ifeu -
Institut für Energie-
und Umweltforschung
Heidelberg GmbH

Ökologische Bewertung neuer Logistikkonzepte für Biobrennstoffe

Teilvorhaben 7 im Verbundvorhaben BioLog: Entwicklung, Erprobung und Demonstration neuer Logistikkonzepte für Biobrennstoffe

Abschlussbericht

Im Auftrag der

CUTEC-Institut GmbH, Clausthal-Zellerfeld

Fördermittelgeber:
Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV)
über die
Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR)

FKZ: 220 319 05

Heidelberg, 20. Februar 2009

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz unter dem Förderkennzeichen **220 319 05** gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

ifeu -
Institut für Energie-
und Umweltforschung
Heidelberg GmbH

Ökologische Bewertung neuer Logistikkonzepte für Biobrennstoffe

Teilvorhaben 7 im Verbundvorhaben BioLog: Entwicklung, Erprobung und Demonstration neuer Logistikkonzepte für Biobrennstoffe

Abschlussbericht

Nils Rettenmaier
Julia Münch
Sven Gärtner
Dr. Guido Reinhardt

ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
Wilckensstr. 3, D – 69120 Heidelberg
Tel.: +49/(0)6221/4767-0, Fax: +49/(0)6221/4767-19
E-Mail: nils.rettenmaier@ifeu.de, Website: www.ifeu.de

Heidelberg, 20. Februar 2009

Inhalt:

1 Einführung 2

2 Methodik und Vorgehensweise 4

3 Analysierte BioLog-Lebenswege 8

3.1 Lebensweg 1: Kraftstoffherstellung (BtL-Pfad) 8

3.2 Lebensweg 2: Strom- und Wärmegewinnung (KWK-Pfad) 10

3.3 Varianten und Optimierungsmöglichkeiten 11

3.3.1 Pelletproduktion: Varianten und Optimierungsmöglichkeiten 11

3.3.2 Pelletnutzung: Optimierungsmöglichkeiten 13

4 Ergebnisse 14

4.1 BioLog-Bioenergieträger versus fossile Energieträger 14

4.1.1 Ergebnisse der Übersichtsökobilanzen: Beispiel Treibhauseffekt 14

4.1.2 BioLog-Kraft- und Brennstoffe im Vergleich: BtL versus KWK 16

4.2 Sensitivitäts- und Variantenanalysen 18

4.2.1 Variante: Elektroporation statt Silierung 18

4.2.2 Sensitivitätsanalyse: Größe der dezentralen Pelletwerke 20

4.3 Optimierungspotenziale bei der Pelletproduktion 22

4.3.1 Wahl des Energieträgers für die Trocknung 22

4.3.2 Zukünftige Entwässerungs- und Trocknungstechnologien 24

4.4 Optimierungspotenziale bei der Pelletnutzung 26

4.5 Alle Optimierungspotenziale im Überblick 28

4.6 BioLog-Bioenergieträger versus biogene Energieträger 30

5 Zusammenführung und Schlussfolgerungen 32

6 Literatur und Abkürzungen 36

7 Anhang 38

7.1 BtL-Pfad: Ergebnisse der Übersichtsökobilanzen 38

7.2 KWK-Pfad: Ergebnisse der Übersichtsökobilanzen 40

7.3 Ausgewählte Basisdaten für verschiedene Bioenergiepfade 42

1 Einführung

Hintergrund und Erkenntnisinteresse

Begünstigt durch ökonomische und politische Rahmenbedingungen haben biogene Kraft- und Brennstoffe in der jüngsten Vergangenheit an Bedeutung gewonnen. Langjährige Steuerbefreiungen aber auch die 2007 eingeführte Quotenverpflichtung trugen dazu bei, dass flüssige Biokraftstoffe wie reines Pflanzenöl, Biodiesel und Bioethanol im Jahr 2007 einen Anteil von immerhin 7,3 % am Gesamtkraftstoffverbrauch erreichten. Doch über diese etablierten Biokraftstoffe aus Öl-, Zucker- und Stärkepflanzen hinaus könnten noch erhebliche Potenziale erschlossen werden, wenn es gelänge, Ganzpflanzen für die Herstellung synthetischer Biokraftstoffe nutzbar zu machen. Frisch geerntete Biomasse wie Ganzpflanzen ist aber aufgrund ihres hohen Wassergehaltes nicht konservierbar und relativ energiearm, was längere Transporte unwirtschaftlich macht. Die Herausforderung besteht also darin, sie in eine lagerfähige, energiereiche und transportwürdige Form – z. B. in Pellets – zu überführen, was die Versorgung großer BtL-Anlagen oder Kraftwerke überhaupt erst ermöglichen würde.

Genau dieser Herausforderung widmet sich das Verbundvorhaben BioLog, das neue Logistikkonzepte für Biobrennstoffe entwickelt, erprobt und demonstriert. Aufbauend auf dem Zweikulturnutzungssystem sieht es vor, die frisch geerntete Biomasse zu silieren und in einem dezentralen Pelletwerk durch Pressen und Trocknen von der Flüssigkeit zu trennen, welche in der integrierten Biogasanlage genutzt wird. Die so produzierten Pellets können dann in zentralen BtL-Anlagen oder Heizkraftwerken genutzt werden (siehe Abb. 1-1).

Das Verbundvorhaben wurde vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) über die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) gefördert.

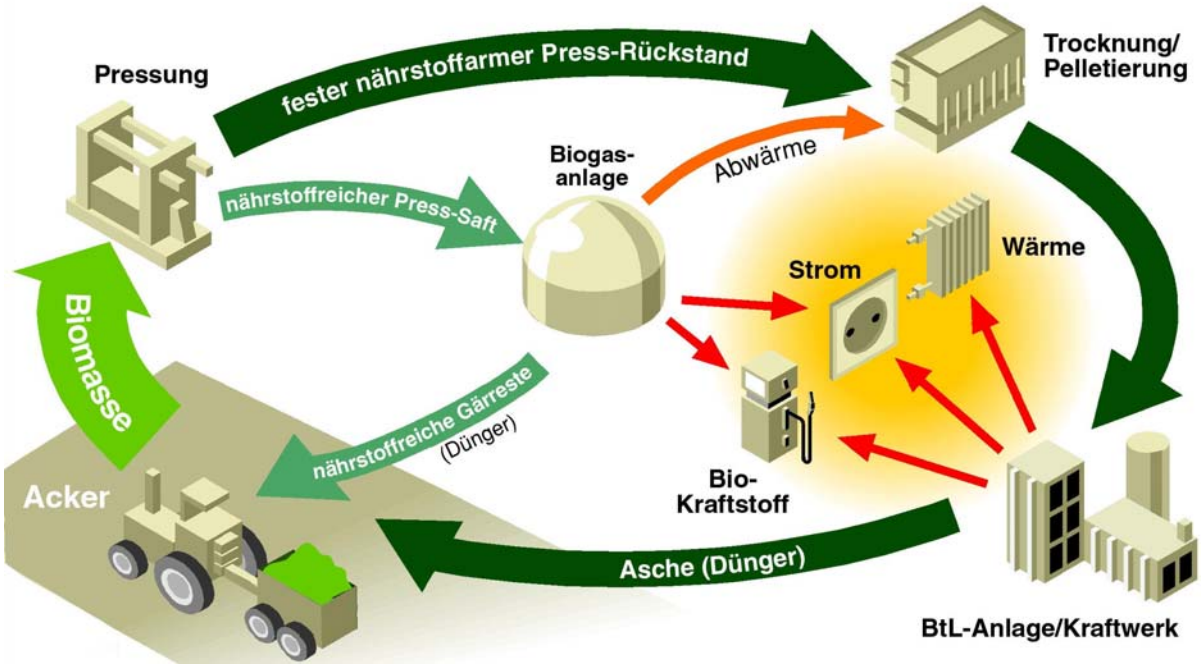

Abb. 1-1 Biokraftstoff- bzw. Bioenergiegewinnung nach dem BioLog-Konzept /FNR 2009/

Im Rahmen des Verbundvorhabens wurde das Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (IFEU) mit der Bearbeitung des Teilvorhabens 7 „Ökologische Begleitforschung“ beauftragt. Das Teilvorhaben hat die Aufgabe, projektbegleitend die Umweltwirkungen der (Zwischen-)Ergebnisse und Planungen des Verbundvorhabens zu untersuchen.

Ziel der Untersuchung

Ziel der Studie ist die Analyse der Umweltwirkungen der BioLog-Bioenergieträger, auf deren Grundlage eine ökologische Bewertung des BioLog-Konzepts vorgenommen wird. Dabei soll insbesondere untersucht werden

- wie ökologisch die analysierten BioLog-Bioenergieträger unter *heutigen* Produktionsbedingungen im Vergleich zur Bereitstellung und Nutzung fossiler Kraft- und Brennstoffe sind,
- inwiefern die besonders ergebnisrelevanten Lebenswegabschnitte aus Umweltschutzsicht optimiert werden können und
- wie die analysierten BioLog-Bioenergieträger unter *zukünftigen* Produktionsbedingungen im Vergleich zu anderen biogenen Kraft- und Brennstoffen, d. h. zu alternativen Biomasse- und Flächennutzungen, abschneiden.

Grundsätzliche Vorgehensweise

Die Untersuchung wird in Anlehnung an die Vorgehensweise bei Ökobilanzen durchgeführt, welche in Kapitel 2 ausführlich beschrieben wird. Dieser Vorgehensweise zufolge sind die gesamten Lebenswege der Bioenergieträger vom Energiepflanzenanbau über die Verarbeitung zu Biokraftstoffen oder -brennstoffen bis hin zu deren energetischer Nutzung im Vergleich zu fossilen Energieträgern zu betrachten. Einen solchen vereinfachten Lebenswegvergleich zeigt Abb. 1-2.

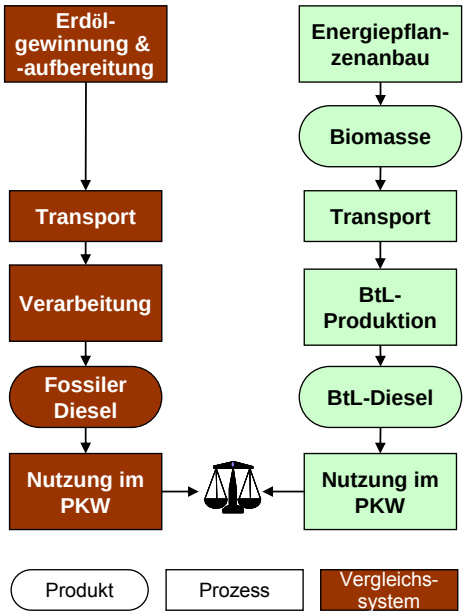

Abb. 1-2 Vereinfachter schematischer Lebenswegvergleich zwischen fossilem Dieselkraftstoff und BtL-Diesel aus BioLog-Pellets (Mischung aus Gras, Roggen und Mais)

2 Methodik und Vorgehensweise

Die Ökobilanzen wurden in Anlehnung an die Vorgehensweise bei Produkt-Ökobilanzen nach DIN 14040 und 14044 (/DIN 2006/) durchgeführt. Aufgrund der Art des Erkenntnisinteresses wurden nur übersichtsartige Bilanzen angefertigt, die keiner (wie in den Normen vorgeschriebenen) externen Begutachtung unterzogen wurden. Dennoch können die Ergebnisse durch die enge Anlehnung an die Normen als sehr belastbar angesehen werden.

Im Folgenden werden die wesentlichen Details zur grundsätzlichen Vorgehensweise präsentiert, allgemeine Festlegungen sowie analysierte Umweltwirkungen beschrieben und die Ableitung der Basisdaten dokumentiert. Details finden sich in der angegebenen Literatur.

Methodische Vorgehensweise

Das Vorgehen zur Erstellung einer Produkt-Ökobilanz ist in den DIN-Normen 14040 und 14044 geregelt. Betrachtet werden insbesondere

- die Input- und Outputflüsse (Roh- und Werkstoffe, Energie bzw. Abfälle, Abwasser, Emissionen etc.) und
- potenzielle Umweltwirkungen (z. B. Treibhauseffekt, Versauerung) des betrachteten Produktsystems (Produkt oder Dienstleistung)
- entlang seines gesamten Lebenswegs („von der Wiege bis zur Bahre“, von der Rohstoffförderung bis zur Entsorgung).

Damit liefern die Produkt-Ökobilanzen umfassende Informationen zu den ökologischen Wirkungen sowohl über einzelne Produktionsstufen als auch über den gesamten Lebensweg von Produkten und Dienstleistungen. Über Sensitivitätsanalysen lassen sich insbesondere auch Optimierungspotenziale und über die Interpretationen Informationen für Entscheidungsprozesse ableiten.

Allgemeine Festlegungen

Die wesentlichen Festlegungen in dieser Studie sind:

- **Funktionelle Einheit**: Die funktionelle Einheit bezeichnet die spezifische Produktmenge oder -dienstleistung, die zur Erzeugung des betrachteten Produktnutzens benötigt wird. Für die Fragestellungen in dieser Studie wird der Nutzen aus einem Hektar Anbaufläche in einem Durchschnittsjahr betrachtet. Dabei wird angesetzt, dass 20 % der Fläche zur Erzeugung von Gras und 80 % der Fläche zur aufeinander folgenden Erzeugung von Roggen und Mais (Zweikulturnutzungssystem) verwendet werden.
- **Geografischer und zeitlicher Bezug**: Der Bezugsraum für die Produktion und Nutzung der Bioenergieträger ist die Bundesrepublik Deutschland. Für Rohstoffe aus anderen Ländern (z. B. Import von Düngemitteln und Erdöl) wird der Bezugsraum entsprechend erweitert. Es werden drei Bezugszeiträume gewählt, insbesondere um mögliche Technologieentwicklungen in den Bereichen Entwässerung, Trocknung und BtL-Produktion abzubilden: Heute (2008), 2010 (kurzfristig) und 2020 (mittelfristig). Grundsätzliche Details zu Bezugsraum und -zeitraum finden sich in /Borken et al. 1999/.

- **Systemgrenzen**: Grundsätzlich wird der so genannten Systemraumerweiterung Vorrang vor der Allokation eingeräumt (Näheres siehe /Borken et al. 1999/). Dabei erhalten Kuppelprodukte Gutschriften für vermiedene Umweltwirkungen, die mit der Produktion nutzenäquivalenter Produkte verbunden wären. Beispielsweise wird dem nährstoffreichen Gärrest aus der Biogasanlage (Teil des Pelletwerks) eine Gutschrift für vermiedene Umweltwirkungen aus der Produktion von mineralischen Düngemitteln erteilt, welche durch den Gärrest ersetzt werden.
- **Bilanzierungstiefe**: Sämtliche stofflichen und energetischen Inputs und Outputs sowie die potenziellen Umweltwirkungen des betrachteten Produktsystems werden entlang des gesamten Lebenswegs bilanziert. Lediglich die Infrastruktur (Bau von Konversionsanlagen, Fahrzeugen und Verkehrswegen) wird nicht berücksichtigt.

Basisdaten

Die für die Übersichtsökobilanzen verwendeten Basisdaten stammen sowohl von den BioLog-Projektpartnern als auch aus der IFEU-internen Datenbank. Im Einzelnen sind dies:

- **BioLog-Lebenswege**
  - Energiepflanzenanbau: Ernteerträge wurden von /ATB 2008/ und /TLL 2008/ übernommen, die anbauspezifischen Aufwendungen von /IFEU 2009/
  - Silagetransport: Angaben zu Transportentfernungen stammen von /TLL 2008/, Transportmittel und Nutzlasten von /IFEU 2009/
  - Biomassekonversion: Sämtliche prozessspezifischen Daten wurden durch die BioLog-Projektpartner zur Verfügung gestellt und durch das IFEU auf Vollständigkeit und Konsistenz überprüft: /ATB 2008/ (Ernte und Silierung), /FZK 2008/ (Elektroporation), /Anhydro 2008/ und /Rinder 2008/ (mechanische Entwässerung), /Abdoun 2008/ (Biogasanlage), /A. Kahl 2008/ und /Sternowsky 2008/ (thermische Trocknung und Pelletierung) sowie /Vodegel 2008/ (BtL-Produktion nach dem ArtFuel-Konzept)
  - Bereitstellung und Nutzung von Äquivalenzprodukten: Im Wesentlichen wurde /IFEU 2009/ herangezogen, mit Ausnahme der Mineraldüngeräquivalente für Filterasche und Gärrest /Beck 2008/
  - Pellettransport und energetische Nutzung von BtL-Diesel und Pellets: /IFEU 2009/
- **Fossile Pfade**
  - Bereitstellung und Nutzung von fossilen Energieträgern: /IFEU 2009/
- **Alternative Bioenergie-Lebenswege** (siehe auch Zusammenstellung im Anhang 7.3)
  - BtL aus Pappel und Triticale (nach dem Carbo-V®-Verfahren): /IFEU 2006/
  - Biogas- / Biomethan aus BioLog-Biomassemix: Angepasst nach /IFEU et al. 2008/

Analysierte Umweltwirkungen

Zunächst werden die in dieser Studie bilanzierten Umweltwirkungen näher erläutert (Tabelle 2-1) und anschließend die dazugehörigen Indikatoren, Sachbilanzgrößen und Äquivalenzfaktoren dargestellt (Tabelle 2-2).

Tabelle 2-1 Indikatoren, Sachbilanzgrößen und Äquivalenzfaktoren zu den untersuchten Umweltwirkungen

Umweltwirkung	Beschreibung
Energie	Energieverbrauch bzw. -einsparung ist ein Indikator der Ressourcenbeanspruchung. In dieser Studie dargestellt sind die nicht-erneuerbaren Primärenergieträger Erdöl, Erdgas und Kohle sowie Uranerz. Im Folgenden wird diese Umweltwirkung der neutraleren Begrifflichkeit wegen mit „Energie“ bezeichnet und in dieser Studie die Einsparung bzw. der Mehrverbrauch von nicht-erneuerbaren Energieträgern in GJ Primärenergie angegeben.
Treibhauseffekt	Bezeichnet die Erwärmung der Atmosphäre in Folge der vom Menschen verursachten Freisetzung von klimawirksamen Gasen. In Ökobilanzen wird nur der anthropogene Treibhauseffekt betrachtet. Es werden Kohlendioxid (CO_2) aus der Verbrennung fossiler Energieträger sowie Methan und Lachgas berücksichtigt. Alle Gase werden nach vorgegebenen Faktoren in CO_2-Äquivalente umgerechnet und in dieser Studie in t CO_2-Äquivalenten angegeben.
Versauerung	Verschiebung des Säuregleichgewichts in Böden und Gewässern durch den Eintrag der Säure bildenden Luftschadstoffe Schwefeldioxid, Stickoxide, Ammoniak und Chlorwasserstoff in Böden und Gewässer (Stichwort „saurer Regen“). Auch diese Luftschadstoffe werden mit Äquivalenzfaktoren umgerechnet und in dieser Studie in kg SO_2-Äquivalenten angegeben.
Nährstoffeintrag	Einbringung von einem Übermaß an Nährstoffen in Böden (terrestrische Eutrophierung) über die Luftschadstoffe Stickoxide und Ammoniak. Diese Luftschadstoffe werden mit Äquivalenzfaktoren in PO_4-Äquivalente umgerechnet und in dieser Studie in kg PO_4-Äquivalenten angegeben.
Fotosmog	Bildung von so genannten Fotooxidantien wie z. B. Ozon unter dem Einfluss von Sonnenstrahlung in bodennahen Luftschichten (Stichwort „Ozonalarm“) durch Zusammenwirken mehrerer Faktoren, zu denen Sonneneinstrahlung, Stickoxide und ungesättigte Kohlenwasserstoffe gehören. Die Äquivalenzfaktoren zur Bewertung des Fotosmogs wurden in den letzten Jahren signifikant verändert. So wurde noch 2004 auch der Summenparameter NMVOC mit in die Bewertung einbezogen, während seit 2007 nur noch die Einzelsubstanzen betrachtet werden, da nicht geklärt ist, wie der Summenparameter ohne hinreichendes Wissen über seine genaue Zusammensetzung bewertet werden soll. Für die Einzelsubstanzen sind allerdings oft keine Daten vorhanden. Um die Umweltwirkung Fotosmog dennoch abbilden zu können, wird in dieser Studie daher trotzdem auf den Summenparameter und die Werte von 2004 zurückgegriffen. Letztere beinhalten auch Äquivalenzfaktoren für NO und NO_2 (mit gegensätzlichem Vorzeichen), aber auch hier liegen in der Regel nur Daten zum Summenwert NO_X vor, der aufgrund der unterschiedlichen Vorzeichen nicht sinnvoll aufgelöst werden kann. Deswegen wird zur Bewertung der Stickoxide auf eine andere Methode zurückgegriffen und dem POCP noch das stickstoffkorrigierte Ozonbildungspotenzial NcPOCP gegenüber gestellt.
Lachgas (Ozonabbau)	Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre durch bestimmte Gase wie FCKW, die ein bestimmtes Ozonabbaupotenzial aufweisen und üblicherweise in FCKW-Äquivalenten angegeben werden (Stichwort „Ozonloch“). Auch Lachgas wirkt sich auf Veränderungen in der Ozonschicht aus, es existiert aber noch kein Äquivalenzfaktor zur Konvertierung in FCKW-Äquivalente, da unklar ist, in welchem Maße eine Wirkung besteht. Zwar hat Lachgas (N_2O) durch Einbindung in molekulare Mechanismen auf das stratosphärische Ozon einen Einfluss, es besteht aber bisher kein wissenschaftlicher Konsens, inwieweit es den Ozonabbau fördert oder verlangsamt. Da FCKW hier nicht von Bedeutung sind, Lachgas dagegen in signifikanten Mengen emittiert wird, wird als ozonrelevantes Gas nur Lachgas in kg N_2O betrachtet.

Tabelle 2-2 Indikatoren, Sachbilanzgrößen und Äquivalenzfaktoren zu den untersuchten Umweltwirkungen (/CML 2004/, /IPCC 2007/, /Klöpffer & Renner 1995/, /Leeuw 2002/, /IFEU 2009/ auf der Basis von /IPCC 2007/)

Umweltwirkung	Indikator	Sachbilanzgröße	Formel	Äquivalenz-faktor
Energie[1]	Kumulierter Primärenergie-aufwand aus nicht-erneuerbaren Quellen	Erdöl Erdgas Steinkohle Braunkohle Uranerz	—	—
Treibhauseffekt	CO_2-Äquivalent (Kohlendioxid-Äquivalent)	Kohlendioxid fossil Lachgas (Distickstoffoxid) Methan biogen Methan fossil	CO_2 N_2O CH_4 CH_4	1 298 25 27,75
Nährstoffeintrag	PO_4-Äquivalent (Phosphat-Äquivalent)	Stickoxide Ammoniak	NO_X NH_3	0,13 0,346
Versauerung	SO_2-Äquivalent (Schwefeldioxid-Äquivalent)	Schwefeldioxid Stickoxide Ammoniak Chlorwasserstoff	SO_2 NO_X NH_3 HCl	1 0,7 1,88 0,88
Fotosmog - POCP	C_2H_4-Äquivalent (Ethen-Äquivalent)	Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe Methan	NMHC CH_4	1 0,006
Fotosmog - NcPOCP	Stickstoffkorrigierte C_2H_4-Äquivalente	Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe Methan Stickoxide	NMHC CH_4 NO_X	— — —
N_2O (Ozonabbau)	—	Lachgas (Distickstoffoxid)	N_2O	—

[1] Energieeinsparung und -verbrauch ist eine Unterkategorie der Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung. Damit werden hier die nicht-erneuerbaren Primärenergieträger Erdöl, Erdgas, Kohle und Uranerz beschrieben.

Ergebnisdarstellung

In den Ergebnisgrafiken werden jeweils die Differenzen zwischen dem Saldo aus Aufwendungen und Gutschriften der Bioenergieträger-Nutzung und den Gutschriften aus den ersetzten fossilen Energieträgern dargestellt und – orientiert an den Bedürfnissen eines „schnellen“ Lesers – kurz diskutiert. Die grafische Darstellung erfolgt in der für die jeweilige Umweltwirkung gebräuchlichen Einheit.

Bei der Beschreibung der Umweltwirkungen (siehe u. a. Tabelle 2-1) sowie der Ergebnisse wird einfach verständlichen Begriffen Vorrang gegenüber wissenschaftlich exakten Darstellungen eingeräumt, beispielsweise „Versauerung“ anstelle von „Versauerungspotenzial auf der Basis von SO_2-Äquivalenten“.

3 Analysierte BioLog-Lebenswege

In diesem Kapitel werden die BioLog-spezifischen Lebenswege (Bioenergiepfade), Varianten und Optimierungsmöglichkeiten im Detail erläutert. Zunächst werden in den Kapiteln 3.1 und 3.2 zwei Basis-Lebenswege präsentiert. In beiden Fällen werden Pellets aus silierter Biomasse hergestellt, welche im Lebensweg 1 zur Herstellung eines synthetischen Biokraftstoffs (Biomass-to-Liquid, BtL) genutzt werden, während sie im Lebensweg 2 zur Strom- und Wärme-Produktion (Kraft-Wärme-Kopplung, KWK) eingesetzt werden. Der Begriff „Basis-Lebensweg“ impliziert dabei, dass neben den Stoff- und Energieströmen weitere Parameter wie Pelletwerkgröße, Entwässerungs- und Trocknungstechnologie, verwendete Energieträger und Wirkungsgrade festgelegt sind. Auf dieser Grundlage werden dann im Kapitel 3.3 Varianten und Optimierungsmöglichkeiten vorgestellt.

Ursprünglich sollten noch zwei weitere Lebenswege untersucht werden, bei denen die Biomasse entweder vor der Silierung elektroporiert wird (Lebensweg 3) oder nach Ernte und Elektroporation, d. h. ohne Silierung, direkt weiterverarbeitet wird (Lebensweg 4). Eine Kombination von Elektroporation und Silierung wurde jedoch als nicht sinnvoll angesehen, da die Silierung – neben der Konservierung der Biomasse – zu einem vollständigen Zellaufschluss führt, welcher durch eine vorgelagerte Elektroporation nicht verbessert wird. Aus diesem Grund wurde Lebensweg 3 nicht weiter betrachtet. Mit Lebensweg 4 wären durch die fehlende Silierung (Konservierung) große logistische und ökonomische Herausforderungen verbunden. Er wird daher nur in Form einer Variantenanalyse betrachtet.

Auf eine detaillierte Dokumentation der alternativen Bioenergie-Lebenswege wir an dieser Stelle verzichtet. Die wichtigsten Konversionsparameter sind im Anhang 7.3 zusammengestellt, weitere Details finden sich in /IFEU 2006/ und /IFEU et al. 2008/.

3.1 Lebensweg 1: Kraftstoffherstellung (BtL-Pfad)

Abb. 3-1 zeigt die BtL-Herstellung nach dem BioLog-Konzept (Lebensweg 1). Als Energiepflanzen werden Gras, Roggen und Mais angebaut, wobei 20 % der Fläche zur Erzeugung von Gras und 80 % der Fläche zur aufeinander folgenden Erzeugung von Roggen und Mais (Zweikulturnutzungssystem) verwendet werden. Die frisch geerntete Biomasse wird siliert, dabei gleichzeitig konserviert und steht ganzjährig der Weiterverarbeitung zur Verfügung.

Nach der Silierung wird das Material zu einem dezentralen Pelletwerk transportiert, wo die Silage mittels Schneckenpresse entwässert (auf 45 % TM-Gehalt), danach mittels Bandtrockner getrocknet (auf 89 % TM-Gehalt) und anschließend pelletiert wird. Die Pelletproduktion dieses Werks beträgt 25.000 Jahrestonnen. Aus dem anfallenden Presssaft werden vor Ort in einer Biogasanlage Strom und Wärme erzeugt, der verbleibende Gärrest wird als Dünger eingesetzt (Gutschrift: Mineraldünger). Während der erzeugte Strom aus ökonomischen Gründen ins Netz eingespeist und nach EEG vergütet wird (Gutschrift: Marginaler Strommix, bestehend aus 50 % Steinkohle und 50 % Erdgas), wird die erzeugte Wärme im Bandtrockner genutzt, dessen thermischer Energiebedarf dadurch zu etwa 10 % gedeckt werden kann. Die restliche Wärme (ca. 90 %) wird aus Braunkohle gewonnen.

Die Pellets werden zu einer zentralen 500 MW-BtL-Anlage transportiert, die bei einem Pelletinput von 1 Mio. Tonnen damit von 40 dezentralen Pelletwerken versorgt werden muss. Dort wird aus den Pellets Synthesegas (eine Mischung aus Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff) produziert, welches gereinigt und anschließend mittels Fischer-Tropsch-Synthese (FT) zu BtL-Diesel umgewandelt wird, welcher fossilen Dieselkraftstoff ersetzt. Die dabei anfallenden Kuppelprodukte werden entweder deponiert (Bettasche) oder ersetzen nutzenäquivalente Produkte fossilen Ursprungs, wofür sie eine entsprechende Gutschrift erhalten.

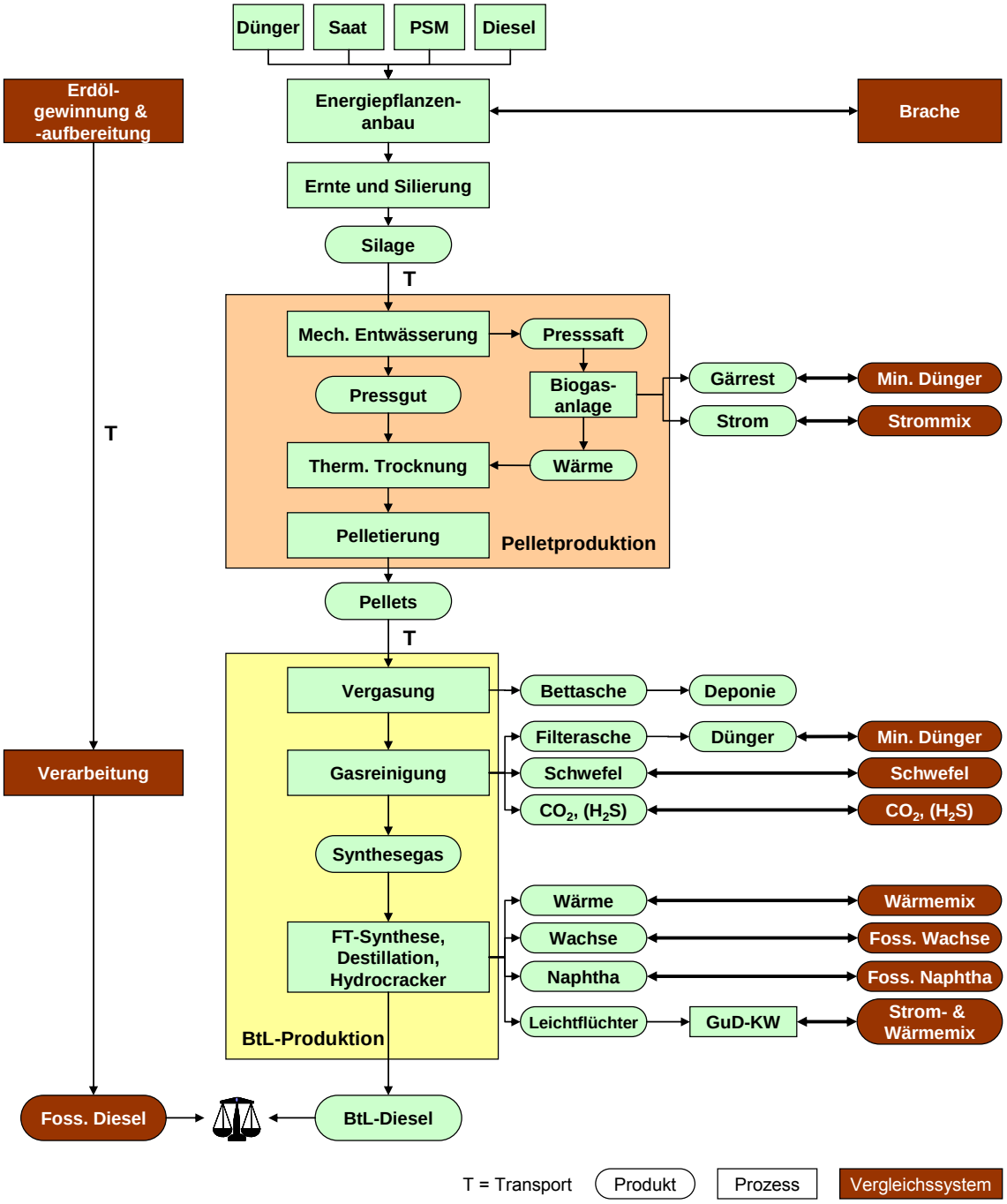

Abb. 3-1 Lebenswegvergleich zwischen fossilem Dieselkraftstoff und BtL-Diesel, der nach dem BioLog-Konzept hergestellt wird.

3.2 Lebensweg 2: Strom- und Wärmegewinnung (KWK-Pfad)

Die Lebenswege 1 und 2 sind bis einschließlich der Pelletproduktion identisch, Unterschiede treten erst bei der Pelletnutzung auf (siehe Abb. 3-2). Im Lebensweg 2 werden die Pellets in einem 50 MW-Heizkraftwerk thermisch verwertet, um Strom und Wärme zu erzeugen. Diese ersetzen einen marginalen Strommix (bestehend aus 50 % Steinkohle und 50 % Erdgas) bzw. einen marginalen Wärmemix (bestehend aus 50 % Heizöl und 50 % Erdgas), wobei im Basisfall unterstellt wird, dass lediglich 50 % der Wärme genutzt werden können. Dies hängt damit zusammen, dass in der Nähe von Heizkraftwerken oftmals weder genügend Wärmeabnehmer wie Industriegebiete noch (Fern-)Wärmenetze zur Verfügung stehen. Die bei der Verbrennung anfallenden Kuppelprodukte Schlacke und Staub / Adsorbat werden deponiert.

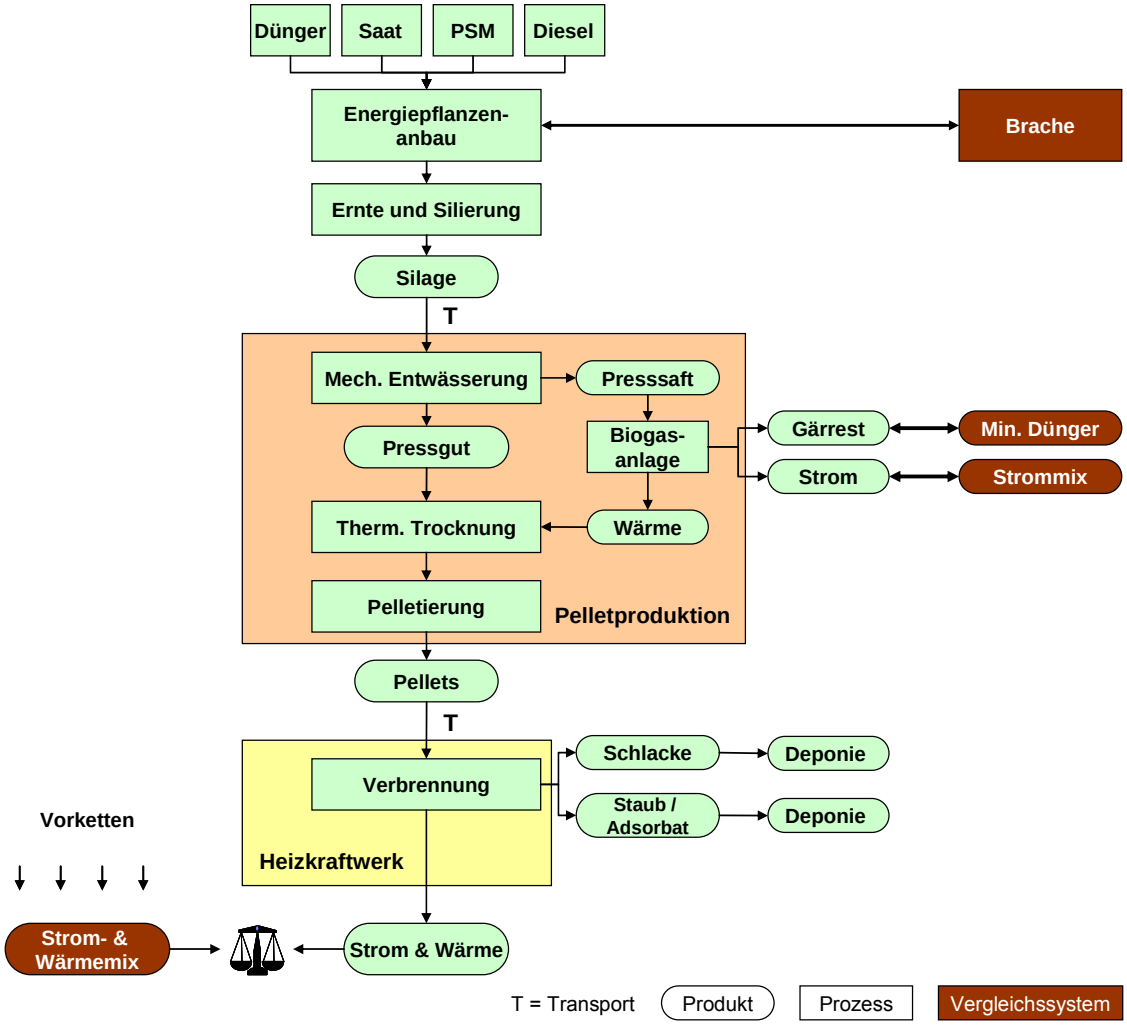

Abb. 3-2 Lebenswegvergleich zwischen herkömmlich gewonnener Energie und Strom & Wärme, die nach dem BioLog-Konzept gewonnen wird.

3.3 Varianten und Optimierungsmöglichkeiten

Wie bereits erwähnt, beziehen sich die Basis-Lebenswege 1 und 2 nicht nur auf die darin festgelegten Stoff- und Energieströme, sondern auch auf bestimmte Pelletwerkgrößen, Entwässerungs- und Trocknungstechnologien, verwendete Energieträger und Wirkungsgrade. Auf dieser Grundlage werden im Folgenden Varianten und Optimierungsmöglichkeiten vorgestellt, von denen sich einige auf die Pelletproduktion (Abschnitt 3.3.1) beziehen (und damit für beide Lebenswege gleichermaßen gelten), andere dagegen nur auf die jeweilige Pelletnutzung (Abschnitt 3.3.2).

3.3.1 Pelletproduktion: Varianten und Optimierungsmöglichkeiten

In den Lebenswegen 1 und 2 wird die Biomasse zunächst siliert und anschließend in einem dezentralen Pelletwerk mit 25.000 Tonnen Jahresproduktion entwässert, getrocknet und pelletiert. Im Folgenden werden einige Varianten- und Sensitivitätsanalysen sowie Optimierungsmöglichkeiten präsentiert.

a.) Variante: Elektroporation statt Silierung (ehemaliger Lebensweg 4)

Der Zellaufschluss, der im Lebensweg 1 durch Silierung erreicht wird, könnte stattdessen auch mittels Elektroporation erfolgen (siehe Abb. 3-3). Allerdings würde das Umgehen der Silierung (und damit auch der Konservierung) große logistische und ökonomische Herausforderungen mit sich bringen, da sämtliche Biomasse in einem kurzen Zeitfenster nach der Ernte mit entsprechend hoher Anlagenkapazität verarbeitet werden müsste. Die restliche Zeit über würde das Pelletwerk dann stillstehen.

Bei der Elektroporation wird Zellgewebe einem elektrischen Feld ausgesetzt. Durch das Anlegen einer elektrischen Spannung findet eine irreversible Porenbildung in der Zellmembran statt, wodurch sich die Abpressbarkeit des elektroporierten Pflanzenmaterials erhöhen könnte. Infolgedessen könnte bei der mechanischen Entwässerung idealerweise mehr Saft abgepresst und damit der Energieaufwand für die thermische Trocknung des Pressguts verringert werden. Die frische Biomasse muss sich bei der Elektroporation in einer wässrigen Suspension befinden. Dazu wird sie leicht angepresst, bis sie im eigenen Saft steht (/FZK 2008/). Die elektrische Energie für die Elektroporation wird durch Netzstrom bereitgestellt.

Die Elektroporation ist ein noch sehr junges Verfahren, das bislang nur bei der Zuckerherstellung großtechnisch eingesetzt wird. Im Rahmen des BioLog-Projekts wurden erstmals Gras, Roggen und Mais elektroporiert, allerdings nur im Labor- bzw. Technikumsmaßstab. Leider konnte das elektroporierte Pflanzenmaterial aufgrund der späten Fertigstellung der mobilen Elektroporationsanlage (KEA-MOBIL) zwar einmalig mittels Schneckenpresse entwässert aber weder mittels Bandtrockner getrocknet noch pelletiert werden, so dass keine Vergleichbarkeit zu den Daten für siliertes Material gegeben war. In dieser Variantenanalyse wurde daher angesetzt, dass sich siliertes und elektroporiertes Material bei den Verarbeitungsschritten Trocknung und Pelletierung identisch verhalten. Dies wäre aber durch entsprechende Untersuchungen noch zu verifizieren. Anstelle des Dieselkraftstoff- und Folienbedarfs für die Silierung und des Energiebedarfs für die Entwässerung wurde hier der Energiebedarf für die Elektroporation und die Entwässerung zugrunde gelegt.

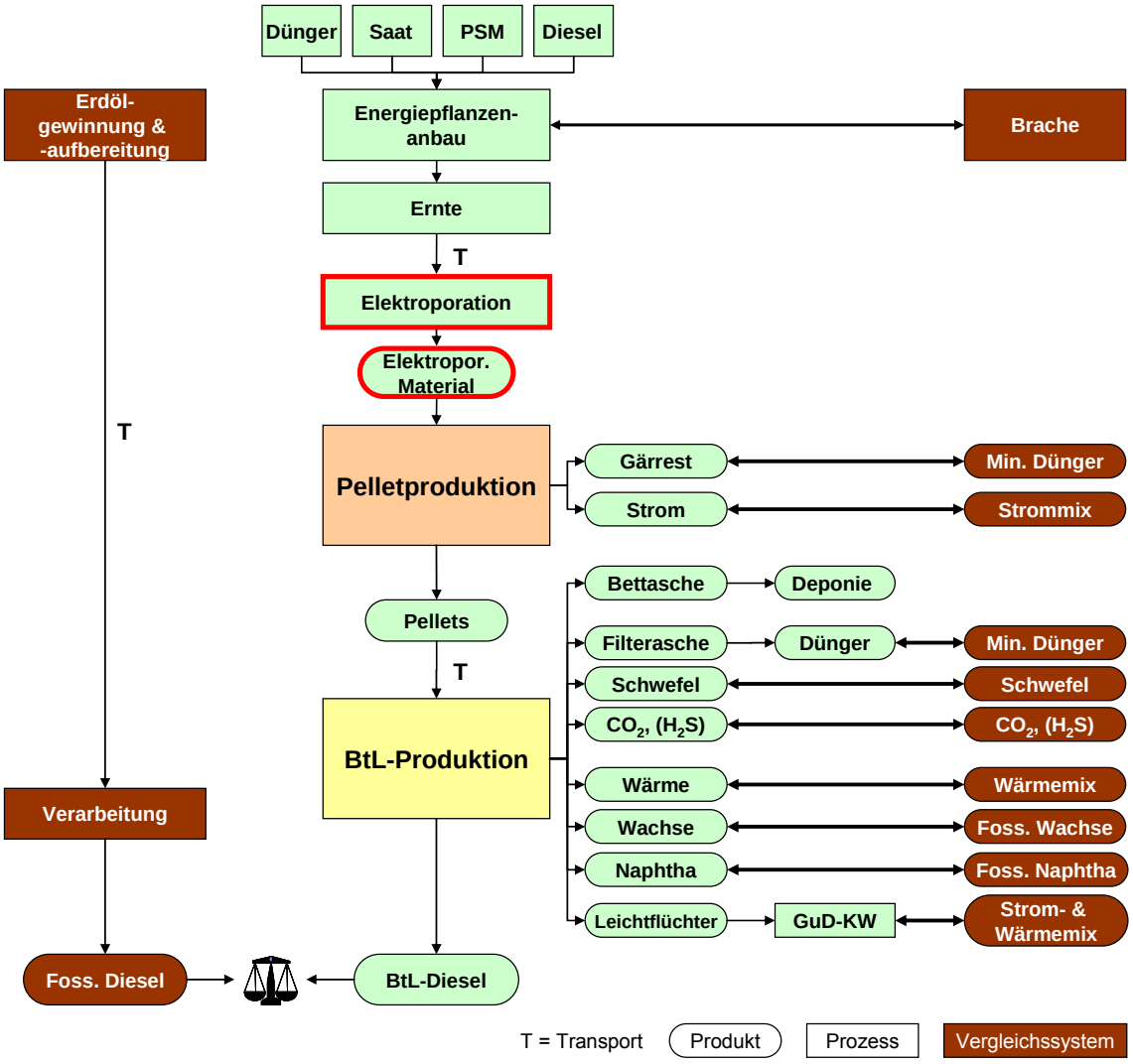

Abb. 3-3 Lebenswegvergleich zwischen fossilem Dieselkraftstoff und BtL-Diesel, der nach dem BioLog-Konzept unter Einbeziehung der Elektroporation (rot) hergestellt wird.

b.) Sensitivitätsanalyse: Pelletwerkgröße

Das BioLog-Konzept sieht vor, dass die Silage zu einem dezentralen Pelletwerk transportiert wird, wo sie entwässert, getrocknet und pelletiert wird. Die Größe eines solchen Werks hängt im Wesentlichen davon ab, wie viel Biomasse in seinem Einzugsgebiet unter Einhaltung ökonomischer (maximale Transportentfernung = 15 km) und pflanzenbaulicher Kriterien erzeugt werden kann. Zu letzteren zählen u. a. der Anteil der Getreidefläche und der Anteil nachwachsender Rohstoffe an der Ackerfläche, der Maisanteil in der Fruchtfolge sowie der Anteil energetisch genutzten Grases an der Grünlandfläche (/TLL 2008/). Die TLL analysierte diese Zusammenhänge anhand einer Modellregion in Niedersachsen und empfiehlt, drei Werksgrößen mit einer jährlichen Pelletproduktion von 12.500, 25.000 und 50.000 Tonnen zu untersuchen. Je nach Pelletwerkgröße kommen dabei z. B. unterschiedliche Pressentypen zum Einsatz, so dass sich der spezifische Energieaufwand unterscheidet /Anhydro 2008/.

Bei einem konstanten Pelletbedarf der zentralen 500 MW-BtL-Anlage von 1 Mio. Tonnen wird die Anzahl der benötigten dezentralen Pelletwerke von ihrer Größe bestimmt. Diese Anzahl wiederum beeinflusst die Transportentfernung zwischen Pelletwerk und zentraler BtL-Anlage (/IFEU 2009/), was in dieser Sensitivitätsanalyse ebenfalls berücksichtigt wurde.

c.) Optimierung der Trocknung durch Wahl des Energieträgers

In den Basis-Lebenswegen 1 und 2 wird Braunkohle als Energieträger für die thermische Trocknung eingesetzt. In dieser Sensitivitätsanalyse werden die Auswirkungen des Einsatzes von Erdgas oder Heizöl als Energieträger untersucht.

d.) Optimierung der Entwässerungs- und Trocknungstechnologien

Der Energieaufwand für die thermische Trocknung feuchter Biomasse ist äußerst hoch. Daher werden drei Szenarien betrachtet, wie dieser Energieaufwand deutlich verringert werden könnte. Die beschriebenen Technologien wären kurzfristig (2010) verfügbar.

- ***Kombination von Hoch- und Niedertemperaturtrockner**:* Das Pressgut wird in einem Hochtemperaturtrockner auf eine Feuchte von 18 – 22 % vorgetrocknet und dann mit einem Niedertemperaturtrockner bis zur Endfeuchte nachgetrocknet. Verglichen mit dem Basisfall können dadurch 45 % an thermischer Energie eingespart werden, während sich der elektrische Energiebedarf um 10 % erhöht /Sternowsky 2008/.
- ***Wärmepumpe**:* Durch den Einsatz einer Wärmepumpe lässt sich der Energieaufwand für die Trocknung gegenüber dem Basisfall um 2/3 reduzieren, allerdings muss die Energie in Form von elektrischer Energie (Netzstrom) bereitgestellt werden /Sternowsky 2008/.
- ***Entwässerung auf 50 % TM-Gehalt**:* Die Silage wird bei gleichem elektrischen Energiebedarf und gleichem TM-Verlust auf einen TM-Gehalt von 50 % (Basisfall: 45 %) entwässert /Rinder 2008/. Dadurch reduziert sich der thermische Energieaufwand bei der Trocknung um 30 % und der elektrische Energieaufwand um 20 % gegenüber dem Basisfall /Sternowsky 2008/. Daneben fällt deutlich mehr Presssaft an.

3.3.2 Pelletnutzung: Optimierungsmöglichkeiten

Sowohl bei der Verarbeitung der Pellets zu BtL-Diesel als auch bei der Kraft-Wärme-Kopplung können Parameter optimiert werden, wie im Folgenden gezeigt wird.

a.) BtL: Optimierter Wirkungsgrad im Jahr 2020

Im Jahr 2020 werden deutlich verbesserte Wirkungsgrade für BtL-Anlage erwartet. Hierzu wird ein um etwa 50 % höherer Output angesetzt, sowohl an BtL-Diesel als auch an den Kuppelprodukten Naphtha und Wachse /Vodegel 2008/.

b.) KWK: Optimierte Wärmenutzung

Wie bereits erwähnt, werden im Basis-Lebensweg 2 nur 50 % der im Heizkraftwerk gewonnenen Wärme genutzt. Bei entsprechender Wärmeabnahme durch Industriegebiete oder (Fern-)Wärmenetze, können aber bis zu 80 % der Wärme genutzt werden /IFEU 2009/. Dies wird hier exemplarisch untersucht.

4 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Übersichtsökobilanzen für die BioLog-Lebenswege präsentiert. Zunächst werden die Ergebnisse für die BioLog-Bioenergieträger im Vergleich zu fossilen Energieträgern – einschließlich Sensitivitäts- und Variantenanalysen – vorgestellt (Kapitel 4.1 – 4.2), danach Optimierungspotenziale aufgezeigt (Kapitel 4.3 – 4.5) und abschließend ein Vergleich zu alternativen Bioenergieträgern vorgenommen (Kapitel 4.6).

4.1 BioLog-Bioenergieträger versus fossile Energieträger

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Übersichtsökobilanzen für die beiden in den Kapiteln 3.1 und 3.2 beschriebenen Basis-Lebenswege 1 und 2 gezeigt. Zunächst wird am Beispiel der Umweltwirkung Treibhauseffekt das Zustandekommen der Ergebnissalden detailliert erläutert. Anschließend werden die Gesamtergebnisse in Form von Salden für weitere ausgewählte Umweltwirkungen präsentiert.

4.1.1 Ergebnisse der Übersichtsökobilanzen: Beispiel Treibhauseffekt

Abb. 4-1 zeigt für die Umweltwirkung Treibhauseffekt die Vor- und Nachteile von BtL-Diesel aus BioLog-Pellets gegenüber fossilem Dieselkraftstoff bzw. Bioenergie gegenüber Strom und Wärme aus fossilen Quellen. Die Ergebnisse für weitere ausgewählte Umweltwirkungen finden sich im Anhang (Abb. 7-1 – Abb. 7-4).

Der Aufbau der gestaffelten Balken folgt immer dem gleichen Muster: Im 1. und 3. Balken sind rechts des Ursprungs die Aufwendungen (hier: Emissionen) dargestellt, die entlang des jeweiligen Lebenswegs anfallen, links des Ursprungs sind die Gutschriften (hier: Vermiedene Emissionen) aufgetragen, die durch Nutzung der Kuppelprodukte zustande kommen. Der 2. und 4. Balken zeigen die Aufwendungen für das jeweilige Äquivalenzprodukt (fossiler Dieselkraftstoff bzw. Strom und Wärme aus fossilen Quellen). Die darunter abgebildeten Ergebnissalden (5. und 6. Balken) sind die Differenz zwischen biogenem und fossilem Produkt und damit das Gesamtergebnis für den jeweiligen Lebenswegvergleich. Sie geben an, wie viele CO_2-Äquivalente pro Hektar und Jahr vermieden bzw. zusätzlich emittiert werden.

Ergebnisse

- Die Produktion und Nutzung von BtL-Diesel aus BioLog-Pellets führt zu einer negativen Treibhausgasbilanz. Nutzt man ihn anstelle von fossilem Dieselkraftstoff, werden zusätzlich 6,8 t CO_2-Äquivalente pro Hektar und Jahr emittiert. Werden die BioLog-Pellets dagegen in einer KWK-Anlage eingesetzt und dadurch Strom und Wärme aus fossilen Quellen ersetzt, können 0,9 t CO_2-Äquivalente pro Hektar und Jahr vermieden werden.
- Verantwortlich für die hohen Treibhausgasemissionen ist neben dem Energiepflanzenanbau mit einem Anteil von ca. 25 % in erster Linie die Trocknung der Silage, die durch den Einsatz fossiler Energieträger knapp zwei Drittel der Emissionen (ca. 65 %) verursacht. Silierung, Entwässerung und Transporte spielen dagegen eine untergeordnete Rolle.

- Die Gutschriften werden vor allem durch die Presssaftvergärung (Gärrest und Strom) und die Kuppelprodukte aus der Fischer-Tropsch-Synthese (Naphtha und Wachse) bestimmt.
- Der Einfluss der thermischen Trocknung ist bei anderen Umweltwirkungen (außer Energie) weniger stark ausgeprägt (siehe Abb. 7-1 – Abb. 7-4 im Anhang). Beispielsweise wird ein Großteil der versauernden Emissionen vom Anbau und der KWK-Anlage verursacht.

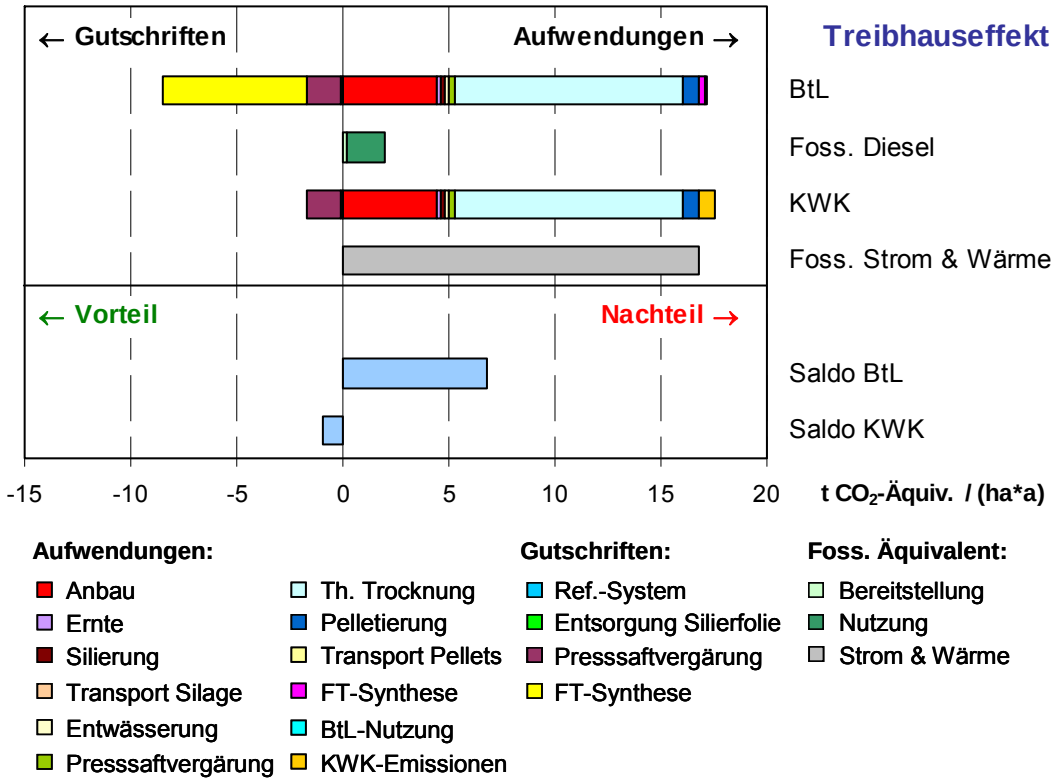

Abb. 4-1 Detaillierte Ergebnisse des Lebenswegvergleichs a) von BtL-Diesel mit fossilem Dieselkraftstoff und b) von Bioenergie mit Strom und Wärme aus fossilen Quellen für die Umweltwirkung Treibhauseffekt

Lesebeispiel für den Balken „BtL“ für Treibhauseffekt:

Bei der Produktion und Nutzung von BtL-Diesel aus BioLog-Pellets werden einerseits ca. 17,1 t CO_2-Äquivalente pro Hektar und Jahr emittiert, andererseits ca. 8,4 t CO_2-Äquivalente pro Hektar und Jahr durch die Nutzung der Kuppelprodukte vermieden. Die Emissionen für die Produktion und Nutzung von fossilem Dieselkraftstoff betragen etwa 1,9 t CO_2-Äquivalente pro Hektar und Jahr. Im Saldo ergeben sich so durch die Nutzung von BtL-Diesel aus BioLog-Pellets anstelle von fossilem Dieselkraftstoff zusätzliche Treibhausgasemissionen von 6,8 t CO_2-Äquivalenten pro Hektar und Jahr.

Fazit

Die Trocknung der Silage hat einen enormen Einfluss auf die Ergebnisse der Treibhausgasbilanzen. Unter heutigen Produktionsbedingungen führt sie dazu, dass BtL-Diesel aus BioLog-Pellets den Treibhauseffekt sogar verstärkt, während die Pelletnutzung zur Strom- und Wärmegewinnung gerade noch zu einer geringfügig positiven Bilanz führt.

4.1.2 BioLog-Kraft- und Brennstoffe im Vergleich: BtL versus KWK

Abb. 4-2 zeigt die die Vor- und Nachteile von BtL-Diesel aus BioLog-Pellets gegenüber fossilem Dieselkraftstoff (BtL-Pfad) und von Bioenergie gegenüber Strom und Wärme aus fossilen Quellen (KWK-Pfad) für die Umweltwirkungen Energie, Treibhauseffekt, Nährstoffeintrag, Versauerung, Fotosmog und Lachgas (Näheres dazu siehe Kapitel 2).

Die grafische Ergebnisdarstellung erfolgt dabei in Form von Salden, die auf die in Abschnitt 4.1.1 beschriebene Weise ermittelt wurden. Die zweite blaue Balken in Abb. 4-2, der die zusätzlichen Treibhausgasemissionen für BtL-Diesel aus BioLog-Pellets zeigt, ist daher mit dem ersten Ergebnissaldo aus Abb. 4-1 (Saldo BtL) identisch.

Ergebnisse

- **Lebensweg 1 (BtL-Pfad)**
  - Energie und Treibhauseffekt: Die Energie- und Treibhausgasbilanzen für den BtL-Pfad fallen negativ aus, was insbesondere auf die hohen Aufwendungen bzw. Emissionen beim Energiepflanzenanbau und der Trocknung der Silage zurückzuführen ist.
  - Weitere Umweltwirkungen: Für das ungünstige Ergebnis bei Versauerung, Nährstoffeintrag und Lachgas sind in erster Linie die Emissionen aus dem Energiepflanzenanbau verantwortlich, gefolgt von denen aus der Trocknung, der Presssaftvergärung und der BtL-Nutzung (siehe Abb. 7-1 – Abb. 7-2 im Anhang).
- **Lebensweg 2 (KWK-Pfad)**
  - Energie und Treibhauseffekt: Die Energiebilanz für den KWK-Pfad fällt sehr positiv aus. Die Treibhausgasbilanz dagegen ist nur deshalb nicht negativ, weil äußerst energie- und treibhausgaslastig gewonnener Strom und Wärme aus fossilen Quellen ersetzt werden.
  - Weitere Umweltwirkungen: Auch hier kommt es bei Versauerung, Nährstoffeintrag und Lachgas zu Mehremissionen gegenüber konventioneller Strom- und Wärmegewinnung, was zum Teil auf die Emissionen aus dem Energiepflanzenanbau, vor allem aber auf die Emissionen des Heizkraftwerks zurückzuführen ist (siehe Abb. 7-3 – Abb. 7-4 im Anhang). Daher schneidet der KWK-Pfad hier deutlich schlechter ab als der BtL-Pfad.
- **Trend**: Während die Energie- und Treibhausgasbilanzen für die beiden Pfade qualitativ unterschiedlich ausfallen (Vorteile für KWK, Nachteile für BtL), treten bei den Umweltwirkungen Versauerung, Nährstoffeintrag und Lachgas stets Mehremissionen (Nachteile) auf. Da die Ergebnisse für alle betrachteten Pfade und Varianten diesem Trend folgen, wird in den kommenden Ergebnisgrafiken nur eine der drei Umweltwirkungen abgebildet (Versauerung), die beiden anderen (Nährstoffeintrag und Lachgas) aber mit diskutiert.
- **Ausnahme**: Wie in Tabelle 2-1 näher beschrieben, gibt es zwei Wirkungsindikatoren zur Beschreibung der Umweltwirkung Fotosmog: POCP und NcPOCP. Während für den KWK-Pfad beide Fotosmog-Ergebnisse auf eine Verstärkung der Fotooxidantienbildung hinweisen, tritt beim BtL-Pfad der Fall auf, dass das POCP-Ergebnis leicht günstig, das NcPOCP-Ergebnis dagegen deutlich ungünstig ausfällt. Aufgrund dieser Gegenläufigkeit wird im Folgenden auf die Darstellung dieser Umweltwirkung verzichtet.

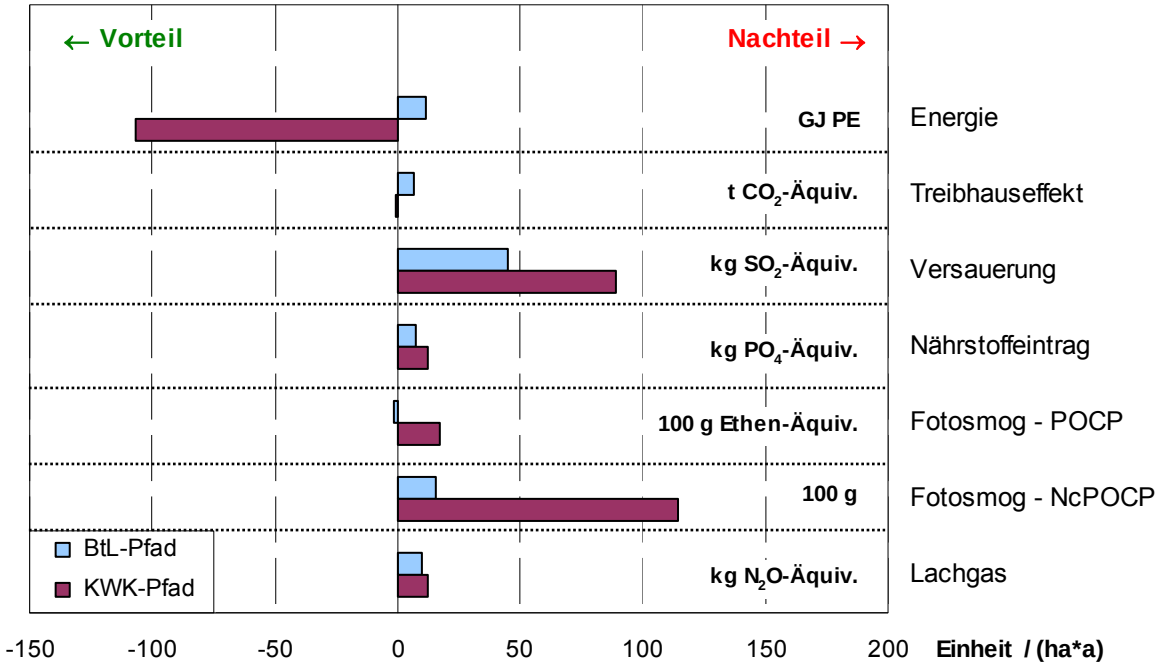

Abb. 4-2 Umweltwirkungen a) von BtL-Diesel im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff (BtL-Pfad) und b) von Bioenergie im Vergleich zu Strom und Wärme aus fossilen Quellen (KWK-Pfad); PE = Primärenergie

Lesebeispiel für den dritten blauen Balken „Versauerung" für BtL:

Wird BtL-Diesel aus BioLog-Pellets produziert und statt fossilem Dieselkraftstoff genutzt, ergeben sich Mehremissionen von ca. 45 kg SO_2-Äquivalenten pro Hektar und Jahr.

Fazit

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Verwendung von BioLog-Pellets zur Strom- und Wärmegewinnung in einer KWK-Anlage zu ökologischen Vor- und Nachteilen führt. Die Ergebnisse folgen damit einem Muster, das bereits für viele Biokraftstoffe und -brennstoffe bekannt ist.

Auf Grundlage der Resultate für die einzelnen Umweltwirkungen kann jedoch keine objektive, wissenschaftlich begründete Entscheidung für oder gegen diesen Pfad getroffen werden. Erst wenn zusätzliche Kriterien herangezogen bzw. subjektive Bewertungsverfahren angewandt werden, lässt sich eine zusammenfassende ökologische Bewertung vornehmen. In Deutschland geschieht dies üblicherweise verbal-argumentativ auf Basis der ökologischen Priorität /UBA 1999/. Diese misst beispielsweise dem Treibhauseffekt eine sehr große ökologische Priorität bei, so dass sich mit dieser Werthaltung eine Entscheidung *für* den KWK-Pfad evtl. begründen ließe. Dagegen ist mit derselben Werthaltung eine BtL-Produktion und -Nutzung unter *heutigen* Bedingungen aufgrund der nachteiligen Ergebnisse abzulehnen.

Da die Ergebnisse für die Umweltwirkungen Versauerung, Nährstoffeintrag und Lachgas qualitativ einheitlich ausfallen, wird in den folgenden Kapiteln – neben Energie und Treibhauseffekt – nur erstere dargestellt. Die Umweltwirkung Fotosmog wird dagegen nicht weiter betrachtet, da die beiden Wirkungsindikatoren POCP und NcPOCP zu gegenteiligen Ergebnissen führen und damit keine abschließende Bewertung zulassen.

4.2 Sensitivitäts- und Variantenanalysen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der ersten beiden in Abschnitt 3.3.1 vorgestellten Varianten und Optimierungsmöglichkeiten präsentiert. Dabei handelt es sich um die Variante Elektroporation und eine Sensitivitätsanalyse zur Größe der dezentralen Pelletwerke.

4.2.1 Variante: Elektroporation statt Silierung

Wie bereits in Abschnitt 3.3.1 beschrieben, könnte der Zellaufschluss, welcher im Lebensweg 1 durch Silierung erreicht wird, auch mittels Elektroporation erfolgen. Abb. 4-3 zeigt die Vor- und Nachteile von BtL-Diesel aus BioLog-Pellets gegenüber fossilem Dieselkraftstoff bei Zellaufschluss durch Silierung (Lebensweg 1) bzw. Elektroporation (ehem. Lebensweg 4) für ausgewählte Umweltwirkungen.

Ergebnisse

- Wird die frische Biomasse elektroporiert statt siliert, so fallen die Bilanzergebnisse für Energie, Treibhauseffekt, Versauerung, Nährstoffeintrag und Lachgas (letztere beide nicht abgebildet) zwar qualitativ ähnlich, aber quantitativ etwas ungünstiger aus.
- Dies ist darauf zurückzuführen, dass für die Elektroporation Strom eingesetzt wird, dessen Bereitstellung höhere spezifische Aufwendungen bzw. Emissionen mit sich bringt als die Bereitstellung von Dieselkraftstoff und die Produktion der Silierfolie. Zudem ergibt sich für die thermische Verwertung der Silierfolie nach Gebrauch eine Gutschrift, welche die Aufwendungen bzw. Emissionen der Produktion bereits wieder zur Hälfte kompensiert.

Fazit

Das noch sehr junge Verfahren der Elektroporation wurde im Rahmen des BioLog-Projekts erstmals an frisch geerntetem Gras, Roggen und Mais getestet. Da die Untersuchungen nur im Labor- bzw. Technikumsmaßstab durchgeführt wurden und das elektroporierte Material weder mittels Bandtrockner getrocknet noch pelletiert wurde, musste in dieser Variantenanalyse angesetzt werden, dass sich siliertes und elektroporiertes Material bei den Verarbeitungsschritten Trocknung und Pelletierung identisch verhalten – was noch zu verifizieren wäre. Unter diesen Randbedingungen schneidet die Elektroporation ungünstiger ab als die Silierung.

Neben den ökologischen Nachteilen würde das Umgehen der Silierung große ökonomische und logistische Herausforderungen mit sich bringen, da sämtliche Biomasse aufgrund der fehlenden Konservierung in einem kurzen Zeitfenster nach der Ernte mit entsprechend hoher Anlagenkapazität verarbeitet werden müsste. Die restliche Zeit über würde das Pelletwerk dann stillstehen.

Eine ebenfalls denkbare Variante, eine Elektroporation nach der Silierung, führt zu keiner Verbesserung der Materialeigenschaften, da die Silierung die frische Biomasse bereits vollständig aufschließt /FZK 2008/. Insgesamt erweist sich die Silierung unter ökologischen, ökonomischen und logistischen Gesichtspunkten als die bessere Wahl, vor allem weil sie die frische Biomasse nebenbei auch konserviert, so dass diese ganzjährig zur Verfügung steht.

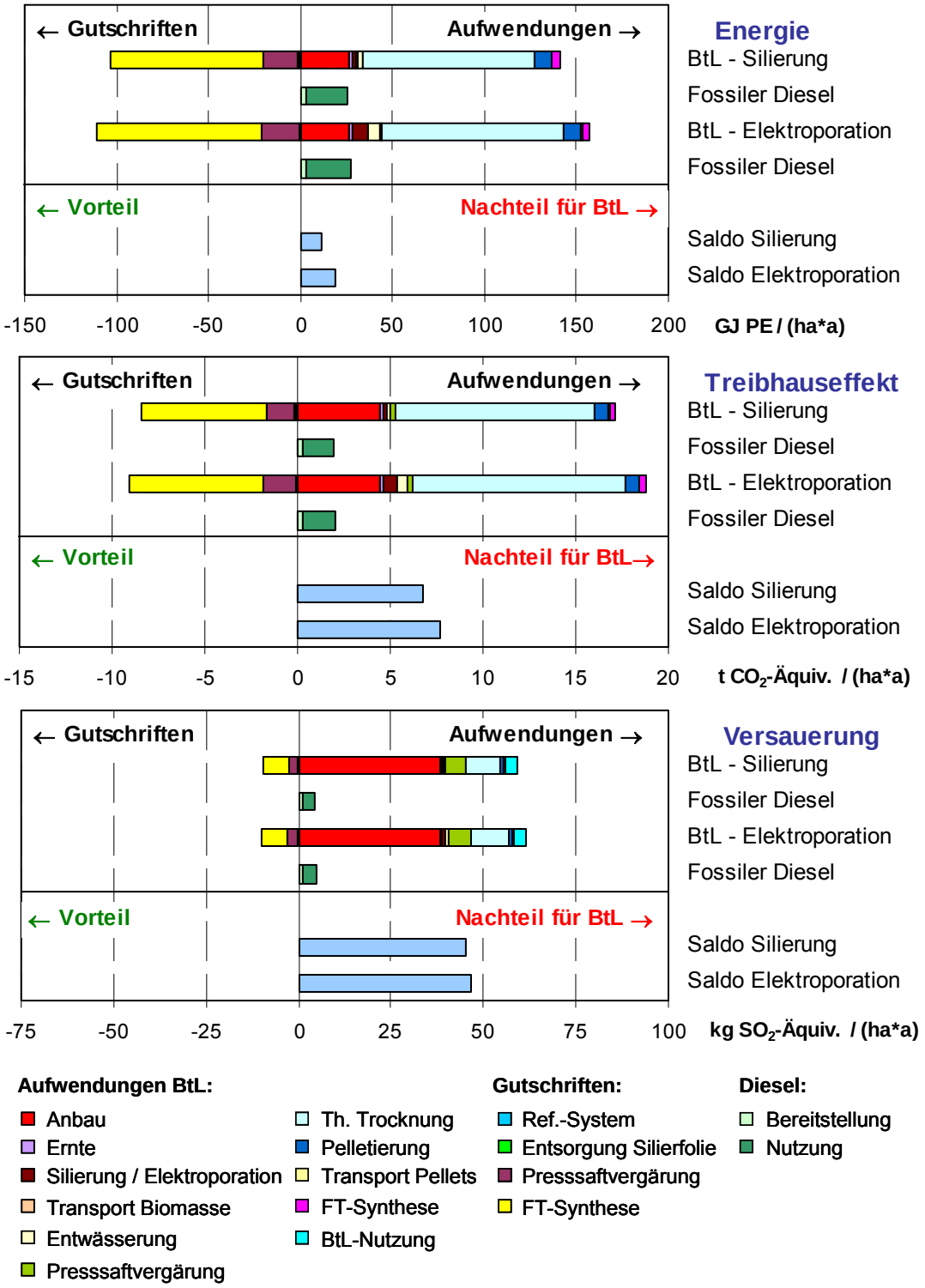

Abb. 4-3 Umweltwirkungen von BtL-Diesel im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff bei Zellaufschluss durch Silierung bzw. Elektroporation; PE = Primärenergie

Lesebeispiel für den Balken „Saldo Elektroporation“ für Energie:

Wird BtL-Diesel aus elektroporierter Biomasse produziert und anstelle von fossilem Dieselkraftstoff genutzt, kommt es zu einem Mehrverbrauch an nicht-erneuerbaren Energieträgern in Höhe von 18,6 GJ Primärenergie.

4.2.2 Sensitivitätsanalyse: Größe der dezentralen Pelletwerke

Das BioLog-Konzept sieht vor, dass die Silage zu einem dezentralen Pelletwerk transportiert wird, wo sie entwässert, getrocknet und pelletiert wird. Die Größe eines solchen Pelletwerks hängt im Wesentlichen davon ab, wie viel Biomasse in ihrem Einzugsgebiet unter Einhaltung ökonomischer und pflanzenbaulicher Kriterien erzeugt werden kann (siehe Abschnitt 3.3.1).

Innerhalb des BioLog-Projekts wurden daher drei Werksgrößen mit einer jährlichen Pelletproduktion von 12.500, 25.000 und 50.000 Tonnen untersucht, wobei für die Basis-Lebenswege 1 und 2 die mittlere Werksgröße zugrunde gelegt wurde.

Abb. 4-4 zeigt die Vor- und Nachteile von BtL-Diesel aus BioLog-Pellets gegenüber fossilem Dieselkraftstoff in Abhängigkeit der Werksgröße für ausgewählte Umweltwirkungen.

Ergebnisse

- Obwohl sich der spezifische Energieaufwand für die mechanische Entwässerung – bedingt durch den Einsatz unterschiedlicher Pressentypen – zum Teil deutlich unterscheidet, hat die Pelletwerkgröße praktisch keinen Einfluss auf die Ergebnisse der Ökobilanzen, die für alle Umweltwirkungskategorien nahezu gleich ausfallen. Dies hängt damit zusammen, dass die Aufwendungen bzw. Emissionen für diesen Lebenswegabschnitt ohnehin recht klein sind (siehe Abb. 4-1 bzw. Abb. 7-1 und Abb. 7-2 im Anhang), so dass selbst eine Verdoppelung des spezifischen Energiebedarfs kaum ins Gewicht fällt.
- Auch die unterschiedlichen Transportentfernungen für Silage bzw. Pellets, die sich – bei einem konstanten Pelletbedarf der zentralen 500 MW-BtL-Anlage von 1 Mio. Tonnen – aus der Pelletwerkgröße und -anzahl ergeben, haben nur einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf die Bilanzergebnisse. So erhöht sich die durchschnittliche Transportentfernung zwar für Silage von 5,5 auf 9,5 km und für die Pellets von ca. 42 auf ca. 49 km (jeweils für das 12.500- bzw. 50.000-Tonnen-Werk), was aber angesichts ohnehin recht kleiner Transportaufwendungen bzw. -emissionen kaum eine Rolle spielt (siehe Abb. 4-1 bzw. Abb. 7-1 und Abb. 7-2 im Anhang).

Fazit

Die Ökobilanzergebnisse weisen keine klaren Vor- oder Nachteile für eine bestimmte Pelletwerkgröße aus. Insofern kann diese aufgrund von (agrar-)ökonomischen oder logistischen Erwägungen gewählt werden.

Neben den hier untersuchten Umweltwirkungen müssen die im BioLog-Konzept vorgesehenen Konversionsanlagen im Sinne einer ökologischen Gesamtbewertung auch unter dem Aspekt der Flächeninanspruchnahme diskutiert werden. Dies betrifft sowohl das Einzugsgebiet eines einzelnen Pelletwerks als auch die gesamte Anbaufläche von 60.000 – 65.000 ha, die zur Versorgung einer 500 MW-BtL-Anlage benötigt wird und damit dauerhaft gebunden wäre. Bei einem maximal anvisierten Nawaro-Anteil von 25 % entspräche dies sogar einer Gesamtfläche von 240.000 – 260.000 ha. Am Beispiel einer Modellregion in Niedersachsen konnte zwar gezeigt werden, dass die erforderlichen Energiepflanzen unter Einhaltung ökonomischer und pflanzenbaulicher Kriterien erzeugt werden können. Inwiefern ein solch intensiver Energiepflanzenanbau aber aus Naturschutzsicht – z. B. in punkto biologische Vielfalt in der Agrarlandschaft – akzeptabel wäre, müsste noch detailliert untersucht werden.

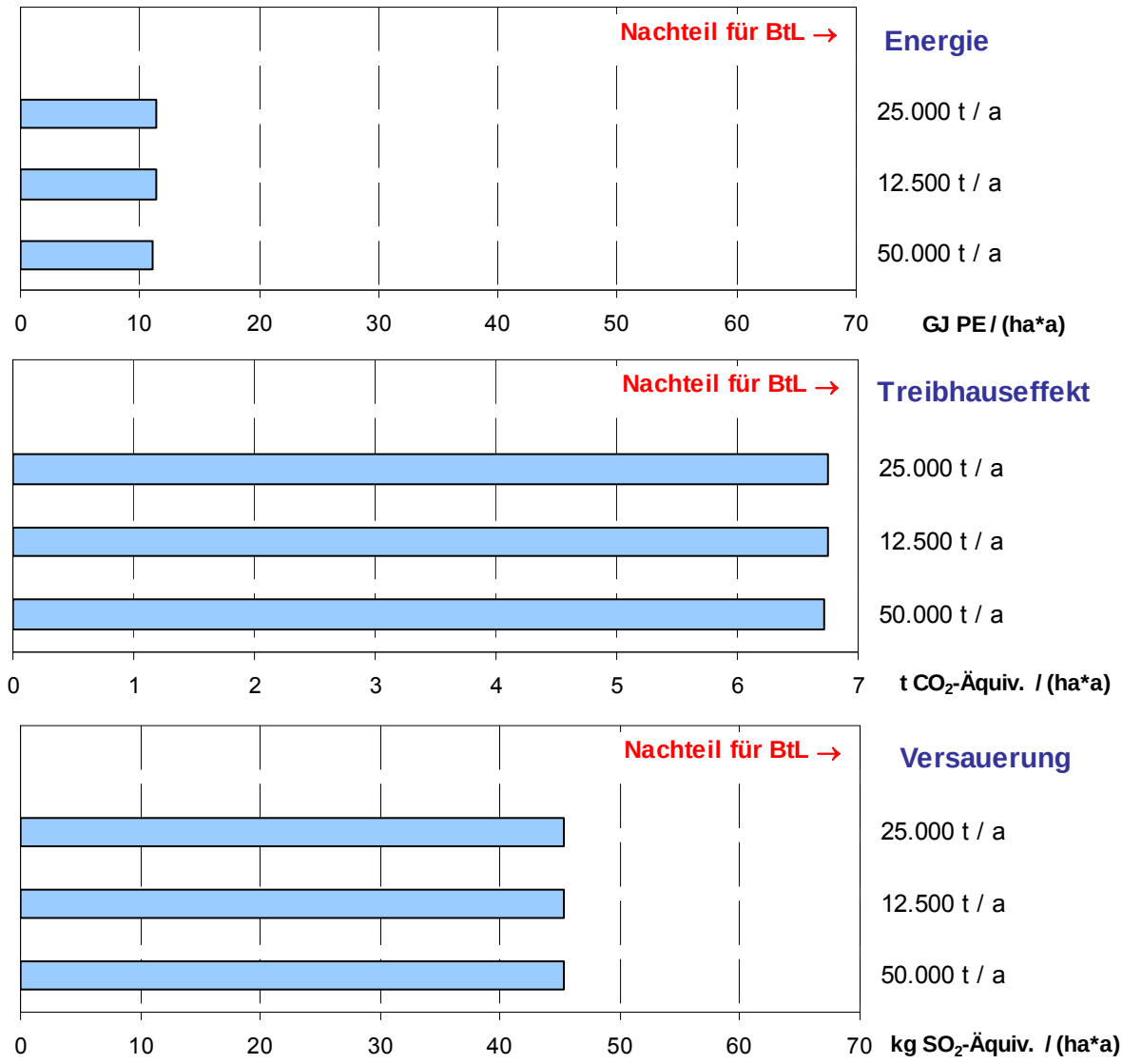

Abb. 4-4 Umweltwirkungen von BtL-Diesel im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff in Abhängigkeit der Größe der dezentralen Pelletwerks; PE = Primärenergie

Lesebeispiel für den zweiten Balken „12.500 t / a“ für Energie:

Werden BioLog-Pellets in einem Pelletwerk mit 12.500 t Jahresoutput produziert, zu BtL-Diesel verarbeitet und anstelle von fossilem Dieselkraftstoff genutzt, so ergeben sich zusätzliche energetische Aufwendungen von ca. 11,4 GJ Primärenergie.

4.3 Optimierungspotenziale bei der Pelletproduktion

Wie in Kapitel 4.1 gezeigt, ist die Trocknung der Silage bei beiden Lebenswegen für über 60 % der Treibhausgasmissionen verantwortlich. Im Projektverlauf wurden daher Szenarien entwickelt, wie dieser Energiebedarf bzw. die resultierenden Emissionen reduziert werden könnten. Im Folgenden werden die Ergebnisse der letzten beiden in Abschnitt 3.3.1 beschriebenen Optimierungsmöglichkeiten beispielhaft für den BtL-Pfad vorgestellt.

4.3.1 Wahl des Energieträgers für die Trocknung

Bei den Basis-Lebenswegen 1 und 2 wurde unterstellt, dass aus ökonomischen Gründen Braunkohle als fossiler Energieträger für die thermische Trocknung der Silage eingesetzt wird. Der Energiebedarf könnte aber auch durch Einsatz von Heizöl oder Erdgas gedeckt werden. Abb. 4-5 zeigt die Vor- und Nachteile von BtL-Diesel aus BioLog-Pellets gegenüber fossilem Dieselkraftstoff bei Verwendung unterschiedlicher fossiler Energieträger.

Ergebnisse

- Die Ergebnisse der Energiebilanz verschlechtern sich, wenn Erdgas oder Heizöl anstelle von Braunkohle als fossile Energieträger für die Trocknung eingesetzt werden. Dies ist auf den höheren spezifischen Energieaufwand bei der Bereitstellung von Erdgas und Heizöl zurückzuführen, der im Fall von Heizöl am größten ist.
- Anders sieht es dagegen bei Treibhauseffekt, Versauerung und Nährstoffeintrag aus. Hier wirkt sich der Einsatz von Erdgas günstig aus, vor allem beim Treibhauseffekt. Gegenüber einem Einsatz von Braunkohle verbessert sich das Ergebnis der Treibhausgasbilanz um 75 %. Diese Verbesserung allein reicht allerdings noch nicht für eine positive Bilanz aus.
- Interessanterweise verlaufen die Ergebnisse für Energie damit nicht parallel zu denen für Treibhauseffekt, Versauerung, Nährstoffeintrag und Lachgas (letztere beide nicht abgebildet). Dies liegt daran, dass Braunkohle zwar mit relativ geringem Energieaufwand bereitgestellt werden kann, dann aber bei der Verbrennung relativ hohe Emissionen verursacht. Bei Erdgas sind die Verhältnisse genau umgekehrt.

Fazit

Aus Klimaschutzsicht sollte unbedingt Erdgas als Energieträger für die thermische Trocknung verwendet werden, da dadurch die Treibhausgasbilanz wesentlich verbessert wird. Zwar wirkt sich dies ungünstig auf die Energiebilanz aus, dennoch ist die Verschlechterung relativ klein im Vergleich zu der enormen Verbesserung beim Treibhauseffekt. Letztendlich führt diese Maßnahme aber noch zu keiner *qualitativen* Verbesserung der Bilanzergebnisse.

Lesebeispiel für den zweiten Balken „Heizöl“ für Treibhauseffekt:

Wird Heizöl als Energieträger zur Trocknung verwendet, anschließend BtL-Diesel aus den BioLog-Pellets produziert und statt fossilem Dieselkraftstoff genutzt, so ergeben sich zusätzliche Treibhausgasemissionen von ca. 3,7 t CO_2-Äquivalenten pro Hektar und Jahr.

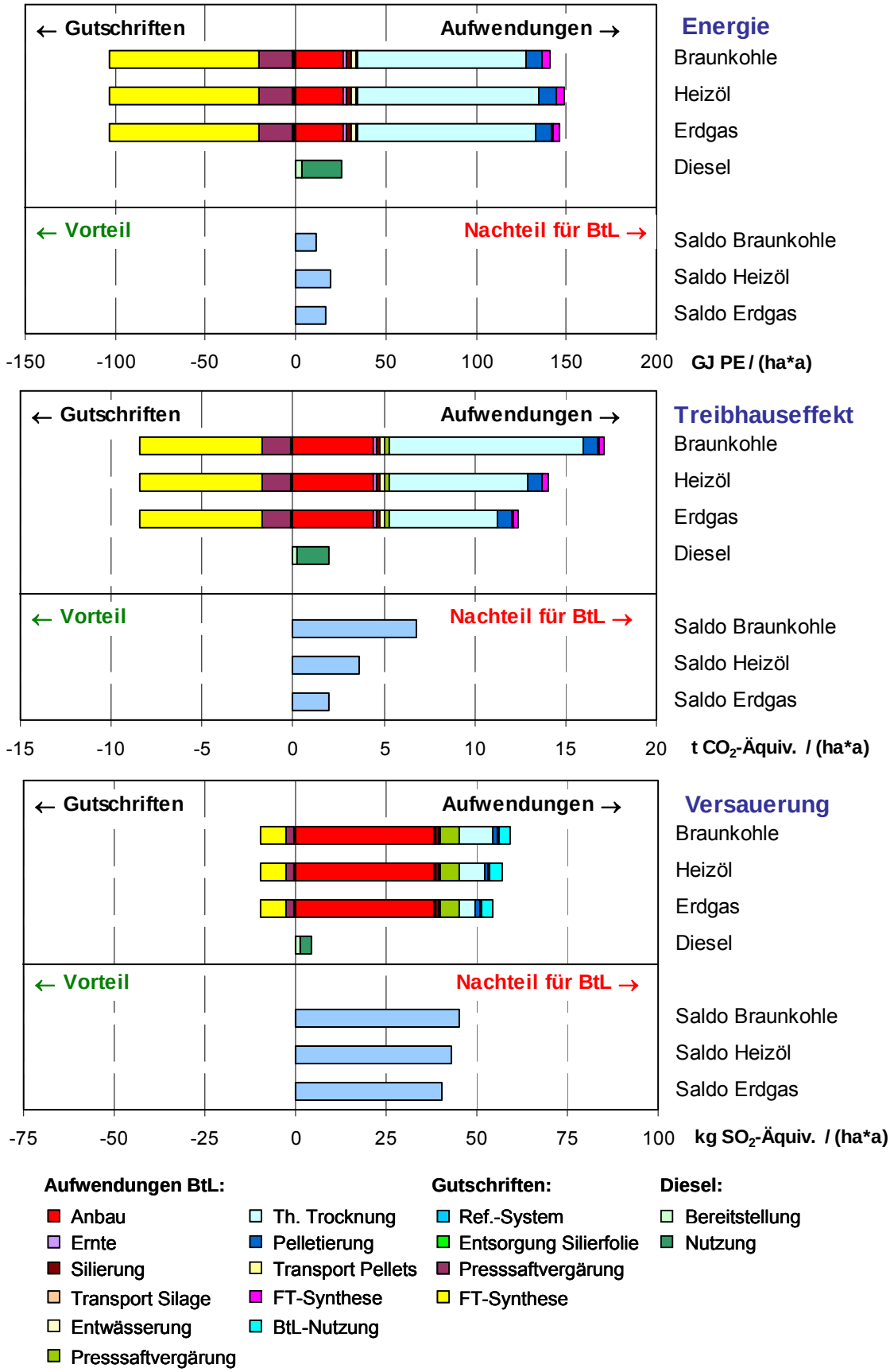

Abb. 4-5 Umweltwirkungen von BtL-Diesel im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff in Abhängigkeit des Energieträgereinsatzes bei der Trocknung; PE = Primärenergie

4.3.2 Zukünftige Entwässerungs- und Trocknungstechnologien

Wie in Abschnitt 3.3.1 bereits beschrieben, gibt es verschiedene, kurzfristig (2010) verfügbare Möglichkeiten, die mechanische Entwässerung und thermische Trocknung zu optimieren, was zu einer deutlichen Reduzierung des Energieaufwands führen würde. Abb. 4-6 zeigt die Vor- und Nachteile von BtL-Diesel aus BioLog-Pellets gegenüber fossilem Dieselkraftstoff für die drei untersuchten Szenarien sowie eine Verknüpfung zweier Szenarien.

Ergebnisse

- Kombination von Hoch- und Niedertemperaturtrockner (‚HT & NT'): Durch diese Kombination verringert sich der Primärenergiebedarf für die Trocknung um ca. 45 % und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen um ca. 50 %. Dadurch kommt es bei der im Basisfall (‚Heute') ungünstigen Energiebilanz zu einem Vorzeichenwechsel, d. h. es kann Energie eingespart werden. Darüber hinaus verbessert sich auch die ungünstige Treibhausgasbilanz um ca. 75 %, bleibt aber negativ.
- Wärmepumpe: Der Einsatz einer Wärmepumpe reduziert den Primärenergiebedarf für die Trocknung um ca. 35 % und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen um ca. 50 %. Dies führt ebenfalls zu einer positiven Energiebilanz, vor allem aber werden die Mehremissionen an Treibhausgasen gegenüber dem Basisfall um ca. 80 % reduziert.
- Entwässerung auf 50 % TM-Gehalt (‚Entwäss. 50 % TM'): Wird die Silage mechanisch auf einen TM-Gehalt von 50 % entwässert, können bei der Trocknung ca. 40 % Primärenergie und Treibhausgasemissionen eingespart werden. Daraus resultieren eine positive Energiebilanz und eine gegenüber dem Basisfall um ca. 70 % verbesserte Treibhausgasbilanz.
- Eine Verknüpfung der Maßnahmen 1 und 3 verringert den Primärenergiebedarf und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen gegenüber dem Basisfall um jeweils ca. 70 %. In diesem Fall kommt es selbst beim Treibhauseffekt zu einem Vorzeichenwechsel, d. h. es können netto Treibhausgasemissionen vermieden werden.
- Auf Versauerung, Nährstoffeintrag und Lachgas (letztere beide nicht abgebildet) haben diese Optimierungsmöglichkeiten allerdings nur geringfügig positive Auswirkungen, da diese Umweltwirkungen vor allem vom Energiepflanzenanbau beeinflusst werden.

Fazit

Erst durch die Verknüpfung einer Entwässerung auf 50 % TM-Gehalt mit einer innovativen Trocknerkombination (‚HT & NT') kommt es bei der Treibhausgasbilanz zu einem Vorzeichenwechsel, d. h. zu Netto-Treibhausgaseinsparungen. Insofern sollten beide Technologien mit Hochdruck weiterentwickelt und besser aufeinander abgestimmt werden. Bislang ist z. B. noch unklar, ob ein TM-Gehalt von 50 % mit einer Schneckenpresse erreichbar ist.

Lesebeispiel für den zweiten Balken „2010: HT & NT" für Energie:

Wird zur Trocknung der Silage eine Kombination aus Hoch- und Niedertemperaturtrockner verwendet, BtL-Diesel aus den Pellets produziert und anstelle von fossilem Dieselkraftstoff genutzt, so lassen sich knapp 33 GJ Primärenergie pro Hektar und Jahr einsparen.

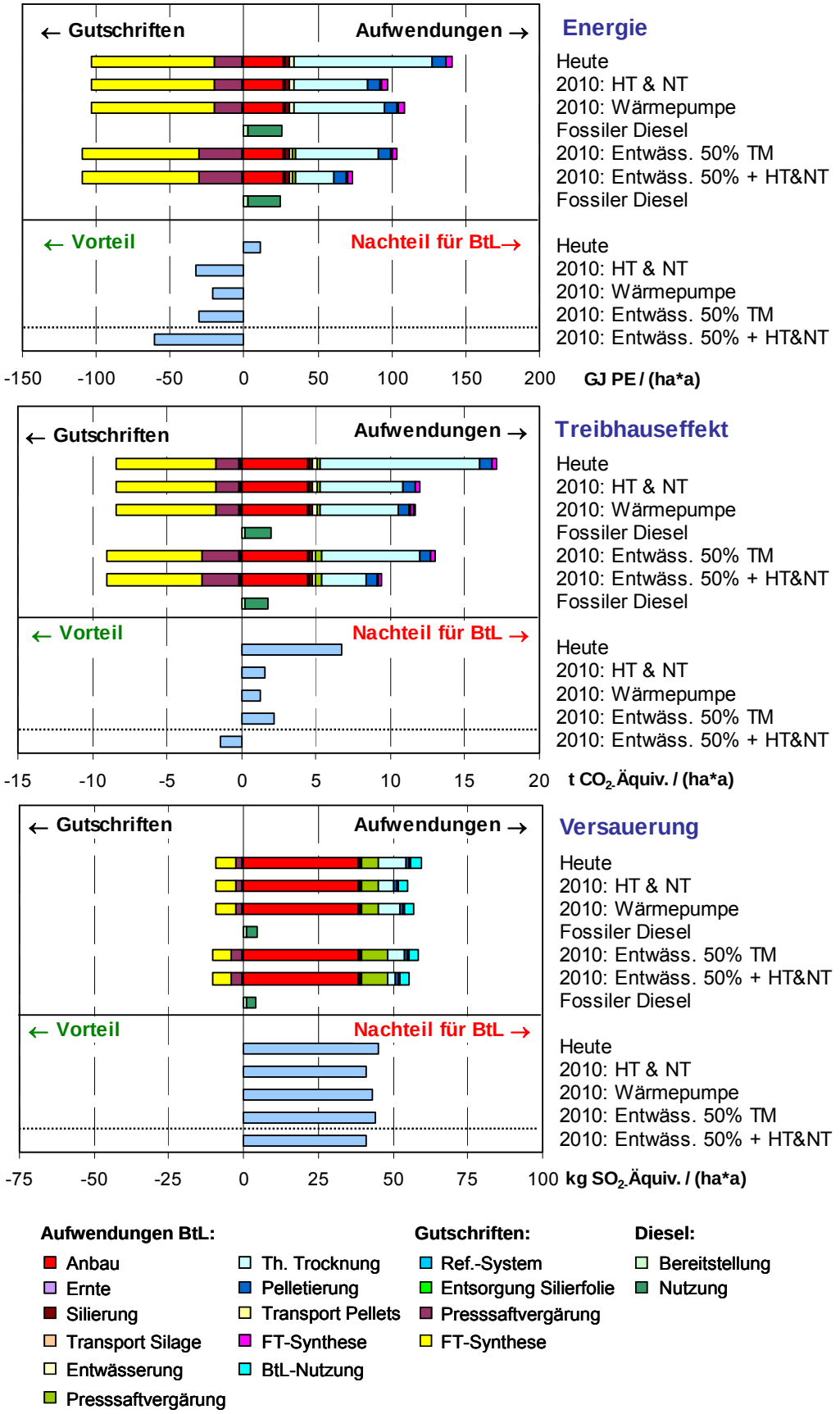

Abb. 4-6 Umweltwirkungen von BtL-Diesel im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff in Abhängigkeit verschiedener Trocknungstechnologien; PE = Primärenergie

4.4 Optimierungspotenziale bei der Pelletnutzung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der in Abschnitt 3.3.2 vorgestellten Optimierungsmöglichkeiten präsentiert. Diese betreffen zum einen den Wirkungsgrad der BtL-Anlage, welcher mittelfristig (2020) deutlich gesteigert werden kann, zum anderen die Wärmenutzung bei der KWK-Anlage. Abb. 4-7 zeigt die Vor- und Nachteile von BtL-Diesel aus BioLog-Pellets gegenüber fossilem Dieselkraftstoff (BtL-Pfad) und von Bioenergie gegenüber Strom und Wärme aus fossilen Quellen (KWK-Pfad) für ausgewählte Umweltwirkungen.

Ergebnisse

- **Lebensweg 1 (BtL-Pfad)**
  - Energie und Treibhauseffekt: Eine Wirkungsgradsteigerung, die den BtL-Output im Jahr 2020 um 50 % erhöht, wirkt sich positiv auf die Energiebilanz aus. Zwar werden dann nur in geringem Umfang nicht-erneuerbare Energieträger eingespart, aber immerhin kommt es nicht mehr wie im Basisfall (‚Heute') zu einem Mehrverbrauch. Darüber hinaus verbessert sich auch die ungünstige Treibhausgasbilanz um ca. 20 %, bleibt aber negativ.
  - Weitere Umweltwirkungen: Auf Versauerung, Nährstoffeintrag und Lachgas (letztere beide nicht abgebildet) hat ein höherer Wirkungsgrad dagegen kaum Auswirkungen, da diese Umweltwirkungen vor allem vom Energiepflanzenanbau beeinflusst werden.
- **Lebensweg 2 (KWK-Pfad)**
  - Energie und Treibhauseffekt: Kann ein größerer Anteil der KWK-Wärme genutzt werden, beispielsweise 80 % gegenüber 50 % im Basisfall, kann 50 % mehr Primärenergie eingespart und die fünffache Menge an Treibhausgasemissionen vermieden werden.
  - Weitere Umweltwirkungen: Eine höhere Wärmenutzung bei der KWK-Anlage wirkt sich auch leicht positiv auf Versauerung und Nährstoffeintrag (letztere nicht abgebildet) aus: Die Mehremissionen lassen sich dadurch um ca. 3 % reduzieren.

Fazit

Allein aus einer Wirkungsgradsteigerung bei der BtL-Produktion wird auch mittelfristig keine positive Treibhausgasbilanz resultieren, allerdings ist sie ein wichtiger Baustein. Daher sollten alle Anstrengungen unternommen werden, auch die BtL-Technologie weiter zu verbessern.

Aus Umweltschutzsicht ist es äußerst erstrebenswert, den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung in stärkerem Maße als bisher voranzutreiben und dabei gleichzeitig darauf zu achten, einen möglichst großen Anteil der erzeugten Wärme zu nutzen. Dies gilt damit auch für den Fall, dass eine KWK-Anlage basierend auf dem BioLog-Konzept umgesetzt wird. Bei der Planung einer solchen Anlage sollten daher potenzielle Wärmesenken unbedingt berücksichtigt werden, u. a. bei der Standortwahl und Dimensionierung der Anlage. Für den Fall, dass in der Nähe keine großen Wärmeabnehmer wie Industriegebiete vorhanden sind, könnten Fernwärmenetze eine Alternative darstellen.

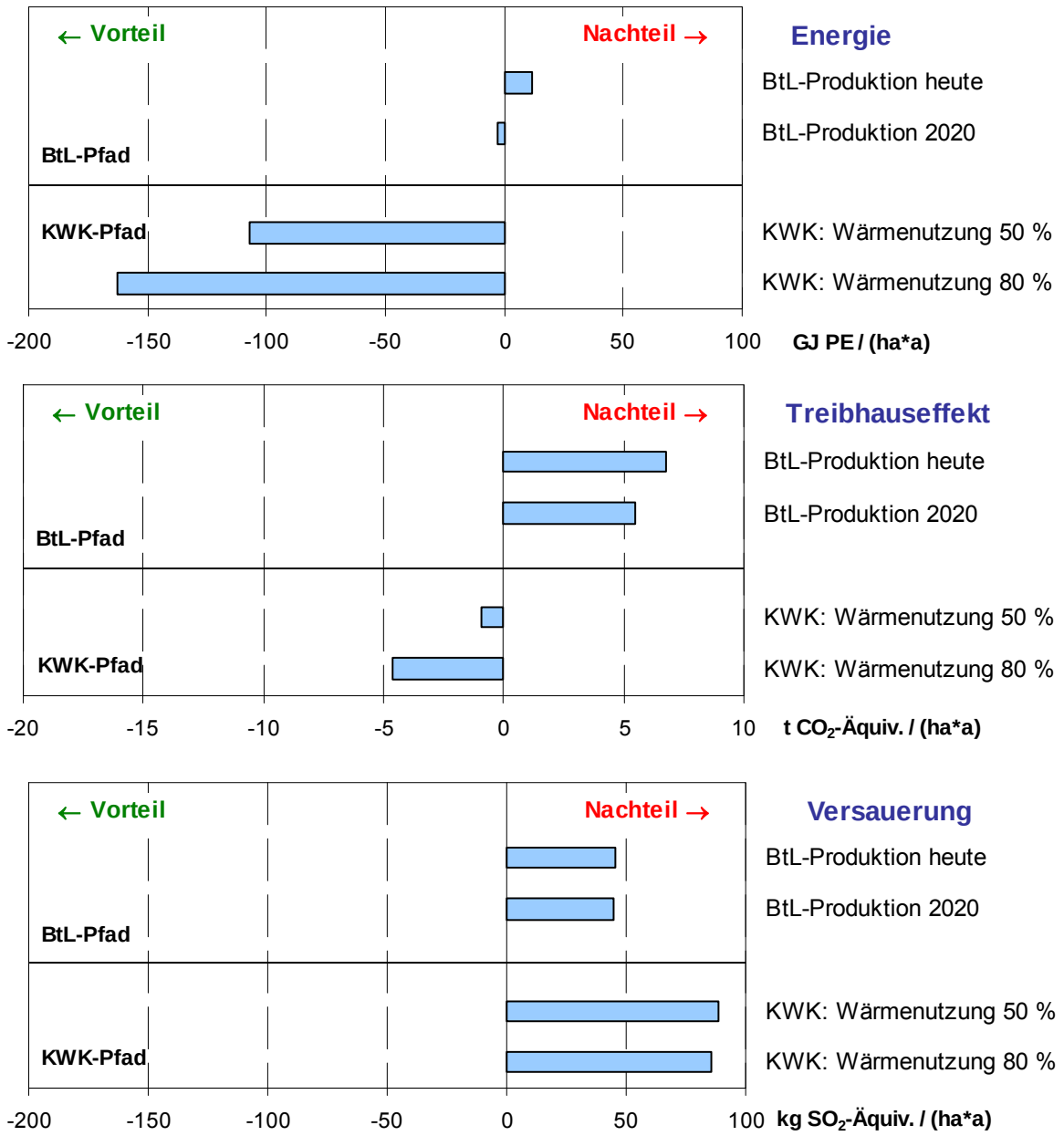

Abb. 4-7 Umweltwirkungen a) von BtL-Diesel im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff (BtL-Pfad) und b) von Bioenergie im Vergleich zu Strom und Wärme aus fossilen Quellen (KWK-Pfad) in Abhängigkeit des Wirkungsgrades der BtL-Anlage und der KWK-Wärmenutzung; PE = Primärenergie

Lesebeispiel für den vierten Balken „Wärmenutzung 80 %“ für Treibhauseffekt:

Werden 80 % der Wärme beim KWK-Pfad genutzt, so lassen sich ca. 4,7 t CO_2-Äquivalente pro Hektar und Jahr einsparen.

4.5 Alle Optimierungspotenziale im Überblick

In den Kapiteln 4.3 und 4.4 wurden die Ergebnisse des Lebenswegvergleichs von BtL-Diesel mit fossilem Dieselkraftstoff und von Bioenergie mit Strom und Wärme aus fossilen Quellen in Abhängigkeit verschiedener Einzeloptimierungen präsentiert. Nachfolgend werden diese nun zu „best case"- und „worst case"-Szenarien für Heute, 2010 und 2020 verknüpft. Abb. 4-8 zeigt die Bandbreite der Ergebnisse (Vor- und Nachteile) von BtL-Diesel aus BioLog-Pellets gegenüber fossilem Dieselkraftstoff (BtL-Pfad) und von Bioenergie gegenüber Strom und Wärme aus fossilen Quellen (KWK-Pfad) für ausgewählte Umweltwirkungen. Das linke Ende der Bandbreite stellt dabei den „best case", das rechte den „worst case" dar.

Ergebnisse

- **Lebensweg 1 (BtL-Pfad)**
  - Heute: Unter *heutigen* Produktionsbedingungen kann lediglich die Wahl des Energieträgers für die Trocknung beeinflusst werden. Die daraus resultierenden Bandbreiten sind mit Ausnahme des Treibhauseffekts aber relativ klein. Hier trägt der Einsatz von Erdgas zwar zur Verbesserung der Treibhausgasbilanz bei, die aber – wie auch die Bilanzen für Energie und Versauerung – trotzdem negativ ausfällt.
  - 2010: Zusätzlich zur Wahl eines umweltfreundlicheren Energieträgers für die Trocknung kann im Jahr 2010 auf verschiedene Optimierungsmöglichkeiten zurückgegriffen werden, die den Energieaufwand für die Trocknung deutlich zu senken. Die Verknüpfung einer Entwässerung auf 50 % TM-Gehalt mit einer Kombination von Hoch- und Niedertemperaturtrockner führt gegenüber dem Szenario ‚Heute' bei der Energiebilanz generell und bei der Treibhausgasbilanz im „best case" zu einem Vorzeichenwechsel.
  - 2020: Über die bereits im Szenario ‚2010' möglichen Optimierungen hinaus kann im Jahr 2020 noch der Wirkungsgrad der BtL-Anlage gesteigert werden. Dadurch verbessern sich die Ergebnisse gegenüber ‚2010' nochmals quantitativ, die qualitativen Aussagen bleiben jedoch gleich.
- **Lebensweg 2 (KWK-Pfad)**
  - Heute: Die Wahl des Energieträgers für die Trocknung hat eine vergleichsweise kleine Auswirkung auf die Bandbreiten. Diese werden beim KWK-Pfad, der bereits unter *heutigen* Produktionsbedingungen positive Energie- und Treibhausgasbilanzen aufweist, in erster Linie durch den Wärmenutzungsgrad der KWK-Anlage bestimmt.
  - 2010: Im Jahr 2010 können auch hier optimierte Entwässerungs- und Trocknungstechnologien zum Einsatz kommen, welche die Energiebilanz gegenüber dem Szenario ‚Heute' nochmals deutlich verbessern.

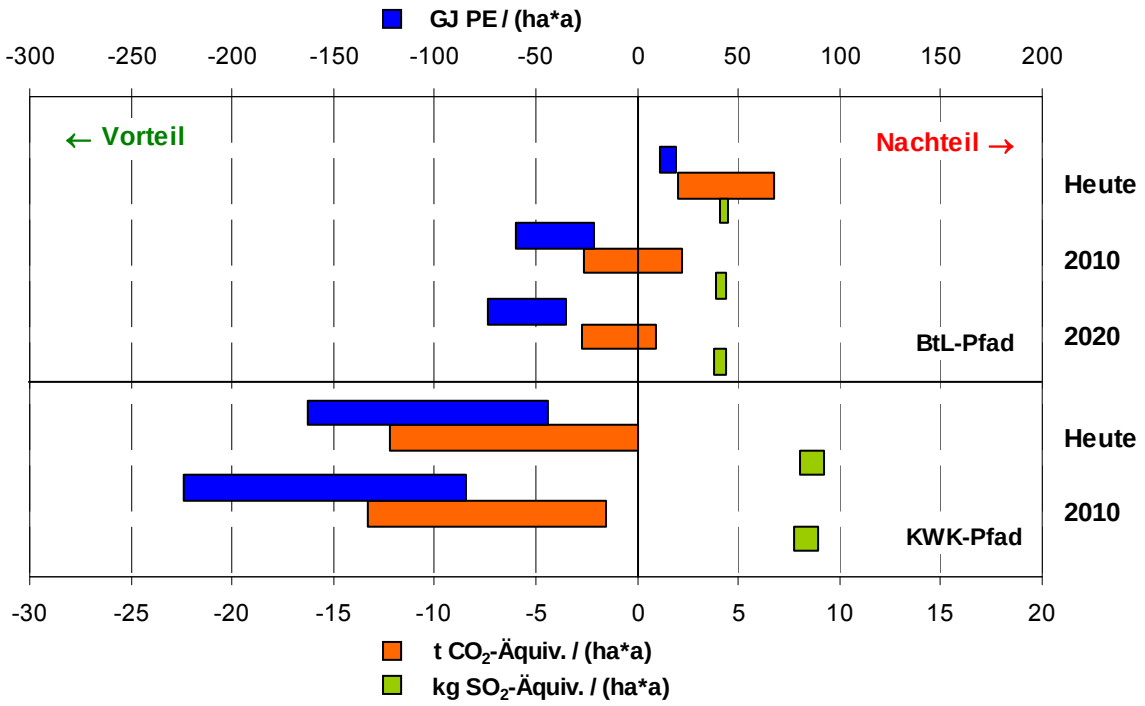

Abb. 4-8 Umweltwirkungen a) von BtL-Diesel im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff (BtL-Pfad) und b) von Bioenergie im Vergleich zu Strom und Wärme aus fossilen Quellen (KWK-Pfad). Die Ergebnisbandbreiten resultieren aus der Verknüpfung unterschiedlicher Optimierungen für Heute, 2010 und 2020; PE = Primärenergie

Lesebeispiel für den ersten blauen Balken „BtL-Pfad – Heute“ bei Energie:

Das linke Ende des Balkens zeigt das heute mögliche Optimum des BtL-Pfads an, das rechte Ende den ungünstigsten Fall. Wird BtL-Diesel anstelle von fossilem Dieselkraftstoff genutzt, beträgt der energetische Mehraufwand unter heutigen Produktionsbedingungen zwischen 11,4 und 19,3 GJ Primärenergie pro Hektar und Jahr.

Fazit

Die Ergebnisse zeigen, dass BtL-Diesel aus BioLog-Pellets *zukünftig* durchaus zur Schonung energetischer Ressourcen und zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen beitragen kann. Dazu müssten allerdings sämtliche Einzeloptimierungspotenziale entlang des gesamten Lebenswegs ausgeschöpft und miteinander verknüpft werden. Im Hinblick auf Energieeinsparung und Klimaschutz betrifft dies in erster Linie die Konversion und Nutzung der Biomasse, d. h. Pelletproduktion und -nutzung. Beispielsweise ist unter *heutigen* Produktionsbedingungen insbesondere die thermische Trocknung dafür verantwortlich, dass mit BtL-Diesel aus BioLog-Pellets im Gegensatz zu anderen Biokraftstoffen energetische Mehraufwendungen und Mehremissionen an Treibhausgasemissionen verbunden sind.

Die Forderung, sämtliche ergebnisrelevanten Lebenswegabschnitte zu optimieren, gilt natürlich auch für den KWK-Pfad, der aber bereits unter *heutigen* Produktionsbedingungen zum Ressourcen- und Klimaschutz beiträgt. Hier gilt es zukünftig vor allem tragfähige Wärmenutzungskonzepte zu entwickeln, welche die Umweltwirkungen deutlich minimieren.

4.6 BioLog-Bioenergieträger versus biogene Energieträger

Nachdem in den vorigen Kapiteln die ökologischen Schwachstellen des BioLog-Konzepts identifiziert und entsprechenden Optimierungspotenziale aufgezeigt wurden, sollen in diesem Kapitel insbesondere die *zukünftig* erzielbaren Ergebnisse für die BioLog-Bioenergieträger den Ergebnissen für andere Bioenergieträger gegenübergestellt werden. Dabei handelt es sich sowohl um alternative Biomasse- als auch Flächennutzungen. Zum einen könnte der BioLog-Biomassemix nicht nur getrocknet, pelletiert und zu BtL-Diesel bzw. Bioenergie umgewandelt werden, sondern nach der Silierung auch als Feuchtgut in einer Biogasanlage verwendet werden. Zum anderen könnten auf derselben Fläche stattdessen auch andere Energiepflanzen wie Pappel-Kurzumtriebsholz oder Tritcale-Ganzpflanzen erzeugt und energetisch genutzt werden. In Abb. 4-9 sind die Vor- und Nachteile der verschiedenen Bioenergieträger gegenüber ihren fossilen Äquivalenten für ausgewählte Umweltwirkungen dargestellt. Die Fehlerbalken bei den KWK-Pfaden zeigen die Bandbreite an, die aus unterschiedlichen Wärmenutzungsgraden resultiert: das linke Ende steht für 80 %, das rechte für 20 %.

Ergebnisse

- **Alternative Biomassenutzung**
  - Unter *zukünftigen* Produktionsbedingungen schneiden BtL-Diesel und als Kraftstoff genutztes Biomethan aus BioLog-Pellets vergleichbar gut ab. Dasselbe gilt auch für die stationäre Strom- und Wärmegewinnung aus BioLog-Pellets, wo der BioLog-KWK-Pfad zu ähnlichen Ergebnissen führt wie Biogas und Biomethan, die dezentral bzw. zentral in einem BHKW genutzt werden (Daten zu Konversionsanlagen siehe Anhang 7.3).
  - Dies liegt zum einen daran, dass die Pellets in einer KWK-Anlage bei einem elektrischen Wirkungsgrad (η_{el}) von 20 % umgewandelt werden, wohingegen die Silage in einer Biogasanlage zunächst mit einem Wirkungsgrad von ca. 50 % fermentiert und das Biogas anschließend mit η_{el} von 41 % verstromt wird, so dass hier insgesamt auch nur ein Wirkungsgrad von ca. 20 % resultiert. Zum anderen können die hohen Aufwendungen für die Trocknung der Silage durch einen höheren Wärmenutzungsgrad der KWK-Anlage von 50 % (Biogas-BHKW: 20 %) kompensiert werden. Drittens ist der BioLog-Biomassemix sicher nicht als optimales Biogassubstrat anzusehen.
- **Alternative Flächennutzung**
  - BtL-Diesel aus BioLog-Pellets liefert *zukünftig* ähnlich gute Resultate wie BtL aus Tritcale-GP. Die hohen Aufwendungen für die Trocknung der Silage werden durch die hohen Erträge kompensiert. Dagegen schneidet BtL aus Pappel aufgrund der geringeren Aufwendungen beim Energiepflanzenanbau in allen Umweltwirkungen besser ab.

Fazit

Unter *zukünftigen* Produktionsbedingungen können die BioLog-Bioenergieträger mit anderen Bioenergieträgern aus Ganzpflanzen mithalten. Das allgemeine Credo, feuchte Biomasse aus ökologischen Gründen ausschließlich in Feuchtgutlinien (z. B. für Biogas) zu nutzen, konnte unter den hier angesetzten Randbedingungen zumindest teilweise widerlegt werden. Dies soll aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass es mit Ethanol aus Zuckerrübe bereits *heute* Biokraftstoffe gibt, die mehr als doppelt so viele Treibhausgasemissionen vermeiden.

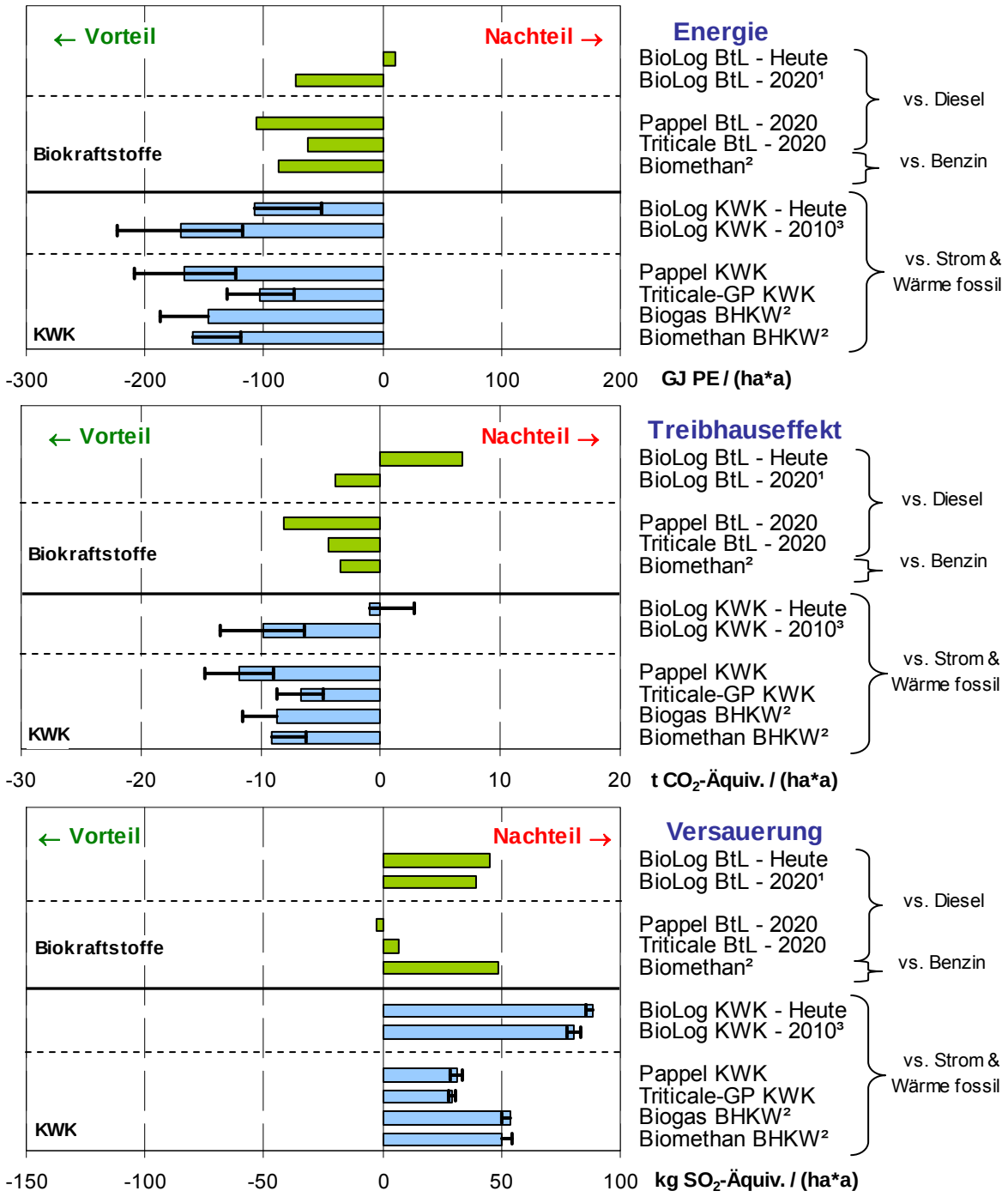

Abb. 4-9 Umweltwirkungen verschiedener Bioenergiepfade im Vergleich zu ihren fossilen Äquivalenten; BHKW = Blockheizkraftwerk, PE = Primärenergie

[1] Energieträger Trocknung Erdgas, Entwäss. 50% TM + HT&NT, BtL-Anlage 2020; [2] Substrat entspricht BioLog-Biomassemix; [3] Energieträger Trocknung Erdgas, Entwäss. 50% TM + HT&NT

Lesebeispiel für den viertletzten Balken „Pappel KWK“ für Treibhauseffekt:

Werden Strom und Wärme aus Pappel-Kurzumtriebsholz erzeugt, 50 % der Wärme genutzt (± 30 %-Pkt.) und damit Strom und Wärme aus fossilen Quellen ersetzt, können pro Hektar und Jahr Emissionen von ca. 11,8 t CO_2-Äquivalenten (± 2,9 t) vermieden werden.

5 Zusammenführung und Schlussfolgerungen

Nachfolgend werden die wesentlichen Ergebnisse und Aussagen aus Kapitel 4 zusammengeführt, einander gegenübergestellt und Schlussfolgerungen abgeleitet. Die eingangs gestellten Fragen dienen dabei als Orientierung:

- Wie ökologisch sind die analysierten BioLog-Bioenergieträger unter *heutigen* Produktionsbedingungen im Vergleich zur Bereitstellung und Nutzung fossiler Kraft- und Brennstoffe?
- Inwiefern können die besonders ergebnisrelevanten Lebenswegabschnitte aus Umweltschutzsicht optimiert werden?
- Wie schneiden die die analysierten BioLog-Bioenergieträger unter *zukünftigen* Produktionsbedingungen verglichen mit der Bereitstellung und Nutzung anderer biogener Kraft- und Brennstoffe ab, d. h. im Vergleich zu alternativen Biomasse- und Flächennutzungen?

BioLog-Kraft- und Brennstoffe im Vergleich zu fossilen Energieträgern

Im Rahmen dieser Studie wurden die Umweltwirkungen von BtL-Diesel aus BioLog-Pellets gegenüber fossilem Dieselkraftstoff (BtL-Pfad) und von Bioenergie gegenüber Strom und Wärme aus fossilen Quellen (KWK-Pfad) untersucht.

Der Vergleich zwischen fossilem Dieselkraftstoff und BtL-Diesel aus BioLog-Pellets, welche aus einer Mischung aus Gras-, Roggen- und Maissilage hergestellt werden, fällt unter *heutigen* Produktionsbedingungen zu Ungunsten des Biokraftstoffs aus. Bei allen analysierten Umweltwirkungen treten Nachteile auf – selbst bei Energie und Treibhauseffekt, bei denen Biokraftstoffe üblicherweise besser abschneiden als ihre fossilen Äquivalente. Dies liegt sowohl am Einsatz fossiler Energieträger bei der thermischen Trocknung als auch am Energiepflanzenanbau, welcher beispielsweise durch die Düngemittelproduktion und -ausbringung zum Teil erhebliche Emissionen an stickstoffhaltigen Verbindungen verursacht. Damit ist der BtL-Pfad unter *heutigen* Produktionsbedingungen aus Umweltschutzsicht abzulehnen. Daran würde auch ein Zellaufschluss durch Elektroporation anstelle von Silierung oder die Änderung der Pelletwerkgröße nichts ändern, wie Sensitivitäts- und Variantenanalysen zeigen.

Werden die BioLog-Pellets dagegen in einer Anlage mit Kraft-Wärme-Kopplung eingesetzt und somit Strom und Wärme aus fossilen Quellen ersetzt, zeigen die Ergebnisse ein Muster, das bereits von den Vergleichen vieler anderer Bioenergieträger mit ihren fossilen Äquivalenten bekannt ist: Tendenzielle Vorteile bei der Schonung energetischer Ressourcen und bei der Vermeidung von Treibhausgasemissionen, während bei den anderen Umweltwirkungen tendenziell Nachteile auftreten. Die Treibhausgasbilanz ist allerdings unter *heutigen* Produktionsbedingungen nur geringfügig positiv. Damit kann keine objektive, wissenschaftlich begründete Entscheidung für oder gegen den KWK-Pfad gefällt werden. Erst wenn zusätzliche Kriterien herangezogen bzw. subjektive Bewertungsverfahren angewandt werden, kann eine Aussage getroffen werden. Misst man beispielsweise der Schonung energetischer Ressourcen und dem Treibhauseffekt eine höhere ökologische Priorität bei als anderen Umweltwirkungen, ließe sich eine positive Bewertung des KWK-Pfads begründen.

Beide untersuchten Pfade könnten jedoch *zukünftig* wesentlich besser bewertet werden, wenn es gelingt, die Pelletproduktion und -nutzung zu optimieren.

Optimierung der besonders ergebnisrelevanten Lebenswegabschnitte

Bei den meisten Ökobilanzen haben einzelne Lebenswegabschnitte einen unterschiedlich großen Einfluss auf die Gesamtergebnisse, so auch bei den Lebenswegvergleichen von BtL-Diesel aus BioLog-Pellets gegenüber fossilem Dieselkraftstoff bzw. Bioenergie gegenüber Strom und Wärme aus fossilen Quellen. Im Folgenden sind die Lebenswegabschnitte nach ihrem direkten Einfluss geordnet:

- Geringer Einfluss: Ernte, Silierung, Silage- und Pellettransport sowie mechanische Entwässerung (wobei sich letztere allerdings indirekt auf die thermische Trocknung auswirkt)
- Mittlerer Einfluss: Presssaftvergärung, Pelletierung sowie Pelletnutzung für BtL
- Großer Einfluss: Anbau, thermische Trocknung sowie Pelletnutzung für KWK

Dieser Einfluss kann bei den einzelnen Umweltwirkungen unterschiedlich stark ausgeprägt sein. Beispielsweise ist der Einfluss des Energiepflanzenanbaus in allen Umweltwirkungen deutlich erkennbar (vor allem bei Versauerung, Nährstoffeintrag und Lachgas), während sich die thermische Trocknung insbesondere bei Energie und Treibhauseffekt niederschlägt. Werden die Pellets zur Strom- und Wärmegewinnung (KWK-Pfad) eingesetzt, wirkt sich dies deutlich negativ auf Versauerung, Nährstoffeintrag und Lachgas aus.

Mit Blick auf die sehr große ökologische Priorität der Umweltwirkung Treibhauseffekt wären also Optimierungen besonders dort lohnenswert, wo sie zu einer deutlichen Reduzierung der Treibhausgasemissionen beitragen. Im Fall der BioLog-Kraft- und Brennstoffe sind dies die besonders ergebnisrelevanten Lebenswegabschnitte thermische Trocknung und Pelletnutzung. Für sie wurden auf Basis von Experteneinschätzungen Szenarien entwickelt, die im Fall der thermischen Trocknung sogar kurzfristig (2010), im Fall der BtL-Produktion wohl aber erst mittelfristig (2020) umsetzbar wären. Der Energiepflanzenanbau wurde nicht weiter betrachtet, da der Biomassemix durch das BioLog-Konzept vorgegeben war. Hier würde lediglich der Anbau von Kurzumtriebsholz, welcher mit geringeren landwirtschaftlichen Aufwendungen verbunden ist, oder der Einsatz von Reststoffen wie Stroh oder Waldrestholz zu besseren Ökobilanzergebnissen führen.

- **Thermische Trocknung**: Die thermische Trocknung kann in zweifacher Hinsicht optimiert werden, zum einen durch die Wahl des fossilen Energieträgers, zum anderen durch Verbesserung der Entwässerungs- und Trocknungstechnologie.
  - Wahl des fossilen Energieträgers: Aus Klimaschutzsicht sollte anstelle von Braunkohle unbedingt Erdgas als Energieträger für die thermische Trocknung verwendet werden, da dadurch die Treibhausgasbilanz wesentlich verbessert wird. Letztendlich führt diese Maßnahme aber noch zu keiner *qualitativen* Verbesserung der Bilanzergebnisse.
  - Entwässerungs- und Trocknungstechnologie: Es wurden drei kurzfristig (2010) verfügbare Technologien analysiert, die alle zu einer deutlichen Reduzierung des Energieaufwands führen würden. Sehr viel versprechend ist eine stärkere mechanische Entwässerung auf 50 % TM-Gehalt sowie eine Kombination aus Hoch- und Niedertemperaturtrockner, die jeweils für sich genommen nur eine Verbesserung der im Basisfall (Heute) negativen Treibhausgasbilanz von BtL-Diesel zur Folge hätten. Erst durch die Verknüpfung der beiden genannten Maßnahmen kommt es zu einem Vorzeichenwechsel, d. h. zu Netto-Treibhausgaseinsparungen. Ob ein TM-Gehalt von 50 % jedoch mit einer Schneckenpresse erreichbar ist, muss erst noch unter Beweis gestellt werden.

- **Pelletnutzung**: Die Pelletnutzung kann sowohl im Falle einer BtL-Produktion als auch bei thermischer Nutzung verbessert werden. Dies betrifft einerseits den Wirkungsgrad der BtL-Anlage, andererseits den Wärmenutzungsgrad der KWK-Anlage.
  - Wirkungsgrad BtL-Produktion: Mittelfristig (2020) werden deutlich verbesserte Wirkungsgrade für BtL-Anlagen erwartet, welche zumindest in einer positiven Energiebilanz resultieren würde. Obwohl diese Optimierung für sich genommen noch nicht zu einer positiven Treibhausgasbilanz führt, ist sie dennoch ein wichtiger Baustein auf dem Weg dorthin.
  - KWK-Wärmenutzungsgrad: Aus Umweltschutzsicht ist bei KWK-Anlagen unbedingt ein hoher Wärmenutzungsgrad anzustreben. Sollte eine solche Anlage basierend auf dem BioLog-Konzept umgesetzt werden, sollten potenzielle Wärmesenken bei der Planung berücksichtigt werden, u. a. bei der Standortwahl und Anlagendimensionierung.

Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass alle Anstrengungen unternommen werden sollten, sämtliche Einzeloptimierungspotenziale entlang des gesamten Lebenswegs auszuschöpfen und miteinander zu verknüpfen. Gelingt dies, würde die Bewertung der untersuchten Pfade *zukünftig* wesentlich positiver ausfallen.

BioLog-Kraft- und Brennstoffe im Vergleich zu anderen biogenen Energieträgern

Die analysierten Pfade stehen trotz *zukünftig* möglicherweise vorteilhafterer Ergebnisse in direkter Konkurrenz zu anderen Biomasse- und Flächennutzungen. Zum einen könnte der BioLog-Biomassemix nicht nur getrocknet, pelletiert und zu BtL-Diesel bzw. Bioenergie umgewandelt werden, sondern nach der Silierung auch als Feuchtgut in einer Biogasanlage verwendet werden. Zum anderen könnten auf derselben Fläche stattdessen auch andere Energiepflanzen wie Pappel oder Triticale erzeugt und energetisch genutzt werden.

- **Alternative Biomassenutzung**: Unter *zukünftigen* Produktionsbedingungen schneiden BtL-Diesel und als Kraftstoff genutztes Biomethan aus BioLog-Pellets vergleichbar gut ab. Dasselbe gilt auch für die stationäre Strom- und Wärmegewinnung aus BioLog-Pellets, wo der BioLog-KWK-Pfad zu ähnlichen Ergebnissen führt wie Biogas und Biomethan, die dezentral bzw. zentral in einem BHKW genutzt werden. Allerdings ist der BioLog-Biomassemix sicher nicht als optimales Biogassubstrat anzusehen.
- **Alternative Flächennutzung**: BtL-Diesel aus BioLog-Pellets liefert *zukünftig* ähnlich gute Resultate wie BtL aus Triticale. Die hohen Aufwendungen für die Trocknung der Silage werden durch die hohen Erträge kompensiert. Dagegen schneidet BtL aus Pappel aufgrund geringerer landwirtschaftlicher Aufwendungen in allen Umweltwirkungen besser ab.

Unter *zukünftigen* Produktionsbedingungen können die untersuchten Pfade durchaus mit anderen Bioenergieträgern aus Ganzpflanzen mithalten. Dabei konnte das allgemeine Credo, feuchte Biomasse aus ökologischen Gründen ausschließlich in Feuchtgutlinien (z. B. für Biogas) zu nutzen, unter den hier angesetzten Randbedingungen zumindest teilweise widerlegt werden. Dies soll aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass es mit Bioethanol aus Zuckerrübe bereits *heute* Biokraftstoffe gibt, die mehr als doppelt so viele Treibhausgasemissionen vermeiden. Inwiefern das BioLog-Konzept auch unter ökonomischen und logistischen Gesichtspunkten mit den etablierten Biokraftstoffen und -brennstoffen wie Biodiesel, Bioethanol oder Biogas konkurrieren kann, muss die ökonomische Begleitforschung zeigen.

Ausblick

Die hier abgeleiteten und dargestellten Ergebnisse können als qualitativ robust angesehen werden und ermöglichen damit zuverlässige Richtungsaussagen für das BioLog-Konzept. Streng genommen gelten sie (insbesondere im quantitativen Sinn) aber nur unter den gesetzten Randbedingungen. Dazu zählen neben dem zugrunde gelegten Biomassemix vor allem auch die auf Basis von Experteneinschätzungen angesetzten Wirkungsgrade zukünftiger Entwässerung- und Trocknungstechnologien sowie BtL-Anlagen, welche zum Teil erst noch unter Beweis gestellt werden müssen. Daher können die Ergebnisse nicht ohne weiteres auf andere nachwachsende Rohstoffe oder Konversionstechnologien übertragen werden.

Obwohl ihr Einfluss letztendlich relativ gering ist, gelten ähnliche Einschränkungen auch für die angesetzte Kuppelproduktnutzung, bei der einige technische und rechtliche Fragen noch ungelöst sind. Beispielsweise muss geklärt werden, inwiefern die Ausbringung von Gärrest und insbesondere Filterasche im Rahmen der Düngemittelverordnung (DüMV) zulässig und ggf. auch technisch umsetzbar ist (Staubbildung bei Ascheausbringung). Außerdem ist noch offen, ob BioLog-Pellets im Sinne der 1. Bundesimmissionsschutzverordnung als Brennstoff für (Klein-)Feuerungsanlagen zwischen 15 und 100 kW anerkannt würden. Diese könnten eine (dezentrale) Alternative zu einer möglicherweise nicht realisierbaren, zentralen KWK-Anlage darstellen. Für größere Anlagen zwischen 100 kW und 50 MW (Geltungsbereich der 4. BImSchV) scheint dies zumindest kein Problem zu sein, allerdings könnten strenge Auflagen der TA Luft aufwändige Rauchgasreinigungssysteme für Anlagen mit BioLog-Pelletfeuerung erforderlich machen.

Im Sinne einer Nachhaltigkeitsbewertung, welche ökologische, ökonomische und soziale Komponenten untersucht, muss bei einer umfassenden ökologischen Bewertung – leider allzu oft reduziert auf Klimaschutzaspekte – beispielsweise auch die Vereinbarkeit mit Naturschutzzielen überprüft werden. Inwiefern eine Flächenbindung von 60.000 – 65.000 ha wie beim BioLog-Konzept z. B. in punkto biologische Vielfalt akzeptabel ist, müsste separat analysiert werden, da solche Fragestellungen nicht Gegenstand der Untersuchung waren.

Nichtsdestotrotz zeigen die Ergebnisse der Übersichtsökobilanzen, dass die nach dem BioLog-Konzept hergestellten Kraft- und Brennstoffe mittelfristig ein durchaus beachtenswertes ökologisches Potenzial besitzen. Allerdings stehen sie aber auch in Konkurrenz zu anderen, aus Umweltschutzsicht vorteilhaften Alternativen der energetischen und stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Damit könnte das BioLog-Konzept zukünftig durchaus zu einem Baustein einer ökologisch effizienten Biomasseallokation werden. Es sollte daher stetig aber behutsam weiterentwickelt werden.

6 Literatur und Abkürzungen

Literatur

/A. Kahl 2008/ Sternowsky, S.: Ermittlung der optimalen maschinentechnischen Parameter zur Trocknung der Silagen sowie zur Herstellung von marktgerechten Brennstoff-Formkörpern. Abschlussbericht BioLog-Teilvorhaben 5, Amandus Kahl GmbH & Co KG, Reinbek, 2008.

/Abdoun 2008/ Herr E. Abdoun, Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik, Johann Heinrich von Thünen Institut (vTI), persönliche Mitteilungen, 2008.

/Anhydro 2008/ Rinder, R.: Entwässerung aufbereiteter Produkte aus dem Energiepflanzenanbau. Abschlussbericht BioLog-Teilvorhaben 3, Anhydro GmbH, Kassel, 2008.

/ATB 2008/ Scholz, V., Idler, C., Daries, W. & Poschmann, T.: Entwicklung und Erprobung einer neuen Verfahrenslinie zur Herstellung von Energiepellets aus Ganzpflanzensilage sowie Ermittlung der Leistungsparameter und des Energieaufwandes. Abschlussbericht BioLog-Teilvorhaben 2 mit Beitrag zu Teilvorhaben 7, Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. (ATB), Potsdam-Bornim, 2008.

/Beck 2008/ Frau J. Beck (TLL), persönliche Mitteilungen, 2008.

/Borken et al. 1999/ Borken, J., Patyk, A. & Reinhardt, G.A.: Basisdaten für ökologische Bilanzierungen. Einsatz von Nutzfahrzeugen in Transport, Landwirtschaft und Bergbau. Vieweg, Braunschweig / Wiesbaden, 1999.

/CML 2004/ Institute of Environmental Sciences (CML). CML's impact assessment methods and characterisation factors. Department of Industrial Ecology, Leiden, 2004.

/DIN 2006/ Deutsches Institut für Normung e. V.: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006) / Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006). Beuth Verlag, Berlin, 2006.

/FNR 2009/ Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR): Projekt-Grafik BioLog. Download: http://www.energiepflanzen.info/cms35/Projekt-Grafik.1608.0.html

/FZK 2008/ Sack, M., Eing, C., Buth, L., Berghöfer, T., Attmann, F., Stängle, R., Wolf, A., Frey, W., Müller, G. & Bluhm, H.-J.: Konditionierung grüner Biomasse durch elektroporationsunterstützte Entwässerung. Abschlussbericht BioLog-Teilvorhaben 1, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (FZK), Karlsruhe, 2008.

/IFEU 2009/ Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg: IFEU-interne Berechnungen und Datenbankabfragen. Heidelberg, 2009.

/IFEU et al. 2008/ Vogt, R., Gärtner, S., Münch, J., Reinhardt, G., Köppen, S. et al. (2008): Optimierungen für einen nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland. Gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), FKZ 0327544. IFEU, IE, FHW Berlin, Öko-Institut, TU Berlin & Peters Umweltplanung. Heidelberg / Leipzig / Berlin / Darmstadt, 2008.

/IFEU 2006/ Reinhardt, G., Gärtner, S., Patyk, A. & Rettenmaier, N.: Ökobilanzen zu BTL – Eine ökologische Einschätzung. Gefördert durch das Bundesministerium für Ernäh-

rung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV), FKZ 2207104. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (IFEU), Heidelberg, 2006.

/IPPC 2007/ IPCC Fourth Assessment Report, Chapter 2, Changes in Atmospheric Constituents and Radiative Forcing, 129-234, 2007.

/Klöpffer & Renner 1995/ Klöpffer, W. & Renner, I: Methodik der Wirkungsbilanz im Rahmen von Produkt-Ökobilanzen unter Berücksichtigung nicht oder nur schwer quantifizierbarer Umwelt-Kategorien. In: Methodik der produktbezogenen Ökobilanzen – Wirkungsbilanz und Bewertung. Umweltbundesamt (UBA), Berlin, 1995.

/Leeuw 2002/ Leeuw, F.D.: A set of emission indicators for long-range transboundary air pollution. Bilthoven, 2002.

/Rinder 2008/ Herr R. Rinder (Anhydro), persönliche Mitteilungen, 2008.

/Sternowsky 2008/ Herr Dr. S. Sternowsky (A. Kahl), persönliche Mitteilungen, 2008.

/TLL 2008/ Beck, J. & Vetter, A.: Überlegungen zur standortangepassten Größe eines Trockenwerkes zur Produktion von Energiepflanzenpellets. Projektinterner Bericht Bio-Log-Teilvorhaben 7, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Jena, 2008.

/UBA 1999/ Umweltbundesamt (Hrsg.): Bewertung in Ökobilanzen: Methode des Umweltbundesamtes zur Normierung von Wirkungsindikatoren, Ordnung (Rangbildung) von Wirkungskategorien und zur Auswertung nach ISO 14042 und 14043. Berlin, 1999.

/Vodegel 2008/ Herr Dr. S. Vodegel, Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH (CUTEC), persönliche Mitteilungen, 2008.

Abkürzungen

Abkürzung	Langfassung	Erläuterung
a	lat. annum (Jahr)	
Äquiv.	Äquivalent(e)	
BHKW	Blockheizkraftwerk	Anlage zur Erzeugung von Strom und Wärme
BtL	Biomass-to-Liquid	Umwandlung von Biomasse in flüssigen Kraftstoff
CH_4	Methan	
CO_2	Kohlenstoffdioxid	
FM	Frischmasse	Substanz im (ernte-)frischen Zustand
FT-(Synthese)	Fischer-Tropsch-(Synthese)	Syntheseverfahren zur Umwandlung von Synthesegas in flüssige Kohlenwasserstoffe
GJ	Gigajoule	= 10^9 Joule = 10^9 Ws
GuD-(KW)	Gas- und Dampf-(Kraftwerk)	
ha	Hektar	= 10^4 m^2
kWh	Kilowattstunde	= 10^3 Wh = 3.600.000 Ws = 3,6 MJ
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung	Gleichzeitige Erzeugung von Strom und Wärme
MW	Megawatt	= 10^6 W = 10^6 Js^{-1}
MW_{el}	Megawatt elektrisch	Endenergie (Leistung) in Form von Strom
MW_{th}	Megawatt thermisch	Endenergie (Leistung) in Form von Wärme
N_2O	Distickstoffoxid	Lachgas
PSM	Pflanzenschutzmittel	
THG	Treibhausgas(e)	
TM	Trockenmasse	

7 Anhang

7.1 BtL-Pfad: Ergebnisse der Übersichtsökobilanzen

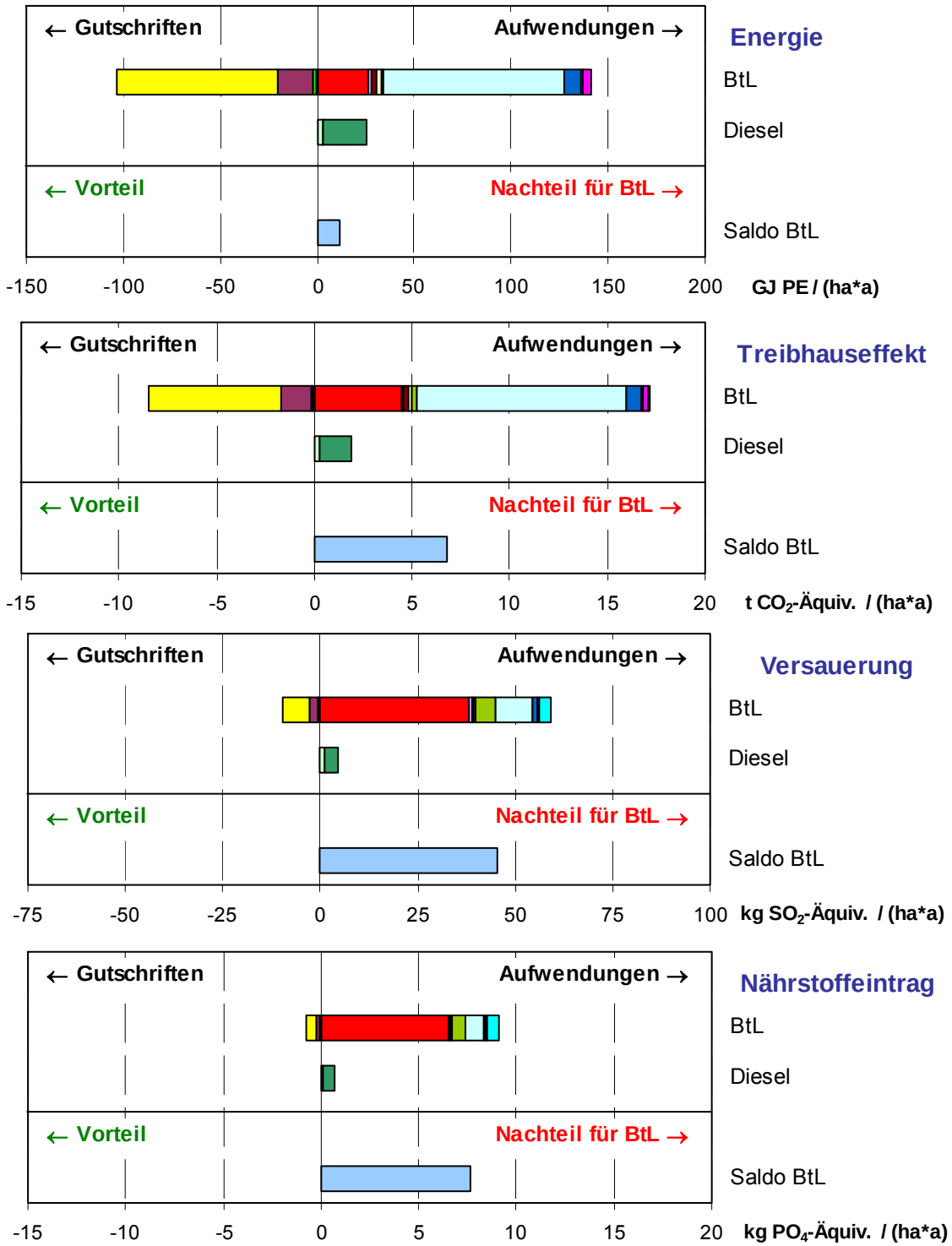

Abb. 7-1 Umweltwirkungen von BtL-Diesel im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff (BtL-Pfad); PE = Primärenergie, Legende siehe rechte Seite

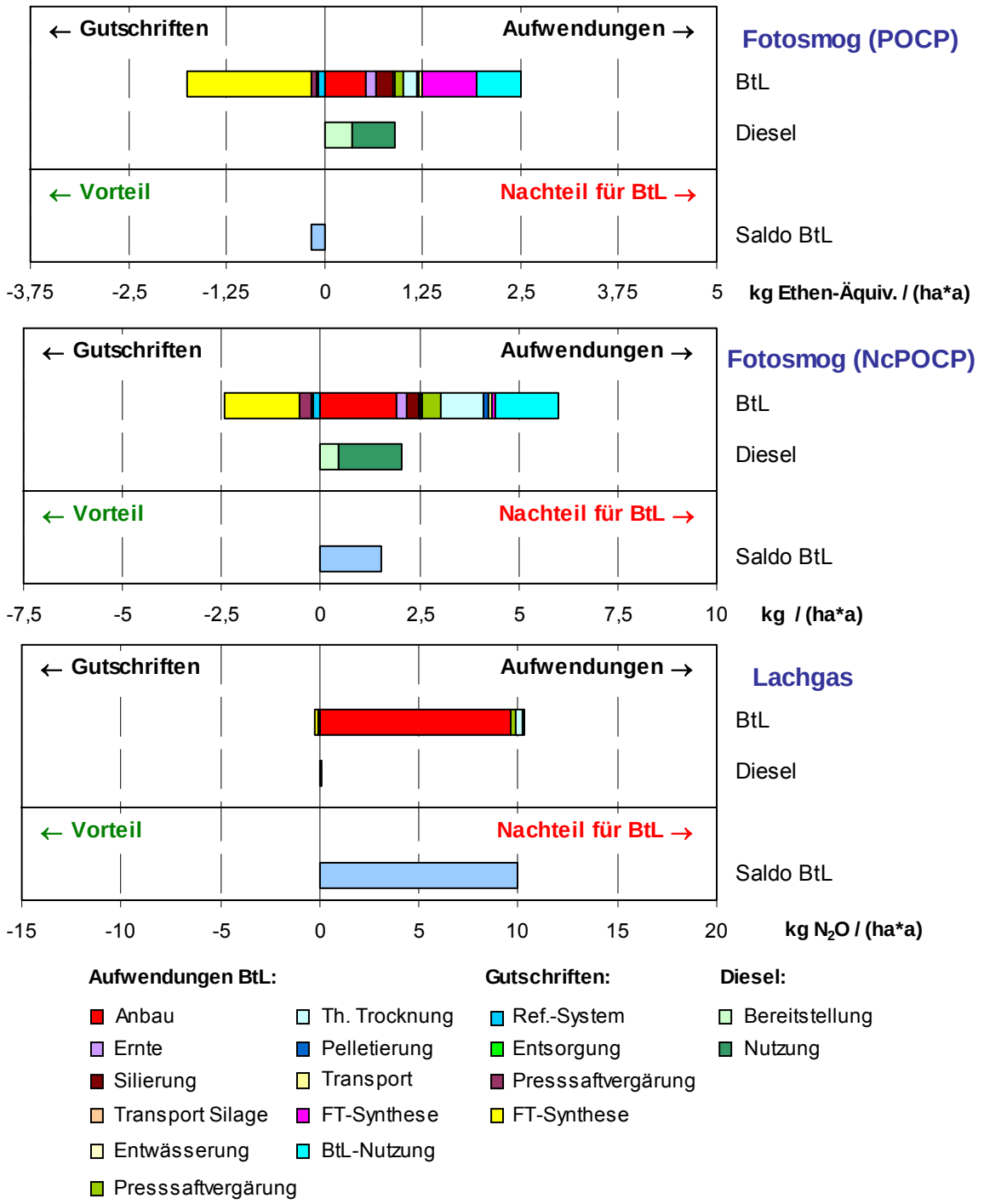

Abb. 7-2 Fortsetzung der Umweltwirkungen von BtL-Diesel im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff (BtL-Pfad)

7.2 KWK-Pfad: Ergebnisse der Übersichtsökobilanzen

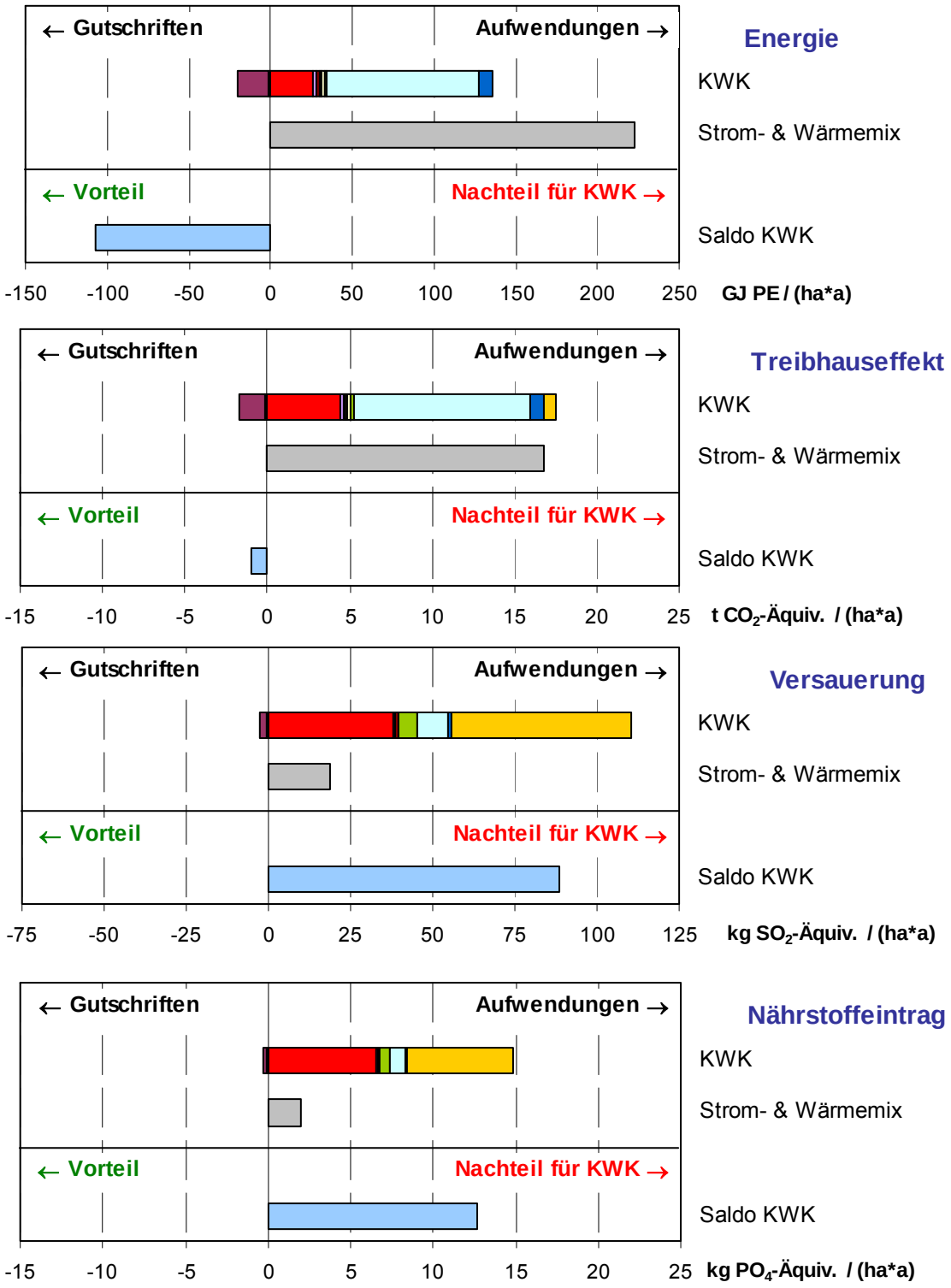

Abb. 7-3 Umweltwirkungen von Bioenergie im Vergleich zu Strom und Wärme aus fossilen Quellen (KWK-Pfad); PE = Primärenergie, Legende siehe rechte Seite

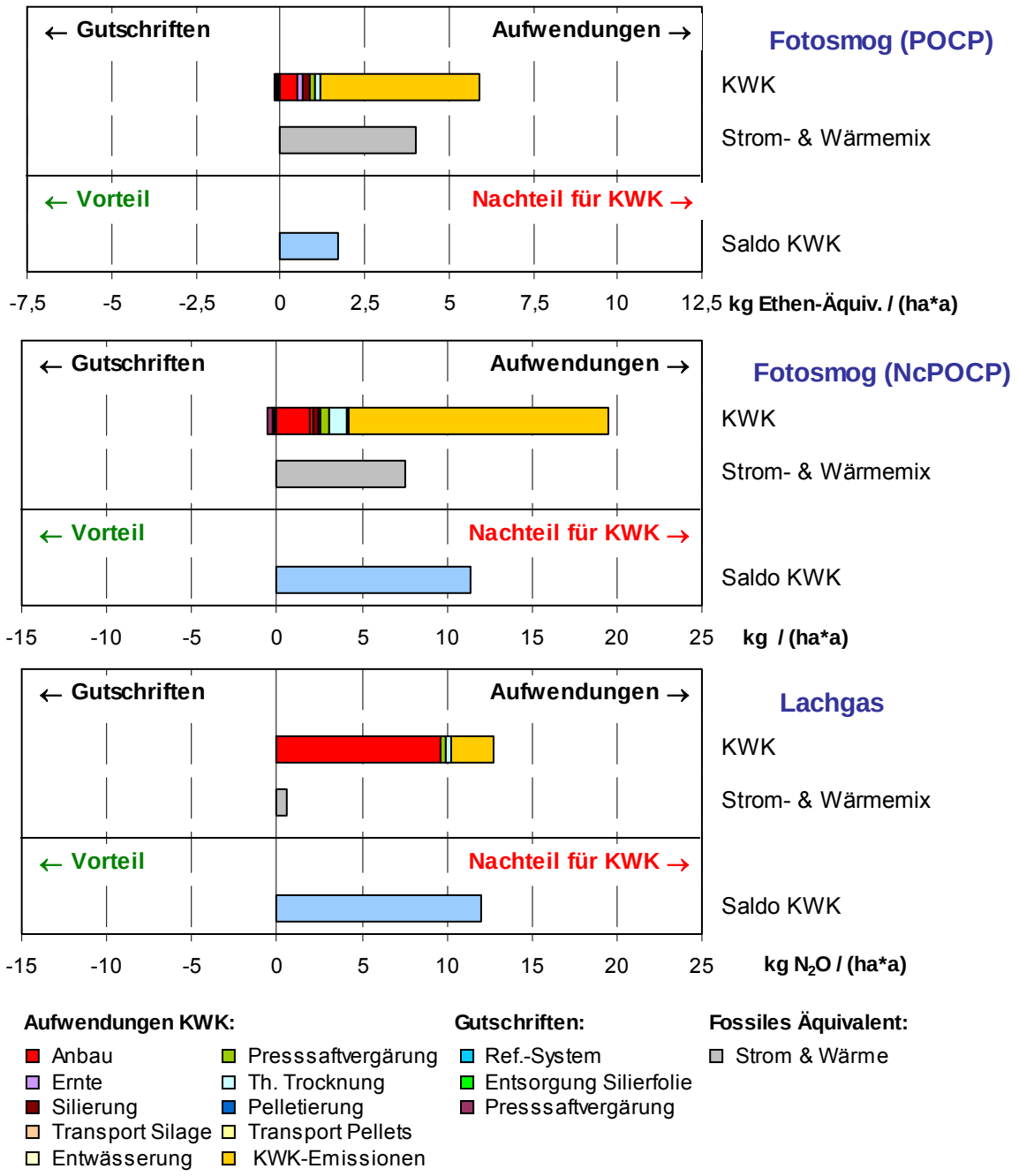

Abb. 7-4 Fortsetzung der Umweltwirkungen von Bioenergie im Vergleich zu Strom und Wärme aus fossilen Quellen (KWK-Pfad)

7.3 Ausgewählte Basisdaten für verschiedene Bioenergiepfade

Tabelle 7-1 Energiepflanzenerträge, Trockenmassegehalte und Daten zu Konversionsanlagen für verschiedene Biokraftstoffpfade (/Vodegel 2008/, /IFEU 2009/)

	Ertrag t TM / (ha*a)	TM-Gehalt %	Wirkungsgrad η BtL	Naphtha	Wachse	Leistung MW
BioLog BtL Heute	14,9 (Pellets)	89	10 %	7 %	8 %	500 MW_{FWL}
BioLog BtL 2020	14,9 (Pellets)	89	15 %	11 %	9 %	500 MW_{FWL}
Biomethan* Kraftstoff	16,4 (Silage)	34,6 (Ø)	-	-	-	2 MW_{el}, Aufbereit. mit PSA
Pappel BtL 2020	12,5	80	50 %	-	-	-
Triticale BtL 2020	12,6	85	50 %	-	-	-

* Produktion in Biogasanlage mit abgedecktem Gärrestlager; PSA = Pressure Swing Adsorption (Druckwechseladsorption)

Tabelle 7-2 Energiepflanzenerträge, Trockenmassegehalte und Daten zu Konversionsanlagen für verschiedene Bioenergiepfade (/IFEU 2009/)

	Ertrag t TM / (ha*a)	TM-Gehalt %	Wirkungsgrad η_{el}	η_{th}	η_{ges}	Leistung MW	Wärmenutzung (Std.)
BioLog KWK Heute	14,9 (Pellets)	89	20 %	62 %	82 %	50 MW_{FWL}	50 %
BioLog KWK 2010	14,9 (Pellets)	89	20 %	62 %	82 %	50 MW_{FWL}	50 %
Biogas* BHKW	16,4 (Silage)	34,6 (Ø)	41 %	43 %	84 %	2 MW_{el}, Aufbereit. mit PSA	20 %
Biomethan* BHKW	16,4 (Silage)	34,6 (Ø)	41 %	43 %	84 %	2 MW_{el}, Aufbereit. mit PSA	80 %
Pappel KWK	12,5	80	20 %	62 %	82 %	50 MW_{FWL}	50 %
Triticale KWK	12,6	85	20 %	62 %	82 %	50 MW_{FWL}	50 %

* Produktion in Biogasanlage mit abgedecktem Gärrestlager; PSA = Pressure Swing Adsorption (Druckwechseladsorption)