseAck-Biogas-BHKW-elektroPKW-30	Rutenhirse	Ackerland	Deutschland	2030	anaerobe Vergärung, Verbrennung in BHKW	Elektromotor
31	HirseWiese-Biogas-BHKW-elektroPKW-30	Rutenhirse	Wiese	Deutschland	2030	anaerobe Vergärung, Verbrennung in BHKW	Elektromotor
37a	KUP-Biomethan-PKW-30	Pappel und Weide aus KUP	Ackerland	Deutschland	2030	Vergasung, Methanisierung	Gas-Ottomotor
40b	Restholz-Hackschn-HeizKW-DT-elektroPKW-30	Restholz	-	n.relevant	2030	Verbrennung	Elektromotor
43	Restholz-FT-PKW-30	Restholz	-	n. relevant	2030	Flugstromvergasung, FT-Synthese	Dieselmotor
44a	Restholz-Biomethan-PKW-30	Restholz	-	n. relevant	2030	Vergasung, Methanisierung	Gas-Ottomotor
45	Restholz-Hyd-PKW-30	Restholz	-	n. relevant	2030	Vergasung, Gasreinigung	Brennstoffzelle (H2)
49	Stroh-FT-PKW-30	Stroh	Ackerland	n. relevant	2030	Vergasung, FT-Synthese	Dieselmotor
50	Stroh-EtOH-PKW-30	Stroh	Ackerland	n. relevant	2030	alkoholische Fermentation, Absolutierung	Ottomotor/FFV
56	Ernterück/Gülle-Biomethan-PKW-05	Ernterückstände/Exkremete	-	n. relevant	2005	anaerobe Vergärung, Gasaufbereitung	Gas-Ottomotor
53	Ernterück/Gülle-Biogas-BHKW-elektroPKW-30	Ernterückstände/Exkremete	-	n. relevant	2005	anaerobe Vergärung, Verbrennung in BHKW	Elektromotor
61	Grassil/Gülle-Biomethan-PKW-30	Gülle/Grassilage 30/70	Ackerland	EU-CON	2030	anaerobe Vergärung, Gasaufbereitung	Gas-Ottomotor
62	Altöl-FAME-PKW-05	Altspeiseöl/Tierfett	-	n. relevant	2005	Raffination, Ver-/Umesterung	Dieselmotor
67	BioAbfall-Biomethan-PKW-05	Bioabfall	-	n. relevant	2005	anaerobe Vergärung, Gasaufbereitung	Gas-Ottomotor
WÄRME							
21	HirseAck-Pellet-Kleinfeuerung-30	Rutenhirse	Ackerland	Deutschland	2030	Pelletierung	Kleinfeuerungsanlage
32	KUP-Pellet-Kleinfeuerung-30	Pappel und Weide aus KUP	Ackerland	Deutschland	2030	Pelletierung	Kleinfeuerungsanlage
38	Restholz-Pellet-Kleinfeuerung-05	Restholz	-	n.relevant	2005	Pelletierung	Kleinfeuerungsanlage
46	Stroh-Pellet-Kleinfeuerung-05	Stroh	Ackerland	n.relevant	2005	Pelletierung	Kleinfeuerungsanlage

Nr.	Abkürzung Setting	Rohstoff/Biomasse	Art der Anbaufläche	Herkunft Rohstoff	Zeit-horizont	Konversionsschritte	Produktwandlung
STROM UND WÄRME - KWK (Hauptprodukt Strom)							
2	Maissilage-Biogas-BHKW-05	Maissilage	Ackerland	Deutschland	2005	anaerobe Vergärung, Gasaufbereitung	dezentrales BHKW (Gas-Ottomotor)
3	Maissilage-Biogas-SOFC-30	Maissilage	Ackerland	Deutschland	2005	anaerobe Vergärung, Gasaufbereitung	SOFC-Brennstoffzelle
4	Maissilage-Biomethan-BHKW-05	Maissilage	Ackerland	Deutschland	2005	anaerobe Vergärung, Gasaufbereitung	dezentrales BHKW (Gas-Ottomotor)
5	Maissilage-Biomethan-GuD-05	Maissilage	Ackerland	Deutschland	2005	anaerobe Vergärung, Gasaufbereitung	zentrales GuD
10	Raps-Pöl-BHKW-05	Raps	Ackerland	Deutschland	2005	Extraktion	dezentrales BHKW (Dieselmotor)
13	Ölpalme-Pöl-BHKW-05	Ölpalme	Ackerland	Indonesien	2005	Extraktion, Umesterung	dezentrales BHKW (Dieselmotor)
15	Ölpalme-Pöl-BHKW-30	Ölpalme	Rodung	Indonesien	2030	Extraktion, Umesterung	dezentrales BHKW (Dieselmotor)
17	JatrophaAck-Pöl-BHKW-30	Jatropha	Ackerland	Indien	2030	Extraktion, Umesterung	dezentrales BHKW (Dieselmotor)
19	JatrophaDeg-Pöl-BHKW-30	Jatropha	degradiertes Land	Indien	2030	Extraktion, Umesterung	dezentrales BHKW (Dieselmotor)
22	HirseAck-Biogas-BHKW-30	Rutenhirse	Ackerland	Deutschland	2030	anaerobe Vergärung	dezentrales BHKW (Gas-Ottomotor)
23	HirseAck-Biogas-SOFC-30	Rutenhirse	Ackerland	Deutschland	2030	anaerobe Vergärung	SOFC-Brennstoffzelle
24	HirseAck-Biomethan-BHKW-30	Rutenhirse	Ackerland	Deutschland	2030	anaerobe Vergärung, Gasaufbereitung	dezentrales BHKW (Gas-Ottomotor)
25	HirseAck-Biomethan-GuD-30	Rutenhirse	Ackerland	Deutschland	2030	anaerobe Vergärung, Gasaufbereitung	zentrales GuD
27	HirseWiese-Biogas-BHKW-30	Rutenhirse	Wiese	Deutschland	2030	anaerobe Vergärung	dezentrales BHKW (Gas-Ottomotor)
28	HirseWiese-Biogas-SOFC-30	Rutenhirse	Wiese	Deutschland	2030	anaerobe Vergärung	SOFC-Brennstoffzelle
29	HirseWiese-Biomethan-BHKW-30	Rutenhirse	Wiese	Deutschland	2030	anaerobe Vergärung, Gasaufbereitung	dezentrales BHKW (Gas-Ottomotor)
30	HirseWiese-Biomethan-GuD-30	Rutenhirse	Wiese	Deutschland	2030	anaerobe Vergärung, Gasaufbereitung	zentrales GuD
33	KUP-Pellet-KohleKW-30	Pappel und Weide aus KUP	Ackerland	Deutschland	2030	Pelletierung, Mitverbrennung	zentrales Kohlekraftwerk
34	KUP-Hackschn-HeizKW-DT-30	Pappel und Weide aus KUP	Ackerland	Deutschland	2030	Verbrennung	zentrales Heizkraftwerk, Dampfturbine
35	KUP-Rohgas-GT-30	Pappel und Weide aus KUP	Ackerland	Deutschland	2030	Wirbelschichtvergasung	Gasturbine
36	KUP-Rohgas-SOFC-30	Pappel und Weide aus KUP	Ackerland	Deutschland	2030	Wirbelschichtvergasung	SOFC-Brennstoffzelle
37b	KUP-Biomethan-GuD-30	Pappel und Weide aus KUP	Ackerland	Deutschland	2030	Vergasung, Methanisierung, Verbrennung	zentrales GuD
39	Restholz-Pellet-KohleKW-05	Restholz	-	n. relevant	2005	Pelletierung, Mitverbrennung	zentrales Kohlekraftwerk
40	Restholz-Hackschn-HeizKW-DT-05	Restholz	-	n. relevant	2005	Verbrennung	zentrales Heizkraftwerk, Dampfturbine
41	Restholz-Rohgas-GT-30	Restholz	-	n. relevant	2030	Wirbelschichtvergasung	Gasturbine
42	Restholz-Rohgas-SOFC-30	Restholz	-	n. relevant	2030	Wirbelschichtvergasung	SOFC-Brennstoffzelle
44b	Restholz-Biomethan-GuD-30	Restholz	-	n. relevant	2030	Vergasung, Methanisierung, Verbrennung	zentrales GuD
47	Stroh-Pellet-KohleKW-05	Stroh	Ackerland	n. relevant	2005	Pelletierung, Mitverbrennung	zentrales Kohlekraftwerk
48	Stroh-Hackschn-HeizKW-DT-05	Stroh	Ackerland	n. relevant	2005	Verbrennung	zentrales Heizkraftwerk, Dampfturbine
51	Ernterück/Gülle-Biogas-BHKW-05	Ernterückstände/Exkrement	-	n. relevant	2005	anaerobe Vergärung	dezentrales BHKW (Gas-Ottomotor)
52	Ernterück/Gülle-Biogas-SOFC-30	Ernterückstände/Exkrement	-	n. relevant	2005	anaerobe Vergärung	SOFC-Brennstoffzelle
54	Ernterück/Gülle-Biomethan-BHKW-05	Ernterückstände/Exkrement	-	n. relevant	2005	anaerobe Vergärung, Gasaufbereitung	dezentrales BHKW (Gas-Ottomotor)
55	Ernterück/Gülle-Biomethan-GuD-30	Ernterückstände/Exkrement	-	n. relevant	2030	anaerobe Vergärung, Gasaufbereitung	zentrales GuD
57	Grassil/Gülle-Biogas-BHKW-30	Gülle/Grassilage 30/70	Ackerland	EU-CON	2030	anaerobe Vergärung	dezentrales BHKW (Gas-Ottomotor)
58	Grassil/Gülle-Biogas-SOFC-30	Gülle/Grassilage 30/70	Ackerland	EU-CON	2030	anaerobe Vergärung	SOFC-Brennstoffzelle
59	Grassil/Gülle-Biomethan-BHKW-30	Gülle/Grassilage 30/70	Ackerland	EU-CON	2030	anaerobe Vergärung, Gasaufbereitung	dezentrales BHKW (Gas-Ottomotor)
60	Grassil/Gülle-Biomethan-GuD-30	Gülle/Grassilage 30/70	Ackerland	EU-CON	2030	anaerobe Vergärung, Gasaufbereitung	zentrales GuD

Nr.	Abkürzung Setting	Rohstoff/Biomasse	Art der Anbaufläche	Herkunft Rohstoff	Zeit-horizont	Konversionsschritte	Produktwandlung
63	BioAbfall-Biogas-BHKW-05	Bioabfall	-	n. relevant	2005	anaerobe Vergärung	dezentrales BHKW (Gas-Ottomotor)
64	BioAbfall-Biogas-SOFC-30	Bioabfall	-	n. relevant	2005	anaerobe Vergärung	SOFC-Brennstoffzelle
65	BioAbfall-Biomethan-BHKW-05	Bioabfall	-	n. relevant	2005	anaerobe Vergärung, Gasaufbereitung	dezentrales BHKW (Gas-Ottomotor)
66	BioAbfall-Biomethan-GuD-05	Bioabfall	-	n. relevant	2005	anaerobe Vergärung, Gasaufbereitung	zentrales GuD

Tab. 6 Charakterisierung der settingspezifischen Modellkonzepte

Nr.	Abkürzung Setting	Rohstoffeinsatz [GJ <sub>RST</sub> /a]	Produkt [GJ <sub>P</sub> /a]	Output nach Produktwandlung		Koppelprodukte I		Koppelprodukte II		Hilfsenergie			
				[MW <sub>EE</sub> ]	[GJ <sub>EE</sub> /a]	[GJ <sub>KP</sub> /a]		[GJ <sub>KP</sub> /a]		[GJ <sub>HE,alle</sub> /a]	[GJ <sub>HE,anb+tp</sub> /a]	[GJ <sub>HE,el</sub> /a]	[GJ <sub>HE,th</sub> /a]
VERKEHR - BIODIESELSTOFFE													
1	Mais-EtOH-PKW-05	5.534.458	2.546.000	23	661.960	DDGS	2.031.120	-		1.650.637	482.137	171.000	997.500
6	Maissilage-Biomethan-PKW-05	91.755	37.895	0	9.853	Gärreste	16.800	-		21.374	8.442	6.786	6.147
7	ZuckerRo-EtOH-PKW-05	9.180.000	3.175.800	29	825.708	Bagasse	3.790.800	-		2.053.146	245.124	211.680	1.596.342
8	ZuckerRo-EtOH-PKW-30	9.180.000	3.175.800	32	920.982	Bagasse	3.790.800	-		2.053.146	245.124	211.680	1.596.342
9	Getr-EtOH-PKW-05	6.585.360	3.175.800	29	825.708	DDGS	2.947.526	-		2.472.982	809.669	205.195	1.458.119
11	Raps-FAME-PKW-05	5.038.252	3.710.000	37	1.075.900	Extraktionschrot	2.369.999	Glycerin	219.300	1.061.015	854.691	113.317	93.007
12	Raps-Pöl-PKW-05	84.341	49.369	0	14.317	Presskuchen	52.759	-		14.539	13.925	614	-
14	Ölpalme-FAME-PKW-05	8.589.583	3.710.000	37	1.075.900	Pressrückstände	2.493.750	Glycerin	219.300	3.291.915	2.833.152	179.483	279.279
16	Ölpalme-FAME-PKW-30	8.589.583	3.710.000	41	1.187.200	Pressrückstände	2.493.750	Glycerin	219.300	3.291.915	2.833.152	179.483	279.279
18	JatrophaAck-FAME-PKW-30	8.388.398	3.710.000	41	1.187.200	Presskuchen	3.563.200	Glycerin	219.300	691.638	416.710	131.299	143.629
20	JatrophaDeg-FAME-PKW-30	8.388.398	3.710.000	41	1.187.200	Presskuchen	3.563.200	Glycerin	219.300	760.109	485.181	131.299	143.629
26	HirseAck-Biogas-BHKW-elektroPKW-30	44.887	13.151	0	10.258	Gärreste	9.600	Wärme	15.227	5.044	1.555	1.052	2.436
31	HirseWiese-Biogas-BHKW-elektroPKW-30	44.887	13.151	0	10.258	Gärreste	9.600	Wärme	15.227	5.044	1.555	1.052	2.436
37a	KUP-Biomethan-PKW-30	1.112.664	735.800	7	213.382	Strom	24.912	Wärme	110.678	46.905	30.713	16.192	-
40b	Restholz-Hackschn-HeizKW-DT-electroPKW-30	633.600	145.728		113.668			Wärme	380.160	15.903	3.507	2.195	
43	Restholz-FT-PKW-30	14.920.920	6.371.200	71	2.038.784	Naphtha	1.190.400	Strom	178.560	258.280	258.280	-	-
44a	Restholz-Biomethan-PKW-30	1.112.384	712.500	7	206.625	Strom	24.192	Wärme	107.136	68.974	53.310	15.664	-
45	Restholz-Hyd-PKW-30	7.198.408	4.045.440	55	1.577.722	-		-		1.612.542	841.481	771.061	-
49	Stroh-FT-PKW-30	15.278.240	6.265.600	70	2.004.992	Naphtha	1.168.000	-	460.800	1.694.598	1.694.598	-	-
50	Stroh-EtOH-PKW-30	10.872.520	4.551.980	46	1.320.074	Strom	17.732	-		1.289.034	1.112.934	-	176.100
56	Ernterück/Gülle-Biomethan-PKW-05	145.240	59.587	1	15.493	Gärreste	28.000	-		17.976	2.718	6.456	8.801
53	Ernterück/Gülle-Biogas-BHKW-elektroPKW-30	72.620	13.151	0	10.258	Gärreste	36.800	Wärme	15.227	6.265	1.406	1.052	3.807
61	Grassil/Gülle-Biomethan-PKW-30	108.186	61.549	1	17.849	Gärreste	28.000	-		19.131	5.199	6.615	7.317
62	Altöl-FAME-PKW-05	1.760.231	1.739.063	18	504.328	Glycerin	90.047	-		219.785	104.698	7.256	107.831
67	BioAbfall-Biomethan-PKW-05	113.609	63.642	1	16.547	Gärreste	20.800	-		18.093	1.206	8.161	8.726

Nr.	Abkürzung Setting	Rohstoffeinsatz	Produkt	Output nach Produktwandlung		Koppelprodukte I		Koppelprodukte II		Hilfsenergie			
		[GJ <sub>RST</sub> /a]	[GJ <sub>p</sub> /a]	[MW <sub>EE</sub> ]	[GJ <sub>EE</sub> /a]		[GJ <sub>KP</sub> /a]		[GJ <sub>KP</sub> /a]	[GJ <sub>HE,alle</sub> /a]	[GJ <sub>HE,amb+tt</sub> /a]	[GJ <sub>HE,el</sub> /a]	[GJ <sub>HE,th</sub> /a]
WÄRME													
21	HirseAck-Pellet-Kleinfeuerung-30	503	124	0	86	-		-		34	14	20	
32	KUP-Pellet-Kleinfeuerung-30	430	115	0	86	Wärme	36	-		30	10	21	
38	Restholz-Pellet-Kleinfeuerung-05	469	109	0	86	Wärme	25	-		17	3	14	
46	Stroh-Pellet-Kleinfeuerung-05	542	107	0	86	-		-		74	54	20	
STROM UND WÄRME - KWK (Hauptprodukt Strom)													
2	Maissilage-Biogas-BHKW-05	45.877	37.895	0	13.162	Gärreste	8.000	Wärme	15.227	7.740	4.252	1.052	2.436
3	Maissilage-Biogas-SOFC-30	45.877	37.895	1	14.540	Gärreste	8.000	Wärme	6.965	7.725	4.209	1.080	2.436
4	Maissilage-Biomethan-BHKW-05	91.755	62.797	1	23.875	Gärreste	16.800	Wärme	27.630	20.466	8.442	5.877	6.147
5	Maissilage-Biomethan-GuD-05	91.755	62.797	1	27.072	Gärreste	16.800	Wärme	18.896	20.530	8.442	5.942	6.147
10	Raps-Pöl-BHKW-05	84.341	49.369	1	18.751	Presskuchen	52.759	Wärme	21.722	14.915	13.925	990	-
13	Ölpalme-Pöl-BHKW-05	113.064	49.369	1	18.751	Pressrückstände	32.825	Wärme	21.722	39.115	37.289	1.826	-
15	Ölpalme-Pöl-BHKW-30	113.064	49.369	1	18.751	Pressrückstände	32.825	Wärme	21.722	39.115	37.289	1.826	-
17	JatrophaAck-Pöl-BHKW-30	107.854	49.369	1	18.751	Presskuchen	46.750	Wärme	21.722	6.541	5.419	1.121	-
19	JatrophaDeg-Pöl-BHKW-30	107.854	49.369	1	18.751	Presskuchen	46.750	Wärme	21.722	7.421	6.300	1.121	-
22	HirseAck-Biogas-BHKW-30	44.887	37.895	0	13.162	Gärreste	9.600	Wärme	15.227	5.044	1.555	1.052	2.436
23	HirseAck-Biogas-SOFC-30	44.887	37.895	1	14.540	Gärreste	9.600	Wärme	6.965	5.028	1.512	1.080	2.436
24	HirseAck-Biomethan-BHKW-30	89.774	62.797	1	23.875	Gärreste	18.400	Wärme	27.630	15.072	3.048	5.877	6.147
25	HirseAck-Biomethan-GuD-30	89.774	62.797	1	27.072	Gärreste	18.400	Wärme	18.896	15.137	3.048	5.942	6.147
27	HirseWiese-Biogas-BHKW-30	44.887	37.895	0	13.162	Gärreste	9.600	Wärme	15.227	5.044	1.555	1.052	2.436
28	HirseWiese-Biogas-SOFC-30	44.887	37.895	1	14.540	Gärreste	9.600	Wärme	6.965	5.028	1.512	1.080	2.436
29	HirseWiese-Biomethan-BHKW-30	89.774	62.797	1	23.875	Gärreste	18.400	Wärme	27.630	15.072	3.048	5.877	6.147
30	HirseWiese-Biomethan-GuD-30	89.774	62.797	1	27.072	Gärreste	18.400	Wärme	18.896	15.137	3.048	5.942	6.147
33	KUP-Pellet-KohleKW-30	2.874.900	2.880.000	60	1.296.000	Wärme	239.760	-		291.891	73.299	218.592	-
34	KUP-Hackschn-HeizKW-DT-30	633.600	-	5	145.728	-		Wärme	380.160	26.350	16.149	10.201	-
35	KUP-Rohgas-GT-30	2.592.000	-	23	648.000	-		Wärme	1.425.600	99.761	54.401	45.360	-
36	KUP-Rohgas-SOFC-30	518.400	-	9	217.728	-		Wärme	104.328	15.235	10.880	4.355	-
37b	KUP-Biomethan-GuD-30	1.112.664	735.800	11	316.483	-		Wärme	220.800	79.580	30.713	48.867	-
39	Restholz-Pellet-KohleKW-05	2.961.969	2.592.000	54	1.166.400	Wärme	159.508	-		186.395	24.993	161.402	-
40	Restholz-Hackschn-HeizKW-DT-05	633.600	-	5	145.728	-		Wärme	380.160	15.903	5.702	10.201	-
41	Restholz-Rohgas-GT-30	2.592.000	-	23	648.000	-		Wärme	1.425.600	57.024	11.664	45.360	-
42	Restholz-Rohgas-SOFC-30	518.400	-	9	217.728	-		Wärme	104.328	6.687	2.333	4.355	-
44b	Restholz-Biomethan-GuD-30	1.112.384	712.500	11	306.173	-		Wärme	213.600	59.433	12.126	47.307	-
47	Stroh-Pellet-KohleKW-05	4.140.180	3.564.000	79	1.706.400	-		-		675.575	424.313	251.262	-
48	Stroh-Hackschn-HeizKW-DT-05	633.600	-	5	145.728	-		Wärme	380.160	75.533	65.332	10.201	-
51	Ernterück/Gülle-Biogas-BHKW-05	72.620	37.895	0	13.162	Gärreste	36.800	Wärme	15.227	6.265	1.406	1.052	3.807
52	Ernterück/Gülle-Biogas-SOFC-30	72.620	37.895	1	14.540	Gärreste	36.800	Wärme	6.965	6.250	1.363	1.080	3.807

Nr.	Abkürzung Setting	Rohstoffeinsatz	Produkt	Output nach Produktwandlung		Koppelprodukte I		Koppelprodukte II		Hilfsenergie			
				[G <sub>RST</sub> /a]	[G <sub>Jp</sub> /a]	[MW <sub>EE</sub> ]	[G <sub>FE</sub> /a]		[G <sub>Kp</sub> /a]		[G <sub>Kp</sub> /a]	[G <sub>HE,alle</sub> /a]	[G <sub>HE,amb+tr</sub> /a]
54	Ernterück/Gülle-Biomethan-BHKW-05	145.240	59.587	1	22.637	Gärreste	72.800	Wärme	26.218	17.114	2.718	5.594	8.801
55	Ernterück/Gülle-Biomethan-GuD-30	145.240	59.587	1	25.690	Gärreste	72.800	Wärme	17.930	17.175	2.718	5.655	8.801
57	Grassil/Gülle-Biogas-BHKW-30	54.093	37.895	0	13.162	Gärreste	13.600	Wärme	15.227	6.735	2.637	1.052	3.045
58	Grassil/Gülle-Biogas-SOFC-30	54.093	37.895	1	14.540	Gärreste	13.600	Wärme	6.965	6.719	2.594	1.080	3.045
59	Grassil/Gülle-Biomethan-BHKW-30	108.186	61.549	1	23.386	Gärreste	28.000	Wärme	27.082	18.240	5.199	5.724	7.317
60	Grassil/Gülle-Biomethan-GuD-30	108.186	61.549	1	26.554	Gärreste	28.000	Wärme	18.520	18.304	5.199	5.787	7.317
63	BioAbfall-Biogas-BHKW-05	113.609	75.789	1	26.294	Gärreste	28.000	Wärme	30.454	12.819	1.260	3.945	7.614
64	BioAbfall-Biogas-SOFC-30	113.609	75.789	1	29.081	Gärreste	28.000	Wärme	13.929	12.788	1.174	4.001	7.614
65	BioAbfall-Biomethan-BHKW-05	113.609	63.642	1	24.192	Gärreste	28.000	Wärme	28.003	17.173	1.206	7.240	8.726
66	BioAbfall-Biomethan-GuD-05	113.609	63.642	1	27.446	Gärreste	28.000	Wärme	19.150	17.238	1.206	7.306	8.726

Tab. 7 Ergebnisübersicht (flächenspezifische Erträge, spezifische Energieaufwendungen ohne Allokation, Gesamtwirkungsgrade)

Nr.	Abkürzung Setting	Rohstoff- ertrag	Rohstoff- ertrag	Ohne Allokation [G <sub>JGES</sub> /G <sub>JEE</sub> ]												
				Rohstoff- anbau	Rohstoff- transport	Rohstoff- einsatz	Konversion I	Konversion II	Produkt- transport	Summe	Produktwandlung	Summe	Gesamt- wirkungs- grad	spez. Produkt- ertrag		
				[t <sub>18</sub> /(ha a)]	[G <sub>RST</sub> /(ha a)]	[G <sub>HE</sub> /G <sub>Jp</sub> ]	[G <sub>HE</sub> /G <sub>Jp</sub> ]	[G <sub>RST</sub> /G <sub>Jp</sub> ]	[G <sub>HE</sub> /G <sub>Jp</sub> ]	[G <sub>RST+HE</sub> /G <sub>Jp</sub> ]	[G <sub>RST+HE</sub> /G <sub>JEE</sub> ]	[G <sub>Jp</sub> /G <sub>JEE</sub> ]	[G <sub>HE</sub> /G <sub>JEE</sub> ]			
VERKEHR - BIOKRAFTSTOFFE																
1	Mais-EtOH-PKW-05	7,57	158,69	0,151	0,008	2,174	0,459	0,000	0,030	2,822	10,854	3,846	-	10,854	9,2	18,98
6	Maissilage-Biomethan-PKW-05	14,52	211,20	0,118	0,006	1,457	0,183	0,000	0,032	1,796	6,908	3,846	-	6,908	14,5	37,69
7	ZuckerRo-EtOH-PKW-05	44,22	650,00	0,346	0,012	2,891	0,569	0,000	0,030	3,848	14,799	3,846	-	14,799	6,8	58,47
8	ZuckerRo-EtOH-PKW-30	24,76	364,00	0,346	0,012	2,891	0,569	0,000	0,030	3,848	13,268	3,448	-	13,268	7,5	36,52
9	Getr-EtOH-PKW-05	6,38	102,80	0,217	0,008	2,074	0,524	0,000	0,030	2,852	10,970	3,846	-	10,970	9,1	12,89
11	Raps-FAME-PKW-05	3,33	83,54	0,201	0,003	1,386	0,035	0,022	0,030	1,678	5,785	3,448	-	5,785	17,3	17,48
12	Raps-Pöl-PKW-05	3,33	83,54	0,251	0,004	1,727	0,013	0,000	0,030	2,024	6,981	3,448	-	6,981	14,3	14,03
14	Ölpalme-FAME-PKW-05	3,75	37,56	0,742	0,007	2,363	0,104	0,022	0,030	3,268	11,271	3,448	-	11,271	8,9	4,61
16	Ölpalme-FAME-PKW-30	3,75	37,56	0,742	0,007	2,363	0,104	0,022	0,030	3,268	10,214	3,125	-	10,214	9,8	5,09
18	JatrophaAck-FAME-PKW-30	3,91	100,00	0,078	0,005	2,284	0,053	0,022	0,030	2,472	7,724	3,125	-	7,724	12,9	14,01
20	JatrophaDeg-FAME-PKW-30	2,11	53,94	0,078	0,005	2,284	0,053	0,022	0,030	2,472	7,724	3,125	-	7,724	12,9	7,56
26	HirseAck-Biogas-BHKW-elektroPKW-30	13,50	235,31	0,079	0,013	3,414	0,245	0,020	0,010	3,781	4,848	1,282	-	4,848	20,6	53,76
31	HirseWiese-Biogas-BHKW-elektroPKW-30	13,50	235,31	0,079	0,013	3,414	0,245	0,020	0,010	3,781	4,848	1,282	-	4,848	20,6	53,76
37a	KUP-Biomethan-PKW-30	8,34	154,32	0,025	0,007	1,512	0,058	0,000	0,032	1,633	5,632	3,448	-	5,632	17,8	29,60

Nr.	Abkürzung Setting	Rohstoff- ertrag	Rohstoff- ertrag	Ohne Allokation [GJ <sub>GES</sub> /GJ <sub>EE</sub> ]												Gesamt- wirkungs- grad	spez. Produkt- ertrag
				Rohstoff- anbau	Rohstoff- transport	Rohstoff- einsatz	Konversion I	Konversion II	Produkt- transport	Summe		Produktwandlung		Summe			
				[t <sub>TS</sub> /(ha a)]	[GJ <sub>RST</sub> /(ha a)]	[GJ <sub>HE</sub> /GJ <sub>P</sub> ]	[GJ <sub>HE</sub> /GJ <sub>P</sub> ]	[GJ <sub>RST</sub> /GJ <sub>P</sub> ]	[GJ <sub>HE</sub> /GJ <sub>P</sub> ]	[GJ <sub>HE</sub> /GJ <sub>P</sub> ]	[GJ <sub>HE</sub> /GJ <sub>P</sub> ]	[GJ <sub>RST+HE</sub> /GJ <sub>P</sub> ]	[GJ <sub>RST+HE</sub> /GJ <sub>EE</sub> ]	[GJ <sub>P</sub> /GJ <sub>EE</sub> ]	[GJ <sub>HE</sub> /GJ <sub>EE</sub> ]		
40b	Restholz-Hackschn-HeizKW-DT-elektroPKW-30	0,85	14,76	0,000	0,020	4,348	0,070	0,000	0,000	4,437	5,689	1,282	-	5,689	17,6	2,65	
43	Restholz-FT-PKW-30	0,85	14,76	0,000	0,011	2,342	0,000	0,000	0,030	2,382	7,445	3,125	-	7,445	13,4	2,02	
44a	Restholz-Biomethan-PKW-30	0,85	14,76	0,000	0,007	1,562	0,058	0,000	0,032	1,659	5,721	3,448	-	5,721	17,5	2,74	
45	Restholz-Hyd-PKW-30	0,85	14,76	0,000	0,008	1,779	0,151	0,000	0,240	2,178	5,585	2,564	-	5,585	17,9	3,23	
49	Stroh-FT-PKW-30	8,13	131,73	0,231	0,010	2,438	0,000	0,000	0,030	2,709	8,465	3,125	-	8,465	11,8	17,29	
50	Stroh-EtOH-PKW-30	8,13	131,73	0,226	0,009	2,389	0,039	0,000	0,009	2,672	9,213	3,448	-	9,213	10,9	15,99	
56	Ernterück/Gülle-Biomethan-PKW-05	5,15	93,60	0,224	0,025	2,430	0,233	0,000	0,032	2,945	11,326	3,846	-	11,326	8,8	10,01	
53	Ernterück/Gülle-Biogas-BHKW-elektroPKW-30	5,15	93,60	0,510	0,057	5,523	0,350	0,020	0,010	6,469	8,294	1,282	-	8,294	12,1	13,22	
61	Grassil/Gülle-Biomethan-PKW-30	9,13	120,00	0,067	0,013	1,752	0,204	0,000	0,032	2,068	7,131	3,448	-	7,131	14,0	19,86	
62	Altöl-FAME-PKW-05	-	-	0,000	0,029	0,967	0,063	0,000	0,030	1,090	3,757	3,448	-	3,757	26,6	-	
67	BioAbfall-Biomethan-PKW-05	-	-	0,000	0,009	1,780	0,243	0,000	0,032	2,063	7,935	3,846	-	7,935	12,6	-	
WÄRME																	
21	HirseAck-Pellet-Kleinfuehrung-30	13,50	235,31	0,025	0,004	1,083	0,039	0,000	0,001	1,153	1,647	1,429	0,017	1,663	60,1	152,05	
32	KUP-Pellet-Kleinfuehrung-30	8,34	154,32	0,016	0,004	0,996	0,044	0,000	0,001	1,063	1,417	1,333	0,017	1,433	69,8	116,19	
38	Restholz-Pellet-Kleinfuehrung-05	0,85	14,76	0,000	0,005	1,143	0,031	0,000	0,001	1,180	1,475	1,250	0,016	1,491	67,1	10,33	
46	Stroh-Pellet-Kleinfuehrung-05	8,13	131,73	0,128	0,005	1,355	0,046	0,000	0,001	1,536	1,920	1,250	0,017	1,936	51,6	77,76	
STROM UND WÄRME - KWK (Hauptprodukt Strom)																	
2	Maissilage-Biogas-BHKW-05	14,52	211,20	0,107	0,006	1,326	0,093	0,000	0,010	1,542	4,057	2,632	0,020	4,077	24,5	60,54	
3	Maissilage-Biogas-SOFC-30	14,52	211,20	0,107	0,006	1,326	0,093	0,000	0,009	1,540	3,209	2,083	0,020	3,229	31,0	76,47	
4	Maissilage-Biomethan-BHKW-05	14,52	211,20	0,118	0,006	1,461	0,184	0,000	0,010	1,779	4,683	2,632	0,020	4,703	21,3	54,93	
5	Maissilage-Biomethan-GuD-05	14,52	211,20	0,118	0,006	1,461	0,184	0,000	0,010	1,779	4,126	2,319	0,020	4,146	24,1	62,34	
10	Raps-Pöl-BHKW-05	3,33	83,54	0,251	0,004	1,727	0,013	0,000	0,030	2,024	5,327	2,632	0,020	5,347	18,7	18,38	
13	Öpalme-Pöl-BHKW-05	3,75	37,56	0,735	0,007	2,340	0,030	0,000	0,030	3,142	8,268	2,632	0,020	8,288	12,1	6,10	
15	Öpalme-Pöl-BHKW-30	3,75	37,56	0,735	0,007	2,340	0,030	0,000	0,030	3,142	8,268	2,632	0,020	8,288	12,1	6,10	
17	JatrophaAck-Pöl-BHKW-30	3,91	100,00	0,075	0,005	2,185	0,015	0,000	0,030	2,310	6,078	2,632	0,020	6,098	16,4	17,39	
19	JatrophaDeg-Pöl-BHKW-30	2,11	53,94	0,075	0,005	2,185	0,015	0,000	0,030	2,310	6,078	2,632	0,020	6,098	16,4	9,38	
22	HirseAck-Biogas-BHKW-30	13,50	235,31	0,030	0,005	1,297	0,093	0,000	0,010	1,435	3,777	2,632	0,020	3,797	26,3	68,94	
23	HirseAck-Biogas-SOFC-30	13,50	235,31	0,030	0,005	1,297	0,093	0,000	0,009	1,434	2,987	2,083	0,020	3,007	33,3	87,08	
24	HirseAck-Biomethan-BHKW-30	13,50	235,31	0,033	0,006	1,430	0,184	0,000	0,010	1,662	4,374	2,632	0,020	4,394	22,8	62,55	
25	HirseAck-Biomethan-GuD-30	13,50	235,31	0,033	0,006	1,430	0,184	0,000	0,010	1,662	3,854	2,319	0,020	3,874	25,8	70,99	
27	HirseWiese-Biogas-BHKW-30	13,50	235,31	0,030	0,005	1,297	0,093	0,000	0,010	1,435	3,777	2,632	0,020	3,797	26,3	68,94	
28	HirseWiese-Biogas-SOFC-30	13,50	235,31	0,030	0,005	1,297	0,093	0,000	0,009	1,434	2,987	2,083	0,020	3,007	33,3	87,08	
29	HirseWiese-Biomethan-BHKW-30	13,50	235,31	0,033	0,006	1,430	0,184	0,000	0,010	1,662	4,374	2,632	0,020	4,394	22,8	62,55	

Nr.	Abkürzung Setting	Rohstoff- ertrag	Rohstoff- ertrag	Ohne Allokation [GJ <sub>GES</sub> /GJ <sub>EE</sub> ]												Gesamt- wirkungs- grad	spez. Produkt- ertrag
				Rohstoff- anbau	Rohstoff- transport	Rohstoff- einsatz	Konversion I	Konversion II	Produkt- transport	Summe		Produktwandlung		Summe			
				[t <sub>TS</sub> /(ha a)]	[GJ <sub>RST</sub> /(ha a)]	[GJ <sub>HE</sub> /GJ <sub>P</sub> ]	[GJ <sub>HE</sub> /GJ <sub>P</sub> ]	[GJ <sub>RST</sub> /GJ <sub>P</sub> ]	[GJ <sub>HE</sub> /GJ <sub>P</sub> ]	[GJ <sub>HE</sub> /GJ <sub>P</sub> ]	[GJ <sub>HE</sub> /GJ <sub>P</sub> ]	[GJ <sub>RST+HE</sub> /GJ <sub>P</sub> ]	[GJ <sub>RST+HE</sub> /GJ <sub>EE</sub> ]	[GJ <sub>P</sub> /GJ <sub>EE</sub> ]	[GJ <sub>HE</sub> /GJ <sub>EE</sub> ]		
30	HirseWiese-Biomethan-GuD-30	13,50	235,31	0,033	0,006	1,430	0,184	0,000	0,010	1,662	3,854	2,319	0,020	3,874	25,8	70,99	
33	KUP-Pellet-KohleKW-30	8,34	154,32	0,016	0,004	0,998	0,044	0,000	0,005	1,068	2,374	2,222	0,070	2,444	40,9	69,57	
34	KUP-Hackschn-HeizKW-DT-30	8,34	154,32	0,072	0,020	0,000	0,000	0,000	0,005	0,096	0,416	4,348	0,070	4,834	20,7	35,49	
35	KUP-Rohgas-GT-30	8,34	154,32	0,066	0,018	0,000	0,000	0,000	0,000	0,084	0,336	4,000	0,070	4,406	22,7	38,58	
36	KUP-Rohgas-SOFC-30	8,34	154,32	0,034	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000	0,044	0,091	2,083	0,020	2,194	45,6	74,07	
37b	KUP-Biomethan-GuD-30	8,34	154,32	0,058	0,007	1,512	0,058	0,000	0,010	1,644	3,824	2,326	0,020	3,844	26,0	43,89	
39	Restholz-Pellet-KohleKW-05	0,85	14,76	0,000	0,005	1,143	0,000	0,000	0,005	1,152	2,561	2,222	0,070	2,631	38,0	5,81	
40	Restholz-Hackschn-HeizKW-DT-05	0,85	14,76	0,000	0,020	0,000	0,000	0,000	0,005	0,024	0,105	4,348	0,070	4,522	22,1	3,39	
41	Restholz-Rohgas-GT-30	0,85	14,76	0,000	0,018	0,000	0,000	0,000	0,000	0,018	0,072	4,000	0,070	4,142	24,1	3,69	
42	Restholz-Rohgas-SOFC-30	0,85	14,76	0,000	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000	0,009	0,020	2,083	0,020	2,123	47,1	7,08	
44b	Restholz-Biomethan-GuD-30	0,85	14,76	0,000	0,007	1,562	0,058	0,000	0,010	1,637	3,807	2,326	0,020	3,827	26,1	4,06	
47	Stroh-Pellet-KohleKW-05	8,13	131,73	0,110	0,005	1,162	0,039	0,000	0,005	1,320	2,933	2,222	0,070	3,003	33,3	51,03	
48	Stroh-Hackschn-HeizKW-DT-05	8,13	131,73	0,412	0,017	0,000	0,000	0,000	0,005	0,433	1,884	4,348	0,070	6,302	15,9	30,30	
51	Ernterück/Gülle-Biogas-BHKW-05	5,15	93,60	0,194	0,022	2,098	0,133	0,000	0,010	2,457	6,465	2,632	0,020	6,485	15,4	16,95	
52	Ernterück/Gülle-Biogas-SOFC-30	5,15	93,60	0,194	0,022	2,098	0,133	0,000	0,009	2,455	5,846	2,381	0,020	5,866	17,0	18,73	
54	Ernterück/Gülle-Biomethan-BHKW-05	5,15	93,60	0,225	0,025	2,437	0,234	0,000	0,010	2,932	7,715	2,632	0,020	7,735	12,9	14,59	
55	Ernterück/Gülle-Biomethan-GuD-30	5,15	93,60	0,225	0,025	2,437	0,234	0,000	0,010	2,932	6,797	2,319	0,019	6,816	14,7	16,56	
57	Grassil/Gülle-Biogas-BHKW-30	9,13	120,00	0,060	0,011	1,563	0,111	0,000	0,010	1,755	4,619	2,632	0,020	4,639	21,6	29,17	
58	Grassil/Gülle-Biogas-SOFC-30	9,13	120,00	0,060	0,011	1,563	0,111	0,000	0,009	1,754	3,654	2,083	0,020	3,674	27,2	36,85	
59	Grassil/Gülle-Biomethan-BHKW-30	9,13	120,00	0,067	0,013	1,758	0,204	0,000	0,010	2,052	5,400	2,632	0,020	5,420	18,4	25,94	
60	Grassil/Gülle-Biomethan-GuD-30	9,13	120,00	0,067	0,013	1,758	0,204	0,000	0,010	2,052	4,758	2,319	0,020	4,778	20,9	29,44	
63	BioAbfall-Biogas-BHKW-05	-	-	0,000	0,008	1,641	0,159	0,000	0,010	1,819	4,787	2,632	0,020	4,807	20,8	-	
64	BioAbfall-Biogas-SOFC-30	-	-	0,000	0,008	1,641	0,159	0,000	0,009	1,818	3,787	2,083	0,020	3,807	26,3	-	
65	BioAbfall-Biomethan-BHKW-05	-	-	0,000	0,009	1,785	0,243	0,000	0,010	2,047	5,388	2,632	0,020	5,408	18,5	-	
66	BioAbfall-Biomethan-GuD-05	-	-	0,000	0,009	1,785	0,243	0,000	0,010	2,047	4,747	2,319	0,020	4,767	21,0	-	

Tab. 8 Ergebnisübersicht (Allokationsfaktoren)

Nr.	Abkürzung Setting	Rohstoff- ertrag	Rohstoff- ertrag	Allokationsfaktoren						
				Rohstoff- anbau	Rohstoff- transport	Rohstoff- einsatz	Konversion I	Konversion II	Produkt- transport	Produkt- wandlung
		[t <sub>RS</sub> /(ha a)]	[GJ <sub>RST</sub> /(ha a)]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
VERKEHR - BIODIESELSTOFFE										
1	Mais-EtOH-PKW-05	7,57	158,69	0,24	0,56	0,56	0,56	-	1,00	-
6	Maissilage-Biomethan-PKW-05	14,52	211,20	0,79	0,79	0,79	0,79	-	1,00	-
7	ZuckerRo-EtOH-PKW-05	44,22	650,00	0,20	0,46	0,46	0,46	-	1,00	-
8	ZuckerRo-EtOH-PKW-30	24,76	364,00	0,20	0,46	0,46	0,46	-	1,00	-
9	Getr-EtOH-PKW-05	6,38	102,80	0,23	0,52	0,52	0,52	-	1,00	-
11	Raps-FAME-PKW-05	3,33	83,54	0,58	0,58	0,58	0,58	0,94	1,00	-
12	Raps-Pö1-PKW-05	3,33	83,54	0,48	0,48	0,48	0,48	-	1,00	-
14	Ölpalme-FAME-PKW-05	3,75	37,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,94	1,00	-
16	Ölpalme-FAME-PKW-30	3,75	37,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,94	1,00	-
18	JatrophaAck-FAME-PKW-30	3,91	100,00	0,48	0,48	0,48	0,48	0,94	1,00	-
20	JatrophaDeg-FAME-PKW-30	2,11	53,94	0,48	0,48	0,48	0,48	0,94	1,00	-
26	HirseAck-Biogas-BHKW-elektroPKW-30	13,50	235,31	0,53	0,53	0,53	0,53	0,68	0,68	-
31	HirseWiese-Biogas-BHKW-elektroPKW-30	13,50	235,31	0,53	0,53	0,53	0,53	0,68	0,68	-
37a	KUP-Biomethan-PKW-30	8,34	154,32	0,82	0,82	0,82	0,82	-	1,00	-
40b	Restholz-Hackschn-HeizKW-DT-elektroPKW-30	0,85	14,76	0,49	0,49	0,49	0,49	-	-	-
43	Restholz-FT-PKW-30	0,85	14,76	0,82	0,82	0,82	0,82	-	1,00	-
44a	Restholz-Biomethan-PKW-30	0,85	14,76	0,82	0,82	0,82	0,82	-	1,00	-
45	Restholz-Hyd-PKW-30	0,85	14,76	1,00	1,00	1,00	1,00	-	1,00	-
49	Stroh-FT-PKW-30	8,13	131,73	0,44	0,79	0,79	0,79	-	1,00	-
50	Stroh-EtOH-PKW-30	8,13	131,73	0,56	0,99	0,99	0,99	-	1,00	-
56	Ernterück/Gülle-Biomethan-PKW-05	5,15	93,60	0,18	0,45	0,45	0,45	-	1,00	-
53	Ernterück/Gülle-Biogas-BHKW-elektroPKW-30	5,15	93,60	0,13	0,33	0,33	0,33	0,68	0,68	-
61	Grassil/Gülle-Biomethan-PKW-30	9,13	120,00	0,69	0,69	0,69	0,69	-	1,00	-
62	Altöl-FAME-PKW-05	-	-	0,95	0,95	0,95	0,95	-	1,00	-
67	BioAbfall-Biomethan-PKW-05	-	-	0,76	0,76	0,76	0,76	-	1,00	-
WÄRME										
21	HirseAck-Pellet-Kleinfuehrung-30	13,50	235,31	1,00	1,00	1,00	1,00	-	1,00	1,00
32	KUP-Pellet-Kleinfuehrung-30	8,34	154,32	0,92	0,92	0,92	0,92	-	1,00	1,00
38	Restholz-Pellet-Kleinfuehrung-05	0,85	14,76	0,94	0,94	0,94	0,94	-	1,00	1,00
46	Stroh-Pellet-Kleinfuehrung-05	8,13	131,73	0,56	1,00	1,00	1,00	-	1,00	1,00

Nr.	Abkürzung Setting	Rohstoff- ertrag	Rohstoff- ertrag	Allokationsfaktoren						
				Rohstoff- anbau	Rohstoff- transport	Rohstoff- einsatz	Konversion I	Konversion II	Produkt- transport	Produkt- wandlung
				[t <sub>RS</sub> /(ha a)]	[GJ <sub>RST</sub> /(ha a)]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
STROM UND WÄRME - KWK (Hauptprodukt Strom)										
2	Maissilage-Biogas-BHKW-05	14,52	211,20	0,55	0,55	0,55	0,55	-	0,68	0,68
3	Maissilage-Biogas-SOFC-30	14,52	211,20	0,68	0,68	0,68	0,68	-	0,84	0,84
4	Maissilage-Biomethan-BHKW-05	14,52	211,20	0,54	0,54	0,54	0,54	-	0,68	0,68
5	Maissilage-Biomethan-GuD-05	14,52	211,20	0,62	0,62	0,62	0,62	-	0,78	0,78
10	Raps-Pöl-BHKW-05	3,33	83,54	0,33	0,33	0,33	0,33	-	0,68	0,68
13	Ölpalme-Pöl-BHKW-05	3,75	37,56	0,41	0,41	0,41	0,41	-	0,68	0,68
15	Ölpalme-Pöl-BHKW-30	3,75	37,56	0,41	0,41	0,41	0,41	-	0,68	0,68
17	JatrophaAck-Pöl-BHKW-30	3,91	100,00	0,35	0,35	0,35	0,35	-	0,68	0,68
19	JatrophaDeg-Pöl-BHKW-30	2,11	53,94	0,35	0,35	0,35	0,35	-	0,68	0,68
22	HirseAck-Biogas-BHKW-30	13,50	235,31	0,54	0,54	0,54	0,54	-	0,68	0,68
23	HirseAck-Biogas-SOFC-30	13,50	235,31	0,66	0,66	0,66	0,66	-	0,84	0,84
24	HirseAck-Biomethan-BHKW-30	13,50	235,31	0,53	0,53	0,53	0,53	-	0,68	0,68
25	HirseAck-Biomethan-GuD-30	13,50	235,31	0,60	0,60	0,60	0,60	-	0,78	0,78
27	HirseWiese-Biogas-BHKW-30	13,50	235,31	0,54	0,54	0,54	0,54	-	0,68	0,68
28	HirseWiese-Biogas-SOFC-30	13,50	235,31	0,66	0,66	0,66	0,66	-	0,84	0,84
29	HirseWiese-Biomethan-BHKW-30	13,50	235,31	0,53	0,53	0,53	0,53	-	0,68	0,68
30	HirseWiese-Biomethan-GuD-30	13,50	235,31	0,60	0,60	0,60	0,60	-	0,78	0,78
33	KUP-Pellet-KohleKW-30	8,34	154,32	0,92	0,92	0,92	0,92	-	1,00	1,00
34	KUP-Hackschn-HeizKW-DT-30	8,34	154,32	0,49	0,49	-	-	-	0,49	0,49
35	KUP-Rohgas-GT-30	8,34	154,32	0,53	0,53	-	-	-	0,53	0,53
36	KUP-Rohgas-SOFC-30	8,34	154,32	0,84	0,84	-	-	-	0,84	0,84
37b	KUP-Biomethan-GuD-30	8,34	154,32	0,64	0,64	0,64	0,64	-	0,78	0,78
39	Restholz-Pellet-KohleKW-05	0,85	14,76	0,94	0,94	0,94	0,94	-	1,00	1,00
40	Restholz-Hackschn-HeizKW-DT-05	0,85	14,76	0,49	0,49	-	-	-	0,49	0,49
41	Restholz-Rohgas-GT-30	0,85	14,76	0,53	0,53	-	-	-	0,53	0,53
42	Restholz-Rohgas-SOFC-30	0,85	14,76	0,00	0,84	-	-	-	0,84	0,84
44b	Restholz-Biomethan-GuD-30	0,85	14,76	0,64	0,64	0,64	0,64	-	0,78	0,78
47	Stroh-Pellet-KohleKW-05	8,13	131,73	0,56	1,00	1,00	1,00	-	1,00	1,00
48	Stroh-Hackschn-HeizKW-DT-05	8,13	131,73	0,27	0,49	-	-	-	0,49	0,49
51	Ernterück/Gülle-Biogas-BHKW-05	5,15	93,60	0,13	0,33	0,33	0,33	-	0,68	0,68
52	Ernterück/Gülle-Biogas-SOFC-30	5,15	93,60	0,16	0,41	0,41	0,41	-	0,84	0,84
54	Ernterück/Gülle-Biomethan-BHKW-05	5,15	93,60	0,12	0,31	0,31	0,31	-	0,68	0,68

Nr.	Abkürzung Setting	Rohstoff- ertrag	Rohstoff- ertrag	Allokationsfaktoren						
				Rohstoff- anbau	Rohstoff- transport	Rohstoff- einsatz	Konversion I	Konversion II	Produkt- transport	Produkt- wandlung
		[t <sub>TS</sub> /(ha a)]	[GJ <sub>RST</sub> /(ha a)]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
55	Ernterück/Gülle-Biomethan-GuD-30	5,15	93,60	0,14	0,35	0,35	0,35	-	0,78	0,78
57	Grassil/Gülle-Biogas-BHKW-30	9,13	120,00	0,49	0,49	0,49	0,49	-	0,68	0,68
58	Grassil/Gülle-Biogas-SOFC-30	9,13	120,00	0,60	0,60	0,60	0,60	-	0,84	0,84
59	Grassil/Gülle-Biomethan-BHKW-30	9,13	120,00	0,47	0,47	0,47	0,47	-	0,68	0,68
60	Grassil/Gülle-Biomethan-GuD-30	9,13	120,00	0,54	0,54	0,54	0,54	-	0,78	0,78
63	BioAbfall-Biogas-BHKW-05	-	-	0,58	0,58	0,58	0,58	-	0,68	0,68
64	BioAbfall-Biogas-SOFC-30	-	-	0,71	0,71	0,71	0,71	-	0,84	0,84
65	BioAbfall-Biomethan-BHKW-05	-	-	0,52	0,52	0,52	0,52	-	0,68	0,68
66	BioAbfall-Biomethan-GuD-05	-	-	0,59	0,59	0,59	0,59	-	0,78	0,78

Tab. 9 Ergebnisübersicht (flächenspezifische Erträge, spezifische Energieaufwendungen mit Allokation, Gesamtwirkungsgrade)

Nr.	Abkürzung Setting	Rohstoff- ertrag	Rohstoff- ertrag	Mit Allokation [GJ <sub>GES</sub> /GJ <sub>EE</sub> ]												
				Rohstoff- anbau	Rohstoff- transport	Rohstoff- einsatz	Konversion I	Konversion II	Produkt- transport	Summe		Produktwandlung		Summe	Gesamt- wirkungs- grad	spez. Produkt- ertrag
		[t <sub>TS</sub> /(ha a)]	[GJ <sub>RST</sub> /(ha a)]	[GJ <sub>HE</sub> /GJ <sub>P</sub> ]	[GJ <sub>HE</sub> /GJ <sub>P</sub> ]	[GJ <sub>RST</sub> /GJ <sub>P</sub> ]	[GJ <sub>HE</sub> /GJ <sub>P</sub> ]	[GJ <sub>RST+HE</sub> /GJ <sub>P</sub> ]	[GJ <sub>RST+HE</sub> /GJ <sub>EE</sub> ]	[GJ <sub>P</sub> /GJ <sub>EE</sub> ]	[GJ <sub>HE</sub> /GJ <sub>EE</sub> ]	[GJ/GJ <sub>EE</sub> ]	%			
VERKEHR - BOKRAFTSTOFFE																
1	Mais-EtOH-PKW-05	7,57	158,69	0,021	0,003	1,209	0,255	0,000	0,030	1,518	5,837	3,846	-	5,837	17,1	34,12
6	Maissilage-Biomethan-PKW-05	14,52	211,20	0,074	0,004	1,153	0,145	0,000	0,032	1,408	5,414	3,846	-	5,414	18,5	47,63
7	ZuckerRo-EtOH-PKW-05	44,22	650,00	0,003	0,003	1,318	0,260	0,000	0,030	1,613	6,203	3,846	-	6,203	16,1	128,25
8	ZuckerRo-EtOH-PKW-30	24,76	364,00	0,003	0,003	1,318	0,260	0,000	0,030	1,613	5,561	3,448	-	5,561	18,0	80,11
9	Getr-EtOH-PKW-05	6,38	102,80	0,026	0,002	1,075	0,272	0,000	0,030	1,405	5,404	3,846	-	5,404	18,5	24,85
11	Raps-FAME-PKW-05	3,33	83,54	0,063	0,001	0,753	0,019	0,021	0,030	0,887	3,057	3,448	-	3,057	32,7	32,17
12	Raps-Pöl-PKW-05	3,33	83,54	0,058	0,001	0,830	0,006	0,000	0,030	0,925	3,190	3,448	-	3,190	31,3	29,18
14	Ölpalme-FAME-PKW-05	3,75	37,56	0,221	0,002	1,253	0,055	0,021	0,030	1,582	5,456	3,448	-	5,456	18,3	8,69
16	Ölpalme-FAME-PKW-30	3,75	37,56	0,221	0,002	1,253	0,055	0,021	0,030	1,582	4,945	3,125	-	4,945	20,2	9,59
18	JatrophaAck-FAME-PKW-30	3,91	100,00	0,017	0,001	1,042	0,024	0,021	0,030	1,136	3,549	3,125	-	3,549	28,2	30,70
20	JatrophaDeg-FAME-PKW-30	2,11	53,94	0,017	0,001	1,042	0,024	0,021	0,030	1,136	3,549	3,125	-	3,549	28,2	16,56

Nr.	Abkürzung Setting	Rohstoff- ertrag	Rohstoff- ertrag	Mit Allokation [GJ <sub>GES</sub> /GJ <sub>EE</sub> ]												Gesamt- wirkungs- grad	spez. Produkt- ertrag
				Rohstoff- anbau	Rohstoff- transport	Rohstoff- einsatz	Konversion I	Konversion II	Produkt- transport	Summe		Produktwandlung		Summe			
				[t <sub>TS</sub> /(ha a)]	[GJ <sub>RST</sub> /(ha a)]	[GJ <sub>HE</sub> /GJ <sub>P</sub> ]	[GJ <sub>HE</sub> /GJ <sub>P</sub> ]	[GJ <sub>RST</sub> /GJ <sub>P</sub> ]	[GJ <sub>HE</sub> /GJ <sub>P</sub> ]	[GJ <sub>RST+HE</sub> /GJ <sub>P</sub> ]	[GJ <sub>RST+HE</sub> /GJ <sub>EE</sub> ]	[GJ <sub>P</sub> /GJ <sub>EE</sub> ]					
26	HirseAck-Biogas-BHKW-elektroPKW-30	13,50	235,31	0,010	0,002	0,834	0,060	0,014	0,007	0,926	1,187	1,282	-	1,187	84,2	220,12	
31	HirseWiese-Biogas-BHKW-elektroPKW-30	13,50	235,31	0,010	0,002	0,834	0,060	0,014	0,007	0,926	1,187	1,282	-	1,187	84,2	220,12	
37a	KUP-Biomethan-PKW-30	8,34	154,32	0,017	0,005	1,236	0,047	0,000	0,032	1,336	4,607	3,448	-	4,607	21,7	36,22	
40b	Restholz-Hackschn-HeizKW-DT-elektroPKW-30	0,85	14,76	0,000	0,005	2,128	0,034	0,000	0,000	2,167	2,778	1,282	-	2,778	36,0	5,41	
43	Restholz-FT-PKW-30	0,85	14,76	0,000	0,007	1,925	0,000	0,000	0,030	1,962	6,132	3,125	-	6,132	16,3	2,45	
44a	Restholz-Biomethan-PKW-30	0,85	14,76	0,000	0,005	1,276	0,047	0,000	0,032	1,360	4,691	3,448	-	4,691	21,3	3,35	
45	Restholz-Hyd-PKW-30	0,85	14,76	0,000	0,008	1,779	0,151	0,000	0,240	2,178	5,585	2,564	-	5,585	17,9	3,23	
49	Stroh-FT-PKW-30	8,13	131,73	0,081	0,006	1,929	0,000	0,000	0,030	2,046	6,394	3,125	-	6,394	15,6	21,85	
50	Stroh-EtOH-PKW-30	8,13	131,73	0,125	0,009	2,371	0,038	0,000	0,009	2,552	8,801	3,448	-	8,801	11,4	16,11	
56	Ernterück/Gülle-Biomethan-PKW-05	5,15	93,60	0,018	0,005	1,095	0,105	0,000	0,032	1,255	4,828	3,846	-	4,828	20,7	22,23	
53	Ernterück/Gülle-Biogas-BHKW-elektroPKW-30	5,15	93,60	0,010	0,003	0,852	0,066	0,014	0,007	0,952	1,221	1,282	-	1,221	81,9	85,67	
61	Grassil/Gülle-Biomethan-PKW-30	9,13	120,00	0,032	0,006	1,210	0,141	0,000	0,032	1,421	4,899	3,448	-	4,899	20,4	28,76	
62	Altöl-FAME-PKW-05	-	-	0,000	0,028	0,967	0,063	0,000	0,030	1,088	3,752	3,448	-	3,752	26,7	-	
67	BioAbfall-Biomethan-PKW-05	-	-	0,000	0,005	1,346	0,183	0,000	0,032	1,567	6,026	3,846	-	6,026	16,6	-	
WÄRME																	
21	HirseAck-Pellet-Kleinfeuerung-30	0,025	0,004	0,025	0,004	1,083	0,039	0,000	0,001	1,153	1,647	1,429	0,017	1,663	60,1	152,05	
32	KUP-Pellet-Kleinfeuerung-30	0,014	0,004	0,014	0,004	0,916	0,041	0,000	0,001	0,975	1,301	1,333	0,017	1,317	75,9	126,38	
38	Restholz-Pellet-Kleinfeuerung-05	0,000	0,005	0,000	0,005	1,073	0,029	0,000	0,001	1,108	1,385	1,250	0,016	1,401	71,4	11,00	
46	Stroh-Pellet-Kleinfeuerung-05	0,072	0,005	0,072	0,005	1,355	0,046	0,000	0,001	1,479	1,849	1,250	0,017	1,866	53,6	77,76	
STROM UND WÄRME - KWK (Hauptprodukt Strom)																	
2	Maissilage-Biogas-BHKW-05	14,52	211,20	0,033	0,002	0,731	0,051	0,000	0,007	0,823	1,481	1,799	0,014	1,494	66,9	160,70	
3	Maissilage-Biogas-SOFC-30	14,52	211,20	0,049	0,003	0,897	0,063	0,000	0,007	1,019	1,782	1,748	0,017	1,799	55,6	134,65	
4	Maissilage-Biomethan-BHKW-05	14,52	211,20	0,035	0,002	0,790	0,099	0,000	0,007	0,933	1,678	1,799	0,014	1,692	59,1	148,59	
5	Maissilage-Biomethan-GuD-05	14,52	211,20	0,045	0,002	0,904	0,114	0,000	0,008	1,073	1,945	1,813	0,016	1,961	51,0	128,88	
10	Raps-Pöl-BHKW-05	3,33	83,54	0,027	0,000	0,567	0,004	0,000	0,021	0,620	1,114	1,799	0,014	1,128	88,7	81,87	
13	Ölpalme-Pöl-BHKW-05	3,75	37,56	0,122	0,001	0,952	0,012	0,000	0,021	1,108	1,993	1,799	0,014	2,006	49,8	21,93	
15	Ölpalme-Pöl-BHKW-30	3,75	37,56	0,122	0,001	0,952	0,012	0,000	0,021	1,108	1,993	1,799	0,014	2,006	49,8	21,93	
17	JatrophaAck-Pöl-BHKW-30	3,91	100,00	0,009	0,001	0,767	0,005	0,000	0,021	0,803	1,443	1,799	0,014	1,457	68,6	72,50	
19	JatrophaDeg-Pöl-BHKW-30	2,11	53,94	0,009	0,001	0,767	0,005	0,000	0,021	0,803	1,443	1,799	0,014	1,457	68,6	39,10	
22	HirseAck-Biogas-BHKW-30	13,50	235,31	0,009	0,001	0,698	0,050	0,000	0,007	0,765	1,376	1,799	0,014	1,389	72,0	187,48	
23	HirseAck-Biogas-SOFC-30	13,50	235,31	0,013	0,002	0,857	0,062	0,000	0,007	0,941	1,645	1,748	0,017	1,662	60,2	157,08	
24	HirseAck-Biomethan-BHKW-30	13,50	235,31	0,009	0,002	0,753	0,097	0,000	0,007	0,868	1,561	1,799	0,014	1,574	63,5	173,67	
25	HirseAck-Biomethan-GuD-30	13,50	235,31	0,012	0,002	0,862	0,111	0,000	0,008	0,994	1,803	1,813	0,016	1,818	55,0	150,64	

Nr.	Abkürzung Setting	Rohstoff- ertrag	Rohstoff- ertrag	Mit Allokation [GJ <sub>GES</sub> /GJ <sub>EE</sub> ]												Gesamt- wirkungs- grad	spez. Produkt- ertrag
				Rohstoff- anbau	Rohstoff- transport	Rohstoff- einsatz	Konversion I	Konversion II	Produkt- transport	Summe		Produktwandlung		Summe			
				[t <sub>TS</sub> /(ha a)]	[GJ <sub>RST</sub> /(ha a)]	[GJ <sub>HE</sub> /GJ <sub>P</sub> ]	[GJ <sub>HE</sub> /GJ <sub>P</sub> ]	[GJ <sub>RST</sub> /GJ <sub>P</sub> ]	[GJ <sub>HE</sub> /GJ <sub>P</sub> ]	[GJ <sub>HE</sub> /GJ <sub>P</sub> ]	[GJ <sub>HE</sub> /GJ <sub>P</sub> ]	[GJ <sub>RST+HE</sub> /GJ <sub>P</sub> ]	[GJ <sub>RST+HE</sub> /GJ <sub>EE</sub> ]	[GJ <sub>P</sub> /GJ <sub>EE</sub> ]	[GJ <sub>HE</sub> /GJ <sub>EE</sub> ]		
27	HirseWiese-Biogas-BHKW-30	13,50	235,31	0,009	0,001	0,698	0,050	0,000	0,007	0,765	1,376	1,799	0,014	1,389	72,0	187,48	
28	HirseWiese-Biogas-SOFC-30	13,50	235,31	0,013	0,002	0,857	0,062	0,000	0,007	0,941	1,645	1,748	0,017	1,662	60,2	157,08	
29	HirseWiese-Biomethan-BHKW-30	13,50	235,31	0,009	0,002	0,753	0,097	0,000	0,007	0,868	1,561	1,799	0,014	1,574	63,5	173,67	
30	HirseWiese-Biomethan-GuD-30	13,50	235,31	0,012	0,002	0,862	0,111	0,000	0,008	0,994	1,803	1,813	0,016	1,818	55,0	150,64	
33	KUP-Pellet-KohleKW-30	8,34	154,32	0,014	0,004	0,918	0,041	0,000	0,005	0,981	2,179	2,222	0,070	2,249	44,5	75,68	
34	KUP-Hackschn-HeizKW-DT-30	8,34	154,32	0,017	0,005	0,000	0,000	0,000	0,002	0,024	0,051	2,128	0,034	2,213	45,2	72,53	
35	KUP-Rohgas-GT-30	8,34	154,32	0,019	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,024	0,051	2,128	0,037	2,215	45,1	72,53	
36	KUP-Rohgas-SOFC-30	8,34	154,32	0,024	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000	0,031	0,054	1,748	0,017	1,819	55,0	88,27	
37b	KUP-Biomethan-GuD-30	8,34	154,32	0,024	0,003	0,966	0,037	0,000	0,008	1,037	1,886	1,818	0,016	1,901	52,6	87,87	
39	Restholz-Pellet-KohleKW-05	0,85	14,76	0,000	0,005	1,073	0,000	0,000	0,005	1,082	2,405	2,222	0,070	2,475	40,4	6,19	
40	Restholz-Hackschn-HeizKW-DT-05	0,85	14,76	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	0,002	0,007	0,015	2,128	0,034	2,177	45,9	6,94	
41	Restholz-Rohgas-GT-30	0,85	14,76	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,011	2,128	0,037	2,176	46,0	6,94	
42	Restholz-Rohgas-SOFC-30	0,85	14,76	0,000	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007	0,012	1,748	0,017	1,777	56,3	8,44	
44b	Restholz-Biomethan-GuD-30	0,85	14,76	0,000	0,003	0,998	0,037	0,000	0,008	1,046	1,901	1,818	0,016	1,917	52,2	8,13	
47	Stroh-Pellet-KohleKW-05	8,13	131,73	0,062	0,005	1,162	0,039	0,000	0,005	1,271	2,825	2,222	0,070	2,895	34,5	51,03	
48	Stroh-Hackschn-HeizKW-DT-05	8,13	131,73	0,055	0,004	0,000	0,000	0,000	0,002	0,061	0,131	2,128	0,034	2,293	43,6	61,91	
51	Ernterück/Gülle-Biogas-BHKW-05	5,15	93,60	0,009	0,002	0,699	0,044	0,000	0,007	0,761	1,368	1,799	0,014	1,382	72,4	74,50	
52	Ernterück/Gülle-Biogas-SOFC-30	5,15	93,60	0,013	0,004	0,858	0,054	0,000	0,007	0,936	1,636	1,748	0,017	1,653	60,5	62,43	
54	Ernterück/Gülle-Biomethan-BHKW-05	5,15	93,60	0,009	0,002	0,750	0,072	0,000	0,007	0,840	1,511	1,799	0,014	1,525	65,6	69,34	
55	Ernterück/Gülle-Biomethan-GuD-30	5,15	93,60	0,011	0,003	0,859	0,082	0,000	0,008	0,963	1,746	1,813	0,015	1,761	56,8	60,14	
57	Grassil/Gülle-Biogas-BHKW-30	9,13	120,00	0,014	0,003	0,763	0,054	0,000	0,007	0,841	1,513	1,799	0,014	1,526	65,5	87,42	
58	Grassil/Gülle-Biogas-SOFC-30	9,13	120,00	0,018	0,003	0,763	0,054	0,000	0,007	0,845	1,478	1,748	0,017	1,495	66,9	89,94	
59	Grassil/Gülle-Biomethan-BHKW-30	9,13	120,00	0,015	0,003	0,830	0,096	0,000	0,007	0,951	1,710	1,799	0,014	1,723	58,0	80,43	
60	Grassil/Gülle-Biomethan-GuD-30	9,13	120,00	0,020	0,004	0,949	0,110	0,000	0,008	1,090	1,977	1,813	0,016	1,992	50,2	69,76	
63	BioAbfall-Biogas-BHKW-05	-	-	0,000	0,003	0,953	0,093	0,000	0,007	1,055	1,897	1,799	0,014	1,911	52,3	-	
64	BioAbfall-Biogas-SOFC-30	-	-	0,000	0,004	1,170	0,114	0,000	0,007	1,295	2,263	1,748	0,017	2,280	43,9	-	
65	BioAbfall-Biomethan-BHKW-05	-	-	0,000	0,002	0,923	0,126	0,000	0,007	1,058	1,902	1,799	0,014	1,916	52,2	-	
66	BioAbfall-Biomethan-GuD-05	-	-	0,000	0,003	1,056	0,144	0,000	0,008	1,210	2,194	1,813	0,016	2,210	45,3	-	

Tab. 10 Wesentliche Eingangsparameter und Ergebnisübersicht der Gestehungskosten

Nr.	Abkürzung Setting	Wesentliche Eingangsparameter Kostenrechnung		Gestehungskosten (nach Annuitätenmethode)					
		Investitionskosten	Rohstoffkosten/ preise	Kapital	Betrieb	Rohstoff	Koppel- produkte	Total	Total
		[TEUR/MW <sub>EE</sub> ]	[EUR/GJ <sub>RST</sub> ]	[EUR/GJ <sub>EE</sub> ]	[EUR/GJ <sub>EE</sub> ]	[EUR/GJ <sub>EE</sub> ]	[EUR/GJ <sub>EE</sub> ]	[EUR/GJ <sub>EE</sub> ]	[EURct/kWh <sub>EE</sub> ]
VERKEHR - BOKRAFTSTOFFE									
1	Mais-EtOH-PKW-05	1.581	6,32	6,08	7,76	10,07	-3,23	20,68	7,44
6	Maissilage-Biomethan-PKW-05	1.612	6,25	4,88	9,14	12,58	0,00	26,60	9,57
7	ZuckerRo-EtOH-PKW-05	450	2,35	1,87	7,77	7,63	-2,57	14,70	5,29
8	ZuckerRo-EtOH-PKW-30	376	2,35	1,57	7,64	7,63	-2,57	14,26	5,13
9	Getr-EtOH-PKW-05	1.364	7,96	5,25	6,64	12,39	-3,29	20,99	7,55
11	Raps-FAME-PKW-05	281	10,53	1,40	3,19	17,04	-5,68	15,95	5,74
12	Raps-Pöl-PKW-05	75	10,53	0,37	0,84	15,88	-4,48	12,61	4,54
14	Ölpalme-FAME-PKW-05	198	11,96	0,99	2,20	13,37	-0,78	15,78	5,68
16	Ölpalme-FAME-PKW-30	182	11,96	0,91	2,18	13,37	-0,78	15,68	5,64
18	JatrophaAck-FAME-PKW-30	182	8,58	0,91	2,18	9,72	-0,78	12,03	4,33
20	JatrophaDeg-FAME-PKW-30	182	8,58	0,91	2,18	9,72	-0,78	12,03	4,33
26	HirseAck-Biogas-BHKW-elektroPKW-30	209	10,42	11,98	5,03	27,42	-10,77	33,67	12,12
31	HirseWiese-Biogas-BHKW-elektroPKW-30	209	10,42	11,98	5,03	27,42	-10,77	33,67	12,12
37a	KUP-Biomethan-PKW-30	1.136	6,95	5,77	3,90	11,72	-1,35	20,03	7,21
40b	Restholz-Hackschn-HeizKW-DT-elektroPKW-30	3.400	4,49	16,34	10,99	21,75	-11,15	37,94	13,66
43	Restholz-FT-PKW-30	1.946	4,49	9,70	4,20	11,73	-2,74	22,89	8,24
44a	Restholz-Biomethan-PKW-30	1.182	4,49	5,96	4,02	7,81	-1,40	16,40	5,90
45	Restholz-Hyd-PKW-30	1.602	4,49	7,98	13,90	9,60	0,00	31,48	11,33
49	Stroh-FT-PKW-30	2.074	5,02	10,32	4,48	13,66	-1,82	26,64	9,59
50	Stroh-EtOH-PKW-30	1.546	5,02	5,77	16,54	3,83	-0,08	26,07	9,38
56	Ernterück/Gülle-Biomethan-PKW-05	1.643	3,33	6,04	8,57	6,54	0,00	21,15	7,61
53	Ernterück/Gülle-Biogas-BHKW-elektroPKW-30	1.977	3,33	15,83	6,18	8,57	-10,77	19,81	7,13
61	Grassil/Gülle-Biomethan-PKW-30	1.542	8,75	5,67	8,24	12,54	0,00	26,45	9,52
62	Altöl-FAME-PKW-05	333	9,56	1,67	3,82	10,80	-0,70	15,60	5,62
67	BioAbfall-Biomethan-PKW-05	5.270	-5,36	24,53	24,46	-19,10	-0,38	29,51	10,62

Nr.	Abkürzung Setting	Wesentliche Eingangsparameter Kostenrechnung		Gestehungskosten (nach Annuitätenmethode)					
		Investitionskosten	Rohstoffkosten/- preise	Kapital	Betrieb	Rohstoff	Koppel- produkte	Total	Total
		[TEUR/MW <sub>EE</sub> ]	[EUR/GJ <sub>RST</sub> ]	[EUR/GJ <sub>EE</sub> ]	[EUR/GJ <sub>EE</sub> ]	[EUR/GJ <sub>EE</sub> ]	[EUR/GJ <sub>EE</sub> ]	[EUR/GJ <sub>EE</sub> ]	[EURct/kWh <sub>EE</sub> ]
WÄRME									
21	HirseAck-Pellet-Kleinfeuerung-30	833	10,00	20,41	5,95	17,77	0,00	44,13	15,89
32	KUP-Pellet-Kleinfeuerung-30	833	10,00	20,41	5,95	17,77	0,00	44,13	15,89
38	Restholz-Pellet-Kleinfeuerung-05	887	9,83	21,72	6,26	16,88	0,00	44,86	16,15
46	Stroh-Pellet-Kleinfeuerung-05	887	9,83	21,72	6,26	16,44	0,00	44,41	15,99
STROM UND WÄRME - KWK (Hauptprodukt Strom)									
2	Maissilage-Biogas-BHKW-05	209	9,82	11,98	5,03	23,67	-10,77	29,92	10,77
3	Maissilage-Biogas-SOFC-30	5.702	9,82	58,37	5,13	25,00	-4,96	83,53	30,07
4	Maissilage-Biomethan-BHKW-05	961	9,82	10,60	10,13	24,81	-10,70	34,84	12,54
5	Maissilage-Biomethan-GuD-05	931	9,82	9,53	9,24	23,04	-6,49	35,31	12,71
10	Raps-Pöl-BHKW-05	1.750	16,53	11,25	13,66	59,37	-13,95	70,34	25,32
13	Ölpalme-Pöl-BHKW-05	1.800	11,96	11,55	13,71	42,78	-13,95	54,09	19,47
15	Ölpalme-Pöl-BHKW-30	1.700	11,96	10,33	13,57	42,78	-13,95	52,73	18,98
17	JatrophaAck-Pöl-BHKW-30	1.700	8,58	10,33	13,57	31,43	-13,95	41,38	14,90
19	JatrophaDeg-Pöl-BHKW-30	1.700	8,58	10,33	13,57	31,43	-13,95	41,38	14,90
22	HirseAck-Biogas-BHKW-30	209	10,42	11,98	5,03	27,42	-10,77	33,67	12,12
23	HirseAck-Biogas-SOFC-30	5.702	10,42	58,37	5,13	26,52	-4,96	85,06	30,62
24	HirseAck-Biomethan-BHKW-30	961	10,42	10,60	10,13	28,77	-10,70	38,79	13,97
25	HirseAck-Biomethan-GuD-30	931	10,42	9,53	9,24	26,68	-6,49	38,96	14,02
27	HirseWiese-Biogas-BHKW-30	209	10,42	19,04	5,80	27,42	-10,77	41,50	14,94
28	HirseWiese-Biogas-SOFC-30	1.426	10,42	58,37	5,13	26,52	-4,96	85,05	30,62
29	HirseWiese-Biomethan-BHKW-30	209	10,42	10,60	10,13	28,77	-10,70	38,79	13,97
30	HirseWiese-Biomethan-GuD-30	931	10,42	9,53	9,24	26,68	-6,49	38,96	14,02
33	KUP-Pellet-KohleKW-30	300	6,73	1,08	3,33	10,06	0,00	14,48	5,21
34	KUP-Hackschn-HeizKW-DT-30	3.200	6,95	15,37	1,00	33,72	-11,15	38,95	14,02
35	KUP-Rohgas-GT-30	2.803	6,95	12,20	4,41	64,95	-6,39	75,16	27,06
36	KUP-Rohgas-SOFC-30	13.214	6,95	53,01	8,00	64,95	-6,39	119,55	43,04
37b	KUP-Biomethan-GuD-30	3.179	6,95	13,67	4,54	64,95	-6,39	76,76	27,63
39	Restholz-Pellet-KohleKW-05	300	5,81	1,08	3,33	7,92	0,00	12,34	4,44
40	Restholz-Hackschn-HeizKW-DT-05	3.400	4,49	16,34	10,99	21,75	-11,15	37,94	13,66
41	Restholz-Rohgas-GT-30	2.803	4,49	12,20	4,41	54,04	-6,39	64,26	23,13
42	Restholz-Rohgas-SOFC-30	13.214	4,49	53,01	8,00	54,04	-6,39	108,65	39,11
44b	Restholz-Biomethan-GuD-30	3.179	4,49	17,02	4,83	54,04	-6,39	69,50	25,02

Nr.	Abkürzung Setting	Wesentliche Eingangsparameter Kostenrechnung		Gestehungskosten (nach Annuitätenmethode)					
		Investitionskosten	Rohstoffkosten/- preise	Kapital	Betrieb	Rohstoff	Koppel- produkte	Total	Total
		[TEUR/MW <sub>EE</sub> ]	[EUR/GJ <sub>RST</sub> ]	[EUR/GJ <sub>EE</sub> ]	[EUR/GJ <sub>EE</sub> ]	[EUR/GJ <sub>EE</sub> ]	[EUR/GJ <sub>EE</sub> ]	[EUR/GJ <sub>EE</sub> ]	[EUR/GJ <sub>EE</sub> ]
47	Stroh-Pellet-KohleKW-05	300	5,36	1,08	3,33	6,86	0,00	11,27	4,06
48	Stroh-Hackschn-HeizKW-DT-05	3.400	5,02	16,34	10,99	24,37	-11,15	40,55	14,60
51	Ernterück/Gülle-Biogas-BHKW-05	1.977	3,33	15,83	6,18	9,50	-10,77	19,812	4,05
52	Ernterück/Gülle-Biogas-SOFC-30	6.035	3,33	61,77	6,14	7,58	-4,96	70,52	25,39
54	Ernterück/Gülle-Biomethan-BHKW-05	1.012	3,33	11,16	11,25	12,92	-10,69	24,63	8,87
55	Ernterück/Gülle-Biomethan-GuD-30	981	3,33	10,04	10,27	11,99	-6,50	25,80	9,29
57	Grassil/Gülle-Biogas-BHKW-30	209	4,76	11,98	5,39	13,71	-10,77	20,32	7,31
58	Grassil/Gülle-Biogas-SOFC-30	1.426	4,76	58,37	5,44	12,12	-4,96	70,97	25,55
59	Grassil/Gülle-Biomethan-BHKW-30	979	4,76	10,81	10,54	14,61	-10,69	25,26	9,10
60	Grassil/Gülle-Biomethan-GuD-30	949	4,76	9,71	9,61	13,55	-6,49	26,38	9,50
63	BioAbfall-Biogas-BHKW-05	7.457	-11,28	82,91	22,41	-32,40	-10,70	62,22	22,40
64	BioAbfall-Biogas-SOFC-30	4.481	-11,28	123,14	20,15	-28,64	-4,98	109,67	39,48
65	BioAbfall-Biomethan-BHKW-05	8.153	-11,28	87,03	24,11	-32,40	-10,70	68,05	24,50
66	BioAbfall-Biomethan-GuD-05	8.124	-11,28	83,08	26,28	-31,04	-6,49	71,83	25,86

Tab. 11 Mehrkosten und THG-Vermeidungskosten

Nr.	Abkürzung Setting	THG-Minderungen			Mehrkosten	THG-Minderungskosten			THG-Minderungen Modellhaushalt			Haushaltsspezifische Mehrkosten		
		noLUC	+dLUC	+iLUC		noLUC	+dLUC	+iLUC	noLUC	+dLUC	+iLUC	Fahrzeug	Energieträger	Summe
		[t <sub>CO2-Ag</sub> /TJ <sub>EE</sub> ]				[EUR/GJ <sub>EE</sub> ]	[EUR/t <sub>CO2-Ag</sub> ]			[t <sub>CO2-Ag</sub> /a]			[EUR/a]	
VERKEHR - BIODIESELSTOFFE														
1	Mais-EtOH-PKW-05	49,22	49,22	-11,14	10,25	208,30	208,30	k.M.	2,02	2,02	-0,46	-	421,39	421,39
6	Maissilage-Biomethan-PKW-05	37,49	37,49	-35,35	16,17	431,33	431,33	k.M.	1,54	1,54	-1,45	258,00	664,63	922,63
7	ZuckerRo-EtOH-PKW-05	63,32	63,68	-2,38	4,28	67,53	67,14	k.M.	2,60	2,62	-0,10	-	175,74	175,74
8	ZuckerRo-EtOH-PKW-30	67,44	86,12	86,12	3,84	56,90	44,56	44,56	2,10	2,69	2,69	-	119,72	119,72
9	Getr-EtOH-PKW-05	43,70	43,70	-58,53	10,56	241,62	241,62	k.M.	1,80	1,80	-2,41	-	434,02	434,02
11	Raps-FAME-PKW-05	47,13	47,13	-61,36	5,52	117,19	117,19	k.M.	1,63	1,63	-2,13	-	191,36	191,36
12	Raps-PöI-PKW-05	53,36	53,36	-58,70	2,18	40,93	40,93	k.M.	1,85	1,85	-2,03	-	75,69	75,69
14	Ölpalme-FAME-PKW-05	44,72	292,85	292,85	5,35	119,66	18,27	18,27	1,55	10,15	10,15	-	185,43	185,43
16	Ölpalme-FAME-PKW-30	44,72	-165,28	-165,28	5,25	117,43	k.M.	k.M.	1,29	-4,78	-4,78	-	152,05	152,05

Nr.	Abkürzung Setting	THG-Minderungen			Mehrkosten	THG-Minderungskosten			THG-Minderungen Modellhaushalt			Haushaltsspezifische Mehrkosten		
		noLUC	+dLUC	+iLUC		noLUC	+dLUC	+iLUC	noLUC	+dLUC	+iLUC	Fahrzeug	Energieträger	Summe
		[tCO <sub>2</sub> -Äq/TJ <sub>EE</sub> ]				[EUR/GJ <sub>EE</sub> ]	[EUR/tCO <sub>2</sub> -Äq]			[tCO <sub>2</sub> -Äq/a]			[EUR/a]	
18	JatropaAck-FAME-PKW-30	54,35	54,35	-54,65	1,61	29,55	29,55	k.M.	1,57	1,57	-1,58	-	46,50	46,50
20	JatropaDeg-FAME-PKW-30	54,35	153,63	153,63	1,61	29,55	10,46	10,46	1,57	4,45	4,45	-	46,50	46,50
26	HirseAck-Biogas-BHKW-elektroPKW-30	56,95	66,95	-69,43	23,24	408,11	347,15	k.M.	0,81	0,95	-0,98	1.767,19	329,46	2.096,65
31	HirseWiese-Biogas-BHKW-elektroPKW-30	56,95	31,21	-105,30	23,24	408,11	744,76	k.M.	0,81	0,44	-1,49	1.767,19	329,46	2.096,65
37a	KUP-Biomethan-PKW-30	70,43	86,26	-28,85	9,60	136,37	111,34	k.M.	2,20	2,69	-0,90	258,00	299,65	557,65
40b	Restholz-Hackschn-HeizKW-DT-elektroPKW-30	79,59	79,59	79,59	27,52	345,72	345,72	345,72	1,13	1,13	1,13	1.767,19	390,04	2.157,22
43	Restholz-FT-PKW-30	81,28	81,28	81,28	12,46	153,32	153,32	153,32	2,35	2,35	2,35	-	360,78	360,78
44a	Restholz-Biomethan-PKW-30	76,89	76,89	76,89	5,97	77,64	77,64	77,64	2,40	2,40	2,40	258,00	186,25	444,25
45	Restholz-Hyd-PKW-30	72,40	72,40	72,40	21,05	290,76	290,76	290,76	1,48	1,48	1,48	1.140,23	429,47	1.569,69
49	Stroh-FT-PKW-30	83,34	83,34	83,34	16,22	194,58	194,58	194,58	2,41	2,41	2,41	-	469,48	469,48
50	Stroh-EtOH-PKW-30	73,77	73,77	73,77	15,64	212,01	212,01	212,01	2,30	2,30	2,30	-	487,96	487,96
56	Ernterück/Gülle-Biomethan-PKW-05	49,00	49,00	49,00	10,72	218,84	218,84	218,84	2,01	2,01	2,01	258,00	440,74	698,74
53	Ernterück/Gülle-Biogas-BHKW-elektroPKW-30	59,83	59,83	59,83	9,39	156,88	156,88	156,88	0,85	0,85	0,85	1.767,19	133,05	1.900,24
61	Grassil/Gülle-Biomethan-PKW-30	66,38	66,38	66,38	16,03	241,45	241,45	241,45	2,07	2,07	2,07	258,00	500,05	758,05
62	Altöl-FAME-PKW-05	81,18	81,18	81,18	5,17	63,70	63,70	63,70	2,81	2,81	2,81	-	179,19	179,19
67	BioAbfall-Biomethan-PKW-05	55,56	55,56	55,56	19,08	343,46	343,46	343,46	2,28	2,28	2,28	258,00	784,30	1.042,30
<b>WÄRME</b>														
21	HirseAck-Pellet-Kleinf Feuerung-30	72,92	77,28	17,86	12,80	175,51	165,61	716,63	3,94	4,17	0,96	-	691,07	691,07
32	KUP-Pellet-Kleinf Feuerung-30	71,38	83,60	-5,31	12,80	179,29	153,07	k.M.	3,85	4,51	-0,29	-	691,07	691,07
38	Restholz-Pellet-Kleinf Feuerung-05	81,04	81,04	81,04	13,53	166,90	166,90	166,90	4,38	4,38	4,38	-	730,35	730,35
46	Stroh-Pellet-Kleinf Feuerung-05	81,04	81,04	81,04	13,08	161,42	161,42	161,42	4,38	4,38	4,38	-	706,36	706,36
<b>STROM UND WÄRME - KWK (Hauptprodukt Strom)</b>														
2	Maissilage-Biogas-BHKW-05	212,66	212,66	81,72	12,80	60,21	60,21	156,69	3,06	3,06	1,18	-	184,38	184,38
3	Maissilage-Biogas-SOFC-30	219,85	219,85	123,62	66,42	302,11	302,11	537,28	3,17	3,17	1,78	-	956,45	956,45
4	Maissilage-Biomethan-BHKW-05	194,31	194,31	74,50	17,73	91,22	91,22	237,92	2,80	2,80	1,07	-	255,25	255,25
5	Maissilage-Biomethan-GuD-05	215,59	215,59	111,94	18,20	84,43	84,43	162,61	3,10	3,10	1,61	-	262,13	262,13
10	Raps-Pöl-BHKW-05	212,15	212,15	48,32	53,22	250,88	250,88	1.101,51	3,06	3,06	0,70	-	766,43	766,43
13	Ölpalme-Pöl-BHKW-05	223,53	582,62	582,62	36,98	165,42	63,47	63,47	3,22	8,39	8,39	-	532,46	532,46
15	Ölpalme-Pöl-BHKW-30	223,53	-566,98	-566,98	35,62	159,36	k.M.	k.M.	3,22	-8,16	-8,16	-	512,94	512,94
17	JatropaAck-Pöl-BHKW-30	222,52	230,42	57,92	24,27	109,07	105,33	419,06	3,20	3,32	0,83	-	349,50	349,50
19	JatropaDeg-Pöl-BHKW-30	222,52	372,43	372,43	24,27	109,07	65,17	65,17	3,20	5,36	5,36	-	349,50	349,50

Nr.	Abkürzung Setting	THG-Minderungen			Mehrkosten	THG-Minderungskosten			THG-Minderungen Modellhaushalt			Haushaltsspezifische Mehrkosten		
		noLUC	+dLUC	+iLUC		noLUC	+dLUC	+iLUC	noLUC	+dLUC	+iLUC	Fahrzeug	Energieträger	Summe
		[tCO <sub>2</sub> -Äq/TJ <sub>EE</sub> ]				[EUR/GJ <sub>EE</sub> ]	[EUR/tCO <sub>2</sub> -Äq]			[tCO <sub>2</sub> -Äq/a]			[EUR/a]	
22	HirseAck-Biogas-BHKW-30	238,26	248,40	110,13	16,56	69,49	66,66	150,34	3,43	3,58	1,59	-	238,43	238,43
23	HirseAck-Biogas-SOFC-30	236,42	245,24	124,95	67,95	287,41	277,07	543,81	3,40	3,53	1,80	-	978,46	978,46
24	HirseAck-Biomethan-BHKW-30	235,09	244,09	121,35	21,68	92,23	88,83	178,67	3,39	3,51	1,75	-	312,22	312,22
25	HirseAck-Biomethan-GuD-30	233,43	242,93	113,37	21,84	93,58	89,92	192,68	3,36	3,50	1,63	-	314,56	314,56
27	HirseWiese-Biogas-BHKW-30	238,26	212,16	73,77	24,39	102,36	114,96	330,63	3,43	3,06	1,06	-	351,21	351,21
28	HirseWiese-Biogas-SOFC-30	236,42	213,71	93,31	67,94	287,36	317,89	728,04	3,40	3,08	1,34	-	978,27	978,27
29	HirseWiese-Biomethan-BHKW-30	235,09	211,92	89,07	21,68	92,23	102,31	243,43	3,39	3,05	1,28	-	312,22	312,22
30	HirseWiese-Biomethan-GuD-30	233,43	208,97	79,29	21,84	93,58	104,53	275,48	3,36	3,01	1,14	-	314,56	314,56
33	KUP-Pellet-KohleKW-30	230,80	253,94	85,61	14,48	62,72	57,00	169,09	3,32	3,66	1,23	-	208,45	208,45
34	KUP-Hackschn-HeizKW-DT-30	246,57	267,62	107,63	21,84	88,58	81,61	202,92	3,55	3,85	1,55	-	314,50	314,50
35	KUP-Rohgas-GT-30	221,00	252,27	24,83	58,05	262,66	230,10	2.337,46	3,18	3,63	0,36	-	835,89	835,89
36	KUP-Rohgas-SOFC-30	230,46	256,12	69,48	102,44	444,52	399,98	1.474,41	3,32	3,69	1,00	-	1.475,19	1.475,19
37b	KUP-Biomethan-GuD-30	243,73	271,21	71,36	59,65	244,74	219,95	835,91	3,51	3,91	1,03	-	858,98	858,98
39	Restholz-Pellet-KohleKW-05	249,08	249,08	249,08	12,34	49,52	49,52	49,52	3,59	3,59	3,59	-	177,63	177,63
40	Restholz-Hackschn-HeizKW-DT-05	255,28	255,28	255,28	20,83	81,60	81,60	81,60	3,68	3,68	3,68	-	299,96	299,96
41	Restholz-Rohgas-GT-30	233,78	233,78	233,78	47,14	201,67	201,67	201,67	3,37	3,37	3,37	-	678,88	678,88
42	Restholz-Rohgas-SOFC-30	240,95	240,95	240,95	91,54	379,92	379,92	379,92	3,47	3,47	3,47	-	1.318,18	1.318,18
44b	Restholz-Biomethan-GuD-30	243,73	243,73	243,73	52,39	214,95	214,95	214,95	3,51	3,51	3,51	-	754,41	754,41
47	Stroh-Pellet-KohleKW-05	254,27	254,27	254,27	11,27	44,34	44,34	44,34	3,66	3,66	3,66	-	162,34	162,34
48	Stroh-Hackschn-HeizKW-DT-05	256,91	256,91	256,91	23,44	91,22	91,22	91,22	3,70	3,70	3,70	-	337,49	337,49
51	Ernterück/Gülle-Biogas-BHKW-05	233,35	233,35	233,35	2,70	11,57	11,57	11,57	3,36	3,36	3,36	-	38,89	38,89
52	Ernterück/Gülle-Biogas-SOFC-30	244,87	244,87	244,87	53,41	218,12	218,12	218,12	3,53	3,53	3,53	-	769,13	769,13
54	Ernterück/Gülle-Biomethan-BHKW-05	213,24	213,24	213,24	7,52	35,27	35,27	35,27	3,07	3,07	3,07	-	108,30	108,30
55	Ernterück/Gülle-Biomethan-GuD-30	236,16	236,16	236,16	8,69	36,81	36,81	36,81	3,40	3,40	3,40	-	125,19	125,19
57	Grassil/Gülle-Biogas-BHKW-30	240,38	240,38	240,38	3,21	13,34	13,34	13,34	3,46	3,46	3,46	-	46,16	46,16
58	Grassil/Gülle-Biogas-SOFC-30	243,21	243,21	243,21	53,86	221,45	221,45	221,45	3,50	3,50	3,50	-	775,55	775,55
59	Grassil/Gülle-Biomethan-BHKW-30	213,74	213,74	213,74	8,15	38,15	38,15	38,15	3,08	3,08	3,08	-	117,41	117,41
60	Grassil/Gülle-Biomethan-GuD-30	236,70	236,70	236,70	9,27	39,18	39,18	39,18	3,41	3,41	3,41	-	133,54	133,54
63	BioAbfall-Biogas-BHKW-05	240,11	240,11	240,11	45,11	187,86	187,86	187,86	3,46	3,46	3,46	-	649,55	649,55
64	BioAbfall-Biogas-SOFC-30	247,55	247,55	247,55	92,56	373,91	373,91	373,91	3,56	3,56	3,56	-	1.332,91	1.332,91
65	BioAbfall-Biomethan-BHKW-05	224,03	224,03	224,03	50,93	227,36	227,36	227,36	3,23	3,23	3,23	-	733,45	733,45

Nr.	Abkürzung Setting	THG-Minderungen			Mehrkosten	THG-Minderungskosten			THG-Minderungen Modellhaushalt			Haushaltsspezifische Mehrkosten		
		noLUC	+dLUC	+iLUC		noLUC	+dLUC	+iLUC	noLUC	+dLUC	+iLUC	Fahrzeug	Energieträger	Summe
		[tCO <sub>2</sub> -Äq/TJ <sub>EE</sub> ]			[EUR/GJ <sub>EE</sub> ]	[EUR/tCO <sub>2</sub> -Äq]			[tCO <sub>2</sub> -Äq/a]			[EUR/a]		
66	BioAbfall-Biomethan-GuD-05	248,39	248,39	248,39	54,72	220,29	220,29	220,29	3,58	3,58	3,58	-	787,93	787,93

k. M. - keine THG-Minderungen, noLUC - keine Landnutzungsänderungseffekte, dLUC - nur direkte Landnutzungsänderungseffekte, iLUC - direkte und indirekte Landnutzungsänderungseffekte berücksichtigt