

ifeu -
Institut für Energie-
und Umweltforschung
Heidelberg gGmbH



Ökobilanzen zu BTL: Eine ökologische Einschätzung

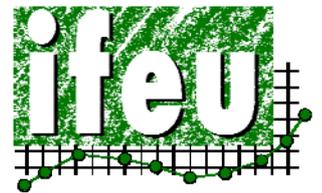
**Gefördert durch das
Bundesministerium für
Ernährung, Landwirtschaft
und Verbraucherschutz (BMELV)**

**Projektträger:
Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.**

FKZ: 2207104

Heidelberg, 8. Mai 2006

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz unter dem Förderkennzeichen 2207104 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.



Ökobilanzen zu BTL: Eine ökologische Einschätzung

**Gefördert durch das
Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft
und Verbraucherschutz (BMELV)**

**Projekträger:
Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.**

Förderkennzeichen 2207104

Dr. Guido Reinhardt

Sven Gärtner

Dr. Andreas Patyk

Nils Rettenmaier

IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH

Wilckensstraße 3

D-69120 Heidelberg

Tel.: +49 (0)6221 47 67-0; Fax: -19

<http://www.ifeu.de>

Heidelberg, 8. Mai 2006

Inhalt

1	Einführung	2
2	Auswahl der BTL-Verfahren und -Konzepte	4
3	Details zum Vorgehen	8
3.1	Methodik, Festlegungen und Ergebnisdarstellung	8
3.1.1	Produkt-Ökobilanzen im Überblick	8
3.1.2	Allgemeine Festlegungen in dieser Studie	9
3.1.3	Analysierte Umweltwirkungen	9
3.1.4	Ergebnisdarstellung und Interpretation	11
3.2	Aufbau der Lebenswegvergleiche	12
3.2.1	Vergleich der BTL-Verfahren	12
3.2.2	Biomassearten	15
3.2.3	Sensitivitätsanalysen	16
3.3	Basisdaten	23
4	Ergebnisse	24
4.1	Vergleiche: BTL-Verfahren	24
4.2	Vergleiche: Biokraftstoffe	26
4.2.1	Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse	26
4.2.2	Biokraftstoffe aus Reststoffen	28
4.3	Vergleiche: Alternative Biomassennutzungen	30
4.3.1	Alternative Reststoffnutzung	30
4.3.2	Alternativen bei der Anbaubiomasse	33
4.4	Sensitivitätsanalysen	36
4.4.1	Basisvergleiche der Biomassearten	36
4.4.2	Nutzungsemissionen	38
4.4.3	Szenario „H2-Import“	40
4.4.4	Hilfsstoffe	46
4.4.5	Pelletierung	48
4.4.6	Szenario „MTS“	50
4.4.7	Transporte	52
4.4.8	Wärmeverlust durch Schlackeaustrag	54
4.4.9	Infrastruktur	56
5	Zusammenführung und Schlussfolgerungen	58

Anhang	64
6 BTL-Technik	64
6.1 Überblick	64
6.1.1 Synthesegasproduktion	64
6.1.2 Rohgasreinigung und -aufbereitung	67
6.1.3 Kraftstoffsynthese	68
6.2 Untersuchte Konzepte	69
6.2.1 Carbo-V, Choren	69
6.2.2 FZK	70
6.2.3 TU Freiberg	71
6.2.4 TU Wien	72
7 Datengenerierung	73
7.1 In- und Outputs der BTL-Produktion	73
7.1.1 Carbo-V, Choren	74
7.1.1.1 Szenario „Ziel“	75
7.1.1.2 Szenario „Minimum“	76
7.1.1.3 Szenario „H2-Import“	76
7.1.1.4 Szenario „MTS“	77
7.1.2 FZK	78
7.1.2.1 Szenario „Ziel“	78
7.1.2.2 Szenario „Minimum“	80
7.1.2.3 Szenario „H2-Import“	80
7.1.3 TU Freiberg	82
7.1.3.1 Szenario „Ziel“	82
7.1.3.2 Szenario „Minimum“	83
7.1.3.3 Szenario „H2-Import“	83
7.1.4 TU Wien	87
7.1.4.1 Szenario „Ziel“	87
7.1.4.2 Szenario „Minimum“	90
7.1.4.3 Szenario „H2-Import“	90
7.1.5 Wirkungsgrade der BTL-Konzepte	93
7.2 BTL-Vorketten und -Nutzung, konventionelle Kraftstoffe, sonstige Prozesse	93
7.2.1 Biomassebereitstellung	94
7.2.2 Nutzung	95
7.2.3 Konventionelle Kraftstoffe, sonstige konventionelle Energieträger	97
7.2.4 Transporte	97
8 Literatur	98

Danksagung

Dem Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz und der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe danken wir für die Vergabe und die Betreuung dieses Förderprojektes.

Zum Gelingen dieser Studie haben zahlreiche Fachgespräche, Diskussionsrunden, schriftliche und mündliche Stellungnahmen mit und von externen FachkollegInnen beigetragen. Insbesondere erwähnen möchten wir: Herrn Friedrich Arendt (Forschungszentrum Karlsruhe), Herrn Prof. Dr. Alfons Kather (TU Hamburg-Harburg), Herrn Dr. Edmund Henrich (Forschungszentrum Karlsruhe), Herrn Dr. Stefan Keppeler (DaimlerChrysler), Herrn Dr. Wolfram Radig (TU Freiberg), Herrn Dr. Reinhard Rauch (TU Wien), Herrn Matthias Rudloff (Choren Industries), Herrn Prof. Dr. Bernd Rudolph (Fachhochschule Jena), Herrn Lars Wiese (TU Hamburg-Harburg). Diesen und auch nicht genannten FachkollegInnen möchten wir hiermit herzlich danken. Unberührt davon liegt die Verantwortung für die Inhalte dieser Studie natürlich allein bei uns.

Weiterhin gilt unser ganz besonderer Dank unseren IFEU-Kollegen Frank Dünnebeil, Hinrich Helms, Ulrich Höpfner, Wolfram Knörr, Udo Lambrecht und Martin Pehnt, die wertvolle Zuarbeit geleistet haben und die Studien mit inhaltlichen Diskussionen, Kritik und Anregungen begleitet haben.

Auch bei Herrn Dr. Thorsten Gottschau möchten wir uns herzlich bedanken, der die Studie auf Seiten der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe nicht nur formell, sondern auch sachlich äußerst konstruktiv begleitete. Bei allen unseren Wünschen und Anforderungen hat er uns zielorientiert und schnell unterstützt.

Unser Dank gebührt schließlich auch unseren Familienangehörigen für ihr Verständnis und ihre Geduld, denn auch diesmal haben wir wieder feststellen müssen, dass eine solche Studie nur zum Teil in geregelten Arbeitszeiten zu erstellen ist.

Heidelberg, im Mai 2006

Sven Gärtner
Andreas Patyk
Guido Reinhardt
Nils Rettenmaier

1 Einführung

Hintergrund und Erkenntnisinteresse

Neben den bereits auf dem Markt befindlichen Biokraftstoffen wie Biodiesel, reinen Pflanzenölen oder Bioethanolen spielen mittlerweile auch die Biokraftstoffe der sogenannten zweiten Generation eine wesentliche Rolle in der öffentlichen Diskussion um biogene und allgemein regenerative Kraftstoffe. Zu diesen gehören u. a. Bioethanol aus Lignozellulose oder auch die so genannten BTL-Kraftstoffe¹. Letztere können prinzipiell aus einer Reihe verschiedener Biomassearten und nach verschiedenen Verfahren hergestellt werden. Allen gemeinsam ist die Umwandlung von Biomasse in Mischungen aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid und die chemische Synthese von Kraftstoffen aus dieser Gasmischung. Die Verfahren sind bisher unterschiedlich weit technisch entwickelt, allerdings ist noch keines der Verfahren vollständig ausgereift. Daher gibt es derzeit noch keine großtechnischen Anlagen. Vielmehr sind Pilot- und Demonstrationsanlagen Gegenstand einer Reihe von F&E-Projekten.

Bemerkenswerterweise ist der Kenntnisstand hinsichtlich der Umweltwirkungen von BTL-Produktion und -Nutzung im Vergleich zu der von fossilen Kraftstoffen eher gering, obwohl regenerative Energien immer auch mit dem Argument des Umweltvorteils gegenüber fossilen Energien gefördert werden. Dieser Vorteil besteht in aller Regel beim Treibhauseffekt (keine direkten Emissionen von fossilem CO₂). Seine Größe, z. B. bezogen auf die zur Produktion benötigte Fläche, hängt jedoch stark vom konkreten System ab. Außerdem können für andere Umweltwirkungen auch Nachteile auftreten. Diese Aspekte wurden bislang nur sehr überschlägig (siehe [IFEU 2004]) bzw. für ein Verfahren mit einigen Variationen [PE 2004] untersucht. Eine umfassende Analyse mehrerer relevanter Verfahren unter einheitlichen Bedingungen und mit strukturell gleichen Varianten und Sensitivitätsanalysen fehlte bisher.

Um diese Lücke zu schließen, hat das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz das Förderprojekt „Ökobilanzen zu BTL: Eine ökologische Einschätzung“, bearbeitet durch das IFEU Heidelberg, bewilligt.

Ziel der Untersuchung

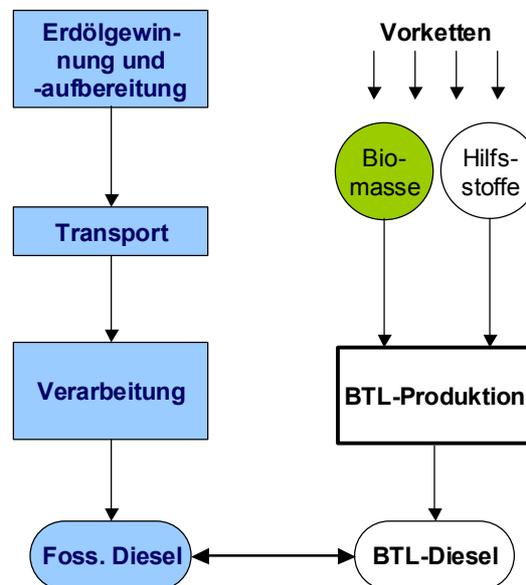
Ziel der Studie ist eine umfassende Einschätzung der Umweltwirkungen durch BTL. Diese sehr umfängliche Fragestellung bringt eine Vielzahl an einzelnen Teilzielen mit sich, zu denen neben anderen die Beantwortung folgender Fragen gehört:

- Wie ökologisch sind BTL im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen?
- Wie ökologisch sind BTL im Vergleich zu anderen Biokraftstoffen?
- Welche BTL-Rohstoffe und welche BTL-Verfahren sind aus Umweltsicht die besten?
- Soll aus Umweltsicht Biomasse eher zur Produktion von BTL oder eher zur Produktion von anderen Biokraftstoffen oder von grünem Strom bzw. grüner Wärme genutzt werden bzw. welche Biomasse soll auf einer Fläche hierfür überhaupt produziert werden?
- Welche Abschnitte bzw. Prozesse der BTL-Linien sind besonders ergebnisrelevant und wo lassen sich ökologische Optimierungen besonders effizient durchführen?

¹ BTL: Biomass To Liquid

Grundsätzliche Vorgehensweise

Die aufgeführten Teilziele lassen sich am besten mit dem Instrument der Ökobilanz beantworten. Aus diesem Grund wird diese Untersuchung in Anlehnung an die Vorgehensweise bei Ökobilanzen durchgeführt. Dementsprechend sind die gesamten BTL-Lebenswege von der Biomasseproduktion über Synthesegaserzeugung und Kraftstoffsynthese bis zur Schadstoffemission bei der Nutzung und vor allem im Vergleich zu fossilem Kraftstoff zu betrachten (s. Abbildung). Darauf aufbauend werden Variationen und Sensitivitätsanalysen über alle Lebenswegabschnitte bzw. Einzelprozesse durchgeführt, so z. B. für die wichtigsten Biomassearten oder auch für die Konzepte und Varianten zur Synthesegaserzeugung und Kraftstoffsynthese. Dadurch können die wesentlichen Zusammenhänge und Abhängigkeiten der ökologischen Implikationen der unterschiedlichen BTL-Pfade identifiziert und *richtungssicher vergleichend* quantifiziert werden. Details zum Vorgehen werden mit Abschnitten zur Methodik einschließlich der allgemeinen Festlegungen, den untersuchten Lebenswegvergleichen und den verwendeten Basisdaten in Kap. 3 beschrieben.



Im folgenden Kapitel werden zunächst die in dieser Studie analysierten BTL-Konzepte und die Kriterien der Auswahl vorgestellt. Kapitel 3 beschreibt Details zur Methodik und den Lebenswegvergleichen. Im Kapitel 4 werden die Ergebnisse der Ökobilanzen dargestellt, gegliedert nach den Hauptfragestellungen und den Sensitivitätsanalysen.

In Kapitel 5 werden die Ergebnisse zusammengeführt und Schlussfolgerungen zur Anwendung in politischen Planungs- und Entscheidungsprozessen abgeleitet.

Im Anhang finden sich Details zur den einzelnen BTL-Konzepten und zur Ableitung der Basisdaten.

2 Auswahl der BTL-Verfahren und -Konzepte

Wie eingangs erwähnt, existiert eine Reihe an unterschiedlichen Rohstoffen, die zur BTL-Produktion infrage kommen, ebenso wie mehrere Verfahren zur BTL-Produktion. Aus der Vielzahl möglicher Kombinationen ist somit eine Auswahl zu treffen, die den Erfordernissen des Projektes gerecht wird:

Grundsätzlich umfasst die BTL-Produktion die Schritte Synthesegaserzeugung (ggf. mit einer thermischen Vorbehandlung der Biomasse), Gaskonditionierung und BTL-Synthese. Im Zentrum der aktuellen F&E-Aktivitäten zum Thema BTL steht die Konversion der Biomasse zu Synthesegas und Gaskonditionierung. Für die Synthesegaserzeugung gibt es prinzipiell drei Anlagengrundtypen – Festbettvergaser, Wirbelschichtvergaser und Flugstromvergaser –, die jeweils mit mehreren Unterformen und Betriebsweisen auf sehr verschiedene Art realisiert werden können. Entsprechendes – tendenziell in noch stärkerem Maße – gilt für die anschließende Synthesegaskonditionierung, die durch Rohgasqualität und Anforderungen der Kraftstoffsynthese bestimmt ist. Für die Kraftstoffsynthese wird vor allem die weitgehend ausgereifte Fischer-Tropsch-Synthese und das Methanol-To-Synfuel-Konzept (MTS) diskutiert. Technische Details der Konzepte, deren aktuelle Entwicklungsstände und jeweiligen Stärken und Schwächen sind im Anhang detailliert beschrieben.

Aus den aufgeführten F&E-Prioritäten ergibt sich, dass vor allem die sinnvolle Auswahl der Verfahren zur Synthesegaserzeugung wesentlich ist, um zielführende Aussagen der Studie zu erhalten. Die BTL-Konzepte (Biomassekonversion bis Kraftstoffsynthese) wurden so ausgewählt, dass die wesentlichen Aspekte der BTL-Entwicklung und -Diskussion berücksichtigt sind: verschiedene Vergasertypen, mit und ohne thermische Vorkonditionierung, zentrale und dezentrale BTL-Produktion, FT- und MTS-Synthese. Daraus ergeben sich folgende Konzepte für die Untersuchung in dieser Studie:

- **Choren (Carbo-V), zentral:** Die Biomasse wird zunächst verschwelt. Die Verschwehlungsprodukte werden in einem Flugstromreaktor mit Sauerstoff umgesetzt. Aus dem konditionierten Synthesegas wird durch eine FT-Synthese BTL-Diesel erzeugt. Der gesamte Prozess findet an einem Standort statt. Für die BTL-Synthese wird als Variante zusätzlich auch die MTS-Synthese betrachtet.
- **FZK, dezentral:** Die Biomasse wird zunächst in dezentralen Anlagen pyrolysiert. Die flüssigen und festen Pyrolyseprodukte, Öl und Koks, werden zu einem Slurry gemischt und in zentralen Großanlagen in Flugstromvergäsern autotherm mit Sauerstoff zu Synthesegas umgesetzt. Aus dem konditionierten Synthesegas wird durch eine FT-Synthese BTL-Diesel erzeugt. Daneben fällt Überschussstrom an.
- **TU Freiberg, zentral und dezentral:** Die Biomasse wird in einem druckaufgeladenen Wirbelschichtvergaser mit Dampf und Sauerstoff autotherm umgesetzt. Aus dem konditionierten Synthesegas wird Methanol synthetisiert. Aus dem Methanol werden BTL-Diesel und -Benzin erzeugt. Im zentralen Konzept finden Methanolsynthese und BTL-Synthese am gleichen Standort, im dezentralen Konzept mit kleineren Vergasern und Methanolanlagen räumlich getrennt statt. Da für dieses Verfahren zumindest im Falle von Stroh als Rohstoff keine Verfahrensweise in Sicht ist, die Biomasse in nicht pelletierter Form zu verarbeiten, wird im Basisszenario die Pelletierung angesetzt und in einer Sensitivitätsanalyse (s. Abschnitt 4.4.5) ihr Einfluss auf die Ergebnisse untersucht.
- **TU Wien, zentral und dezentral:** Die Biomasse wird in einem Wirbelschichtvergaser (zentral: druckaufgeladen) mit Dampf allotherm umgesetzt. Aus dem konditionierten Synthesegas werden durch eine FT-Synthese BTL-Rohdiesel, -Rohbenzin und Wachse

erzeugt. Sowohl im zentralen als auch im dezentralen Konzept werden die Rohprodukte in Raffinerien zu Kraftstoffen aufgearbeitet. Der Unterschied zwischen dem zentralen und dem dezentralen Konzept besteht in der Anlagengröße und darin, dass die größeren zentralen Anlagen auf eine hohe BTL-Ausbeute optimiert sind. In beiden Konzepten fallen erhebliche Mengen Überschussstrom an, in den kleineren dezentralen Anlagen außerdem auch Wärme zur Nutzung als Haus- oder Nahwärme.

Auf den folgenden Seiten sind diese Verfahren schematisch dargestellt (Abb. 2-1 bis 2-4).

Die BTL-Konzepte wurden in verschiedenen Szenarien untersucht, um auch von den Entwicklern aus unterschiedlichen Gründen nicht erwogene Aspekte zu berücksichtigen, um eine vollständige Gegenüberstellung zu erlangen bzw. Unsicherheiten in der Datenlage abzufangen.

- **Szenario „Ziel“ (= Basisszenario):** Dieses Szenario bildet die Basis der Untersuchung und stellt gewissermaßen das von den jeweiligen Entwicklern gesteckte Langfristziel dar. Die Wirkungsgrade der BTL-Produktion und gegebenenfalls Stoffströme sowie Angaben zur Produktion von Überschussstrom und -wärme wurden von den Entwicklern geliefert bzw. mit ihnen abgestimmt.
- **Szenario „Minimum“:** Da möglicherweise nicht alle zur Zielerreichung notwendigen technischen Teilziele erreicht werden, wurde mit „Minimum“ ein entsprechendes Szenario untersucht. In diesen Szenarien wurden jeweils die energetischen Ausbeuten reduziert. Damit spannen die Szenarien „Ziel“ und „Minimum“ eine Bandbreite auf, innerhalb derer die Wirkungsgrade der zukünftigen Anlagen erwartet werden.
- **Szenario „H2-Import“:** In diesem Szenario wird eine gegenüber „Ziel“ deutlich erhöhte BTL-Ausbeute betrachtet, indem Wasserstoff von außen zugeführt wird und somit mehr Kohlenstoff für die BTL-Produktion zur Verfügung steht. D. h., der Wasserstoff wird nicht aus Biomasse und Dampf, sondern mit externer Energie (Erdgas) erzeugt. Hierfür wird eine höhere BTL-Ausbeute von 50 % angesetzt.
- **Szenario „MTS“:** Für das Choren-Verfahren (Basisszenario: FT-Synthese) wurde auch ein MTS-Szenario betrachtet. (Für das Freiburger Konzept ist der MTS-Pfad das Basis-szenario.)
- **Biomasseeinsatz:** Für alle Konzepte und Szenarien wurden unabhängig von ihrem aktuellen Entwicklungsstand und Planungen der Entwickler als Biomasseinput sowohl Holz als auch Getreide/Stroh, jeweils aus Anbaubiomasse bzw. als Reststoffe, betrachtet (siehe Kap. 3.2.2). Insbesondere die Verfahren des FZK und der TU Freiberg sind bzw. werden auch auf die Verwendung von Stroh ausgelegt.

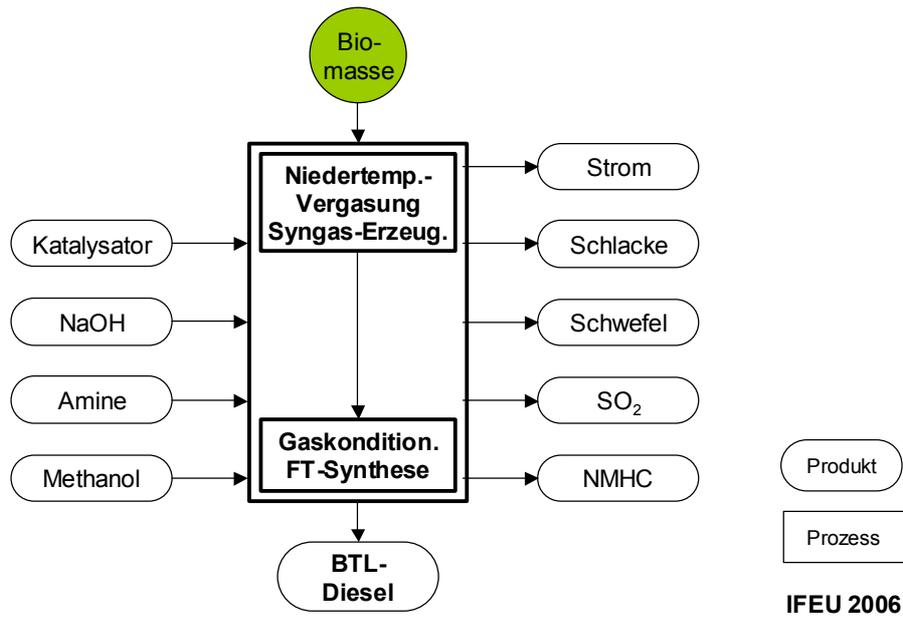


Abb. 2-1 BTL-Produktion nach dem Konzept von Choren

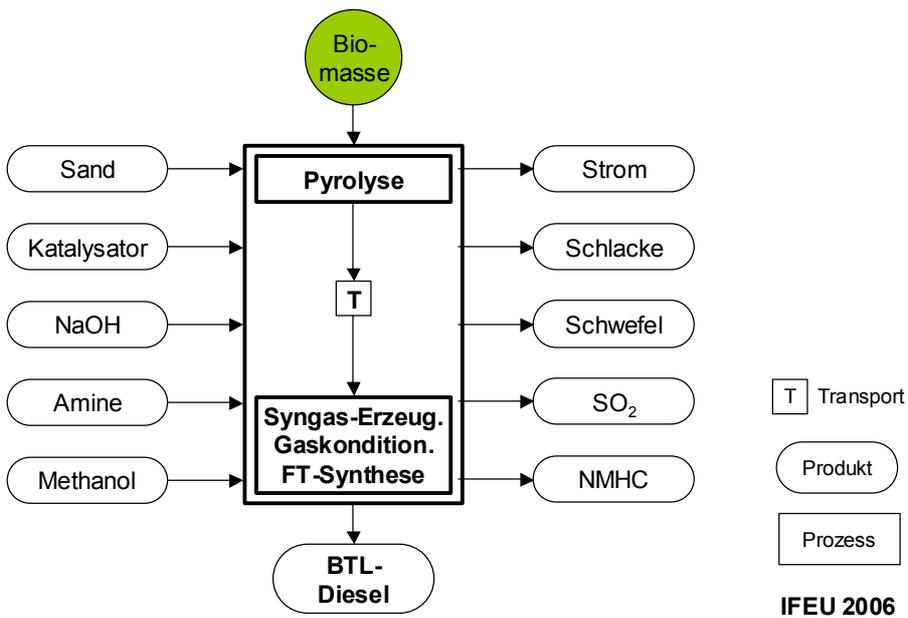


Abb. 2-2 BTL-Produktion nach dem Konzept von FZK

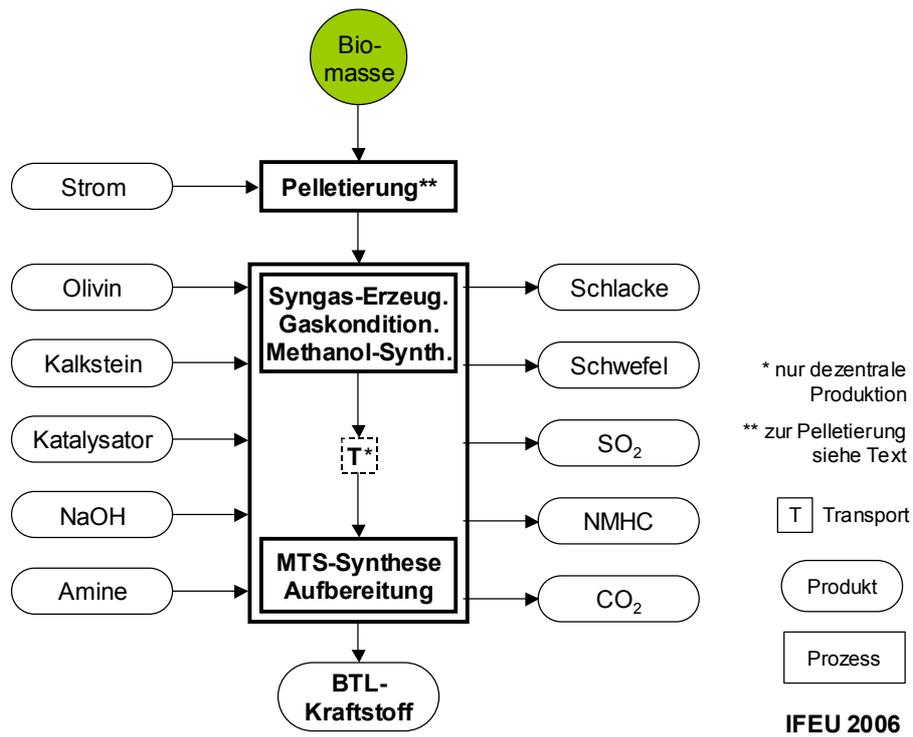


Abb. 2-3 BTL-Produktion nach dem Konzept der TU Freiberg, zentrale und dezentrale Option.

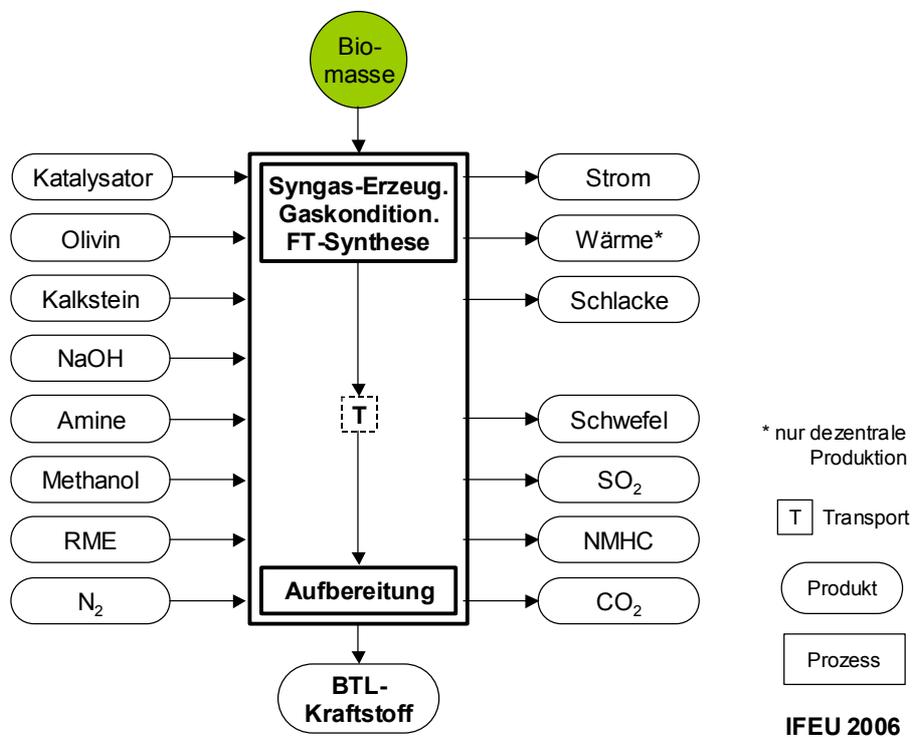


Abb. 2-4 BTL-Produktion nach dem Konzept der TU Wien, zentrale und dezentrale Option

3 Details zum Vorgehen

Im Folgenden werden zunächst die angewendete Methode allgemein sowie konkrete Verfahren und Festlegungen in dieser Studie beschrieben. Anschließend werden der Aufbau der Lebenswegvergleiche und die Generierung der Basisdaten dokumentiert.

3.1 Methodik, Festlegungen und Ergebnisdarstellung

Wie eingangs beschrieben, lässt sich das Ziel der Studie am besten mit dem Instrument der Ökobilanz erreichen. Aus diesem Grund wird diese Untersuchung in Anlehnung an die Vorgehensweise bei Ökobilanzen – genauer: Produkt-Ökobilanz nach ISO 14040-43 – durchgeführt. Das Untersuchungskonzept dieser Studie bringt es mit sich, dass keine vollständige Ökobilanz nach ISO-Norm angefertigt wird, bei der beispielsweise die Einbindung eines externen Review-Prozesses vorgeschrieben ist. Wegen der Art des Erkenntnisinteresses ist dies hier nicht nötig. Andererseits wurde diese Untersuchung sehr eng an die Erfordernisse der Norm angelehnt, so dass die hier angefertigten so genannten Übersichts-Ökobilanzen als durchaus sehr belastbar angesehen werden können.

Im Folgenden werden einige wesentlichen, grundsätzlichen Elemente zum methodischen Konzept sowie zu Auswahl und Festlegung wichtiger Eckpunkte wie räumliche und zeitliche Bezüge der untersuchten Prozesse, analysierte Umweltwirkungen usw. dargestellt, für Details finden sich in der angegebenen Literatur.

3.1.1 Produkt-Ökobilanzen im Überblick

Das Vorgehen zur Erstellung einer Produkt-Ökobilanz ist in der ISO-Norm 14040/43 geregelt. Betrachtet werden insbesondere

- die In- und Outputflüsse (Roh- und Werkstoffe, Energie bzw. Abfälle, Abwasser, Emissionen etc.) und
- potenziellen Umweltwirkungen (z. B. Treibhauseffekt, Versauerung) des betrachteten Produktsystems (Produkt oder Dienstleistung)
- entlang seines gesamten Lebensweges („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 wie auch über den gesamten Lebensweg von Produkten und Dienstleistungen. Über Sensitivitätsanalysen lassen sich insbesondere auch Optimierungspotenziale und über die Interpretationen Informationen für Entscheidungsprozesse ableiten.

3.1.2 Allgemeine Festlegungen in dieser Studie

Die Erstellung der Bilanzen orientiert sich weitgehend an den Ökobilanznormen [DIN 14040ff.]. Die Randbedingungen und Datenquellen werden detailliert im Anhang dargestellt. Die wesentlichen Festlegungen sind:

- Funktionelle Einheit: Für die einzelnen Fragestellungen in dieser Studie sind verschiedene funktionale Einheiten sinnvoll bzw. erforderlich. So wird beispielsweise bei Fragen, die die Flächeneffizienz bewerten sollen, der Nutzen aus 100 ha Anbaufläche betrachtet. Je nach Fragestellung wird in den Ergebnissen auf die jeweils entsprechende funktionale Einheit bezogen.
- Geographischer und zeitlicher Bezug: Bezugsraum für die Produktion und Nutzung der BTL-Kraftstoffe ist die Bundesrepublik Deutschland / Zentraleuropa. Für Rohstoffe usw. aus anderen Ländern wird der Bezugsraum entsprechend erweitert (z. B. Import von Phosphat-Dünger oder Erdöl). Bezugszeitraum: etwa 2020. Zu grundsätzlichen Details hierzu siehe [Borken et al. 1999].
- Systemgrenzen: Grundsätzlich wird der so genannten Systemerweiterung Vorrang vor Allokation eingeräumt (Näheres siehe [Borken et al. 1999]). So werden beispielsweise im Falle von Kuppelprodukten aus der BTL-Produktion, insbesondere Strom und Wärme, Gutschriften für die vermiedene konventionelle Strom- und Wärmeerzeugung erteilt.
- Bilanzierungstiefe: An Infrastruktur werden Maschinen, Gebäude etc. – also die direkte Infrastruktur – zur Produktion bzw. Bereitstellung der Produkte berücksichtigt. Indirekte Infrastruktur (Fabriken zur Produktion des Autos) werden hier nicht betrachtet. Die dadurch möglicherweise entstehende Unsicherheit ist u. E. marginal, denn diese Infrastrukturelemente treten im Regelfall bei den hier durchgeführten vergleichenden Bilanzen bei fossilen und biogenen Systemen in gleicher Art und Weise auf.

3.1.3 Analytierte Umweltwirkungen

Die hier bilanzierten Umweltwirkungen sind in Tabelle 3-1 beschrieben und lehnen sich an die in der Ökobilanzpraxis betrachteten Wirkungen an. In Tabelle 3-2 sind für diese Wirkungen die Indikatoren, Sachbilanzgrößen und Äquivalenzfaktoren für die einzelnen Umweltwirkungen zusammengestellt.

Tabelle 3-1 Untersuchte Umweltwirkungen

Umweltwirkung	Beschreibung
Energieeinsparung	Energieverbrauch bzw. -einsparung sind Unterkategorien von Ressourcenverbrauch bzw. -schonung. Bilanziert werden alle erneuerbaren und nicht erneuerbaren energieträger. In den Ergebnisinterpretation dargestellt werden die nicht erneuerbaren Energieträger: die fossilen Brennstoffe Erdöl, Erdgas und Kohle sowie Uranerz. (Im Folgenden wird der besseren Begrifflichkeit wegen und da die Ergebnisse in nahezu allen Fällen Ressourcenschonung ausweisen mit „Energieeinsparung“ bezeichnet.)
Treibhauseffekt	Erwärmung der Atmosphäre in Folge der vom Menschen verursachten Freisetzung von klimawirksamen Gasen. Wichtigstes Treibhausgas: Kohlendioxid (CO ₂) aus der Verbrennung von fossilen Energieträgern.
Versauerung	Verschiebung des Säuregleichgewichts in Böden und Gewässern durch Säure bildende Gase (Stichwort „saurer Regen“) wie Schwefeldioxid, Stickoxide, Ammoniak und Chlorwasserstoff.
Nährstoffeintrag	Einbringung von Nährstoffen in Böden und Gewässer (Stichwort „Algenblüte“) wie Phosphate, Stickoxide und Ammoniak.
Fotosmog (Sommersmog)	Bildung von so genannten Fotooxidantien wie u. a. Ozon unter dem Einfluss von Sonnenstrahlung in der bodennahen Atmosphäre (Stichwort „Ozonalarm“) durch Zusammenwirken mehrerer Faktoren zu denen Sonneneinstrahlung, Stickoxide und Kohlenwasserstoffe gehören.
Ozonabbau	Zerstörung des schützenden Ozons in der Stratosphäre durch bestimmte Gase wie FCKW oder Lachgas (Stichwort „Ozonloch“).
Humantoxizität	Humantoxische Wirkung von Feinstaub (PM10) in der Luft, der durch direkte Emission oder über Vorläufersubstanzen wie Stickoxide, Kohlenwasserstoffe, Ammoniak und Schwefeldioxid entstehen kann.

Tabelle 3-2 Indikatoren, Sachbilanzgrößen und Äquivalenzfaktoren zu den untersuchten Umweltwirkungen

Umweltwirkung	Indikator	Sachbilanzgröße	Formel	Äquivalenzfaktor
Energieeinsparung	Kumulierter Energieaufwand aus erschöpflichen Quellen	Erdöl Erdgas Steinkohle Braunkohle Uranerz	—	—
Treibhauseffekt	CO ₂ -Äquivalent (Kohlendioxid-Äquivalent)	Kohlendioxid fossil Lachgas (Distickstoffoxid) Methan	CO ₂ N ₂ O CH ₄	1 296 23
Versauerung	SO ₂ -Äquivalent (Schwefeldioxid-Äquivalent)	Schwefeldioxid Stickoxide Ammoniak Chlorwasserstoff	SO ₂ NO _x NH ₃ HCl	1 0,7 1,88 0,88
Nährstoffeintrag	PO ₄ -Äquivalent (Phosphat-Äquivalent)	Stickoxide Ammoniak	NO _x NH ₃	0,13 0,346
Fotosmog	C ₂ H ₄ -Äquivalent (Ethen-Äquivalent)*	Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe Methan	NMHC CH ₄	0,5 0,007
Ozonabbau	—	Lachgas (Distickstoffoxid)	N ₂ O	—
Humantoxizität	PM10-Äquivalent	Schwefeldioxid Stickoxide Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe Ammoniak PM10	SO ₂ NO _x NMHC NH ₃ PM10	0,54 0,88 0,012 0,64 1

* Berechnungen der NO_x-korrigierten Werte (NcPOCP) zeigten keine signifikant anderen Ergebnisse. Sie werden daher nicht dokumentiert.

Quellen: [CML 1992], [CML et al. 2002], [IPCC 2001], [IRIS 1996], [Jenkin & Hayman 1999], [Klöpffer 1995], [Leeuw 2002], [UBA 1995]

IFEU 2006

3.1.4 Ergebnisdarstellung und Interpretation

Dargestellt werden die Ergebnisse wie folgt:

- Der Bezug orientiert sich zunächst an der jeweiligen Fragestellung (siehe auch funktionale Einheit, Kap. 3.1.2) wie z. B. Hektar, gefolgt von dessen Anschaulichkeit (wie z. B. 1.000 ha, wenn die Werte ansonsten nur aus Nachkommastellen bestünden).
- Für die Einheit wird im Regelfall der so genannte Einwohnerdurchschnittswert gewählt. Das ist eine Größe, die bereits einen ersten Interpretationsschritt beinhaltet und die quantitativen Ergebnisse z. B. einer Emission in Relation zum mittleren Pro-Kopf-Wert der Gesamtemission setzt.

Näheres hierzu – insbesondere auch zur Behandlung der Unterschiede bei der Interpretation von Anbaubiomasse und Reststoffen – siehe [Reinhardt & Zemanek 2000].

3.2 Aufbau der Lebenswegvergleiche

Wie in Kapitel 1 bereits aufgeführt, werden die Umweltwirkungen von BTL-Kraftstoffen im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen in so genannten „Lebenswegvergleichen“ bewertet. Den Produkten der BTL-Linien werden dabei jeweils die ersetzten konventionellen Produkte als Gutschriften gegengerechnet, die vom BTL-Kraftstoff und seinen Kuppelprodukten ersetzt werden.

Dieses Kapitel beschreibt im Detail die Struktur der Lebenswegvergleiche, d. h. der BTL-seitigen In- und Outputs sowie der fossilen Vergleichsprodukte. Dazu werden zunächst die Basisvergleiche der BTL-Verfahren sowie der Biomassearten und anschließend die Sensitivitätsanalysen zu den einzelnen variablen Größen in den Lebenswegen aufgeführt.

3.2.1 Vergleich der BTL-Verfahren

Im Folgenden werden die Lebenswege der vier Verfahren dargestellt, die die Basis für die Lebenswegvergleiche bilden. Dabei werden die Biomasse und die Hilfs- und Betriebsstoffe der BTL-Prozesse der Übersichtlichkeit halber ohne ihre Vorketten gezeigt.

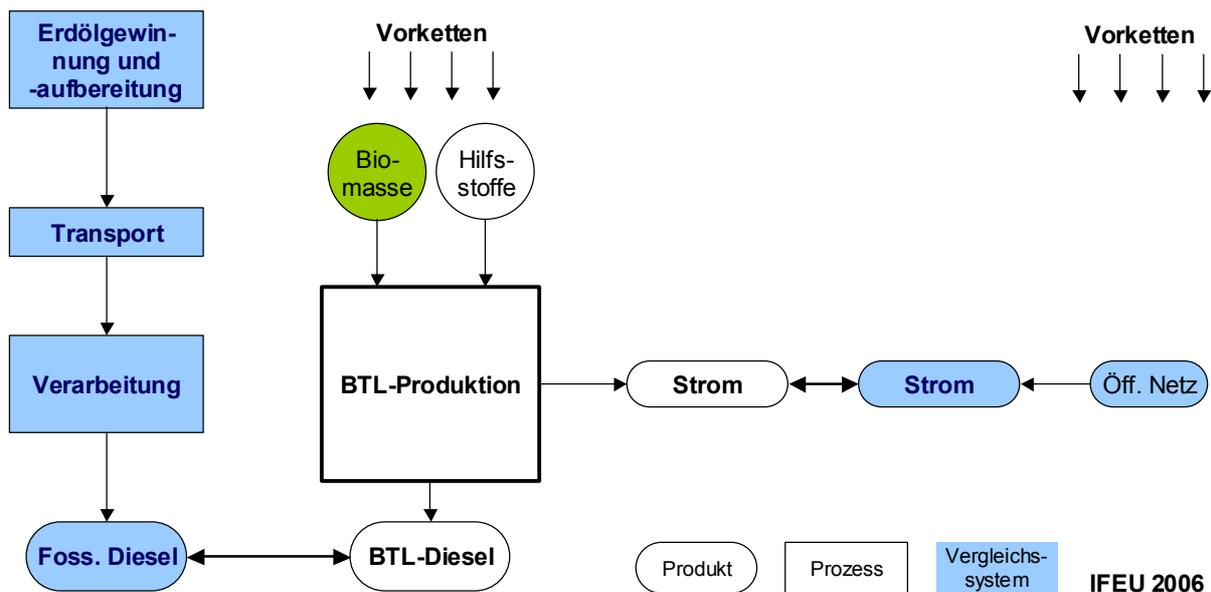


Abb. 3-1 Groschematische Darstellung des Lebenswegvergleichs für BTL-Kraftstoff nach dem Choren-Verfahren

Abb. 3-1 zeigt eine grobschematische Darstellung des BTL-Lebenswegs nach dem Choren-Verfahren. Für die BTL-Produktion werden neben der Biomasse Natronlauge, Amine, Methanol und Katalysatormaterial als Inputs angesetzt (siehe Abb. 2-1; in der aktuellen Konzeption von Choren sind keine Methanol- und Aminwäschen vorgesehen; zur Begründung des Ansatzes hier siehe Abschnitt 7.1, Thema „Sonstige In- und Outputs“ im Anhang). Als Kuppelprodukt des BTL-Diesels, der fossilen Dieselkraftstoff ersetzt, wird Strom erzeugt, der Strom aus dem öffentlichen Netz ersetzt.

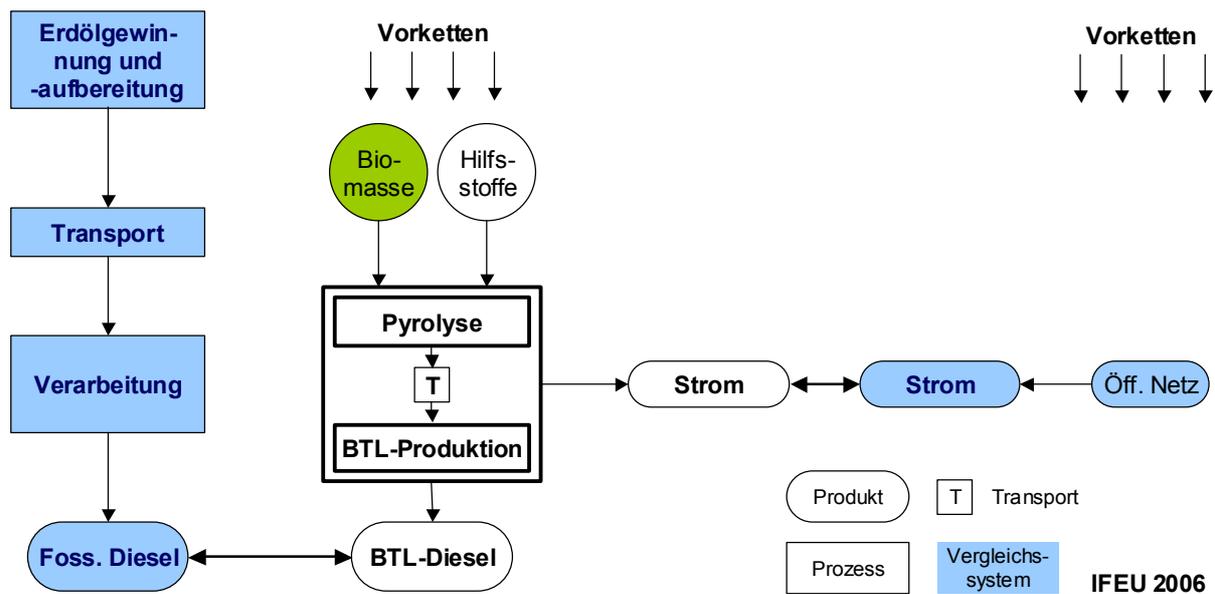


Abb. 3-2 Grobschematische Darstellung des Lebenswegvergleichs für BTL-Kraftstoff nach dem FZK-Verfahren

In Abb. 3-2 ist der Lebensweg von BTL-Kraftstoff nach dem FZK-Verfahren gezeigt. Für die BTL-Produktion werden neben der Biomasse Natronlauge, Amine, Methanol, Sand und Katalysatormaterial als Inputs angesetzt (s. Abb. 2-2). Produkte sind auch hier BTL-Diesel und Strom, die fossilen Dieselkraftstoff und Strom aus dem öffentlichen Netz ersetzen. Wegen der räumlichen Trennung der ersten und zweiten Konversionsstufe in dem dezentralen FZK-Konzept erfolgt zwischen den beiden Stufen ein Transport des Zwischenprodukts (Öl/Koks-Slurry).

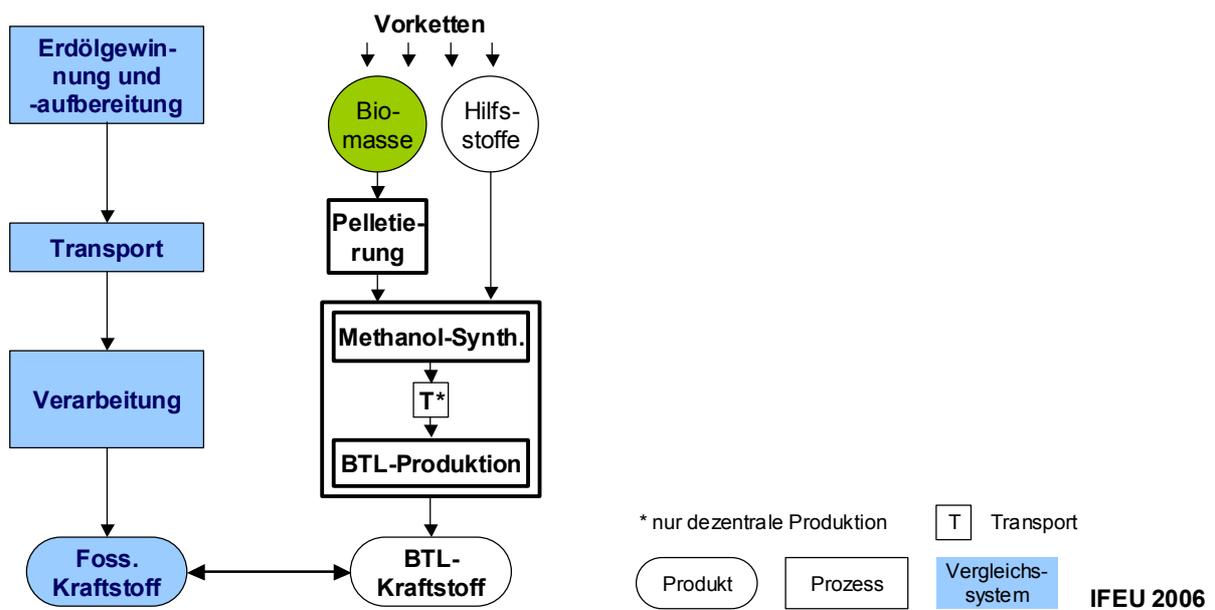


Abb. 3-3 Grobschematische Darstellung des Lebenswegvergleichs für BTL-Kraftstoff nach dem Verfahren der TU Freiberg

Eine grafische Übersicht über den Lebensweg von BTL-Kraftstoff nach dem Verfahren der TU Freiberg präsentiert Abb. 3-3. Für die BTL-Produktion werden neben der Biomasse in Pelletform Natronlauge, Amine, Methanol, Olivin, Kalkstein und Katalysatormaterial als Inputs angesetzt (siehe Abb. 2-3; in der aktuellen Konzeption der TU Freiberg sind keine NaOH- und Aminwäschen vorgesehen; zur Begründung des Ansatzes hier siehe Abschnitt 7.1, Thema „Sonstige In- und Outputs“ im Anhang). Produkte sind hier BTL-Diesel und BTL-Benzin, die fossile Kraftstoffe ersetzen. Da in der dezentralen Variante des Konzepts Methanolsynthese und MTS-Synthese räumlich getrennt stattfinden, erfolgt zwischen den beiden Stufen ein Transport des Methanols.

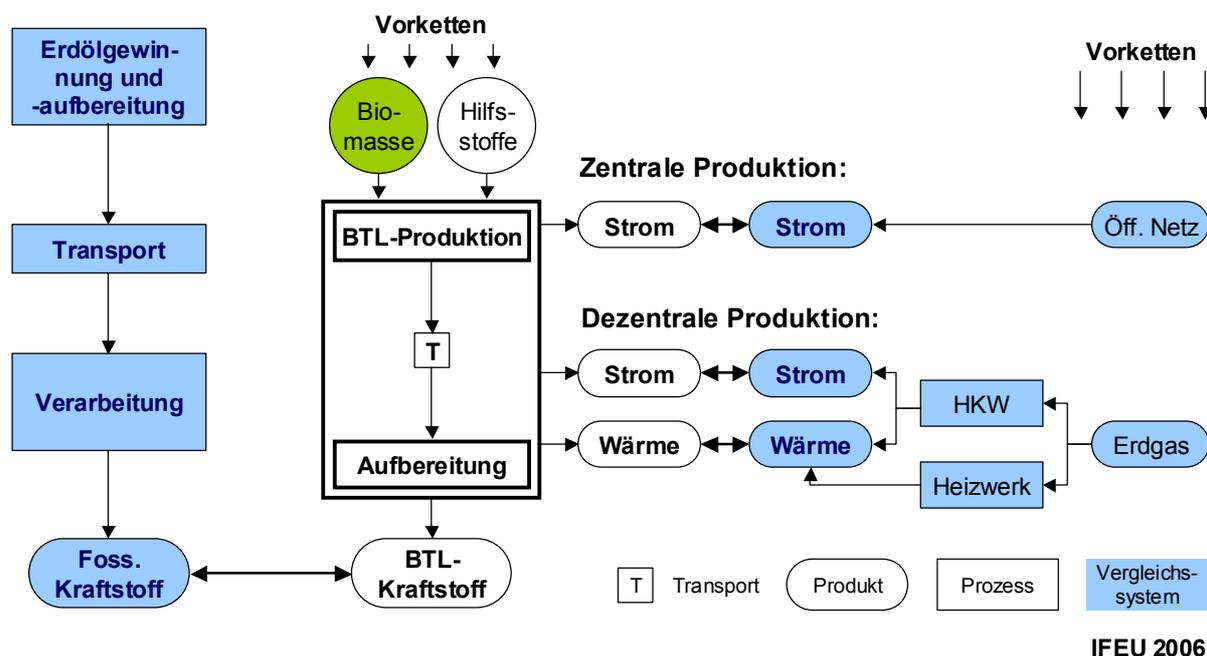


Abb. 3-4 Grobschematische Darstellung des Lebenswegvergleichs für BTL-Kraftstoff nach dem Verfahren der TU Wien

Für die BTL-Produktion nach dem Verfahren der TU Wien (s. schematische Abb. 3-4) werden neben der Biomasse Natronlauge, Amine, Methanol, Olivin, Kalkstein, RME, flüssiger Stickstoff und Katalysatormaterial als Inputs angesetzt (siehe Abb. 2-4; in der aktuellen Konzeption der TU Wien sind keine Methanol- und Aminwäschen vorgesehen; zur Begründung des Ansatzes siehe Abschnitt 7.1, Thema „Sonstige In- und Outputs“ im Anhang). Produkte sind hier BTL-Diesel und BTL-Benzin, die fossile Kraftstoffe ersetzen, sowie Strom und im dezentralen Konzept auch Wärme. Im zentralen Fall wird Strom aus dem öffentlichen Netz ersetzt, in der dezentralen Variante Strom und Wärme aus einem erdgasbetriebenen Heizkraftwerk. Dem dadurch noch nicht abgedeckten Teil des Wärmeüberschusses der BTL-Linie wird zusätzlich Wärme aus einem Erdgasheizwerk gegengerechnet. Da sowohl im zentralen wie im dezentralen Konzept die Aufbereitung der BTL-Rohprodukte zentral in Raffinerien stattfindet, erfolgt ein Transport der Rohprodukte zwischen Synthesanlage und Aufbereitungsstufe.

3.2.2 Biomassearten

Die vorstehend beschriebenen BTL-Verfahren können prinzipiell mit unterschiedlichen Arten von Biomasse gefahren werden (auch wenn dies nicht in allen Fällen dem aktuellen Entwicklungsstand oder der Planung entspricht). Da je nach eingesetzter Biomasse, z. B. Holz oder Halmgüter, Anbaubiomasse oder landwirtschaftliche Reststoffe, unterschiedliche Ergebnisse zu erwarten sind, werden bei der Bilanzierung vier Biomassearten unterschieden.

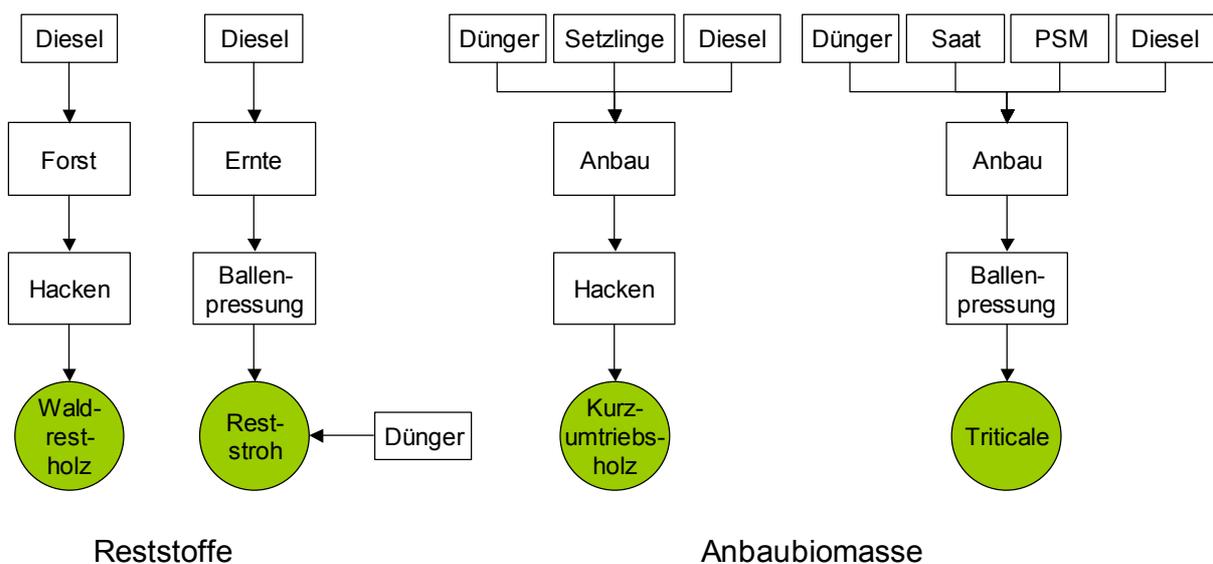
Biomasse-Reststoffe

Es werden Waldrestholz als holzartige und Weizenstroh als halmgutartige Biomasse untersucht. Waldrestholz besteht aus Ästen, Schwachholz, Stammteilen etc., die bei der Auslichtung und bei der Holzernte anfallen und nicht für die industrielle Weiterverarbeitung geeignet ist. Es verbleibt oft im Wald und wird nicht weiter genutzt. Weizenstroh ist in der deutschen Landwirtschaft das am häufigsten als Reststoff anfallende Halmgut. Es dient oft als Bodenverbesserer, indem es nach der Getreideernte untergepflügt wird, und gibt dem Boden Nährstoffe zurück, die im Falle der Nutzung über Düngemittel zugeführt werden müssten.

Anbaubiomasse

Als für die energetische Nutzung angebaute Biomassen werden Pappelholz aus Kurzumtriebsplantagen und Triticale-Ganzpflanzen untersucht. Kurzumtriebsplantagen sind Pflanzungen schnellwüchsiger Hölzer, die im Rhythmus weniger Jahre geschnitten werden und immer wieder austreiben. Sie haben gemäßigten Düngemittel-, kaum Pestizidbedarf und liefern dabei recht hohe Erträge. Triticale ist eine Kreuzung aus Winterweizen und Winterroggen und ergibt auf mittleren bis guten Standorten gute Erträge.

Die holzartige Biomasse wird am Ort der Produktion zu Hackschnitzeln verarbeitet, während das Halmgut bei der Ernte zu Ballen gepresst wird.



3.2.3 Sensitivitätsanalysen

Im Basisvergleich der Biomassenutzung in den verschiedenen BTL-Lebenswegen werden die Vor- und Nachteile der BTL-Kraftstoffe gegenüber fossilen Kraftstoffen dargestellt. Dazu sind in Abb. 3-5 zunächst die Aufwendungen und Gutschriften der BTL-Lebenswege und ihrer fossilen Pendanten exemplarisch für zwei Verfahren und zwei Umweltwirkungen abgebildet. Der jeweils darunter dargestellte Saldo ist die Differenz zwischen dem biogenen und dem fossilen Kraftstoff und damit das Gesamtergebnis des entsprechenden Lebenswegvergleichs.

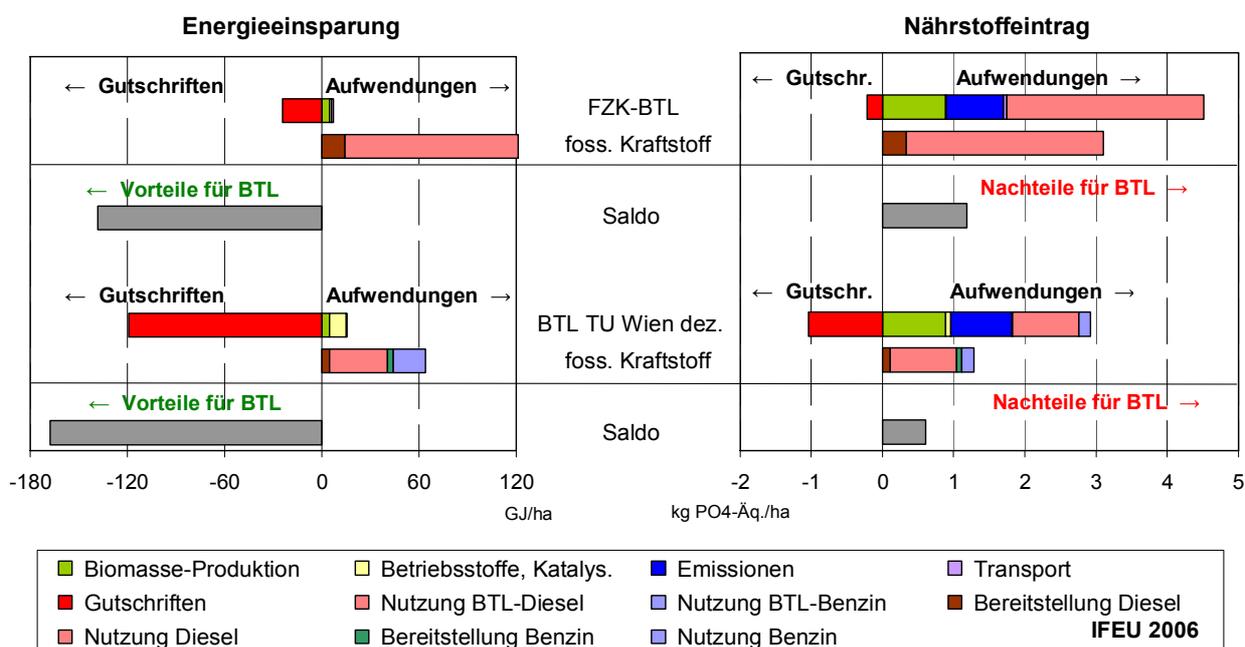


Abb. 3-5 Beispielhafte Darstellung der Aufwendungen und Gutschriften des Lebensweges von BTL-Kraftstoff aus Kurzumtriebsholz von 1 ha Anbaufläche und der entsprechenden Menge fossilem Kraftstoff (Szenario „Ziel“)

Lesebeispiel für den ersten Balken, linkes Diagramm:

Dargestellt sind die Aufwendungen und Gutschriften für den Lebensweg von BTL aus Kurzumtriebsholz nach dem FZK-Verfahren.

Zur Produktion und Nutzung der Biomasse und des BTL müssen pro Hektar Kurzumtriebsholz etwa 7 GJ fossile Energie aufgewendet werden. Gleichzeitig werden fast 25 GJ fossile Energie durch Kuppelprodukte ersetzt und dem Prozess gutgeschrieben.

Ergebnisse

Die Abbildung zeigt anschaulich die Bedeutung der einzelnen Lebenswegabschnitte für die Gesamtbilanz in den beispielhaft dargestellten Umweltwirkungen:

- **Erstes Beispiel (FZK):** Die energetischen Aufwendungen für den gesamten BTL-Lebensweg sind gering und werden durch die Gutschriften überkompensiert. Der Energieaufwand für die Produktion und Nutzung einer entsprechenden Menge fossilen Kraftstoffs liegt dagegen um ein Vielfaches über dem Aufwand für den BTL-Lebensweg. Daraus resultiert ein entsprechend großer Saldo. Dagegen zeigen sich größere Aufwendungen und nur geringe Gutschriften beim Nährstoffeintrag. Diese Diskrepanz zwischen Energieeinsparung und Nährstoffeintrag stammt aus verschiedenen Faktoren: Zum einen werden bei der Düngemittelproduktion und in der Landwirtschaft selbst Gase frei, die zum Nährstoffeintrag beitragen, zum anderen verursachen die Verbrennungsprozesse in der BTL-Anlage (unter anderem zur Energiebereitstellung) signifikante Emissionen. Diese sind aufgrund der Anlagengröße deutlich größer als die aus der Stromproduktion resultierenden Emissionen.
- **Zweites Beispiel (TU Wien, dez.):** Die energetischen Aufwendungen für den BTL-Lebensweg sind gering und werden durch die Gutschriften überkompensiert. Der durch den BTL-Kraftstoff verursachte Nährstoffeintrag liegt auch hier deutlich über dem der Bereitstellung fossilen Kraftstoffs. Die Gutschriften sind dabei allerdings höher als beim FZK-Verfahren. Dies liegt an der großen Menge an Strom und Wärme, die das Verfahren bei gleichzeitig relativ kleinem Volumen an BTL-Kraftstoff zur Verfügung stellt. Aufgrund dieser Kuppelprodukte Strom und Wärme, die zusammen energetisch deutlich mehr Anteil am Output der BTL-Anlage haben als der BTL-Kraftstoff selbst, sind die Konzepte der TU Wien (zentral und dezentral) nur eingeschränkt mit den anderen Verfahren vergleichbar. Das muss in den folgenden Analysen berücksichtigt werden.
- **Bedeutung der Lebenswegabschnitte:** Schon den zwei dargestellten Umweltwirkungen für die zwei Verfahren lässt sich die Bedeutung der einzelnen Lebenswegabschnitte entnehmen und zum Teil ableiten, welche Sensitivitätsanalysen in Abschnitt 4.4 durchgeführt werden sollten. Zum einen haben die Emissionen in der Nutzungsphase eine starke Relevanz, daher ist hier eine größere Sensitivität der Ergebnisse auf veränderte Parameter wahrscheinlich. Auch können alle Maßnahmen, die den Wirkungsgrad des Prozesses beeinflussen (z. B. in den Szenarien „H2-Import“ oder „MTS“), möglicherweise zu größeren Ergebnisunterschieden führen. Etwas geringere Bedeutung haben die Betriebsstoffe des BTL-Prozesses und als eher unbedeutend sind Transporte zu werten.

Zur Analyse des Einflusses der verschiedenen variablen Größen in den Lebenswegen werden Sensitivitätsanalysen vorgenommen. Nachfolgend werden diese Analysen für die einzelnen Verfahren dargestellt. Dabei bildet das Szenario „Ziel“ die Basis, auf die sich alle Sensitivitätsanalysen beziehen.

Die Darstellung der Sensitivitätsanalysen erfolgte mit dem Ziel, die jeweiligen Ergebnisse für möglichst alle Verfahren darzustellen. Abweichungen gibt es dort, wo eine vollständige Darstellung aller Sensitivitätsanalysen aufgrund der Vielzahl der Ergebnisse unübersichtlich wäre. Dies betrifft den Vergleich der Biomassearten, die Analyse der Nutzungsemissionen, der Hilfsstoffe, der Transporte und der Abwärmennutzung aus der Schlacke. Für diese wurden jeweils die Verfahren als Beispiele gewählt, die die jeweiligen Sensitivitäten am stärksten aufzeigen. Die Aussagen, die anhand dieser Beispiele getroffen werden, gelten jedoch für alle übrigen Verfahren in gleicher Weise.

Insgesamt lassen sich die hier dokumentierten Sensitivitätsanalysen in folgende Rubriken unterteilen:

- Biomassearten (teils deutliche Änderungen)
- Nutzungsemissionen (teils deutliche Änderungen)
- Szenario „H2-Import“ (teils deutliche Änderungen)
- Pelletierung (teils deutliche Änderungen)
- Hilfsstoffe (unbedeutende Änderungen)
- Szenario „MTS“ (unbedeutende Änderungen)
- Transporte (unbedeutende Änderungen)
- Wärmeverlust durch Schlackeaustrag (unbedeutende Änderungen)
- Infrastruktur (unbedeutende Änderungen)

In Abb. 3-6 bis 3-9 sind für die vier betrachteten Verfahrenskonzepte die jeweils im Ergebnisteil dokumentierten Sensitivitätsanalysen schematisch dargestellt.

Choren

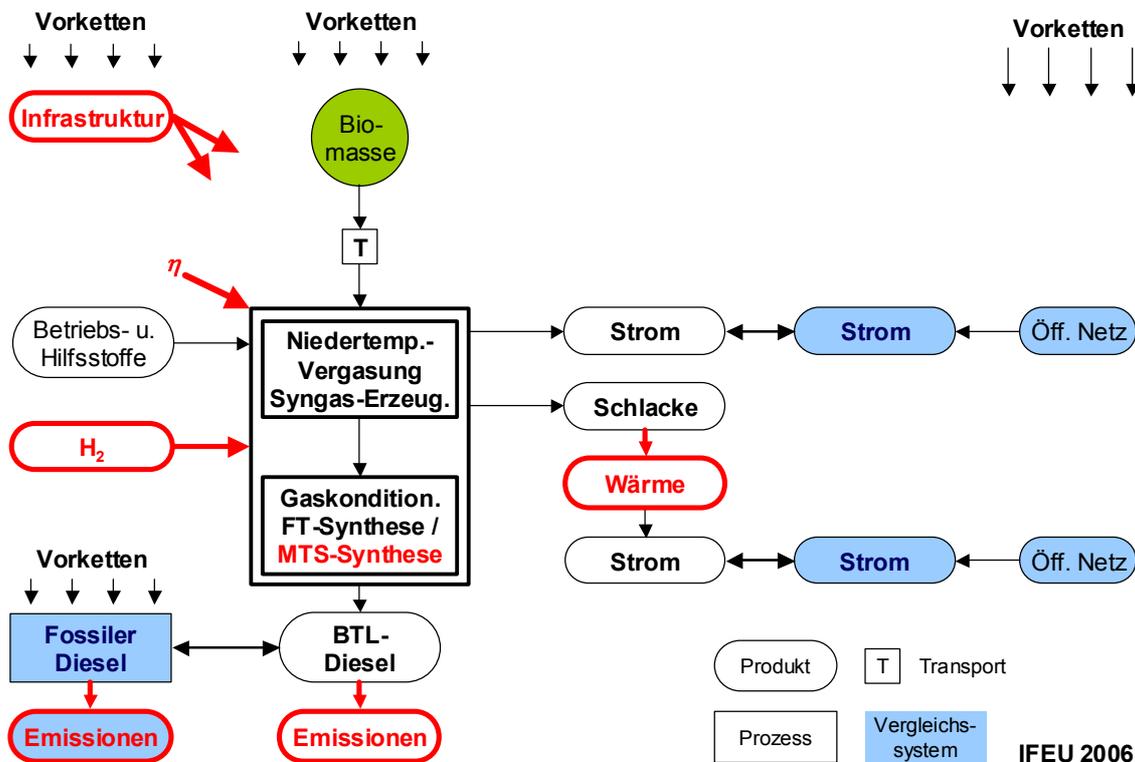


Abb. 3-6 Grobschematische Darstellung der Sensitivitätsanalysen für BTL-Kraftstoff nach dem Choren-Verfahren

Für das Choren-Verfahren werden sechs verschiedene Sensitivitätsanalysen durchgeführt (s. Abb. 3-6). Neben den oben genannten Szenarien „Minimum“ (in der Grafik gekennzeichnet durch den Wirkungsgrad η) und „H2-Import“ (als H_2 dargestellt) wird auch das in Kapitel 2 genannte Szenario „MTS“ analysiert. Dabei wird anstelle der Fischer-Tropsch-Synthese eine MTS-Synthese durchgeführt. Bei der Analyse der **Emissionen** in der Nutzungsphase werden verschiedene Fahrzeugstandards untersucht. Eine weitere Sensitivitätsanalyse untersucht, inwieweit der Austrag von heißer Schlacke aus dem Prozess die Ergebnisse beeinflusst, indem eine Nutzung der Abwärme (Bezeichnung „Wärme“) unterstellt wird. Schließlich wird eine Sensitivitätsanalyse zu den Aufwendungen für die **Infrastruktur** (Anlagen, Gebäude und Fahrzeuge) durchgeführt.

FZK

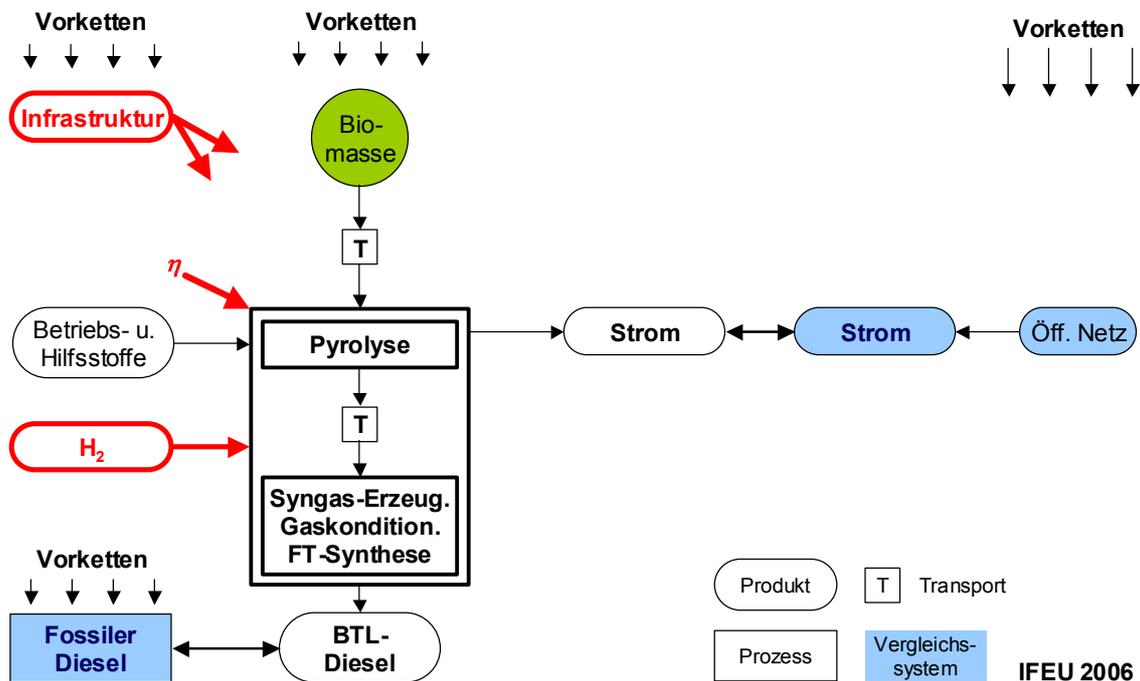


Abb. 3-7 Grobschematische Darstellung der Sensitivitätsanalysen für BTL-Kraftstoff nach dem FZK-Verfahren

Für das FZK-Verfahren werden drei Sensitivitätsanalysen durchgeführt (s. Abb. 3-7). Dies sind zum einen die zu Beginn dieses Abschnitts genannten Szenarien „Minimum“ (in der Grafik gekennzeichnet durch den Wirkungsgrad η) und „H₂-Import“ (als H₂ dargestellt). Ferner wird wie im Falle der BTL-Herstellung nach Choren eine Sensitivitätsanalyse zu den Aufwendungen für die **Infrastruktur** (Anlagen, Gebäude und Fahrzeuge) durchgeführt.

TU Freiberg

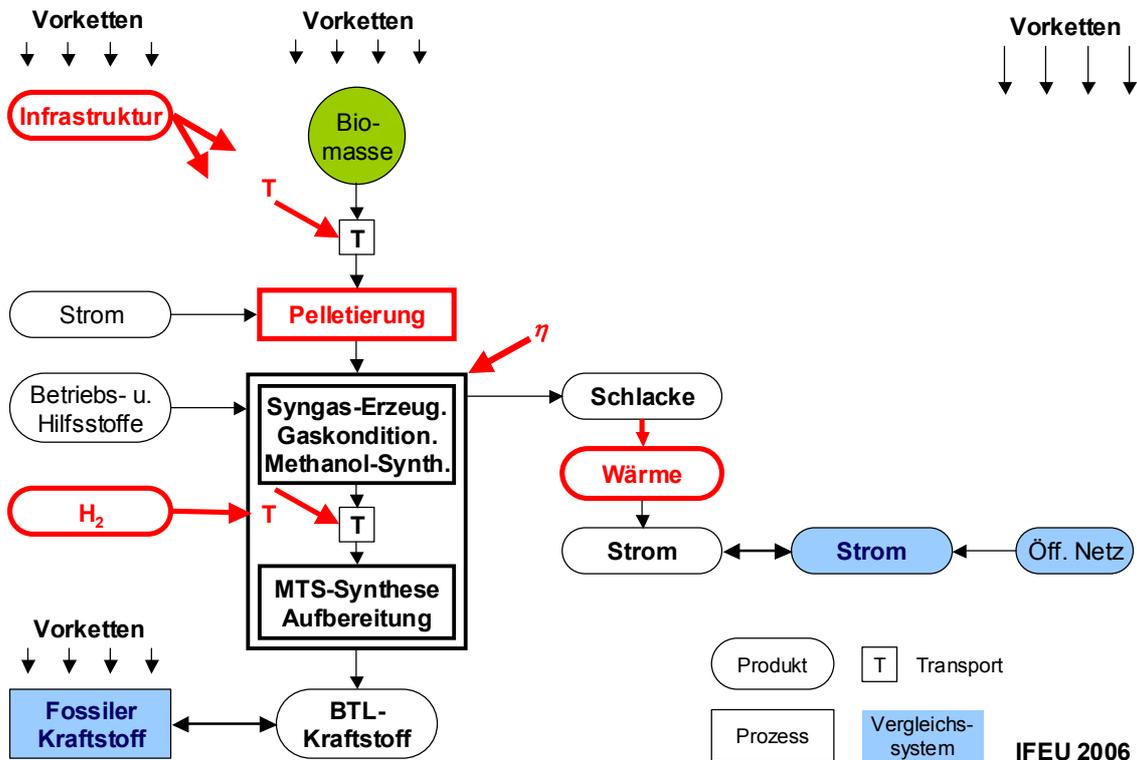


Abb. 3-8 Grobschematische Darstellung der Sensitivitätsanalysen für BTL-Kraftstoff nach dem Verfahren der TU Freiberg

Zum BTL-Verfahren nach der TU Freiberg werden sechs Sensitivitätsanalysen durchgeführt (s. Abb. 3-8). Dies sind zum einen die am Anfang dieses Abschnitts genannten Szenarien „Minimum“ (in der Grafik gekennzeichnet durch den Wirkungsgrad η) und „H₂-Import“ (als H₂ dargestellt). Des weiteren wird die Auswirkung unterschiedlich weiter Transporte der Bio-masse zur Verarbeitung (Markierung „T“ in der Grafik) untersucht. Ferner wird analysiert, in welchem Maße die **Pelletierung** und inwieweit der Austrag von heißer Asche aus dem Prozess die Ergebnisse beeinflusst, indem eine Nutzung der Abwärme (Bezeichnung „Wärme“) unterstellt wird. Schließlich wird auch hier eine Sensitivitätsanalyse zu den Aufwendungen für die **Infrastruktur** (Anlagen, Gebäude und Fahrzeuge) durchgeführt.

TU Wien

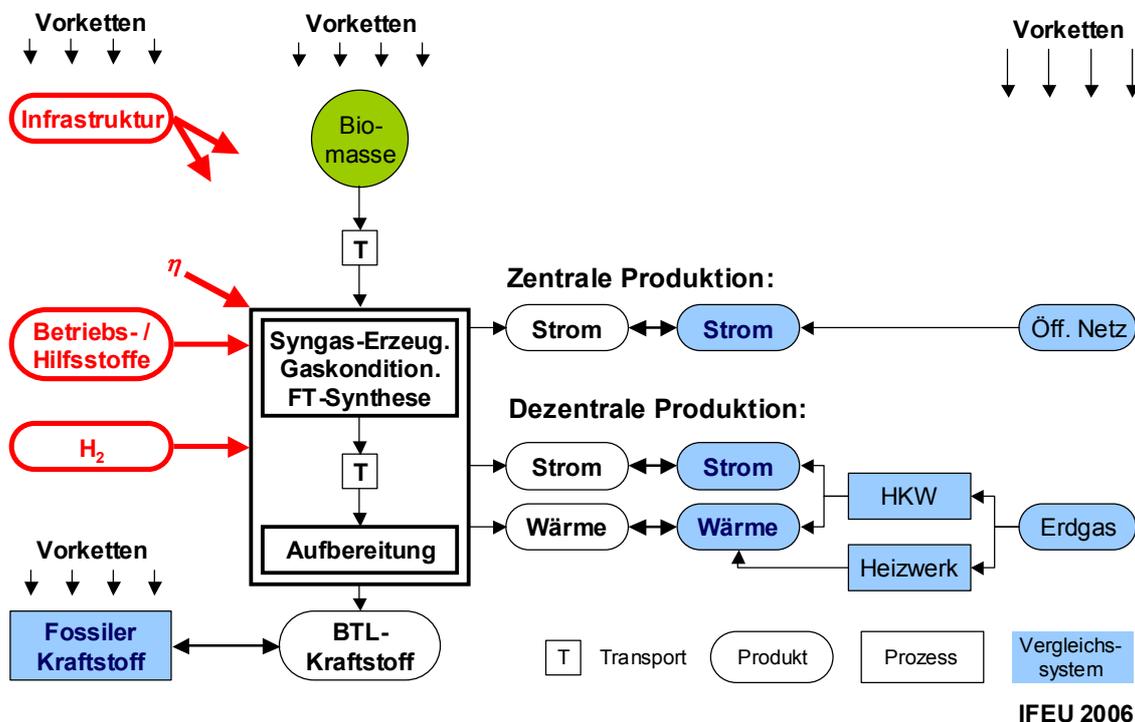


Abb. 3-9 Grobschematische Darstellung der Sensitivitätsanalysen für BTL-Kraftstoff nach dem Verfahren der TU Wien

Für das BTL-Verfahren der TU Freiberg werden vier Sensitivitätsanalysen durchgeführt (s. Abb. 3-9). Dies sind zum einen die am Anfang dieses Abschnitts genannten Szenarien „Minimum“ (in der Grafik gekennzeichnet durch den Wirkungsgrad η) und „H₂-Import“ (als H₂ dargestellt). Außerdem wird eine Sensitivitätsanalyse zu den Aufwendungen für die **Infrastruktur** (Anlagen, Gebäude und Fahrzeuge) durchgeführt. Schließlich wird der Einfluss analysiert, den die Bereitstellung der verwendeten **Betriebs- und Hilfsstoffe** auf die Gesamtergebnisse hat.

3.3 Basisdaten

Hinsichtlich Quellen und Generierung lassen sich die verwendeten Basisdaten in zwei Hauptkategorien unterteilen:

- Daten zu „Vorketten“ wie der Bereitstellung von Biomasse, den dazu notwendigen Betriebsstoffen wie Düngemitteln usw. und zur Nutzung von BTL einschließlich der Daten für die Bereitstellung der herkömmlichen Energieträger-Gutschriften.
- Daten zur Produktion von BTL-Kraftstoffen aus bereitgestellter Biomasse.

Erstere werden im Wesentlichen aus der IFEU-Datenbank entnommen. Es handelt sich um Daten, die in zahlreichen Studien des IFEU erarbeitet und validiert wurden und allgemein akzeptiert sind.

Die Daten zur BTL-Produktion wurden im Wesentlichen für diese Studie abgeleitet. Unterschieden werden können folgende Kategorien:

Energetische Outputs (Ausbeuten bzw. Wirkungsgrade): Zu den aus einer bestimmten Menge Biomasse produzierten Mengen an BTL-Kraftstoffen, Überschussstrom und -wärme wurden für die einzelnen Konzepte im Szenario „Ziel“ Daten angesetzt, die von den Entwicklern geliefert wurden bzw. mit ihnen abgestimmt wurden. Bei diesen Daten handelt es sich im Wesentlichen um die Ergebnisse von Berechnungen mit Simulationsprogrammen zur Anlagenplanung. Sie repräsentieren damit zukünftige Anlagen, was dem Konzept dieser Studie entsprechend gewünscht ist. Die Wirkungsgrade der Szenarien „Minimum“ und „H2-Import“ wurden von den Autoren dieser Studie, ebenfalls in Abstimmung mit den Entwicklern, basierend auf „Ziel“ abgeschätzt bzw. gesetzt.

Sonstige In- und Outputs: Für Betriebsstoffe, prozessspezifische Emissionen, Emissionen aus der Stromerzeugung, Nebenprodukte und Abfälle werden generische Daten aus verschiedenen Quellen angesetzt. Zu Betriebsstoffen liegen einzelne Daten von Entwicklern vor, die, wo dies sinnvoll ist, auch für die übrigen Konzepte angesetzt werden. Andere werden aus Literaturangaben zu vergleichbaren Prozessen abgeleitet. Für die Emissionen werden Zahlen aus verschiedenen Datenbanken wie [ecoinvent 2003], [GEMIS 2005], [ProBas 2005], [TREMODO 2006] und der IFEU-internen Datenbank [IFEU 2006] angesetzt bzw. aus Literaturangaben zu vergleichbaren Prozessen abgeleitet. Die Schlackemengen werden aus dem Aschegehalt der Biomasse und ggf. Betriebsstoffausträgen berechnet. Diesem Vorgehen liegt die Idee zugrunde, Ressourcenverbräuche und Emissionen, die mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht ergebnisbestimmend sind und für die auch nur schwierig belastbare Daten zu erhalten sind, trotzdem näherungsweise mitzuerfassen.

Die Datenbasis ist damit relativ inhomogen. Die Qualität der Daten zu den Energieoutputs ist aufgrund der Datenherkunft als gut zu betrachten. Die Qualität der übrigen Daten ist geringer, sie beeinflussen aber auch weniger die Gesamtergebnisse. Insbesondere sind Unsicherheiten, die daraus resultieren, dass zukünftige Anlage deutlich von heute konzipierten abweichen können, größer als die aus Vereinfachungen hinsichtlich z.B. der chemischen Spezifikation oder Menge eines Adsorptionsmittels. Insgesamt ist die Datenqualität damit auf jeden Fall ausreichend für die Fragestellungen.

4 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Basisvergleiche der Verfahren sowie die Sensitivitätsanalysen der einzelnen Einflussgrößen dargestellt.

4.1 Vergleiche: BTL-Verfahren

Aus den Einzelergebnissen ergeben sich Bandbreiten, die aufzeigen, in welchem Bereich die Ergebnisse für die jeweiligen BTL-Verfahren liegen. Abb. 4-1 zeigt diese Bandbreiten am Beispiel des Kurzumtriebholzes für die einzelnen Umweltwirkungen. Die Bandbreiten selbst sind durch die Szenarien „Ziel“ und „Minimum“ (s. Kapitel 2 und 3.2.1) abgesteckt.

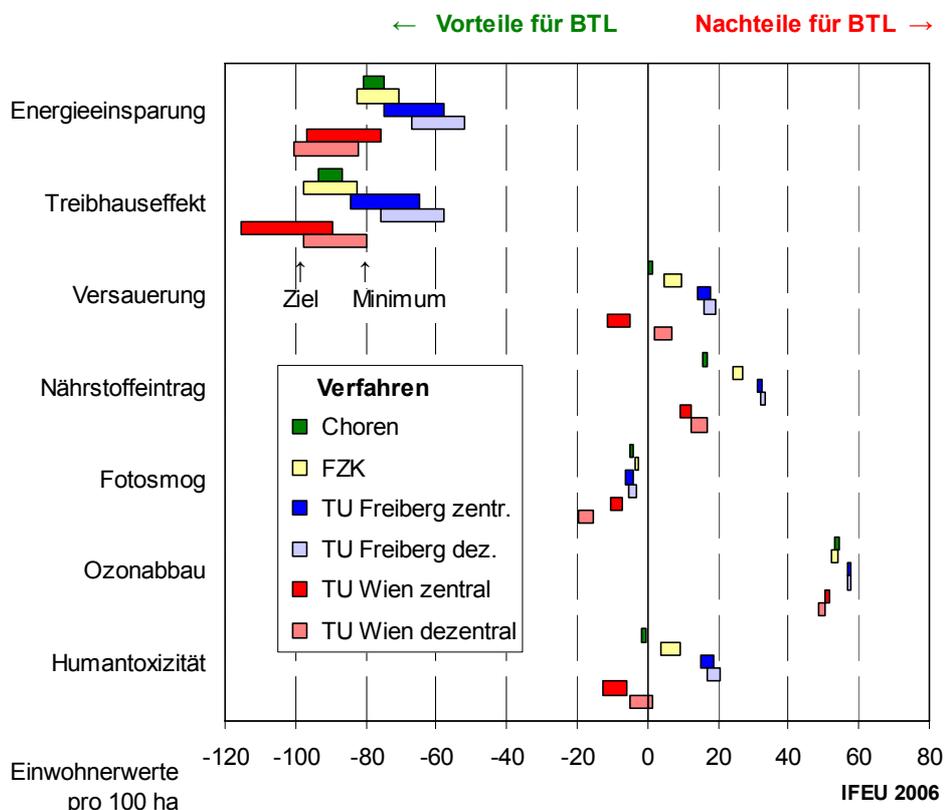


Abb. 4-1 Vor- und Nachteile der verschiedenen BTL-Verfahren gegenüber fossilen Kraftstoffen bei Einsatz von Kurzumtriebsholz von 100 ha Anbaufläche

Lesebeispiel für den ersten Balken:

Dargestellt sind die Bandbreiten der Ergebnisse für Energieeinsparung für den Vergleich von BTL aus Kurzumtriebsholz nach dem Choren-Verfahren und konventionellem Dieseldieselkraftstoff in den Szenarien „Ziel“ und „Minimum“ (s. Text).

Wird BTL anstelle von Diesel verwendet, so lässt sich pro 100 ha Kurzumtriebsholz so viel Energie einsparen, wie etwa 75-80 Bundesbürger jährlich im Durchschnitt benötigen.

Ergebnisse

- **BTL im Vergleich zu fossilem Kraftstoff:** Die Ergebnisse fallen qualitativ aus wie die der Vergleiche vieler anderer Bioenergieträger mit ihren fossilen Pendanten: eindeutige Vorteile bei der Einsparung von Energie und Treibhausgasen, während bei den anderen Umweltkategorien tendenziell eher Nachteile auftreten. Hier treten in Einzelfällen Vorteile auf, die beim Verfahren der TU Wien auf die Gutschrift von Strom bzw. Dampf zurückzuführen und damit nicht zwingend BTL-spezifisch ist bzw. beim Fotosmog, was durch die höheren Kohlenwasserstoffemissionen bei der Bereitstellung fossiler Kraftstoffe zu erklären ist. Insgesamt bewegen sich alle diese Kategorien im Bereich bis ca. 20 Einwohnerwerten und damit weit unterhalb des Bereiches, der sich bei der Energieeinsparung und den Treibhausgasen ergibt – vom Ozonabbau abgesehen.
- **Energie und Treibhausgase:** Die BTL-Kraftstoffe aller Verfahren sparen fossile Energie und Treibhausgase ein. Dabei spiegelt die Höhe der Vorteile zum einen die Wirkungsgrade wider, mit denen die BTL-Kraftstoffe erzeugt werden können, zum anderen die Gutschriften aus dem zusätzlichen Strom- und ggf. Wärmeoutput, die die meisten Anlagen in größerem oder kleinerem Umfang liefern. Hier muss insbesondere auf das Verfahren der TU Wien hingewiesen werden, dessen Strom- und Wärmeproduktion im dezentralen Konzept deutlich über dem energetischen Output an BTL-Kraftstoff liegt und dessen Stromerzeugung auch im zentralen Fall noch höher ist als bei den anderen Verfahren. Das Wiener Verfahren nimmt daher eine Sonderstellung ein und ist mit den anderen Verfahren nicht direkt vergleichbar.

Der Vergleich zunächst der Ergebnisse des Szenarios „Ziel“ der verbleibenden vier Konzepte zeigt, dass die drei Verfahren Choren, FZK und die zentrale Variante der TU Freiberg bei der Energieeinsparung im etwa gleichen Bereich liegen. Die dezentrale Variante der TU Freiberg schneidet wegen des gegenüber den anderen Verfahren geringeren Wirkungsgrades ungünstiger ab. Außerdem kommt auch hier der beim Verfahren nach der TU Freiberg nicht vorhandene zusätzliche Strom- und Wärmeoutput sowie die Pelletierung der Biomasse zum Tragen.

Die Ergebnisse im Szenario „Minimum“ unterscheiden sich teils deutlicher, was vor allem an den unterschiedlichen Wirkungsgraden der Konzepte liegt (s. Tabelle 7-1 im Anhang).
- **Andere Umweltwirkungen:** Neben den bereits erwähnten Einzelfällen fallen die Ergebnisse bei den meisten Ergebnissen der anderen Umweltwirkungen zu Ungunsten der BTL aus. Das liegt grundsätzlich daran, dass die Gesamtheit der Vorketten bei den BTL in der Regel wesentlich mehr Emissionen aufweist als die fossilen Ketten – insbesondere, wenn es sich um Anbaubiomasse handelt (s. auch Abschnitt 4.4.1). So verursacht der landwirtschaftliche Anbau durch die Düngemittelproduktion und -ausbringung beispielsweise zum Teil erhebliche Mengen an Lachgas- und Ammoniakemissionen, die zur Versauerung, dem Nährstoffeintrag und dem Ozonabbau beitragen.
- **Bandbreite:** Die Bandbreiten werden hauptsächlich durch die verschiedenen Wirkungsgrade der BTL-Verfahrenskonzepte dominiert. Dies spiegelt sich direkt in den Ergebnissen für die Energie- und Treibhausgasbilanzen wider. Dahingegen fallen die Bandbreiten der anderen Umweltwirkungen äußerst schmal aus, denn diese werden nicht durch die Wirkungsgrade der Verfahren, sondern im Wesentlichen durch Unterschiede in den Vorketten bestimmt, die hier relativ gering ausfallen.
- **Zentral/dezentral:** Beim Freiburger Verfahren hat die zentrale Variante für alle Umweltwirkungen Vorteile gegenüber der dezentralen. Dies liegt an den höheren Umwandlungs-Wirkungsgraden, die sich im zentralen Fall erzielen lassen und die Mehraufwendungen für Transporte dabei überkompensieren.

Beim Wiener Verfahren zeigt die dezentrale Variante i. A. größere Bandbreiten, allerdings hat keine Variante gegenüber der anderen ausschließliche Vorteile: Die einerseits höhere BTL-Ausbeute beim zentralen und die andererseits höhere Wärmeausbeute beim dezentralen Verfahren führen jeweils zu unterschiedlichen Auswirkungen bei den einzelnen Umweltwirkungen, da die Ergebnisse insbesondere auch von der Art und Weise der Gutschrift für die entstehende Wärme abhängen.

- **Gültigkeit:** Die hier diskutierten Ergebnisse gelten zwar vom Grundsatz her allgemein, streng genommen aber nur für die Randbedingungen der hier betrachteten Basisszenarien. In Einzelfällen können sie deutlich anders ausfallen, nämlich dann, wenn grundsätzlich andere, gleichzeitig für die Ergebnisse relevante Randbedingungen gelten. So hat beispielsweise die Nutzungsphase den größten Anteil (je über 50 %) an den Gesamtwirkungen bei den Umweltwirkungen Versauerung, Nährstoffeintrag, Fotosmog und Humantoxizität. Dies kommt hier nicht zum Tragen, da im Basisszenario die Emissionen der Nutzungsphase für beide Kraftstoffe gleich gesetzt sind, ändert sich aber bei unterschiedlichen Emissionen zum Teil gewaltig. Dies wird im Einzelnen in den Sensitivitätsanalysen diskutiert und dargestellt.

Zusammengefasst kann jedoch festgehalten werden, dass sich, auch wenn sich leichte Unterschiede ergeben, kein Verfahren als gegenüber den anderen über- oder unterlegen aufdrängt.

4.2 Vergleiche: Biokraftstoffe

Für die Fragestellung, wie die BTL im Vergleich zu den Biokraftstoffen der ersten Generation abschneiden, sind in Abb. 4-2 die Ergebnisse der Energie- und Klimagasbilanzen für die Bandbreite der hier untersuchten BTL den entsprechenden Ergebnissen diverser Biokraftstoffe aus verschiedenen Biomasserohstoffen – im Vergleich zu ihren jeweiligen fossilen Pendanten – gegenübergestellt (EtOH = Bio-Ethanol, ETBE = Ethyl-Tertiärbutylether aus Bioethanol).

4.2.1 Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse

Ergebnisse

- BTL-Kraftstoffe schneiden aus ökologischer Sicht günstiger, in einigen Fällen deutlich günstiger als die meisten Biodieselarten wie Biodiesel aus Soja, Raps oder Sonnenblume ab.

Beim Vergleich der BTL mit Ethanol- und ETBE-Routen spielen die Biomassearten zur Produktion der BTL wie auch der Ethanole die entscheidende Rolle. Beispielsweise sind die landwirtschaftlichen Auswirkungen der Produktion von Kurzumtriebsholz signifikant geringer als der zur Produktion von Getreide, was sich in den Ergebnissen direkt niederschlägt. Folgende eindeutige Aussagen lassen sich diesbezüglich ableiten:

- BTL-Kraftstoffe schneiden dann günstiger ab als die meisten Bioethanol-Linien, wenn diese mit Standardverfahren produziert werden. Das gilt uneingeschränkt für den Vergleich mit Bioethanol aus Kartoffeln, Mais und Getreide. Zudem gilt dies auch im Vergleich mit aus den genannten Rohstoffen hergestelltem ETBE, wenn BTL aus Kurzumtriebsholz produziert wird.
- Umgekehrt fallen Ethanol bzw. ETBE aus Zuckerrohr gegenüber BTL-Kraftstoffen aus Getreide tendenziell günstiger aus.

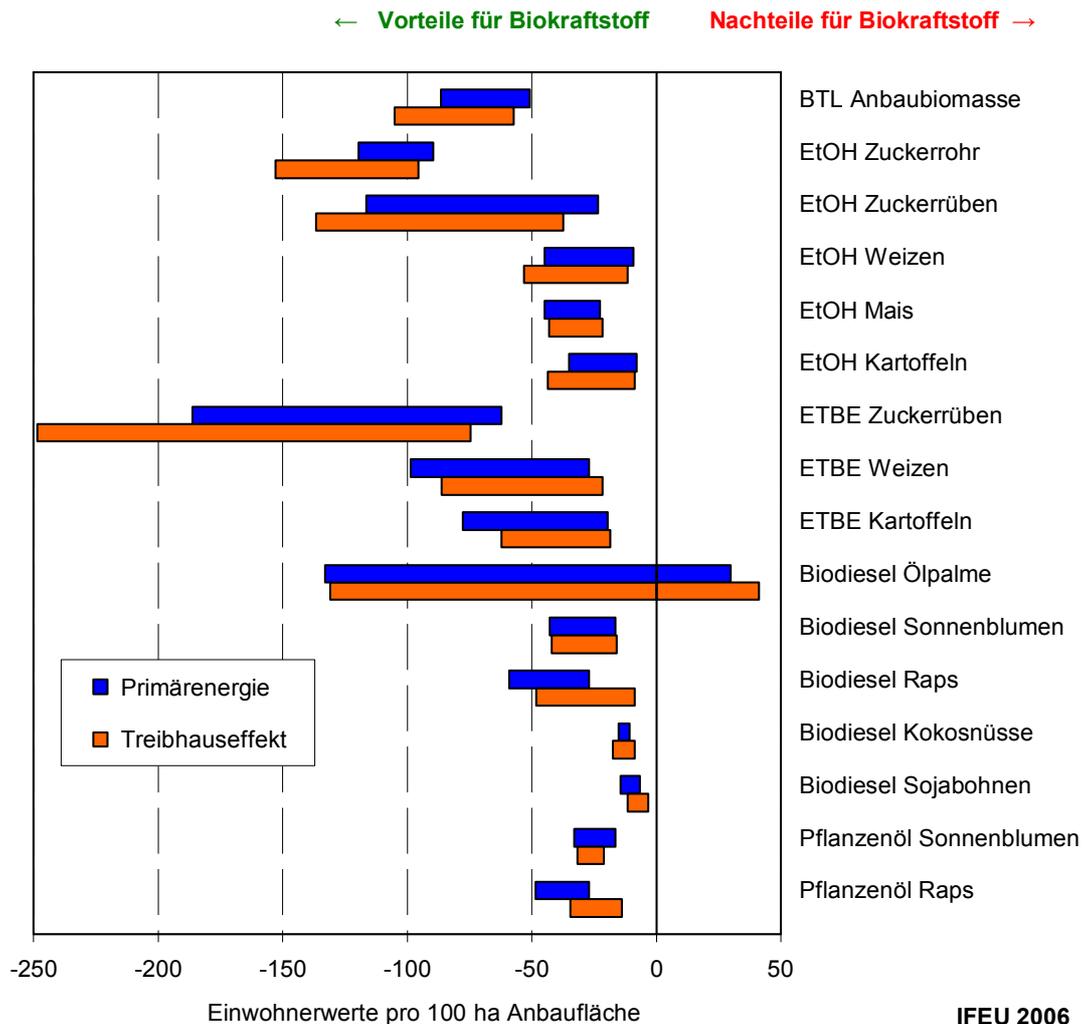


Abb. 4-2 Vor- und Nachteile verschiedener Biokraftstoffe aus Biomasse von 100 ha Anbaufläche gegenüber fossilen Kraftstoffen am Beispiel Energie und Treibhauseffekt

Lesebeispiel für den ersten Balken:

Dargestellt sind die Ergebnisse für die Energieeinsparung für den Vergleich von BTL aus Anbaubiomasse und konventionellem Dieseldieselkraftstoff.

Wird BTL anstelle von Diesel verwendet, so lässt sich pro 100 ha Anbaufläche so viel Energie einsparen, wie 50-90 Bundesbürger jährlich im Durchschnitt benötigen.

Die anderen Fälle des Vergleichs der BTL mit Bioethanol bzw. ETBE zeigen unterschiedliche Ergebnisse:

- Die ETBE aus den genannten Rohstoffen weisen in nahezu allen Umweltwirkungen ähnliche Ergebnisse auf wie die BTL aus Getreide.
- Werden Ethanol bzw. ETBE aus Zuckerrohr BTL aus Kurzumtriebsholz gegenübergestellt (und nicht BTL-Kraftstoffen aus Getreide wie oben beschrieben), dann weisen sie zwar günstigere Energie- und Treibhausgasbilanzen auf, aber ungünstigere Ergebnisse bei den anderen Umweltwirkungen wie Versauerung und Nährstoffeintrag. Gleiches gilt auch für alle BTL-Kraftstoffe gegenüber Ethanol bzw. ETBE, wenn diese mit innovativen, energieoptimierten Verfahren aus Zuckerrüben produziert werden.

Damit kann aus BTL-Sicht zusammengefasst werden: Es gibt eine Reihe an Biokraftstoffen, denen BTL ökologisch überlegen ist. Es existieren aber auch Pfade sowohl in den gemäßigten Breiten wie auch in den Tropen, die günstigere Werte als die BTL aufweist. Die BTL zeigen gegenüber den anderen Biokraftstoffen besonders große ökologische Potenziale, wenn sie aus Kurzumtriebsholz (und nicht aus Getreide) produziert werden.

4.2.2 Biokraftstoffe aus Reststoffen

Biokraftstoffe aus Reststoffen können nicht uneingeschränkt mit solchen aus Anbaubiomasse verglichen werden, da ein Flächenbezug nur unter sehr speziellen Fragestellungen Sinn macht. Selbst ein Vergleich der Biokraftstoffe aus Reststoffen untereinander ist nur eingeschränkt sinnvoll. Als Bezugseinheit für den Vergleich dient hier der Energieinhalt der Kraftstoffe (s. detaillierte Diskussion hierzu in [Reinhardt & Zemanek 2000]).

← Vorteile für Biokraftstoff

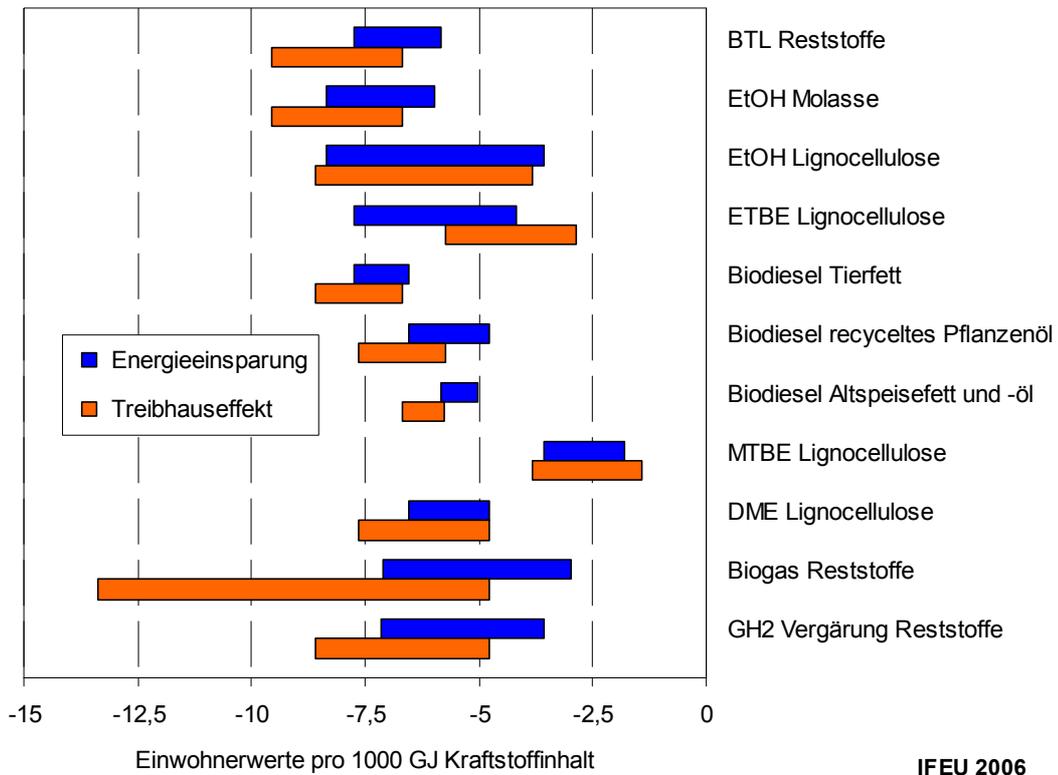


Abb. 4-3 Vor- und Nachteile verschiedener Biokraftstoffe aus Reststoffen gegenüber fossilen Kraftstoffen am Beispiel Energie und Treibhauseffekt

Lesebeispiel für den ersten Balken:

Dargestellt sind die Ergebnisse für Energieeinsparung für den Vergleich von BTL aus Reststoffen und konventionellem Diesekraftstoff.

Wird BTL anstelle von Diesel verwendet, so lässt sich pro 1000 GJ Kraftstoff so viel Energie einsparen, wie etwa 6-8 Bundesbürger jährlich im Durchschnitt benötigen.

Ergebnis

- BTL-Kraftstoffe reihen sich in ihren Effizienzen nahtlos in die der meisten anderen Biokraftstoffe aus Reststoffen ein. Aus ökologischer Sicht sind BTL damit anderen Biokraftstoffen weder über- noch unterlegen – zumindest in Bezug auf die in dieser Studie dargestellte Bezugsgröße, nämlich auf die Kraftstoffmenge. Bei anderen Fragestellungen, die zu anderen Bezügen führen und die jeweils separat betrachtet werden müssen, können gegebenenfalls auch andere Ergebnisse erhalten werden (s. hierzu auch [IFEU 2004]).

4.3 Vergleiche: Alternative Biomassenutzungen

Jede Nutzung eines Rohstoffs oder Materials auf eine bestimmte Weise bedeutet, dass andere Nutzungsmöglichkeiten damit ausgeschlossen sind. Es könnte aber sein, dass sich eine andere Nutzung effizienter oder umweltverträglicher darstellt. Aus diesem Grund werden im Folgenden unterschiedliche Nutzungsmöglichkeiten der hier betrachteten Biomasserohstoffe untersucht. Das sind z. B. – neben der Verwendung zur Produktion von BTL – Nutzungen zur Produktion von grünem Strom und/oder Wärme.

Während bei den biogenen Reststoffen ausschließlich eine alternative Nutzung der Biomasse zu betrachten ist, könnte bei der Anbaubiomasse neben der Alternativnutzung der Biomasse zusätzlich auch eine Alternativnutzung der Fläche, auf der die Biomasse angebaut wird, infrage kommen. Aus diesem Grund werden diese Alternativen in zwei unterschiedlichen Unterkapiteln dargestellt.

4.3.1 Alternative Reststoffnutzung

Wie eingangs Kap. 4.3 erwähnt, wird in diesem Kapitel verglichen, wie die verschiedenen Nutzungsoptionen von organischen Reststoffen ökologisch zu bewerten sind. Damit soll eine Antwort auf die Frage gegeben werden, ob aus einer vorhandenen Biomasse aus ökologischer Sicht vorzugsweise BTL, grüner Strom oder Wärme produziert werden sollte.

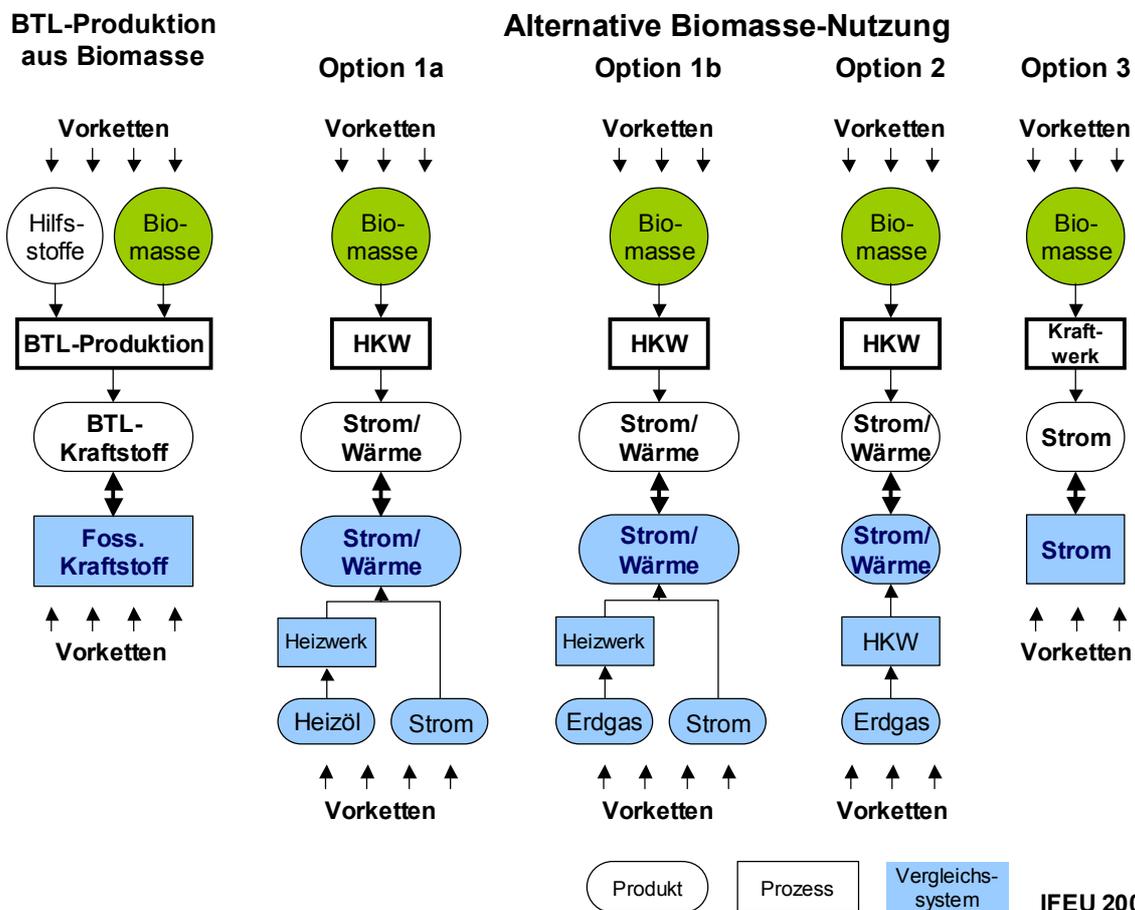


Abb. 4-4 Schematischer Lebenswegvergleich für die Nutzung von Reststoffen zur Bioenergieproduktion im Vergleich zur fossilen Energiebereitstellung

Neben der Produktion von BTL aus organischen Reststoffen wird eine Reihe an Optionen betrachtet, die in Abb. 4-4 schematisch abgebildet und in Tabelle 4-1 in einer Übersicht zusammengestellt sind. Sie leiten sich wie folgt ab:

- Die derzeit übliche Form der Nutzung ist die Umwandlung von Biomasse zu Strom und Wärme in **Heizkraftwerken**. Dabei können unterschiedliche fossile Energien ersetzt werden, beispielsweise Strom aus dem Netz zusammen mit Heizöl oder Erdgas in Heizwerken oder auch fossil betriebene Heizkraftwerke (Optionen 1a, 1b und 2).
- Eine andere Option ist die Stromerzeugung aus Biomasse in **Kraftwerken**, bei der Strom aus dem Netz ersetzt werden kann (Option 3).
- Neben der direkten Verbrennung der Biomasse und Stromerzeugung in Dampfturbinen lassen sich dieselben Energiedienste auch über Vergasung der Biomasse und Einsatz des Brenngases in Verbrennungsmotoren bereitstellen. Diese **innovativen Heizkraftwerke** und **Kraftwerke**, die sich derzeit noch in Entwicklung befinden, sollen zukünftig einen höheren Gesamtwirkungsgrad als die Energiebereitstellung über direkte Verbrennung haben (Option 1b, 2 und 3).

Tabelle 4-1 Untersuchte Optionen der Reststoffnutzung zur Bioenergieproduktion und die ersetzten konventionellen Energieträger

Biomasse	Nutzung	Äquivalent	
Waldrestholz	BTL	↔	fossiler Kraftstoff

Biomasse	Alternativnutzung	Äquivalent	Option		
Waldrestholz	Heizkraftwerk (HKW)	↔	Strommix und Heizöl-Heizwerk (HEL)	1a	
		↔	Strommix und Erdgas-Heizwerk (EG)	1b	
		↔	Erdgas-Heizkraftwerk (EG-HKW)	2	
	Kraftwerk	↔	Strommix	3	
		Innovatives Heizkraftwerk	↔	Strommix und Erdgas-Heizwerk (EG)	1b
			↔	Erdgas-Heizkraftwerk (EG-HKW)	2
	Innovatives Kraftwerk	↔	Strommix	3	

IFEU 2006

Als eingesetzte Biomasse wird beispielhaft der Reststoff Waldrestholz für die verschiedenen Nutzungsmöglichkeiten betrachtet. Die Darstellung der Ergebnisse in Abb. 4-5 erfolgt jeweils für die gesamten Lebenswegvergleiche entsprechend Abb. 4-4 einzeln für die in der Tabelle 4-1 aufgelisteten Nutzungsoptionen und für die BTL-Produktion aus Waldrestholz über die gesamte Bandbreite aller BTL-Konzepte und Szenarien.

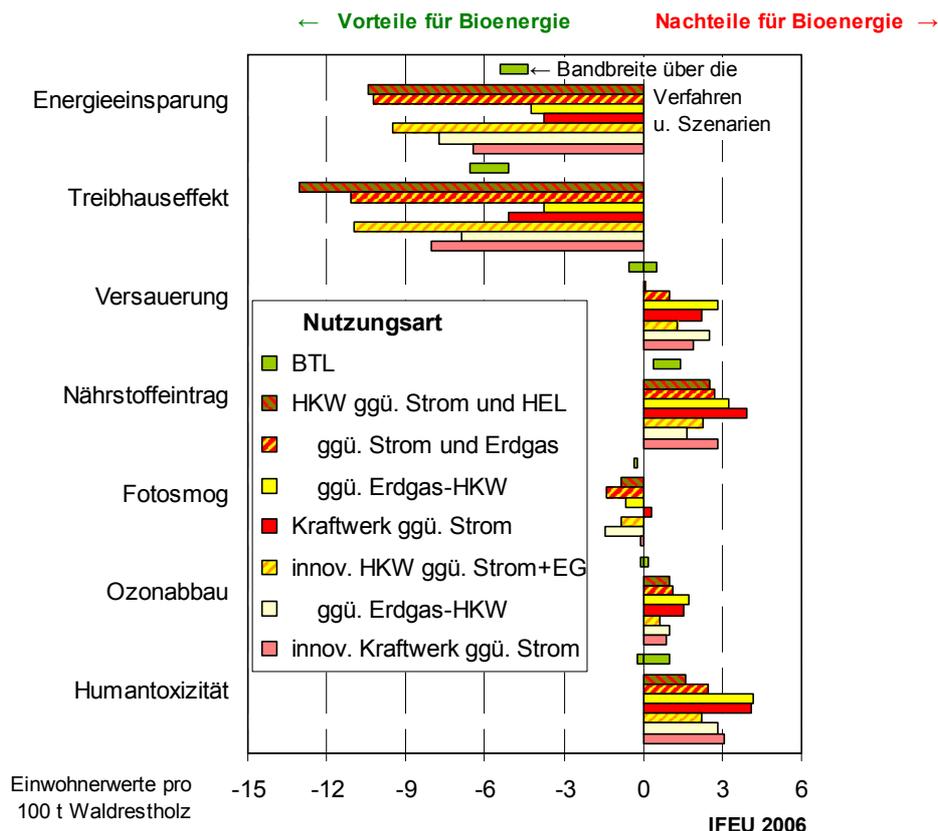


Abb. 4-5 Umweltwirkungen für BTL aus 100 t Waldrestholz für die Bandbreite der BTL-Konzepte und für die gleiche Menge Biomasse in Heizkraftwerken bzw. Kraftwerken gegenüber der jeweils konventionellen Energiebereitstellung

Lesebeispiel für den ersten Balken: vgl. Abb. 4-3.

Lesebeispiel für den zweiten Balken:

Dargestellt ist das Ergebnis für die Nutzung von Waldrestholz in einem Heizkraftwerk verglichen mit konventioneller Stromproduktion und Wärmeproduktion aus Heizöl für den Parameter Energieeinsparung.

Ersetzen Strom und Wärme aus 100 t Waldrestholz konventionellen Strom und Wärme aus Heizöl, spart das so viel Energie wie etwa 10 Bundesbürger jährlich im Durchschnitt benötigen.

Ergebnisse

- Die in Abb. 4-5 gegenübergestellten Ergebnisse für die verschiedenen Nutzungsoptionen der gleichen Biomasse zeigt, dass es stationäre Nutzungen der Biomasse gibt, die aus Umweltsicht eindeutig günstiger als BTL ausfallen, aber auch solche, die ungünstiger sind. Dabei spielt maßgeblich eine Rolle, welche Technologie als auch welche konventionelle Energie ersetzt wird.
- BTL sind insbesondere dann günstiger, wenn die Biomasse ansonsten in HKW eingesetzt würde und konventionell mit Erdgas oder Heizöl betriebene HKW ersetzen. Sie sind auch dann günstiger, wenn die Biomasse verstromt wird und durchschnittlichen EU-

Strom ersetzt. Bei deutlich anderem Strommix können die Ergebnisse allerdings auch zu Ungunsten der BTL ausfallen.

- BTL sind dann ungünstiger als die stationäre Nutzung der gleichen Biomasse, wenn diese in Heizkraftwerken genutzt wird und Netzstrom sowie Wärme aus fossilen Heizwerken ersetzt. Grund hierfür ist insbesondere der höhere Gesamtwirkungsgrad der KWK gegenüber den Einzelwirkungsgraden der Strom- und der Wärmeerzeugung. Ebenso ungünstiger sind die BTL, wenn die Biomasse in hocheffizienten Vergaser-Heizkraftwerken eingesetzt wird. Dies gilt dann für alle ersetzten konventionellen Technologien. Dabei ist die Bandbreite der Ergebnisse bei der innovativen KWK aus einer Kombination mehrerer Gründe kleiner als die Bandbreite bei den konventionellen Technologien:
 1. Zum einen ist beim Ersetzen fossiler KWK aufgrund der Technologie das Verhältnis zwischen den elektrischen und dem thermischen Wirkungsgrad bei der Biomasse identisch mit oder zumindest sehr ähnlich dem Wirkungsgradverhältnis bei der fossilen KWK, wodurch praktisch keine Unterschiede bei den jeweils gegenzurechnenden Gutschriften entstehen.
 2. Zum anderen erfolgt im Fall des innovativen Biomasse-Kraftwerks eine höhere Stromgutschrift, so dass das Ergebnis günstiger ausfällt als im Fall der direkten Verbrennung mit Stromerzeugung.
- Welche konventionelle Technologie ersetzt wird, hat einen großen Einfluss auf die Ergebnisse. Während die Ergebnisse in der Energieeinsparung und dem Treibhauseffekt richtungssicher sind, lassen sie in den meisten anderen Umweltwirkungen keine eindeutige Aussage zu. Je nach zu betrachtendem Szenario im Einzelfall und den damit verbundenen Emissionen der ersetzten konventionellen Energien ergeben sich teils Vorteile, teils Nachteile der Bioenergie gegenüber den ersetzten konventionellen Energien.

4.3.2 Alternativen bei der Anbaubiomasse

Analog zu Kap. 4.3.1 wird in diesem Kapitel verglichen, wie die verschiedenen Nutzungsoptionen von Anbaubiomasse ökologisch zu bewerten sind. Damit soll eine Antwort auf die Frage gegeben werden, ob aus einer vorhandenen Biomasse aus ökologischer Sicht vorzugsweise BTL, grüner Strom oder Wärme produziert werden sollte. Darüber hinaus stellt sich – wie eingangs des Kapitels erwähnt – in diesem Fall die zusätzliche Frage, wozu eine Fläche genutzt werden könnte, wenn nicht die hier analysierten Energiepflanzen darauf angebaut würden. Dies können andere Pflanzen zur Biokraftstoffproduktion sein, aber auch Pflanzen für die Nutzung in einem Biomasse-Kraftwerk oder Heizkraftwerk, Futter- oder Nahrungsmittelpflanzen, die entsprechende andere Produkte ersetzen können, oder Pflanzen zur stofflichen Nutzung, wie z. B. Hanf zur Nutzung der Fasern in einem Faserverbundstoff oder Dämmmaterial.

Aus der Vielzahl dieser potenziellen Alternativen werden folgende Optionen beispielhaft betrachtet:

- **Alternative Biomassenutzung:** Hier wird der Anbau von Triticale sowie (ohne grafische Ergebnisdarstellung) Kurzumtriebsholz zur Strom- bzw. Strom-/Wärme-Erzeugung betrachtet. Dabei wird unterschieden nach Nutzungsarten (Heizkraftwerk und Kraftwerk) sowie den jeweils ersetzten konventionellen Energieträgern (Strommix; Heizöl, Erdgas im Heizwerk bzw. Heizkraftwerk).

- **Alternative Flächennutzung:** Für den Pfad der Biogasbereitstellung wird beispielhaft Energiemais betrachtet, aus dem in Biogasanlagen Strom und Wärme produziert werden.
- **Alternative Flächennutzung:** Für die Produktion von Biokraftstoffen wird beispielhaft Raps zur Biodieselproduktion und Weizen sowie Zuckerrüben zur Bioethanolproduktion dargestellt.

Tabelle 4-2 Dargestellte Arten der Flächennutzung zur Bioenergieproduktion und die ersetzten konventionellen Energieträger

Biomasse	Nutzung	Äquivalent
Triticale	BTL	↔ fossiler Kraftstoff
Biomasse	Alternativnutzung	Äquivalent
Triticale	Heizkraftwerk	↔ Strommix und Heizöl-Heizwerk, Strommix und Erdgas-Heizwerk, Erdgas-Heizkraftwerk
	Kraftwerk	↔ Strommix
Silagemais	Biogas-Blockheizkraftwerk	↔ Strommix, Strommix und Heizöl-Heizwerk, Strommix und Erdgas-Heizwerk
Raps	Biodiesel (RME)	↔ fossiler Dieselkraftstoff
Weizen, Zuckerrübe	Bioethanol	↔ fossiler Ottokraftstoff

IFEU 2006

Alle betrachteten Optionen werden über ihre vollständigen Lebenswege jeweils im Vergleich zu ihren fossilen Pendanten betrachtet (s. Tabelle 4-2). Die Ergebnisse in Abb. 4-6 werden einzeln für die in der Tabelle 4-2 aufgeführten Nutzungsoptionen dargestellt. Dabei ist die BTL-Produktion über die gesamte Bandbreite der BTL-Konzepte und Szenarien wiedergegeben, wobei das Konzept der TU Wien nicht in die Bandbreite einbezogen wurde, weil bei diesem Konzept ein großer Anteil der Biomasse bereits „alternativ“ zur Strom- und Wärmeproduktion eingesetzt wird.

Lesebeispiel für den ersten Balken: vgl. Abb. 4-2.

Lesebeispiel für den zweiten Balken in Abb. 4-6:

Dargestellt ist das Ergebnis für die Nutzung von Triticale in einem Heizkraftwerk verglichen mit konventioneller Stromproduktion und Wärmeproduktion aus Heizöl für den Parameter Energieeinsparung.

Ersetzen Strom und Wärme aus Triticale von 100 ha Anbaufläche den Strommix und Wärme aus Heizöl, spart das so viel Energie wie etwa 170 Bundesbürger jährlich im Durchschnitt benötigen.

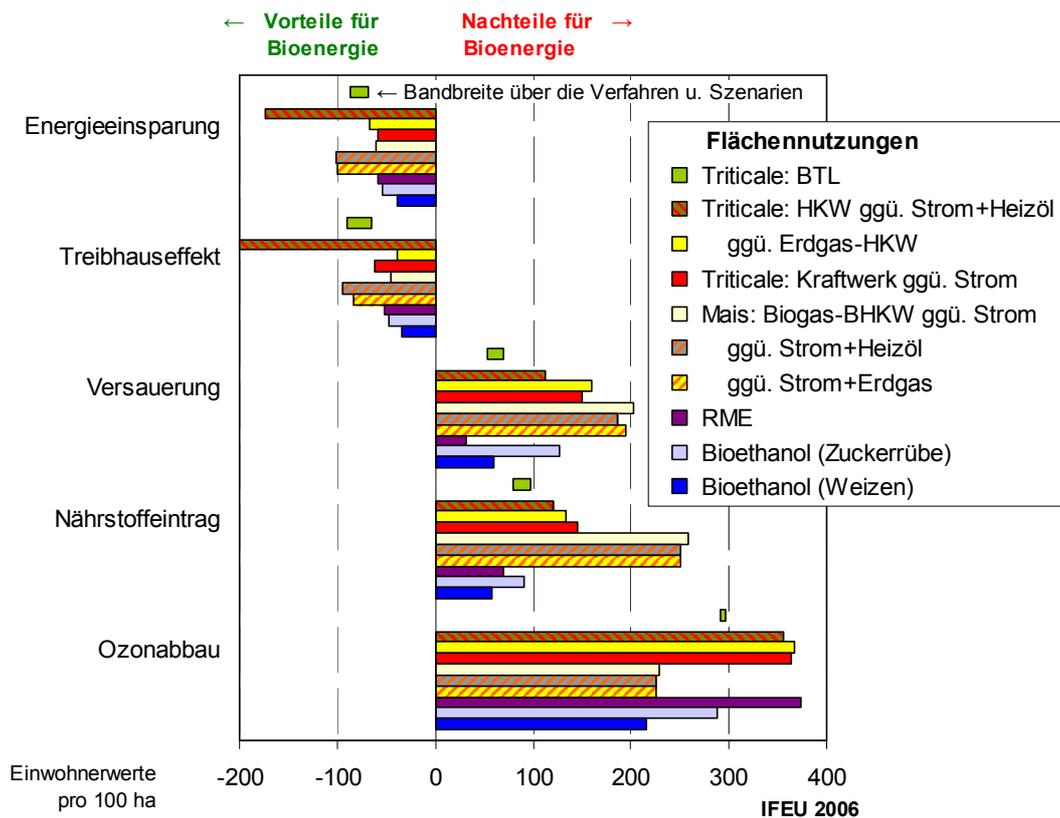


Abb. 4-6 Ergebnisse für verschiedene Flächennutzungen von 100 ha Anbaufläche (s. Tabelle 4-2)

Ergebnisse

- Die in Abb. 4-6 gegenübergestellten Ergebnisse für die Alternativen bei der Anbaubiomasse zeigen, dass es sowohl Biomasse- als auch Flächennutzungsoptionen gibt, die aus Umweltsicht eindeutig günstiger als BTL ausfallen, aber auch solche, die ungünstiger sind. Dabei spielt maßgeblich eine Rolle, welche Biomasse auf der Fläche angebaut wird und mit welcher Technologie sie genutzt wird.
- Alternative Biomassennutzung: Für die Anbaubiomasse gilt in analoger Form das Gleiche wie bereits für die Reststoffe diskutiert: Für die verschiedenen Nutzungsoptionen der gleichen Biomasse zeigt sich, dass es stationäre Nutzungen der Biomasse gibt, die aus Umweltsicht eindeutig günstiger als BTL ausfallen, aber auch solche, die ungünstiger sind (s. Diskussion zu Abb. 4-5).
- Alternative Flächennutzung: Ähnliches gilt auch für die Alternativen bei der Flächennutzung: Sowohl die dargestellten Beispiele für eine Biogasproduktion aus Anbaubiomasse wie auch die aufgeführten Biokraftstoffe zeigen, dass im Einzelfall BTL die aus Umweltsicht deutlich günstigere Alternative darstellen kann, in einem anderen Fall wiederum schlechter abschneidet (vgl. auch mit der ausführlichen Diskussion der BTL im Vergleich zu Biokraftstoffen, Abb. 4-2).

4.4 Sensitivitätsanalysen

Die Sensitivitätsanalysen untersuchen den Einfluss verschiedener variabler Größen auf die Gesamtergebnisse. Auch in diesen Fällen werden die Umweltwirkungen der BTL-Lebenswege denen fossiler Kraftstoffe gegenübergestellt. Die Reihenfolge der Unterkapitel spiegelt in etwa den Einfluss der einzelnen Größen, beginnend mit den wichtigeren, auf die Ergebnisse wider.

4.4.1 Basisvergleiche der Biomassearten

Der Einfluss verschiedener Biomassearten auf die ökologischen Vor- und Nachteile von BTL gegenüber fossilen Kraftstoffen wird in diesem Abschnitt diskutiert. Dazu zeigt Abb. 4-7 die Ergebnisse für alle untersuchten Biomassearten für das zentrale Verfahren der TU Freiberg zum einen bezogen auf die Menge an Biomasse und zum anderen bezogen auf die Menge an BTL. Ein Ergebnisvergleich mit den anderen Verfahren zeigt, dies vom Grundsatz her auch für die anderen BTL-Konzepte gilt. Die Ergebniswerte fallen in Einzelfällen zwar unterschiedlich aus, wobei sich die Unterschiede zwischen den Biomassearten allerdings praktisch nicht ändern. Daher spielt dies für die Diskussion um den Einfluss der verschiedenen Biomassearten auf die Ergebnisse keine direkte Rolle.

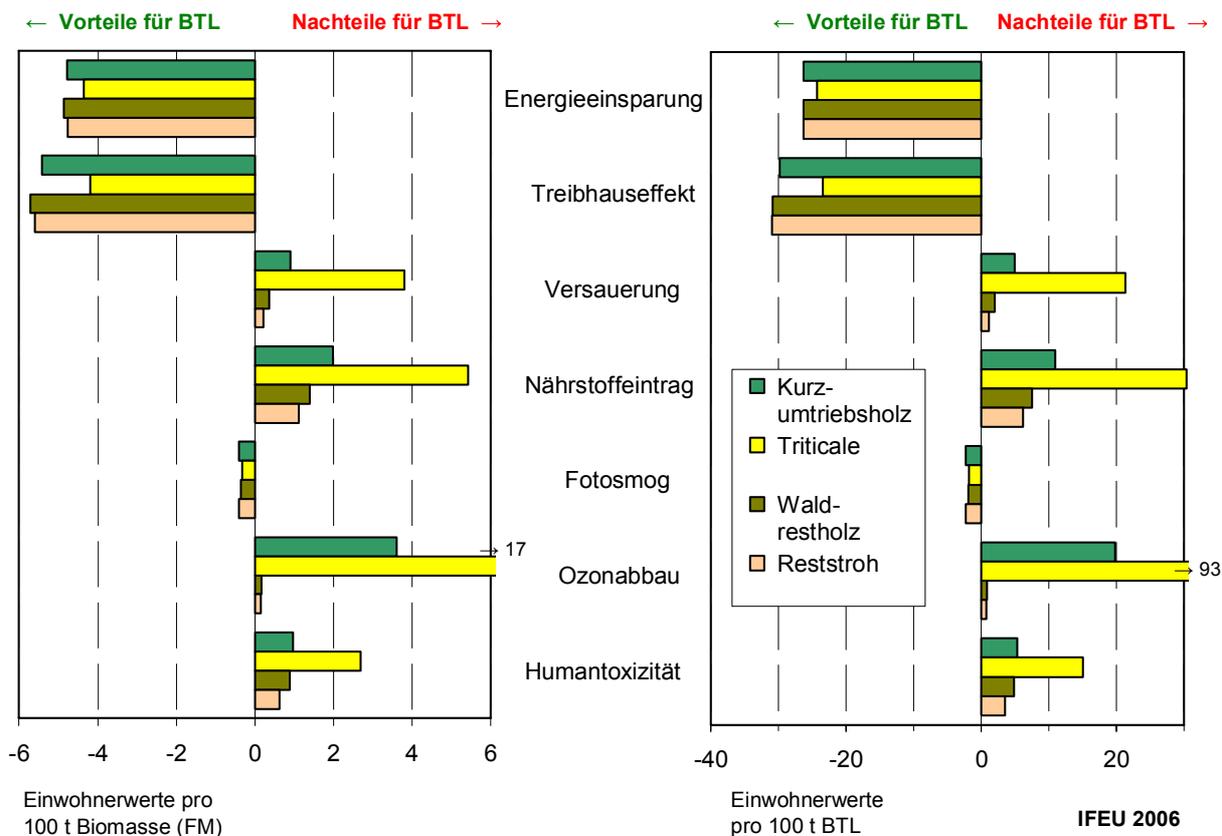


Abb. 4-7 Vor- und Nachteile bei der Nutzung der verschiedenen Biomassearten für die BTL-Produktion nach TU Freiberg (zentral) gegenüber fossilen Kraftstoffen bei Einsatz von jeweils 100 t Biomasse (Feuchtmasse) bzw. 100 t BTL

Lesebeispiel für den ersten Balken des linken Diagramms:

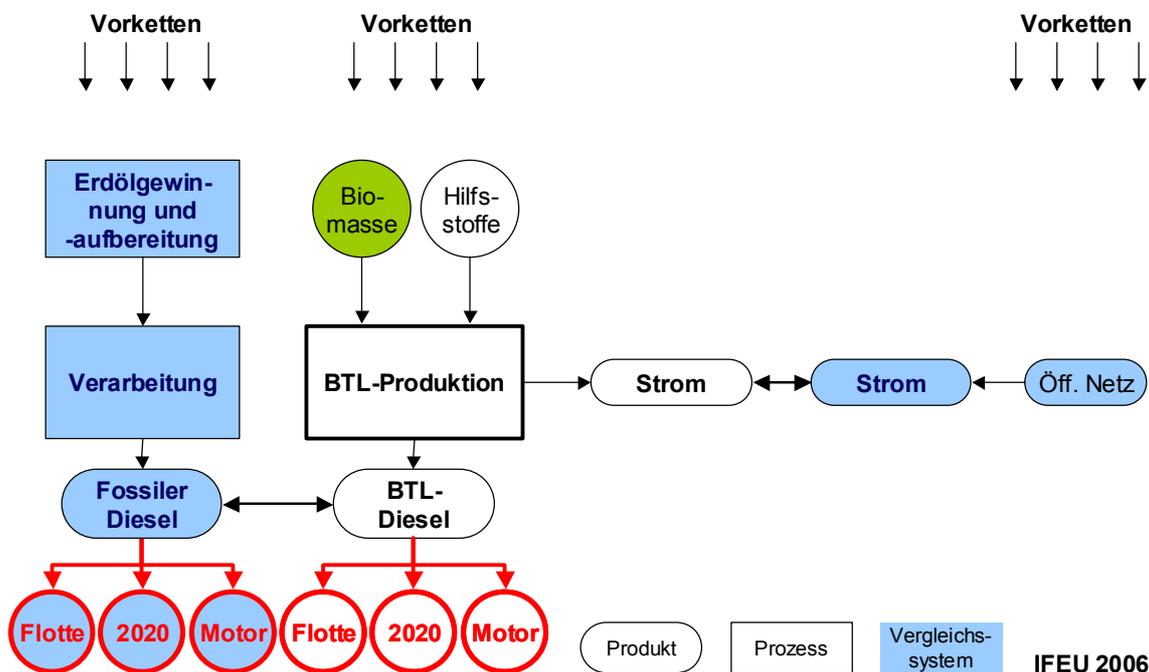
Dargestellt sind die Ergebnisse für Energieeinsparung für den Vergleich von BTL aus Kurzumtriebsholz nach dem Konzept der TU Freiberg (zentral) und konventionellem Dieselmotorkraftstoff im Szenario „Ziel“.

Bei der Verwendung von BTL anstelle von Diesel lässt sich pro 100 t Kurzumtriebsholz so viel Energie einsparen wie etwa 5 Bundesbürger jährlich im Durchschnitt benötigen.

Ergebnisse

- Die Ergebnisse für BTL-Kraftstoffe aus den verschiedenen Biomassearten fallen für alle Umweltwirkungen jeweils gleichgerichtet aus.
- **Vergleich: Anbaubiomasse – Reststoffe:** Für viele Fragestellungen zum Thema Bioenergie verbietet sich ein Vergleich „Anbaubiomasse versus Reststoffe“, da diese Biomasserohstoffe unterschiedlichen Flächen entstammen, unterschiedliche Massenpotenziale aufweisen etc. (s. ausführliche Diskussion in [Reinhardt & Zemanek 2000]). Für zwei spezielle Fälle von Fragestellungen, die Bezug auf die Feuchtmasse bzw. auf den Kraftstoff nehmen, zeigen die Ergebnisse in Abb. 4-7, dass die BTL aus Reststoffen günstiger ausfallen als solche aus Anbaubiomasse. Dies liegt insbesondere an den landwirtschaftlichen Aufwendungen zur Bereitstellung der Anbaubiomasse.
- **Vergleich Anbaubiomasse: Triticale versus Kurzumtriebsholz:** Triticale zeigt in allen Umweltwirkungen – zum Teil sehr deutliche – Nachteile gegenüber Kurzumtriebsholz. Dies hängt mit den vergleichsweise deutlich höheren Aufwendungen in der Landwirtschaft zusammen. Dabei spielt die Stickstoffdüngung die größte Rolle, aufgrund der durch mikrobiologische Prozesse im Boden Ammoniak und Lachgas freierwerden.
- **Vergleich Reststoffe: Waldrestholz versus Stroh:** Die allgemeine Aussage, wie sie beim Vergleich Anbaubiomasse versus Reststoffe formuliert wurde, gilt auch hier: Dieser Vergleich ist nur für ganz bestimmte Fragestellungen zulässig. Liegt eine solche vor und hat das zur Folge, dass dadurch die Ergebnisse auf die Feuchtmasse bzw. auf den BTL-Kraftstoff bezogen werden müssen, dann zeigen sie, dass zwischen Waldrestholz und Stroh keine signifikanten Unterschiede auftreten. Der Mehraufwand zum Einsammeln des Waldrestholzes entspricht in etwa der entgangenen Düngewirkung bei der Strohnutzung (s. Abschnitt 3.2.2).

4.4.2 Nutzungsemissionen



Für die Emissionen der Nutzung von BTL und fossilem Kraftstoff in Fahrzeugen werden mehrere Varianten analysiert.

2020: Im Basisszenario wird davon ausgegangen, dass die Kraftstoffe im deutschen bzw. europäischen Fahrzeugen von 2020 und Folgejahren genutzt werden und – in erster Näherung – keine Emissionsunterschiede zwischen BTL-Diesel und fossilem Dieselkraftstoff auftreten.

Flotte: Dieses Szenario betrachtet den Fall, dass BTL-Kraftstoffe in 2020 oder den Folgejahren gezielt insbesondere in Flotten eingesetzt werden, bei denen die BTL zu Emissionsminderungen gegenüber Dieselkraftstoff führen, wie dies beispielsweise in Euro-4-Fahrzeugen der Fall ist. Für diesen Fall werden bei Nutzung von BTL gegenüber fossilem Dieselkraftstoff Reduktionen für Kohlenwasserstoffe (Methan und NMHC) und Kohlenmonoxid von jeweils 50 % angesetzt. Bei den NO_x und Partikeln werden keine Minderungsraten angenommen.

Motor: Dieses Szenario betrachtet den Fall besonderer Motorkonzepte, die von dem üblichen Diesel- bzw. Otto-Prinzip abweichen und sich durch BTL-bedingte, besonders niedrige NO_x -Emissionen auszeichnen. Für dieses Szenario wird eine NO_x -Reduktion um 50 % angesetzt.

Für die exemplarische Darstellung der Ergebnisse wird BTL aus Reststroh betrachtet, das die geringsten Umweltwirkungen hat. Die Anteile der Nutzung an den Gesamtwirkungen werden damit größer und Unterschiede zwischen den Fahrzeugen deutlicher.

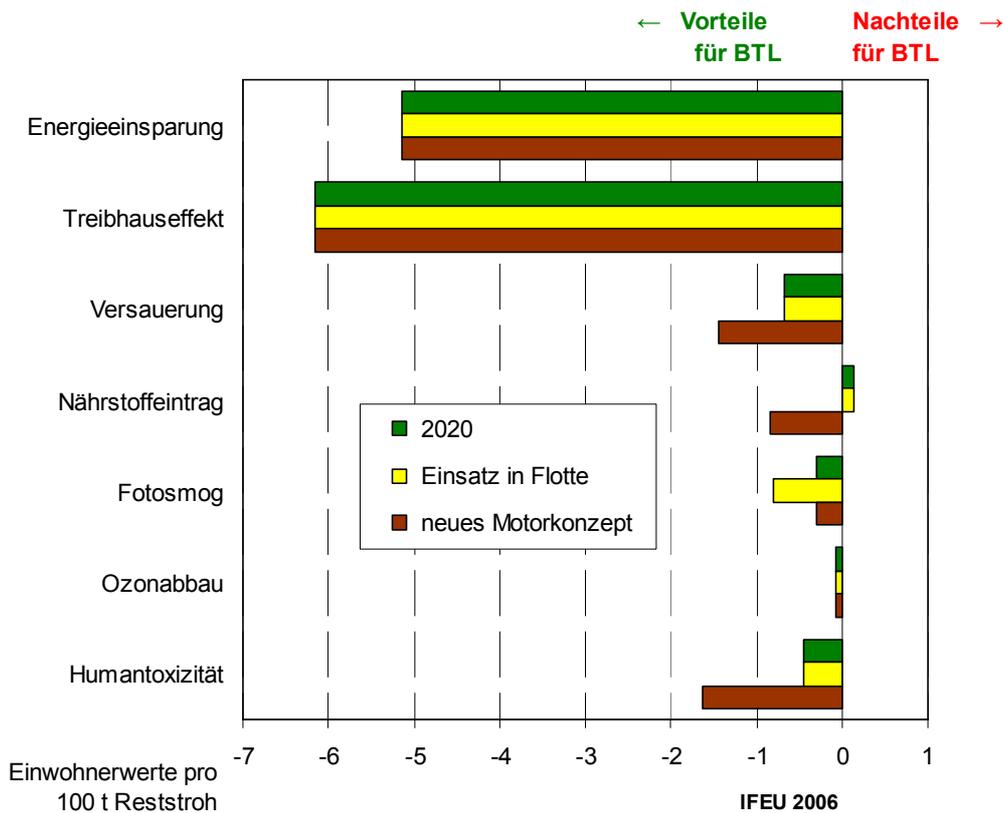


Abb. 4-8 Umweltwirkungen für BTL nach dem Choren-Konzept gegenüber fossilen Kraftstoffen in verschiedenen Fahrzeugen bei Einsatz von 100 t Reststroh

Lesebeispiel für die ersten drei Balken:

Dargestellt sind die Ergebnisse für Energieeinsparung für den Vergleich von BTL aus Reststroh nach dem Choren-Verfahren und konventionellem Dieselmotorkraftstoff in verschiedenen Fahrzeugen.

Bei der Verwendung von BTL anstelle von Diesel lässt sich pro 100 t Reststroh so viel Energie einsparen wie etwa fünf Bundesbürger jährlich im Durchschnitt benötigen, nahezu unabhängig davon, in welchem Fahrzeug es eingesetzt wird.

Ergebnisse

- Die Einsparung fossiler Energien, der Treibhauseffekt wie auch der Ozonabbau sind von den unterschiedlichen Szenarien nicht betroffen, so dass sich hier auch keine Ergebnisunterschiede zeigen können.
- Bei den anderen Umweltwirkungen ändern sich die Ergebnisse zum Teil deutlich, d. h. die Nutzungsphase spielt eine nicht unerheblich Rolle für die Ergebnisse. Andererseits sind die Änderungen überschaubar und dominieren die Ergebnisse nicht uneingeschränkt. Erst eine weiterführende Bewertung, die beispielsweise die Rolle des Fotosmogs (der einzige bedeutsame Vorteil bei „Flotte“) gegenüber den anderen Umweltwirkungen diskutiert, kann über die Bedeutung dieser Zusammenhänge und den daraus resultierenden Optimierungspotenzialen Aufschluss liefern, was nicht Inhalt dieser Untersuchung ist.

4.4.3 Szenario „H2-Import“

Für die Produktion von BTL ist grundsätzlich Wasserstoff nötig, der in der Regel aus der eingesetzten Biomasse im Vergasungsprozess direkt und zusätzlich durch eine Shiftreaktion hergestellt wird (s. Beschreibung der Verfahren in Abschnitt 6.1.2). Die Wasserstoffproduktion aus Biomasse reduziert jedoch die verfügbare CO-Menge aus der Biomasse. Zur Steigerung der BTL-Ausbeute durch höhere C-Bindung kann Wasserstoff aus anderen Quellen eingesetzt werden. In diesem Abschnitt werden entsprechende Szenarien betrachtet.

Der von außen zugeführte Wasserstoff kann aus einer Reihe unterschiedlicher Quellen entstammen: Er kann aus fossilen Rohstoffen in Reformern hergestellt werden, insbesondere aus Methan und/oder anderen Kohlenwasserstoffen, oder elektrolytisch aus Strom. Strom wiederum lässt sich aus fossilen bzw. erschöpflichen oder aus regenerativen Energieträgern produzieren (Windkraft, Wasserkraft, Strom aus Biomasse etc.). Damit gibt es eine kaum überschaubare Fülle an potenziellen Wasserstoffproduktionspfaden bzw. -kombinationen. Im Rahmen der Diskussion um BTL stehen u. E. folgende Überlegungen im Vordergrund:

- **Wasserstoff aus fossilem Strom:** Im Regelfall übersteigen die Produktionskosten von Wasserstoff aus fossilen bzw. erschöpflichen (einschließlich Kernkraft) Stromquellen die Kosten der Erzeugung aus Methan oder anderen Kohlenwasserstoffen per Reformers bei Weitem [WI, DLR & IFEU 2006]. Insofern scheint uns dieses Szenario für die nächsten Dekaden unrealistisch (für den Regelfall).
- **Wasserstoff aus regenerativem Strom:** Neben dem Kostenargument, das auch bei regenerativ erzeugtem Strom trotz steigender Preise für konventionelle Energieträger greifen mag, zählt hier – im Sinn von Ökobilanzen – insbesondere die Frage, ob es sich bei dem regenerativen Strom um eine gezielte Produktion oder um Überschussstrom handelt. Hintergrund hierfür ist, dass ein Überschussstrom in der Ökobilanz ohne Umweltbelastung geführt werden könnte. Bis auf mögliche Ausnahme- oder Spezialfälle (z. B. Stichwort „Island“) sind wir jedoch der Meinung, dass Strom auch zukünftig – wie heute auch – einen Engpass in der Energieversorgung darstellt und somit gezielt produziert wird. Würde zukünftig also regenerativer Strom zur Wasserstoffherstellung verwendet werden, so stünde er für andere Zwecke nicht zur Verfügung und müsste deshalb auf anderem Weg (in letzter Konsequenz auf konventionellem Weg) produziert werden. Dies läuft auf den zuvor beschriebenen Fall hinaus.
- **Wasserstoff aus Kohlenwasserstoffen, z. B. Erdgas:** Die Wasserstoffproduktion aus Kohlenwasserstoffen per Reformers ist eine etablierte Technologie. Von den potenziell einsetzbaren Kohlenwasserstoffen erscheint uns Methan (Erdgas) als der wahrscheinlichste, denn im Regelfall dürfte eine BTL-Anlage, deren Standort nach Verfügbarkeit der Biomasse gewählt werden wird, nicht direkt mit einer Erdölraffinerie kombiniert sein, bei der für eine Wasserstoffproduktion geeignete Kohlenwasserstofffraktionen anfallen. Aufgrund des für kleinere Anlagen kaum tragbaren Kostenpotenzials ist eine Erdgas-Reformierung für die dezentralen Varianten eher unrealistisch, wird hier aber aus Symmetriegründen dennoch dargestellt.
- **Wasserstoffzukauf:** Für solche Fälle, bei denen Wasserstoff an anderer Stelle produziert und zu den BTL-Anlagen transportiert würde, gilt das für den Strom oben Skizzierte analog: es müsste aus Ökobilanzsicht eine entsprechende Gutschrift für den entgangenen Nutzen gegengerechnet werden, solange es den Wasserstoff als Überschuss gibt – was wir für den Regelfall in der Zukunft nicht sehen.

Damit kann zusammengefasst werden: Das u. E. realistischste und unter Ökobilanzgesichtspunkten sinnvollste Szenario für den Fall einer zusätzlichen Wasserstoffproduktion zur Steigerung der BTL-Ausbeute ist die Wasserstoffproduktion aus Erdgas (s. Abb. 4-9). In Einzelfällen mögen zukünftig natürlich auch die anderen Varianten realisiert werden; dies wäre aber ohne Relevanz für den Normalfall, der hier im Vordergrund steht.

An dieses Szenario knüpft sich eine weitere Fragestellung direkt an: Da das von außen zugekaufte Erdgas zur Erhöhung der Ausbeute an BTL eingesetzt wird, könnte man auch fragen, wie die Umweltbilanz aussähe, würde man auf den Zukauf verzichten und das Erdgas direkt im Transportsektor einsetzen. Auch auf diese Frage soll in diesem Abschnitt eine Antwort gegeben werden.

Da es sich aber um zwei deutlich unterschiedliche Fragestellungen handelt, werden im Folgenden beide Fragestellungen – bei jeweils gleichem Biomasseeinsatz (!) – getrennt behandelt:

- I Zusätzlicher Erdgaseinsatz für die Wasserstoffproduktion zur Erhöhung der BTL-Ausbeute.
- II Erdgasverwendung im Transportsektor, dadurch keine Erhöhung der BTL-Ausbeute.

I Zusätzlicher Erdgaseinsatz zur Wasserstoffproduktion

Wie beschrieben vergleicht dieses Szenario den Fall, dass für eine optimierte BTL-Produktion Wasserstoff aus Erdgas zusätzlich produziert wird.

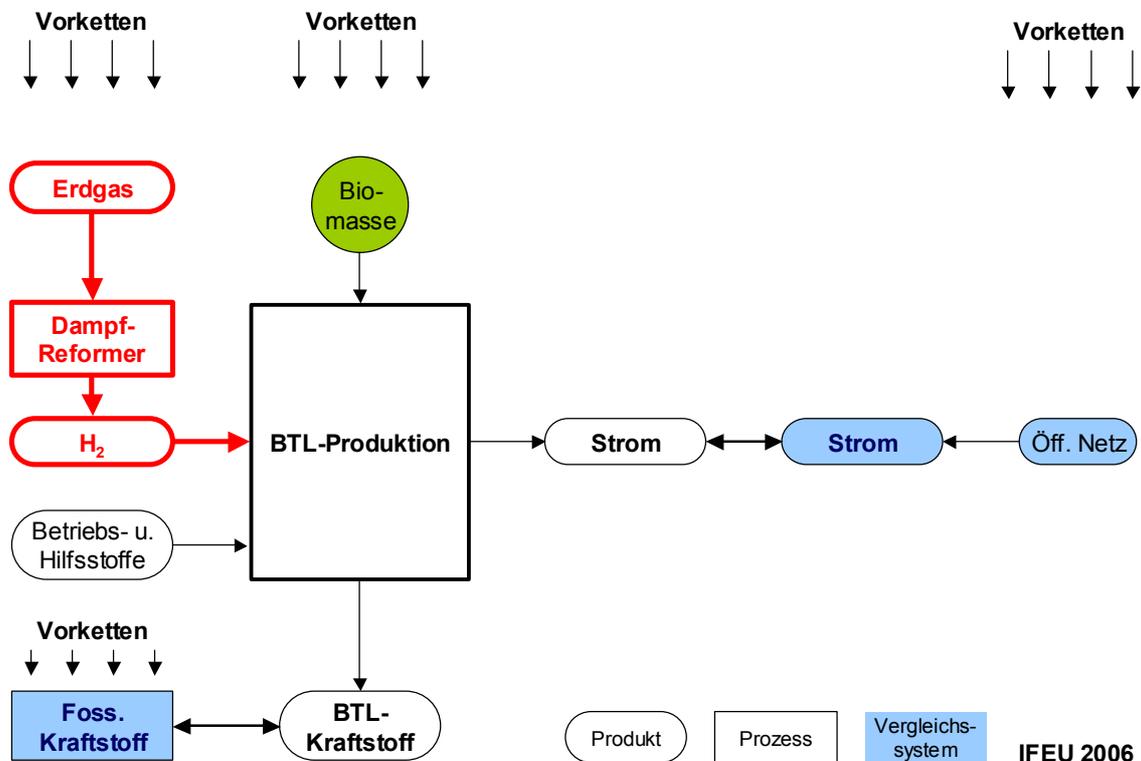


Abb. 4-9 Grobschematische Darstellung des Lebenswegvergleichs BTL-Verfahren gegenüber fossilen Kraftstoffen bei zusätzlicher Wasserstoffproduktion (Szenario „H2-Import“)

In der Darstellung der Ergebnisse wird mit dem Kurzumtriebsholz dieselbe Biomasse gewählt wie im Basisvergleich der Verfahren (Abschnitt 4.1), die Ergebnisse gelten aber auch für die anderen Biomassearten.

Ergebnisse

- Bis auf den Treibhauseffekt zeigen alle Umweltwirkungen im Szenario „H2-Import“ deutliche Nachteile gegenüber einer BTL-Produktion ohne zusätzlicher Wasserstoffproduktion (s. Abb. 4-10). D. h., die zusätzliche Wasserstoffproduktion aus Erdgas verursacht deutlich mehr Umweltauswirkungen als durch die Mehrproduktion an BTL vermieden werden (Ausnahme: Treibhauseffekt).
- Der Vorteil der Einsparung von Treibhausgasen beim Szenario „H2-Import“ hängt damit zusammen, dass durch die Mehrproduktion an BTL eine bestimmte Menge an Dieselmotorkraftstoff zusätzlich substituiert wird, die insgesamt mehr Treibhausgas eingespart, als insgesamt durch den Einsatz des Erdgases freigesetzt werden. Vereinfacht dargestellt, handelt es sich hier also um einen Vergleich „Erdgas versus Heizöl“, wobei das Erdgas einen relativ schlechten Wirkungsgrad in seiner Nutzung aufweist.

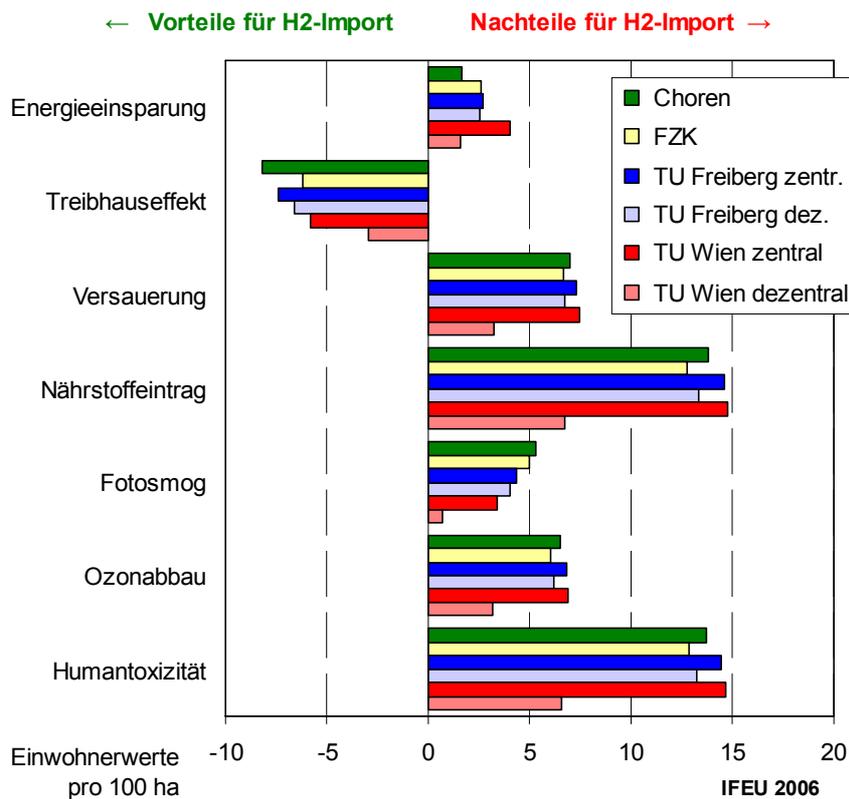


Abb. 4-10 Umweltwirkungen für die verschiedenen BTL-Verfahren bei Einsatz von Kurzumtriebsholz von 100 ha Anbaufläche und zusätzlichem Wasserstoffproduktion (Szenario „H2-Import“) im Vergleich mit dem Szenario „Ziel“

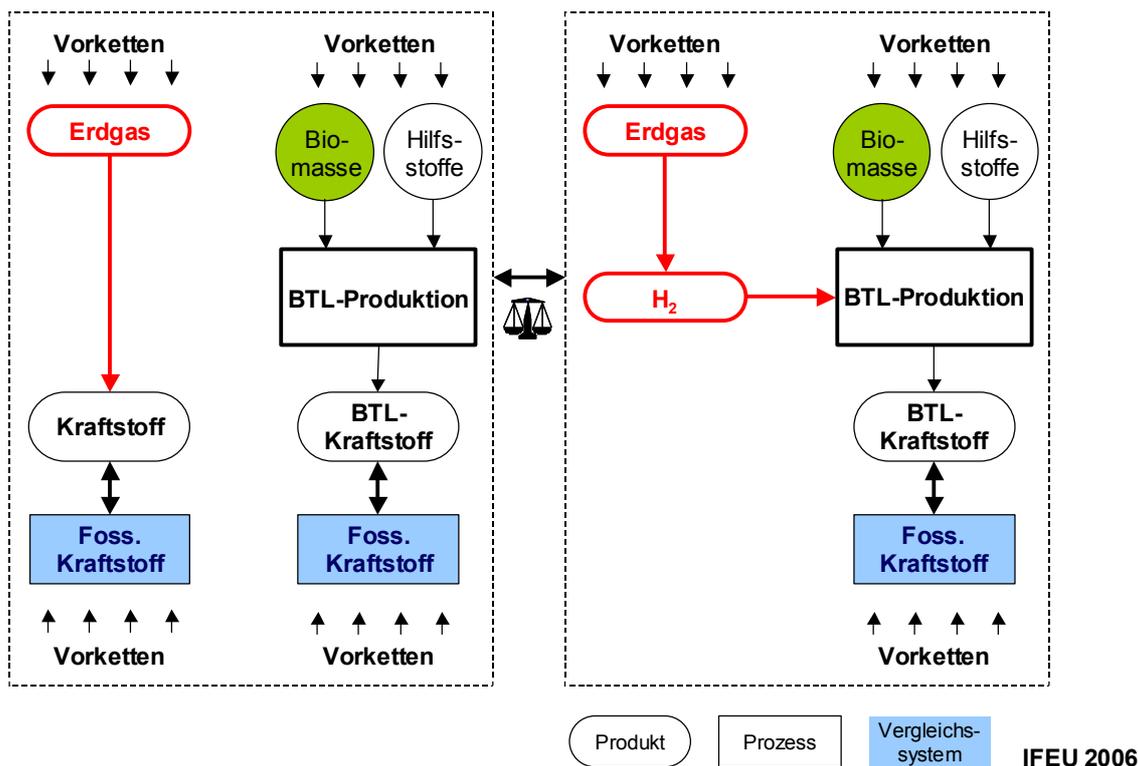
Lesebeispiel für den ersten Balken:

Dargestellt sind die Unterschiede in der Energieeinsparung für den Einsatz von BTL aus Kurzumtriebsholz nach dem Choren-Verfahren statt konventionellem Dieseldieselkraftstoff, wenn aus Erdgas erzeugter Wasserstoff zusätzlich für die BTL-Produktion verwendet wird und wenn dies nicht der Fall ist.

Wird BTL-Kraftstoff anstelle von Diesel eingesetzt, lässt sich mit dem Choren-Verfahren ohne zusätzlich eingesetzten Wasserstoff gegenüber der Variante mit Wasserstoff-Import pro 100 ha Kurzumtriebsholz so viel Energie einsparen wie etwa zwei Bundesbürger jährlich im Durchschnitt benötigen.

II Erdgasverwendung im Transportsektor statt Wasserstoffproduktion

Wie oben beschrieben vergleicht dieses Szenario den Fall, dass für eine optimierte BTL-Produktion Wasserstoff aus Erdgas zusätzlich produziert wird, und den Fall, dass das Erdgas statt für die Erhöhung der BTL-Produktion direkt als Kraftstoff eingesetzt wird. In letzterem Fall ersetzt das Erdgas fossilen Ottokraftstoff und die BTL-Herstellung findet wie im Szenario „Ziel“ statt. Damit werden in beiden Systemen die gleichen Mengen Biomasse und Erdgas eingesetzt. An BTL-Kraftstoff und eingesparten fossilen Kraftstoffen ergeben sich jeweils unterschiedliche Mengen.



Lesebeispiel für die ersten zwei Balken von Abb. 4-11:

Dargestellt ist die Energieeinsparung für den Vergleich von BTL aus Kurzumtriebsholz nach dem Choren-Verfahren bei Verwendung von Erdgas zur Wasserstoffherstellung gegenüber der Nutzung derselben Erdgasmenge als Kraftstoff und BTL-Produktion ohne zusätzliche Wasserstoffverwendung.

Bei der Verwendung von Erdgas als Kraftstoff und der Produktion von BTL-Kraftstoff ohne zusätzlich eingesetzten Erdgas-Wasserstoff lässt sich pro 100 ha Kurzumtriebsholz mehr Energie einsparen, als wenn das Erdgas zur Erhöhung der BTL-Produktion verwendet wird – und zwar etwa so viel Energie, wie etwa 5 Bundesbürger jährlich im Durchschnitt benötigen.

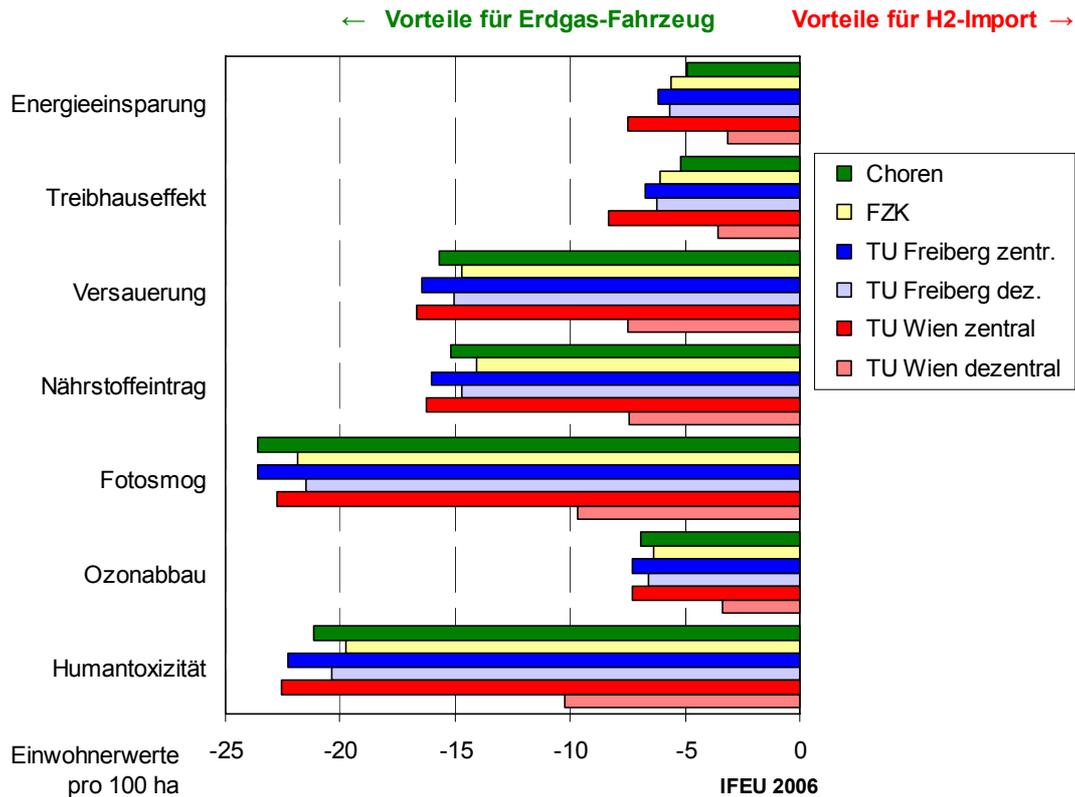
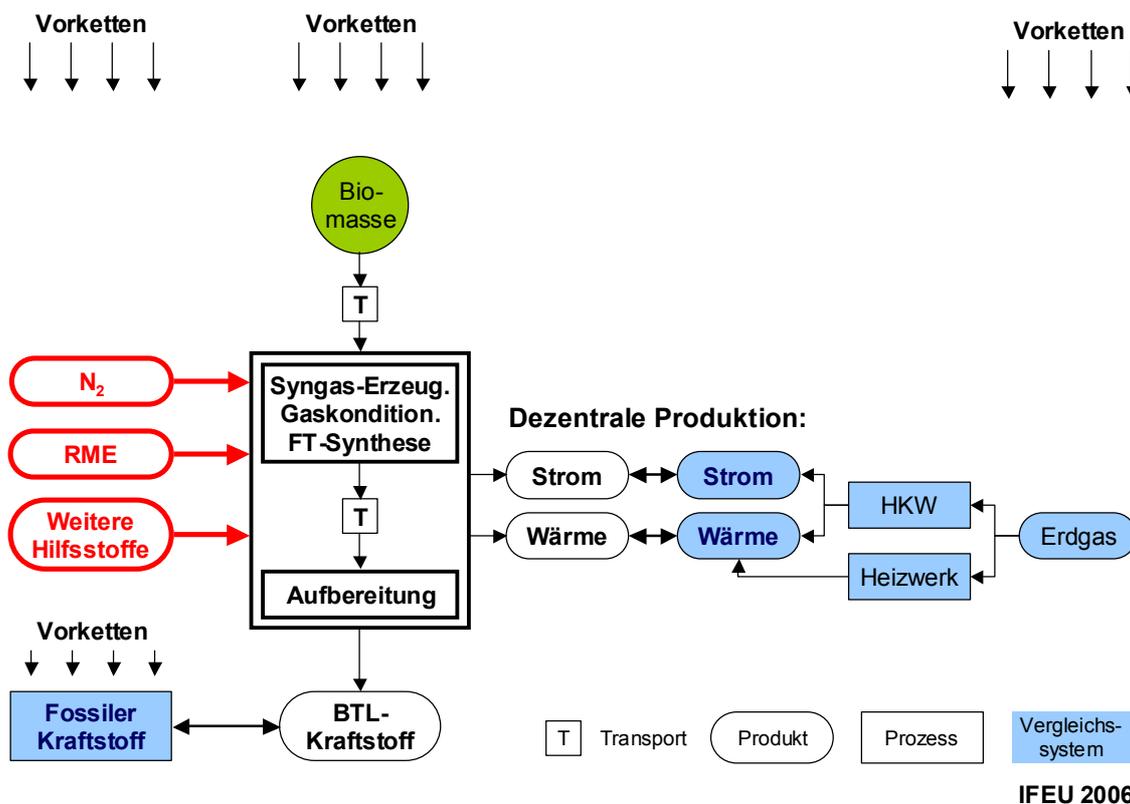


Abb. 4-11 Umweltwirkungen für die verschiedenen BTL-Verfahren bei Einsatz von Kurzumtriebsholz von 100 ha Anbaufläche und zusätzlicher Verwendung von Erdgas als Kraftstoff im Vergleich zur Nutzung der gleichen Menge Erdgas zur Produktion von Wasserstoff für eine erhöhte BTL-Produktion (Szenario „H2-Import“)

Ergebnisse

- Die direkte Nutzung des Erdgases als Kraftstoff zeigt in allen betrachteten Umweltwirkungen klare Vorteile gegenüber einer Verwendung zur Wasserstoffproduktion und der damit einhergehenden BTL-Produktion. Hauptgrund hierfür ist, dass bei der Erdgasnutzung im Transportsektor eine größere Menge an konventionellem Kraftstoff ersetzt wird als durch die Mehrproduktion an BTL im „H2-Import“-Szenario. Die Differenzen bei Versauerung, Nährstoffeintrag, Fotosmog und Humantoxizität können dabei je nach den Nutzungsemissionen durchaus anders ausfallen. Dabei ist die Verlagerung der Emissionen zwischen Otto- und Dieselfahrzeug (für den Erdgas- bzw. zusätzlichen BTL-Betrieb) ausschlaggebend.
- Die dargestellten Vorteile auf Seiten der Direktnutzung von Erdgas im Transportsektor gelten darüber hinaus auch für die Vielzahl der durchgeführten Sensitivitätsanalysen. Lediglich im Fall deutlich unterschiedlicher Nutzungsemissionen (s. Abschnitt 4.4.2) können sich andere Ergebnisse ergeben – dann aber nur bei den davon betroffenen Wirkungskategorien Versauerung, Nährstoffeintrag, Fotosmog und Humantoxizität: Wenn bestimmte Emissionen, insbesondere NO_x und Partikel, bei der Nutzung von BTL um mehr als 50 % unter denen der Nutzung fossilen Kraftstoffs liegen (in der Abbildung nicht dargestellt), hat das Szenario „H2-Import“ für einzelne Produktionskonzepte und Umweltwirkungen Vorteile. Die Energieeinsparung, Treibhauseffekt und Ozonabbau bleiben davon allerdings unberührt.

4.4.4 Hilfsstoffe



Für das Konzept der TU Wien liegen detaillierte Daten zu einer größeren Zahl von Hilfs- und Betriebsstoffen vor. Aber auch für die anderen Konzepte ist eine Reihe an Inputs neben der Biomasse vorgesehen. In dieser Sensitivitätsanalyse wird die Relevanz des Produktionsaufwands für diese Hilfs- und Betriebsstoffe untersucht.

Am Beispiel der BTL-Produktion nach dem Konzept der TU Wien (dezentral) werden zwei energetisch aufwändige Stoffe (flüssiger Stickstoff und RME) herausgegriffen. In drei Varianten wird der BTL-Lebensweg ohne die Produktionsaufwendungen jedes einzelnen dieser Stoffe und schließlich aller Betriebsstoffe untersucht. Dabei werden die Ergebnisse bei Nutzung von Waldrestholz dargestellt, das als Reststoff relativ geringe Umweltwirkungen hat. Die Anteile der Hilfs- und Betriebsstoffe an den Gesamtwirkungen werden damit größer und Unterschiede deutlicher.

Lesebeispiel für den ersten Balken in Abb. 4-12:

Dargestellt sind die Ergebnisse für Energieeinsparung für den Vergleich von BTL aus Kurzumtriebsholz nach dem Verfahren der TU Wien (dezentral) und konventionellem Kraftstoff.

Bei der Verwendung von BTL anstelle von fossilem Kraftstoff lässt sich pro 100 t Waldrestholz (Feuchtmasse) so viel Energie einsparen wie etwa 6 bis 7 Bundesbürger jährlich im Durchschnitt benötigen.

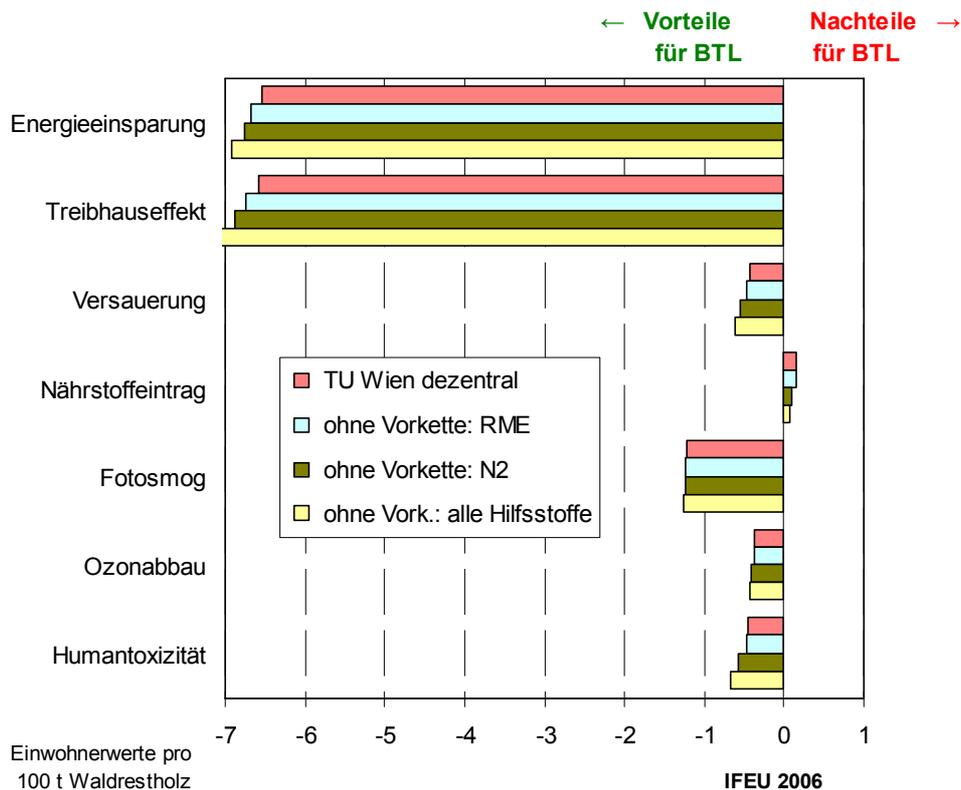
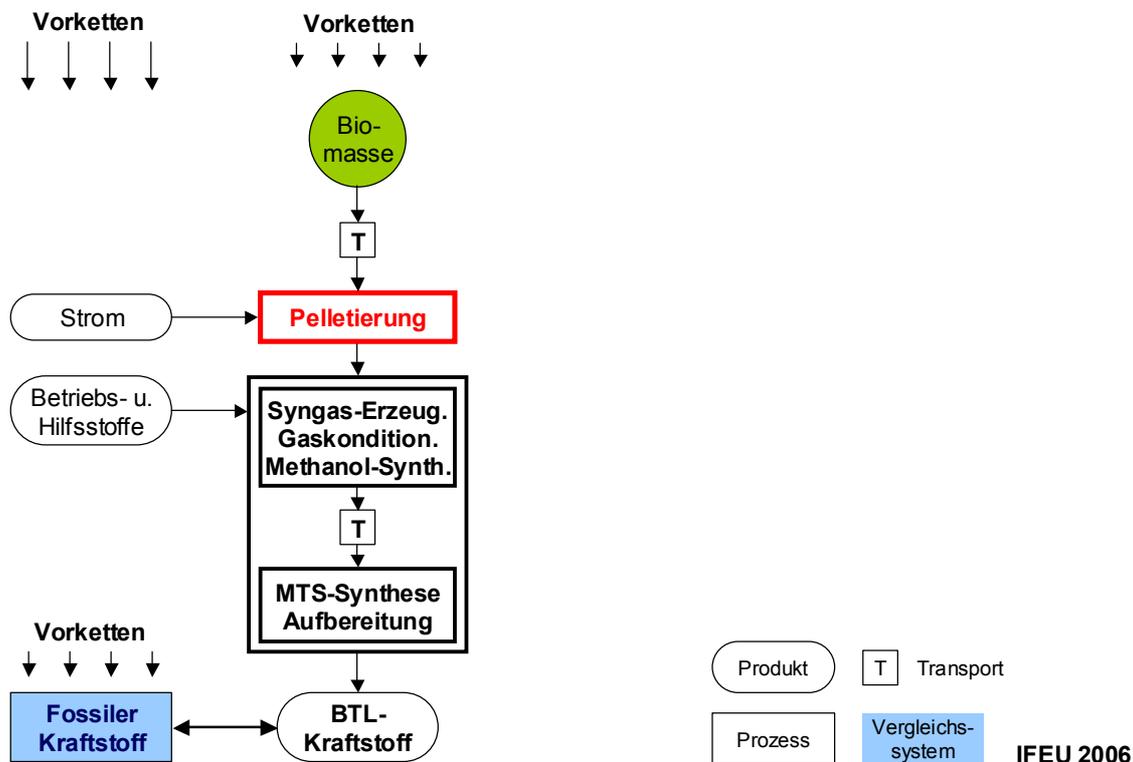


Abb. 4-12 BTL aus Waldrestholz im Verfahren der TU Wien (dezentral) mit Berücksichtigung der Aufwendungen der Produktion („Vorketten“) aller Hilfs- und Betriebsstoffe und ohne die Vorketten ausgewählter oder aller Hilfs- und Betriebsstoffe

Ergebnisse

- Die Aufwendungen zur Produktion der Hilfs- und Betriebsstoffe spielen für die Gesamtergebnisse keine wesentliche Rolle. Die Vorketten aller Betriebsstoffe machen weniger als 8 % des Ergebnisses bei der Energieeinsparung und dem Treibhauseffekt aus. Für die übrigen Umweltwirkungen sieht es ähnlich aus.
- Die Aufwendungen zur Produktion von Stickstoff nach dem Linde-Verfahren und von Dieselkraftstoff, der als Ersatz für das nicht als Kraftstoff, sondern für die BTL-Produktion eingesetzte RME dient, machen in den Umweltwirkungen über 70 % der Aufwendungen aller Hilfs- und Betriebsstoffe aus, bei Energieeinsparung und Treibhauseffekt sogar bis über 90 %. Für die anderen BTL-Konzepte ist daher der Einfluss der Hilfs- und Betriebsstoffe noch geringer als für das Wiener Verfahren.
- Da die Gesamtheit aller Hilfs- und Betriebsstoffe keine wesentliche Rolle spielt, sind mögliche Fehler durch Ungenauigkeiten der Basisdaten bei diesen Stoffen von noch geringerer Bedeutung. D. h., die Bilanzierung der Hilfs- und Betriebsstoffe ist für die Erfordernisse dieser Studie hinreichend belastbar.

4.4.5 Pelletierung



Im Basisszenario des BTL-Konzepts der TU Freiberg ist eine Pelletierung der Biomasse vorgesehen, da derzeit kein Verfahren in Sicht ist, Stroh unpelletiert in die Wirbelschicht einzubringen, Holz und Stroh aber bevorzugt mit einem für beide Biomassen geeigneten einheitlichen Fördersystem eingebracht werden sollen. Für Holz ist außerdem der zukünftige Einsatz von Mikrohackgut (2 bis 4 cm Größe) angedacht, das ohne wesentlich höheren Energieaufwand als größerer Hackschnitzel hergestellt werden könnte.

In dieser Sensitivitätsanalyse wird untersucht, welchen Einfluss die Pelletierung auf die Ergebnisse für das Verfahren der TU Freiberg hat. Die Analyse wurde für die Randbedingungen des Basisvergleichs aller Verfahren (Abschnitt 4.1) durchgeführt, um so eine Einordnung der Ergebnisse zu denen der anderen Verfahren zu ermöglichen.

Lesebeispiel für die ersten beiden Balken in Abb. 4-13:

Dargestellt sind die Ergebnisse für Energieeinsparung für den Vergleich von BTL aus Kurzumtriebsholz nach dem Verfahren der TU Freiberg (zentrales Konzept) und konventionellem Dieseldieselkraftstoff im Szenario „Ziel“ mit und ohne die Aufwendungen für die Pelletierung der Biomasse.

Bei der Verwendung von BTL aus pelletierter Biomasse anstelle von Diesel lässt sich pro 100 ha Kurzumtriebsholz so viel Energie einsparen, wie etwa 75 Bundesbürger jährlich im Durchschnitt benötigen, im Fall nicht pelletierter Biomasse ist es so viel Energie, wie etwa 80 Bundesbürger durchschnittlich benötigen.

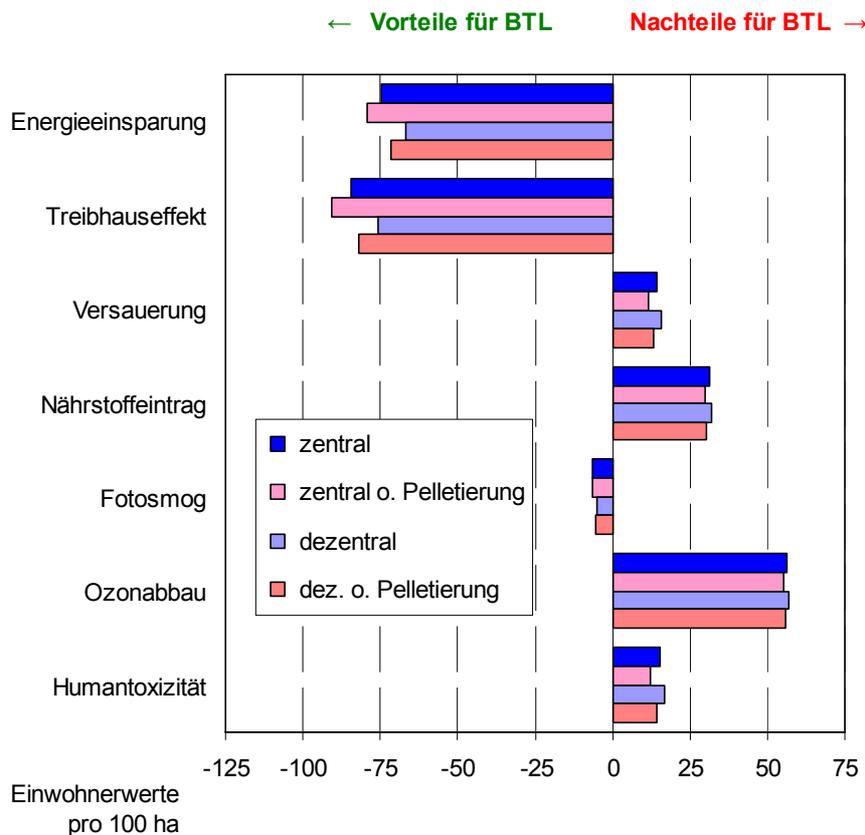
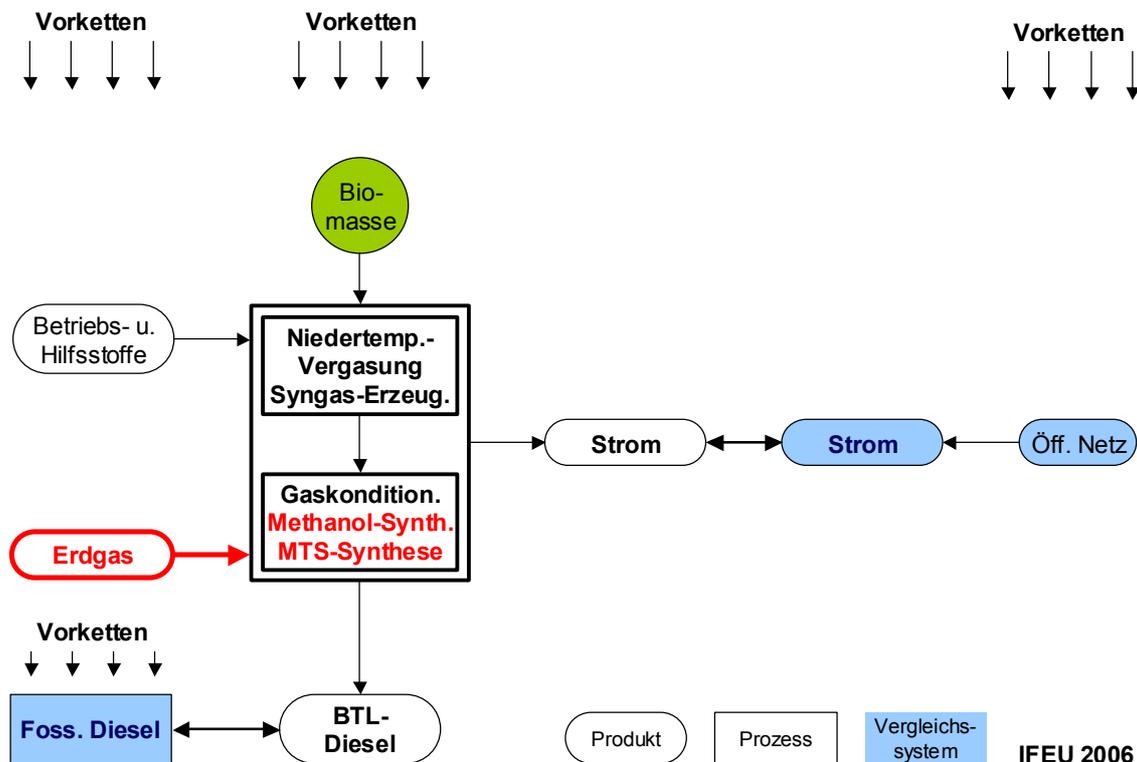


Abb. 4-13 Umweltwirkungen für BTL-Kraftstoff nach dem Verfahren der TU Freiberg mit und ohne Pelletierung der Biomasse gegenüber fossilen Kraftstoffen bei Einsatz von Kurzumtriebsholz von 100 ha Anbaufläche

Ergebnisse

- Der Energieaufwand für die Pelletierung (etwa 1,5% des energetischen Biomasseinputs werden als Strom benötigt) bewirkt eine deutliche Verschlechterung der Bilanz gegenüber dem Fall ohne Pelletierung bei der Energieeinsparung und dem Treibhauseffekt. Dabei verbessern sich die Ergebnisse, wenn die BTL-Produktion nach dem Verfahren der TU Freiberg ohne Pelletierung möglich sein sollte, auf Werte, die für die zentrale Variante in der Nähe des Choren-Verfahrens liegen. Damit wird auch deutlich, dass hier ein gewisses Optimierungspotenzial besteht.
- Die anderen Umweltwirkungen werden von der Stromproduktion weniger stark beeinflusst, so dass sich hier die Unterschiede zu den anderen Verfahren nicht wesentlich verändern.

4.4.6 Szenario „MTS“



In diesem Szenario wurde für das Choren-Konzept, in dem beim Basisszenario die BTL-Kraftstoffsynthese nach dem Fischer-Tropsch-Verfahren erfolgt, die Kraftstoffsynthese nach dem MTS-Verfahren (Methanol-to-Synfuel) betrachtet, bei dem zunächst Methanol und daraus dann BTL-Diesel erzeugt wird.

Im Szenario „MTS“ ist der Wirkungsgrad der Konversion von der Biomasse zum BTL um ca. 4 Prozentpunkte höher. Dafür werden zusätzlich 5 % Erdgas (bezogen auf die Biomasseenergie) zugeführt. An den übrigen In- und Outputs ändert sich nichts.

Die Analyse wurde für Kurzumtriebsholz wie im Basisvergleich der Verfahren (Abschnitt 4.1) durchgeführt, um den Vergleich mit den Ergebnissen des Konzepts der TU Freiberg zu ermöglichen, das mit der MTS-Synthese als Standard arbeitet.

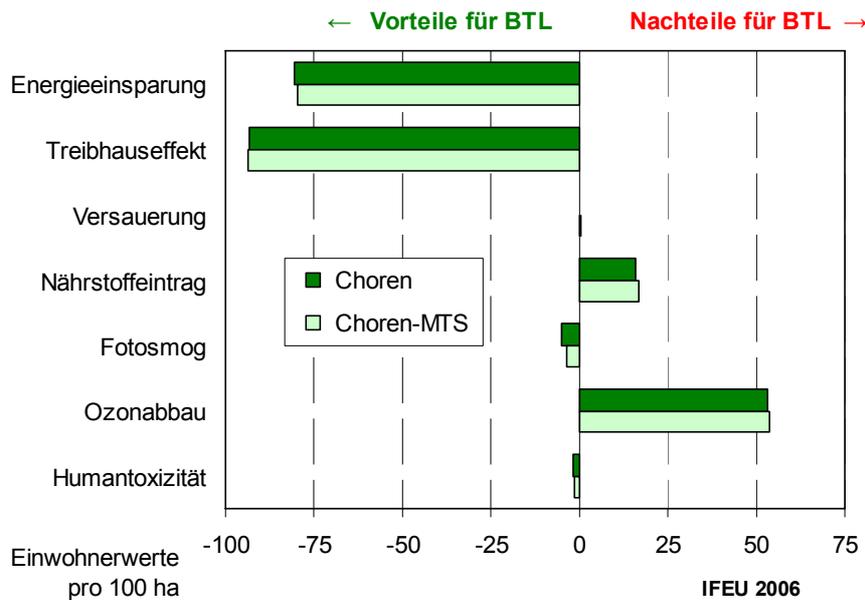


Abb. 4-14 Umweltwirkungen der Szenarien „Ziel“ und „MTS“ für das Choren-Verfahren gegenüber fossilen Kraftstoffen bei Einsatz von Kurzumtriebsholz von 100 ha Anbaufläche

Lesebeispiel für die ersten beiden Balken:

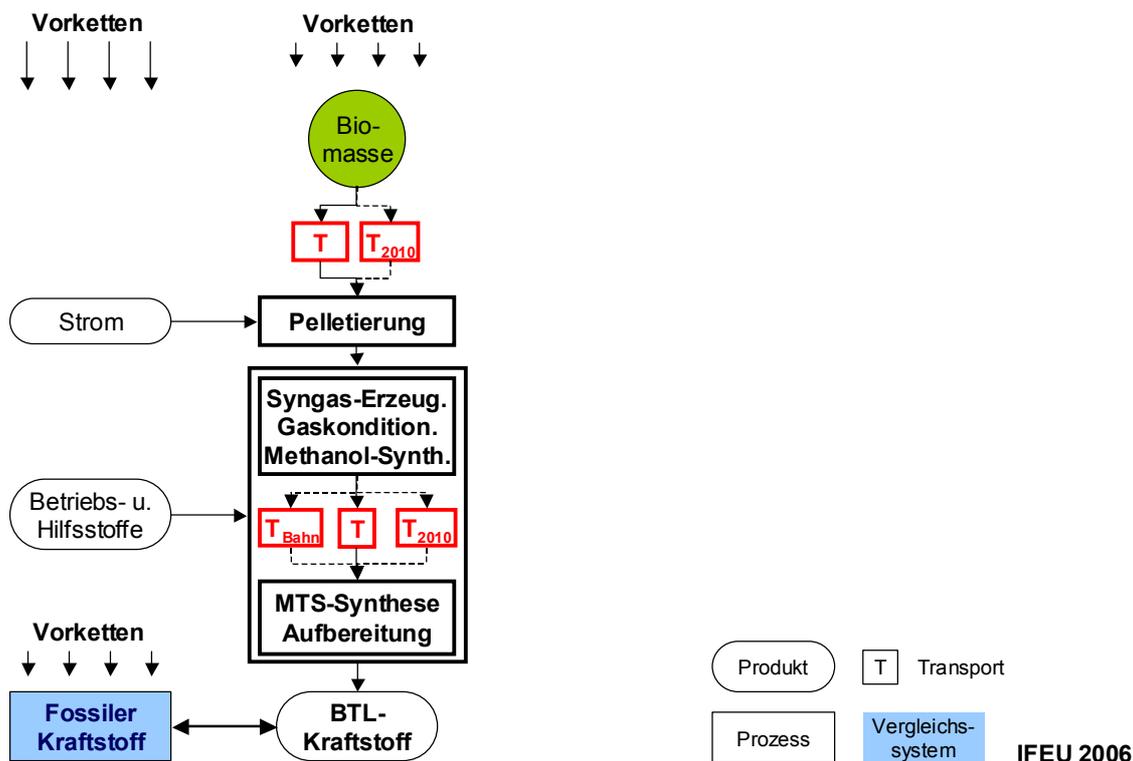
Dargestellt sind die Ergebnisse für Energieeinsparung für den Vergleich von BTL aus Kurzumtriebsholz nach dem Choren-Verfahren und konventionellem Dieselmotorkraftstoff für die beiden Szenarien „Ziel“ (= Fischer-Tropsch) und „MTS“.

Bei der Verwendung von BTL anstelle von Diesel lässt sich pro 100 ha Kurzumtriebsholz so viel Energie einsparen wie etwa 80 Bundesbürger jährlich im Durchschnitt benötigen, nahezu unabhängig davon, ob die Kraftstoffsynthese beim Choren-Verfahren über Fischer-Tropsch oder MTS erfolgt.

Ergebnisse

- Allgemein zeigen sich keine großen Änderungen in den Umweltwirkungen, wenn die MTS-Synthese statt der FT-Synthese eingesetzt wird.
- Die Energieeinsparung geht geringfügig zurück. Begründet werden kann dies mit dem Erdgasbedarf, der die Mehrproduktion an BTL überkompensiert (allerdings zukünftig auch entbehrlich werden kann).
- Dagegen bleibt der Treibhauseffekt nahezu konstant, da ähnlich wie im Szenario „H₂-Import“ (s. Abschnitt 4.4.3) die Bereitstellung und Nutzung einer Mehrproduktion von fossilem Dieselmotorkraftstoff etwa so viel fossiles Kohlendioxid verursacht wie die Nutzung des zusätzlichen Erdgases.
- Für die Veränderung der übrigen Umweltwirkungen zeigt sich kein klares Ergebnis zugunsten des einen oder des anderen Verfahrens, die Unterschiede an sich sind jedoch verhältnismäßig klein.

4.4.7 Transporte



Diese Sensitivitätsanalyse untersucht den Einfluss der Transporte auf die Ergebnisse der BTL-Vergleiche. Dabei gibt es grundsätzlich drei Variationsmöglichkeiten: die Transportentfernung, die Wahl der Transportmittel sowie deren Verbrauchs- und Emissionseigenschaften. Da es sich gezeigt hat, dass die Transporte einen nur geringen Einfluss auf die Ergebnisse haben, werden im Folgenden zum Teil relativ extreme Annahmen getroffen – unabhängig von ihrer Realisierbarkeit oder ökonomischen Darstellbarkeit –, um eben dies zu veranschaulichen. Gegenstand sind die Transporte der Biomasse zur (ersten) Konversionsanlage und bei dezentralen Verfahren auch die Transporte der Zwischenprodukte zwischen den einzelnen Konversionsanlagen. Für den Kraftstofftransport zur Tankstelle wird keine Sensitivitätsanalyse vorgenommen, da dieser, wie oftmals bei einem Massentransport eines hochenergiereichen Produktes, die Ergebnisse nicht wesentlich beeinflusst.

Die Transporte der Biomasse zur ersten Konversionsanlage sind aufgrund der unterschiedlichen Flächendichten (Hektarerträge, auch bei Reststoffen) für die verschiedenen Biomassearten unterschiedlich weit (s. Tabelle 7-2 im Anhang). Hier wurde davon ausgegangen, dass in dem zur Versorgung der Anlage notwendigen Umkreis dieser Anlage die jeweilige Biomasse von 20 % der Gesamtfläche gewonnen werden kann und dann per Lkw transportiert wird. Es ergeben sich damit bei Trockenmasseerträgen von 1,76 bis 15,2 t/(ha·a) und Anlagenleistungen von 30 bis 500 MW Biomasseinput durchschnittliche Transportentfernungen von 5 bis 60 km. Zur Überprüfung der Sensitivität der Ergebnisse wird in der Variante „langer Transport“ jeweils die doppelte Entfernung angesetzt.

In den dezentralen Verfahren BTL werden die Zwischenprodukte (je nach Konzept Slurry, Methanol bzw. BTL-Rohprodukte) von der ersten zur zweiten Konversionsanlage transportiert. In der Basisvariante wird von einem durchschnittlichen Lkw-Transport mit 50 km Entfernung ausgegangen. In verschiedenen Sensitivitätsanalysen werden hier Transportentfernung und Transportmittel variiert: Transport mit der Bahn (gleiche Entfernung) und einen auf die doppelte Entfernung erhöhten Transport mit Lkw bzw. Bahn. Ferner wird untersucht, wie sich der Transport aller Produkte (Biomasse, Zwischenprodukte und BTL) mit durchschnittlichen Lkws des Jahres 2010 gegenüber dem Zeitrahmen 2020 auswirkt.

Die Ergebnisse werden für Waldrestholz als Biomasserohstoff dargestellt, da dieser Rohstoff mit sehr geringen Umweltwirkungen aufwartet und so die größten Unterschiede in den Sensitivitätsanalysen deutlich werden.

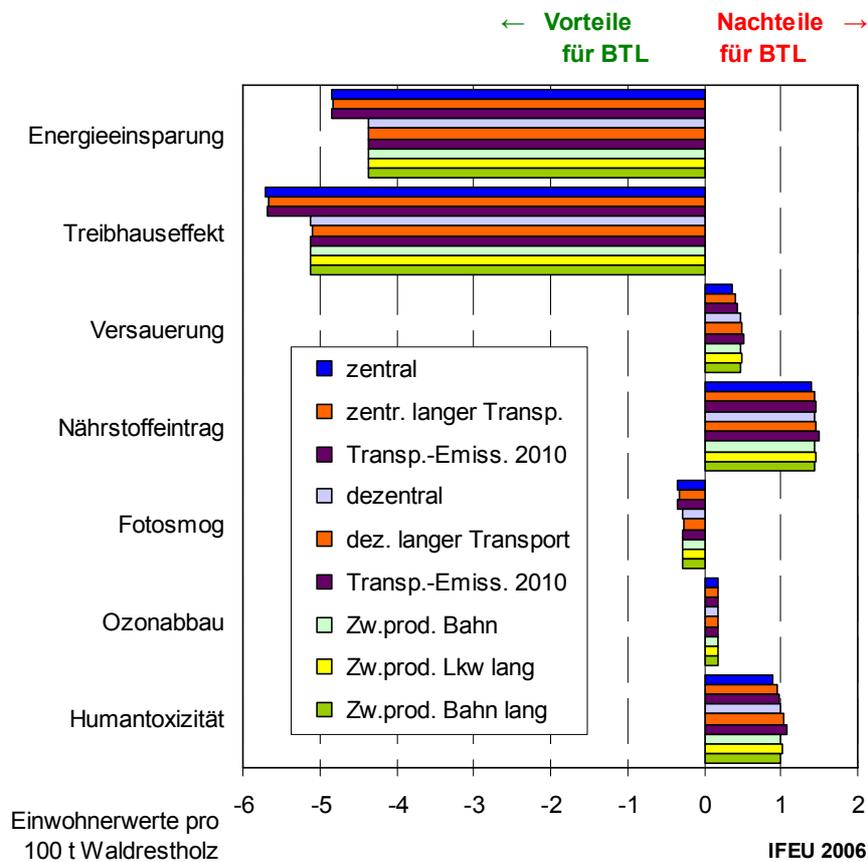


Abb. 4-15 Transportvarianten am Beispiel des Konzepts der TU Freiberg (zentral bzw. dezentral) bei Nutzung von Waldrestholz

Lesebeispiel für den ersten Balken:

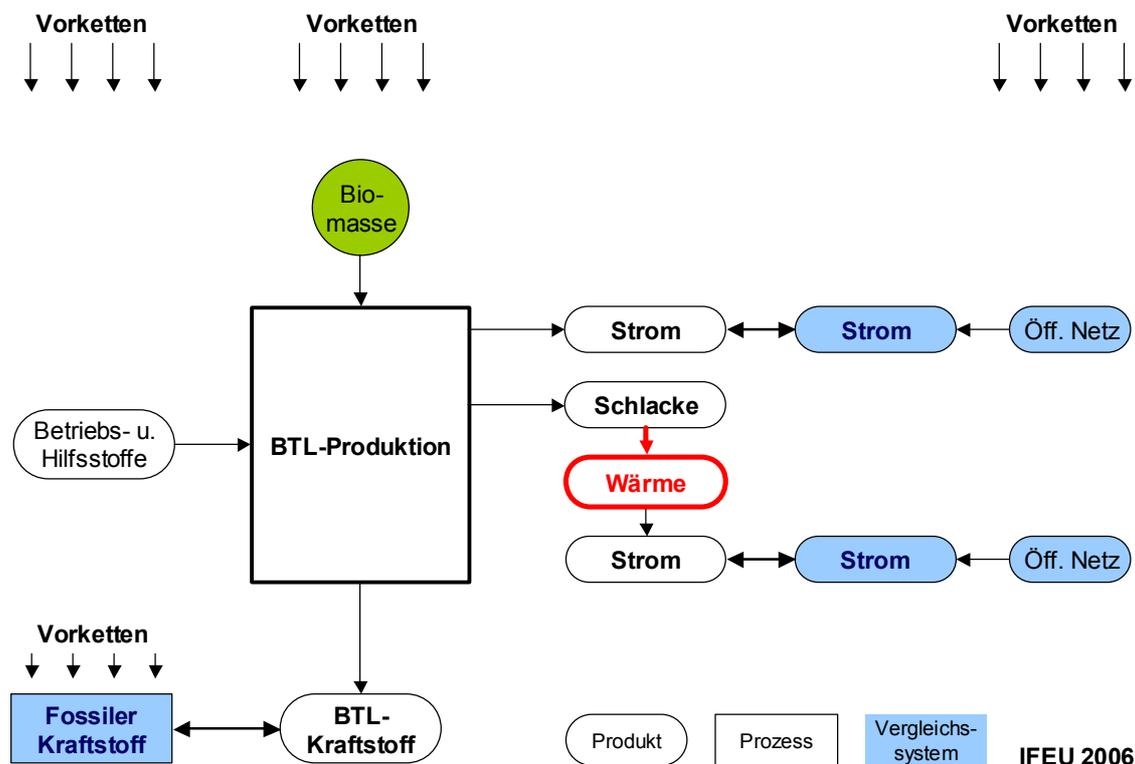
Dargestellt sind die Ergebnisse für Energieeinsparung für den Vergleich von BTL aus Waldrestholz nach dem Verfahren der TU Freiberg und konventionellem Kraftstoff.

Bei der Verwendung von BTL statt fossilem Kraftstoff lässt sich pro 100 t Waldrestholz so viel Energie einsparen wie etwa 5 Bundesbürger jährlich im Durchschnitt benötigen.

Ergebnisse

- Selbst unter den hier angesetzten, teilweise extremen Annahmen hat die Art und Weite der Transporte auf die Ergebnisse keinen wesentlichen Einfluss.
- Erwartungsgemäß resultieren zwar leicht erhöhte Umweltwirkungen bei längeren Transportwegen und für Lkw mit Emissionen, die typisch für das Jahr 2010 sind, die beide aber insgesamt als eher unbedeutend eingestuft werden können. Die Unterschiede zwischen Lkw- und Bahntransport sind dagegen kaum wahrnehmbar.
- Die großen Unterschiede bei der Energieeinsparung und dem Treibhauseffekt zwischen den zentralen und den dezentralen BTL-Verfahren an sich hängen, wie bereits in Abschnitt 4.1 ausführlich diskutiert, nicht mit den Transporten zusammen.

4.4.8 Wärmeverlust durch Schlackeaustrag



Diese Analyse untersucht den Einfluss von unterschiedlichen Behandlungsweisen der Schlacke. Die Schlacke setzt sich zusammen aus dem Ascheanteil in der Biomasse und den verschiedenen Inertmaterialien, die in den Konzepten mit Wirbelschichtvergäsern eingesetzt werden.

In den Basisszenarien wird die Schlacke heiß aus dem Vergaser ausgetragen; die darin enthaltene Restwärme wird nicht genutzt. In der Sensitivitätsanalyse wird die Restwärme zur Stromerzeugung genutzt, womit Strom aus dem Strommix ersetzt wird. Dabei wird in einem vereinfachten Ansatz optimistisch davon ausgegangen, dass sich der Strom aus dieser Abhitze emissionsfrei mit einem Wirkungsgrad von 30% gewinnen lässt, bei einem nutzbaren Wärmeinhalt von 0,8 MJ/kg in der Schlacke (Temperaturdifferenz 1000 K, spezifische Wärmekapazität der Schlacke 0,8 kJ/(kg · K)).

Die Darstellung erfolgt einerseits für die Biomasse mit dem höchsten Ascheanteil (Reststroh), die im BTL-Konzept mit dem höchsten Durchsatz an Inertmaterialien (TU Freiberg) eingesetzt wird. Zum Vergleich wird andererseits der Einsatz von Waldrestholz (mit dem niedrigsten Aschegehalt) im Konzept von Choren gezeigt, das wegen einer anderen Verfahrenstechnik ganz ohne Inertmaterialien auskommt.

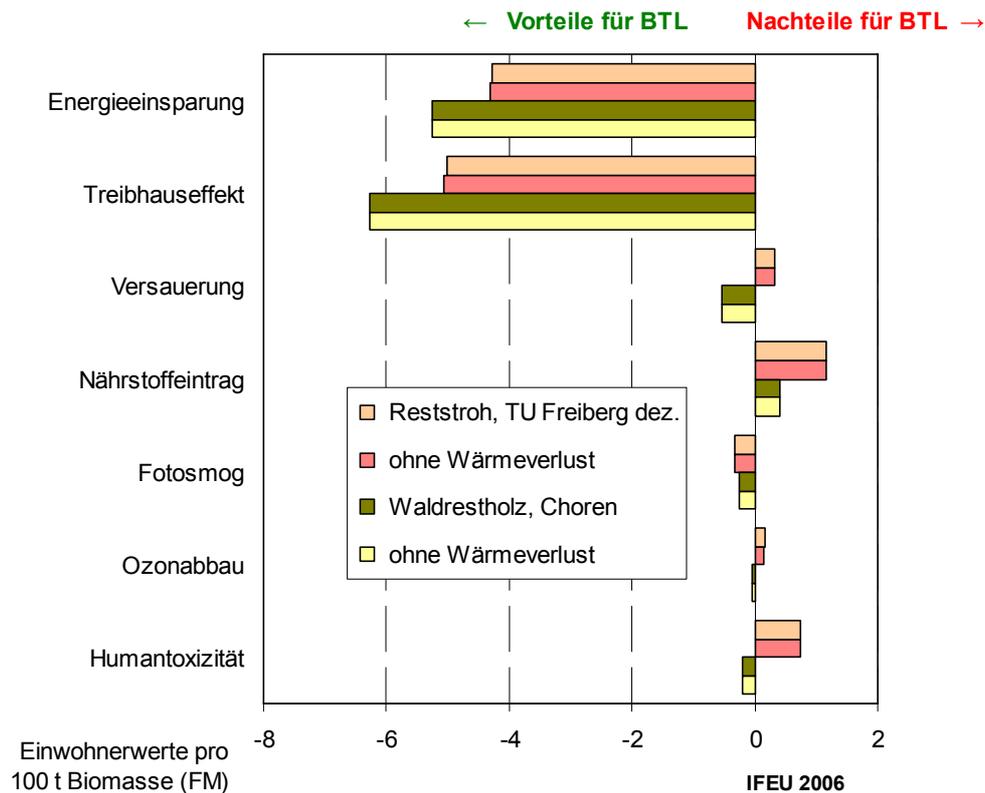


Abb. 4-16 Umweltwirkungen für BTL aus 100 t Reststroh bzw. Waldrestholz nach den Konzepten von TU Freiberg (dezentrale Option) bzw. Choren gegenüber fossilen Kraftstoffen mit und ohne Wärmenutzung beim Austrag der Schlacke

Lesebeispiel für den ersten Balken:

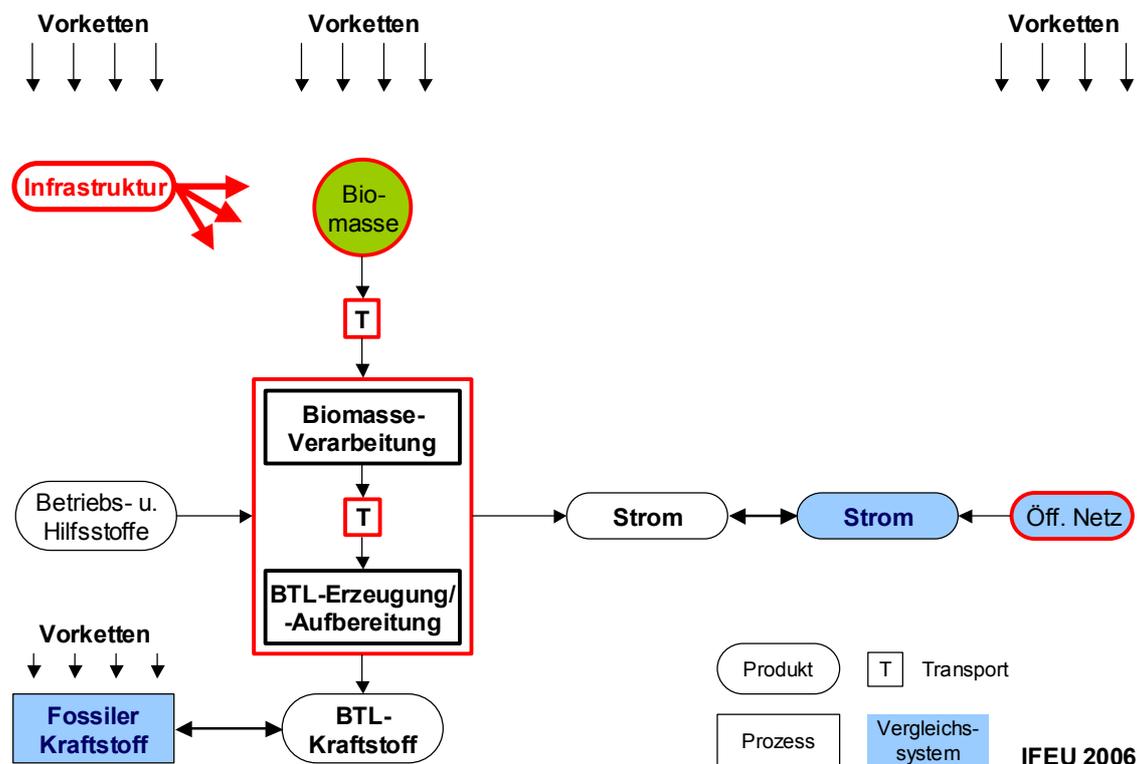
Dargestellt sind die Ergebnisse für Energieeinsparung für den Vergleich von BTL aus Reststroh nach dem Verfahren der TU Freiberg (dezentral) und konventionellem Kraftstoff.

Bei der Verwendung von BTL aus 100 t Stroh anstelle von fossilem Kraftstoff lässt sich so viel Energie einsparen wie etwa 4 Bundesbürger jährlich im Durchschnitt benötigen.

Ergebnisse

- Die Ergebnisse ohne und mit Berücksichtigung der Abwärmenutzung aus der Schlacke sind nahezu identisch. Dies gilt sowohl für Produktionskonzepte, bei denen keine (Choren) oder relativ viel (TU Freiberg) Inertstoffe verwendet werden als auch für Biomassearten mit niedrigem (Waldrestholz) oder hohem (Reststroh) Aschegehalt.
- Ob die in der Schlacke enthaltene Restwärme genutzt wird oder nicht, spielt demnach bei keiner Biomasseart und keinem Produktionskonzept eine Rolle.

4.4.9 Infrastruktur



In dieser Sensitivitätsanalyse wird die Bedeutung der Infrastruktur, das sind Gebäude, Anlage, Maschinen, Fahrzeuge und Straßen auf die Ergebnisse der Umweltwirkungen für die verschiedenen BTL-Pfade untersucht.

Dabei werden alle Fahrzeuge für den Landbau bzw. die Gewinnung der Biomasse sowie den Transport, die Anlagen zur Stromerzeugung für den Strombedarf der BTL-Produktion und die BTL-Anlagen selbst erfasst (aufgrund der Datenlage hier undifferenziert mit denselben Daten für alle Anlagen), aber auch alle Anlagen, die Strom, Wärme oder einen Strom-Wärme-Mix aus fossilen Energien zur Gutschrift für die Kuppelprodukte der BTL-Produktion bereitstellen, ferner die Raffinerie für die Produktion fossiler Kraftstoffe. Infrastruktur der „zweiten Ebene“ wie die Produktionsaufwendungen für die Errichtung der Anlagen oder die dafür nötige Infrastruktur wie Bagger oder Kräne wie auch Straßen und Schienenwege bleiben unberücksichtigt, da bereits die Infrastruktur der ersten Ebene die Ergebnisse kaum beeinflusst (siehe unten). Betrachtet werden die Materialien Stahl (in drei Legierungsstufen), Aluminium, Kupfer und Beton.

Dargestellt werden die Salden der Aufwendungen abzüglich der Gutschriften der jeweiligen Infrastruktur für die Verwendung von Kurzumtriebsholz in allen BTL-Konzepten. Damit können die Ergebnisse auch direkt mit dem Basisvergleich der Verfahren (Abschnitt 4.1) verglichen werden.

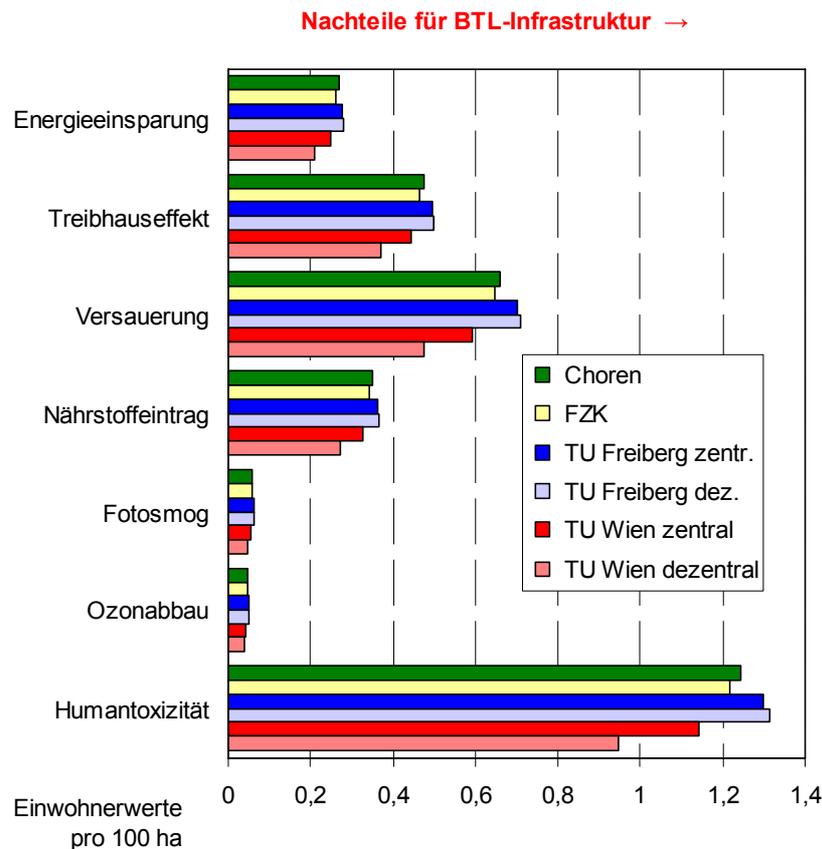


Abb. 4-17 Umweltwirkungen für die Salden der Infrastrukturaufwendungen und -gutschriften für BTL aus Kurzumtriebsholz von 100 ha Anbaufläche gegenüber fossilen Kraftstoffen

Lesebeispiel für den ersten Balken:

Dargestellt sind die Ergebnisse für die Einsparung fossiler Energien (in diesem Fall Mehraufwand) durch die Infrastruktur gegenüber der Bilanz ohne Berücksichtigung der Infrastruktur für den Vergleich von BTL aus Kurzumtriebsholz nach dem Konzept von Choren und konventionellem Kraftstoff.

Bei der Verwendung von BTL aus 100 ha Kurzumtriebsholz anstelle von fossilem Kraftstoff erfordert die Infrastruktur einen Mehraufwand an Energie der in etwa dem durchschnittlichen Jahresverbrauch von 0,3 Bundesbürgern entspricht.

Ergebnisse

- Die Ergebnisse für alle Umweltwirkungen bei Berücksichtigung der Infrastruktur liegen nur minimal schlechter als die Ergebnisse ohne deren Berücksichtigung. Im Vergleich zum Abschnitt 4.1 verschlechtern sich die Umweltwirkungen Energieeinsparung und Treibhauseffekt um nicht einmal ein halbes Prozent.
- Auch die Ergebnisse der anderen Umweltwirkungen verändern sich nur geringfügig, dass dies auf der Skala der Grafik in Abschnitt 4.1 praktisch nicht sichtbar wäre.
- Für den Fall, dass die Nutzung von BTL-Kraftstoff die Haltbarkeit des Motors gegenüber einer Dieselnutzung beeinflusst, kann das Ergebnis durchaus anders aussehen.

5 Zusammenführung und Schlussfolgerungen

Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse und Aussagen zu den verschiedenen Szenarien und Sensitivitätsanalysen aus Kapitel 4 zusammen- und einander gegenübergestellt sowie Schlussfolgerungen daraus abgeleitet. Dabei orientieren wir uns an den eingangs gestellten Fragen:

- Wie ökologisch sind BTL im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen?
- Wie ökologisch sind BTL im Vergleich zu anderen Biokraftstoffen?
- Welche BTL-Rohstoffe und welche BTL-Verfahren sind aus Umweltsicht die besten?
- Soll aus Umweltsicht Biomasse eher zur Produktion von BTL oder eher zur Produktion von anderen Biokraftstoffen oder von grünem Strom bzw. grüner Wärme genutzt werden bzw. welche Biomasse soll auf einer Fläche hierfür überhaupt produziert werden?
- Welche Abschnitte bzw. Prozesse der BTL-Linien sind besonders ergebnisrelevant und wo lassen sich ökologische Optimierungen besonders effizient durchführen?

I BTL im Vergleich zu fossilem Kraftstoff

Die Ergebnisse fallen qualitativ aus wie die der Vergleiche vieler anderer Bioenergieträger mit ihren fossilen Pendanten: eindeutige Vorteile bei der Einsparung von Energie und Treibhausgasen, während bei den anderen Umweltkategorien tendenziell eher Nachteile auftreten. Das liegt grundsätzlich daran, dass die gesamte Produktion der BTL von der Bereitstellung der Biomasse bis zu dessen Verarbeitung in der Regel wesentlich mehr Emissionen aufweist als die gesamte Bereitstellung der fossilen Kraftstoffe – insbesondere dann, wenn es sich um Anbaubiomasse handelt: So verursacht der landwirtschaftliche Anbau durch die Düngemittelproduktion und -ausbringung beispielsweise zum Teil erhebliche Mengen an stickstoffhaltigen Verbindungen, die zur Versauerung, dem Nährstoffeintrag und dem Ozonabbau beitragen. In Einzelfällen und bei einzelnen Szenarien treten zwar Vorteile auf, die z. B. bei Verfahren, die neben BTL auch Strom und Dampf produzieren, auf die hierfür anzurechnenden Gutschriften zurückzuführen ist – was damit aber nicht zwingend BTL-spezifisch ist.

Damit kann zusammengefasst werden, dass die BTL in allen Fällen die genannten Umweltvorteile aufweisen, allerdings verbunden mit den aufgeführten Umweltnachteilen, die jedoch jeweils unterschiedlich ausgeprägt auftreten. Damit kann – rein wissenschaftlich gesehen – keine abschließende Aussage darüber getroffen werden, ob aus Umweltsicht die BTL günstiger oder ungünstiger als fossile Kraftstoffe abschneiden. Nur in Verbindung mit persönlichen, damit also subjektiven, Werthaltungen kann ein Urteil abgegeben werden: So lässt sich beispielsweise eine Bewertung zugunsten der BTL gegenüber fossilen Kraftstoffen dann begründen, wenn man persönlich der Ressourcenschonung fossiler Energien und dem Treibhauseffekt eine höhere Priorität zuschreibt als der Versauerung und anderer Umweltwirkungen.

II BTL im Vergleich zu anderen Biokraftstoffen

Beim Vergleich von Biokraftstoffen untereinander ist zunächst zu unterscheiden, ob die Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse oder Reststoffen produziert werden, da bei Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse die Flächeneffizienz bei der Bewertung die maßgebliche Rolle spielt,

während bei den Biokraftstoffen aus Reststoffen die Ergebnisse je nach Fragestellung auf unterschiedliche Größen bezogen werden.

Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse:

- BTL-Kraftstoffe schneiden aus ökologischer Sicht günstiger, in einigen Fällen deutlich günstiger als die meisten Biodieselarten wie Biodiesel aus Soja, Raps oder Sonnenblume ab.

Beim Vergleich der BTL mit Ethanol- und ETBE-Routen spielen die Biomassearten zur Produktion der BTL wie auch der Ethanole die entscheidende Rolle. Folgende eindeutige Aussagen lassen sich diesbezüglich ableiten:

- BTL-Kraftstoffe schneiden dann günstiger ab als die meisten Bioethanol-Linien, wenn diese mit Standardverfahren produziert werden. Das gilt uneingeschränkt für den Vergleich mit Bioethanol aus Kartoffeln, Mais und Getreide. Zudem gilt dies auch im Vergleich mit aus den genannten Rohstoffen hergestelltem ETBE, wenn BTL aus Kurzumtriebsholz produziert wird.
- Umgekehrt fallen Ethanol bzw. ETBE aus Zuckerrohr gegenüber BTL-Kraftstoffen aus Getreide tendenziell günstiger aus.

Die anderen Fälle des Vergleichs der BTL mit Bioethanol bzw. ETBE zeigen unterschiedliche Ergebnisse:

- Die ETBE aus den genannten Rohstoffen weisen in nahezu allen Umweltwirkungen ähnliche Ergebnisse auf wie die BTL aus Getreide.
- Werden Ethanol bzw. ETBE aus Zuckerrohr BTL aus Kurzumtriebsholz gegenübergestellt (und nicht BTL-Kraftstoffen aus Getreide wie oben beschrieben), dann weisen sie zwar günstigere Energie- und Treibhausgasbilanzen auf, aber ungünstigere Ergebnisse bei den anderen Umweltwirkungen wie Versauerung und Nährstoffeintrag. Gleiches gilt auch für alle BTL-Kraftstoffe gegenüber Ethanol bzw. ETBE, wenn diese mit innovativen, energieoptimierten Verfahren aus Zuckerrüben produziert werden.

Damit kann aus BTL-Sicht zusammengefasst werden: Es gibt eine Reihe an Biokraftstoffen, denen BTL ökologisch überlegen ist. Es existieren aber auch Pfade sowohl in den gemäßigten Breiten wie auch in den Tropen, die günstigere Werte als die BTL aufweist. Die BTL zeigen gegenüber den anderen Biokraftstoffen besonders große ökologische Potenziale, wenn sie aus Kurzumtriebsholz (und nicht aus Getreide) produziert werden.

Biokraftstoffe aus Reststoffen

- Sofern es überhaupt Sinn macht, Biokraftstoffe aus Reststoffen wie Reststroh, Waldrestholz, Molasse oder Altspeisefetten miteinander zu vergleichen, reihen sich BTL-Kraftstoffe nahtlos in die Effizienzen der meisten anderen Biokraftstoffe aus Reststoffen ein. Aus ökologischer Sicht sind BTL damit anderen Biokraftstoffen weder über- noch unterlegen – zumindest in Bezug auf die in dieser Studie dargestellte Bezugsgröße, nämlich auf die Kraftstoffmenge. Bei anderen Fragestellungen, die zu anderen Bezügen führen und die jeweils separat betrachtet werden müssen, können gegebenenfalls auch andere Ergebnisse erhalten werden.

III BTL-Konzepte im Vergleich

Betrachtet wurden die Verfahrenskonzepte Choren, TU Freiberg und TU Wien in zentraler Auslegung und die Konzepte FZK, TU Freiberg und TU Wien in dezentraler Auslegung. Der Vergleich der Ergebnisse für diese Konzepte zeigt Folgendes:

- Die drei Verfahren Choren, FZK und die zentrale Variante der TU Freiberg zeigen bei der Energieeinsparung und den Treibhausgasemissionen ähnliche Ergebnisse. Unterschiede resultieren aus unterschiedlichen Wirkungsgraden der BTL-Produktion und zum anderen aus den Gutschriften für unterschiedlich große zusätzliche Strom- und ggf. Wärmeoutputs, den die meisten Anlage liefern.
- Die Werte für das Konzept der TU Wien fallen demgegenüber günstiger aus. Dies hängt insbesondere damit zusammen, dass dessen Strom- und Wärmeproduktion im dezentralen Konzept deutlich über dem energetischen Output an BTL-Kraftstoff liegt und dessen Stromerzeugung auch im zentralen Fall noch höher ist als bei den anderen Verfahren. Dadurch können sich – abhängig vom angesetzten Strommix – zum Teil erhebliche und ergebnisrelevante Gutschriften ergeben. Durch die "Stromlastigkeit" der Produktzusammensetzung nimmt das Wiener Verfahren eine Sonderstellung ein und ist mit den anderen Verfahren nicht direkt vergleichbar.
- Die dezentrale Variante der TU Freiberg schneidet wegen des gegenüber den anderen Verfahren geringeren Wirkungsgrades ungünstiger ab. Außerdem kommt hier der beim Verfahren nach der TU Freiberg nicht vorhandene zusätzliche Strom- und Wärmeoutput sowie die Pelletierung der Biomasse zum Tragen.
- Zentral/dezentral: Beim Freiburger Verfahren hat die zentrale Variante für alle Umweltwirkungen Vorteile gegenüber der dezentralen. Dies liegt an den höheren Umwandlungswirkungsgraden, die sich im zentralen Fall erzielen lassen und die Mehraufwendungen für Transporte dabei überkompensieren. Beim Wiener Verfahren zeigt die dezentrale Variante i. A. größere Bandbreiten, allerdings hat keine Variante gegenüber der anderen ausschließliche Vorteile: Die einerseits höhere BTL-Ausbeute beim zentralen und die andererseits höhere Wärmeausbeute beim dezentralen Verfahren führen jeweils zu unterschiedlichen Effekten bei den einzelnen Umweltwirkungen, da die Ergebnisse insbesondere auch von der Art und Weise der Gutschrift für die entstehende Wärme, d.h. des substituierten Prozesses, abhängen.

Zusammengefasst kann damit festgehalten werden, dass sich, auch wenn leichte Unterschiede vorhanden sind, kein Verfahren als gegenüber den anderen aus ökologischer Sicht über- oder unterlegen aufdrängt.

IV Biomassenutzung: als BTL oder zur Produktion von Strom / Wärme ?

Eine weitere Fragestellung ist, ob eine vorhandene Biomasse aus Umweltsicht eher zur Produktion von BTL verwendet oder zur Produktion von grünem Strom und/oder grüner Wärme genutzt werden soll (vereinfacht: mobile versus stationäre Nutzung). Infrage kommt hierbei eine Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten: Einsatz der Biomasse in Kraftwerken, Heizwerken oder Heizkraftwerken, wobei an fossilen Energieträgern Heizöl, Erdgas, Durchschnittsstrom, Marginalstrom (z. B. Kohlestrom) oder jeweils Kombinationen davon ersetzt werden.

- Die Ergebnisse für alle diese verschiedenen Nutzungsoptionen der gleichen Biomasse zeigt, dass es stationäre Nutzungen der Biomasse gibt, die aus Umweltsicht eindeutig günstiger als BTL ausfallen, aber auch solche, die ungünstiger sind. Dabei spielt jeweils

maßgeblich eine Rolle, welche Technologie als auch welche konventionelle Energie ersetzt wird.

- BTL sind insbesondere dann günstiger, wenn die Biomasse ansonsten in HKW eingesetzt würde und konventionell mit Erdgas oder Heizöl betriebene HKW ersetzen. Sie sind auch dann günstiger, wenn die Biomasse verstromt wird und durchschnittlichen EU-Strom ersetzt. Bei deutlich anderem Strommix können die Ergebnisse allerdings auch zu Ungunsten der BTL ausfallen.
- BTL sind dann ungünstiger als die stationäre Nutzung der gleichen Biomasse, wenn diese in Heizkraftwerken genutzt wird und Netzstrom sowie Wärme aus fossilen Heizwerken ersetzt. Ebenso ungünstiger sind die BTL, wenn die Biomasse in hocheffizienten Vergaser-Heizkraftwerken eingesetzt wird.

Damit lassen sich die Umweltauswirkungen der BTL zur stationären Nutzung der gleichen Biomasse gut einordnen. Je nach tatsächlicher oder politisch zukünftig gewünschter Ausgestaltung einer regionalen oder auch nationalen Energieversorgung kann den BTL damit – zumindest aus ökologischer Sicht – ein optimaler Platz zugewiesen werden.

V Flächennutzung: zur Produktion von BTL, anderen Biokraftstoffen oder Strom und/oder Wärme?

Ebenso lässt sich die Frage stellen, welche Biomasseproduktion auf einer Fläche verbunden mit einer bestimmten Nutzung dieser Biomasse den größten Umweltnutzen hat (Stichwort „Flächeneffizienz“). Infrage kommt hier eine ganze Palette an unterschiedlichen Biomassen zur Bioenergieproduktion wie auch die gesamte Bandbreite der Nutzungsoptionen wie u. a. als Biogas, als Biokraftstoff und auch zur grünen Strom- und/oder Wärmebereitstellung.

Die Ergebnisse zeigen, dass es Biomassen und dazugehörige Nutzungspfade gibt, die aus Umweltsicht günstiger als die BTL-Linien ausfallen, dass es andererseits aber auch eine Reihe an Pfaden gibt, bei denen die BTL günstiger ausfallen wie beispielsweise gegenüber einer großen Anzahl an Biokraftstoffen der ersten Generation oder auch verschiedenen stationären Nutzungen (siehe die einzelnen Ausführungen hierzu jeweils oben).

Insgesamt kann festgehalten werden, dass hier die BTL ein durchaus beachtenswertes ökologisches Potenzial besitzen, deren Realisierung aber von der sowohl grundsätzlichen wie auch spezifischen Ausgestaltung der zukünftigen Strategie des Ausbaus der Nutzung von Bioenergie abhängt.

VI Welche Abschnitte bzw. Prozesse der BTL-Linien sind besonders ergebnisrelevant und wo lassen sich ökologische Optimierungen besonders effizient durchführen?

Wie bei den meisten Ökobilanzen gibt es auch bei den Lebenswegvergleichen der BTL gegenüber fossilen Kraftstoffen einzelne Lebenswegabschnitte, die auf die Gesamtergebnisse einen nur vergleichsweise geringen Einfluss haben und solche, die die Ergebnisse maßgeblich bestimmen. Die Größen, die auf die Ergebnisse keinen oder einen nur geringen Einfluss ausüben, sind:

- Infrastruktur
- Nutzung der in der Asche der Vergasungsverfahren enthaltenen Wärme
- Hilfsstoffe bzw. Betriebsmittel

- **Syntheseverfahren:** Hier ist es im Großen und Ganzen unerheblich, ob das Synthesegas über Fischer-Tropsch- oder Methanol-to-Synfuel-Verfahren zu BTL verarbeitet wird.
- **Variationen beim Transport:** Das betrifft sowohl die Transportmittelwahl (z. B. Lkw/ Bahn), die Transportentfernungen wie insbesondere auch die bei den dezentralen Konzepten gegenüber den zentralen Konzepten veränderte Transportlogistik. Vor allem der letzte Punkt ist besonders bemerkenswert, da in der Literatur häufig angenommen wird, dass die niedrigeren Wirkungsgrade bei den dezentralen Verfahren durch die gleichzeitig auftretenden geringeren Transportaufwendungen zu einem erheblichen Teil oder vollständig kompensiert oder sogar überkompensiert werden. Unseren Analysen zufolge kann bestenfalls von einer teilweisen, letztlich aber unbedeutenden Kompensation gesprochen werden.

D. h., in diesen Bereichen sind aus Umweltsicht auch keine bedeutsamen Optimierungen (oder auch Verschlechterungen) möglich. Anders ist das bei den Größen, die die Ergebnisse maßgeblich beeinflussen können:

- **H2-Import:** Für die Produktion von BTL ist grundsätzlich Wasserstoff nötig, der in der Regel aus der eingesetzten Biomasse hergestellt wird. Zur Steigerung der BTL-Ausbeute kann Wasserstoff auch aus anderen Quellen eingesetzt werden, vorzugsweise über einen Erdgas-Reformer. Andere Quellen wie regenerativen Strom halten wir entweder für unrealistisch – insbesondere aus ökonomischen Gründen – oder für aus ökobilanzieller Sicht nachteilig: Sie würden zu Schlechtschriften für die BTL wegen entgangenem Alternativnutzen führen (s. Ausführungen in Abschnitt 4.4.3).
Die Ergebnisse zeigen, dass eine zusätzliche Wasserstoffproduktion zu ökologischen Nachteilen bei allen betrachteten Umweltwirkungen außer dem Treibhauseffekt führt, d. h., die Mehraufwendungen zur Wasserstoffproduktion sind höher als der Nutzen des zusätzlich produzierten BTL. Vereinfacht und anschaulich: Erdgas ersetzt mit schlechtem Wirkungsgrad Dieselkraftstoff, so dass nur noch der Vorteil beim Treibhauseffekt übrig bleibt. Würde man – ein zweites Szenario – dieses Erdgas direkt im Verkehrssektor einsetzen und das BTL-Konzept in seiner Basisvariante belassen, so zeigen sich Vorteile auf Seiten des Erdgases in durchgängig allen Umweltwirkungen und stärker ausgeprägt als bei der Nutzung zur Steigerung der BTL-Ausbeute. Aus der Perspektive der Erdgasverwendung kann damit festgehalten werden, dass aus ökologischer Sicht ein direkter Einsatz im Verkehrssektor – und auch in einer stationären Nutzung, wenn dadurch Heizöl substituiert wird – einer Wasserstoffherstellung zur BTL-Produktion eindeutig vorzuziehen ist.
Damit lässt sich zusammenfassen, dass – zumindest für den angenommenen Normalfall – eine zusätzliche Wasserstoffproduktion zur Steigerung der BTL-Ausbeute aus Umweltsicht kontraproduktiv ist.
- **Pelletierung:** Der Energieaufwand für die Pelletierung der Biomasse bewirkt eine deutliche Verschlechterung der Bilanz gegenüber Linien ohne Pelletierung. Das heißt aber nicht, dass Verfahren, die pelletierte Biomasse verarbeiten, grundsätzlich schlechter sind als solche, die verfahrensbedingt ohne Pelletierung auskommen. Es bedeutet allerdings durchaus, dass hier ein gewisses Optimierungspotenzial besteht und die zukünftigen Weiterentwicklungen der Biomassevergasungstechnologien hier einen Schwerpunkt setzen sollten.
- **BTL-Nutzung in Fahrzeugen:** Je nachdem, in welchen Fahrzeugen bzw. in welchen Motor- mit zugehörigen Abgasreinigungskonzepten die BTL-Kraftstoffe zukünftig eingesetzt werden, zeigen sich keine oder auch mehr oder weniger deutliche Unterschiede.

Davon unberührt bleibt in allen Fällen der große Vorteil der BTL-Kraftstoffe gegenüber Dieselkraftstoff: Einsparung fossiler Energien und Treibhausgase.

Bei motorseitigen Reduktionen der Emissionen durch den Einsatz von BTL gegenüber Dieselkraftstoff zeigen sich über die gesamten Lebenswegbilanzen hinweg in einigen Umweltwirkungen teilweise deutliche Verbesserungen der Ergebnisse. Ob diese allerdings zukünftig erreicht werden, hängt insbesondere davon ab, ab wann BTL in signifikanten Mengen zur Verfügung stehen, welche Motorentchnologie mit welcher Marktdurchdringung dann vorhanden ist, wie die BTL dann eingesetzt werden könnten (bestimmte Flotte, Marktmix etc. bzw. innerorts/außerorts etc.). Die Relevanz hängt von der dann herrschenden Immissionssituationen ab. Die Quantifizierung muss weiterführenden Studien vorbehalten bleiben.

Hier kann zumindest festgehalten werden, dass es gewisse Optimierungspotenziale beim Einsatz der BTL-Kraftstoffe gibt, deren zukünftige Realisierungsoptionen von mehreren Faktoren abhängig ist.

- **Biomasserohstoffe:** Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die Bereitstellung der Biomasserohstoffe für die BTL-Kraftstoffe– über die gesamten Lebenswegvergleiche hinweg betrachtet – signifikant das Ergebnis beeinflussen.

Anbaubiomasse: Da Triticale vergleichsweise deutlich höhere Aufwendungen in der Landwirtschaft aufweist als Kurzumtriebsholz, zeigen sich bei BTL aus Triticale in allen Umweltwirkungen deutliche Nachteile gegenüber BTL aus Kurzumtriebsholz.

Reststoffe: BTL aus den beiden hier betrachteten Reststoffen Reststroh aus der Landwirtschaft und Waldrestholz zeigen keine signifikanten ökologischen Unterschiede.

Anbaubiomasse versus Reststoffe: Es gibt nur wenige Fragestellungen, bei denen dieser Vergleich Sinn macht. Ist nach der Effizienz in Bezug auf eingesetzte Feuchtmasse oder produzierte BTL-Menge gefragt, so zeigen die BTL aus Reststoffen ökologische Vorteile gegenüber den BTL aus Anbaubiomasse.

Zusammengefasst: Eine generelle Aussage, welcher BTL-Biomasserohstoff der ökologisch günstigste ist, lässt sich nicht ableiten, weil hinter dieser Fragestellung eine Reihe an Detailfragen steht, die jeweils zu unterschiedlichen Antworten führen. Bei Bedarf lassen sich jedoch mit den Detailanalysen in den entsprechenden Kapiteln auf entsprechende Detailfragen Antworten geben und so auch ein gegebenenfalls vorhandenes Optimierungspotenzial ableiten.

Ausblick

Die hier abgeleiteten Ergebnisse zeigen, dass die BTL ein durchaus beachtenswertes ökologisches Potenzial besitzen, andererseits aber auch in Konkurrenz zu ebenfalls ökologisch sehr attraktiven Alternativen der Bioenergieproduktion und -nutzung stehen. Eine zukünftige Ausgestaltung der BTL-Linien muss daher jeweils in einem Gesamtsystem einer beispielsweise regionalen oder nationalen Energieversorgung betrachtet und daran orientiert optimiert werden.

Streng (insbesondere im quantitativen Sinn) gelten die hier abgeleiteten und dargestellten Ergebnisse natürlich nur für die gesetzten Randbedingungen. Die Aussagen wurden jedoch im Rahmen des im Projekt Machbaren über verschiedene Sensitivitätsanalysen bestmöglich abgesichert bzw. differenziert. Damit können die Ergebnisse als qualitativ weit anwendbar und als zuverlässige Richtungsaussagen für „BTL an sich“ gelten. Sie liefert damit auch eine Basis für weiterführende Studien in speziellen Kontexten wie regionalen oder nationalen Energiesystemen.

Anhang

6 BTL-Technik

In den folgenden Abschnitten wird zunächst ein Überblick über die BTL-Technologie allgemein gegeben. Anschließend werden die in dieser Studie untersuchten Konzepte beschrieben.

6.1 Überblick

Im Mittelpunkt dieses Abschnitts stehen der F&E-Realität entsprechend die Synthesegaserzeugung und die Gaskonditionierung, da hier Biomasse-spezifische Probleme auftreten, während die Fischer-Tropsch-Synthese sehr weit entwickelt ist und mit entsprechend konditioniertem Syngas aus Kohle seit Jahrzehnten großindustriell angewendet wird. Neben der FT-Synthese wird für die eigentliche Kraftstoffsynthese ein Pfad mit Methanol als Zwischenprodukt diskutiert.

6.1.1 Synthesegasproduktion

Die Produktion von Synthesegas aus Festbrennstoffen kann nach drei verschiedenen Konzepten durchgeführt werden:

- Festbettvergasung
- Flugstromvergasung
- Wirbelschichtvergasung

Für fossile Brennstoffe, d.h. Stein- und Braunkohle, sind die Verfahren weitgehend ausgereift. Das Synthesegas dient dabei meist als Input für die Fischer-Tropsch-Synthese von Kraftstoffen, in jüngerer Zeit auch zur Stromerzeugung mit Gasturbinen (IGCC). Für biogene Brennstoffe war das Ziel lange Zeit vor allem die Produktion von Brenngasen zur Stromerzeugung mit Gasturbinen oder -motoren. Selbst dabei treten noch zahlreiche Probleme auf und die Anlagen haben überwiegend Technikums- oder „semi-kommerziellen“ Charakter. Berücksichtigt man die im Vergleich zu Motoren und Turbinen deutlich höheren Ansprüche der FT-Synthese (und von Brennstoffzellen) an das Synthesegas, ergibt sich für alle Verfahren ein Entwicklungsstand, der noch relativ weit von einer kommerziellen Anwendung entfernt ist. Einige konkrete Probleme:

- Alle einstufigen Verfahren sind für Halmgüter (Stroh, Triticale usw.) ungeeignet: Der hohe K- und Cl-Gehalt dieser Materialien fördert Verschlackung und Korrosion. Je nach Verfahren müssen die Halmgüter aufwändig konditioniert werden (staubfein Mahlen oder Pelletieren).
- Auch für Holz ist die direkte Flugstromvergasung ungünstig (staubfein Mahlen).

- Festbettvergaser sind auf Leistungen bis 5 MW beschränkt [Meyer et al. 2004] und ergeben Rohgase mit extrem hohem Teergehalt, Wirbelschichtvergaser mit hohem Staubgehalt.
- Mehrstufige Verfahren (Blauer Turm, Carbo-V, FZK z.B.), die bessere Rohgase liefern und flexibler hinsichtlich des Inputs sind und damit größere Biomassepotenziale erschließen, sind tendenziell auch aufwändiger.
- Tendenziell wird in den meisten Konzepten wegen des dezentralen Anfalls von Biomasse von kleineren Anlagengrößen als bei fossilen Brennstoffen ausgegangen, was zu höheren spezifischen Kosten führt (economy of scales).

Zur Lösung dieser Probleme finden an allen Vergasertypen Weiterentwicklungen statt. Tabelle 6-1 fasst Merkmale der Konzepte, die unten kurz skizziert werden, zusammen, Tabelle 6-2 enthält Informationen zu einigen existierenden Anlagen, von denen allerdings die wenigsten für die BTL-Produktion geplant sind.

Einstufige Verfahren

Festbettvergaser

Festbettvergaser können als Gleich- oder Gegenstromvergaser ausgelegt sein (Brennstoff und Oxidationsmittel bewegen sich in die gleiche Richtung bzw. gegeneinander). Gegenstromvergaser zeichnen sich durch hohe thermische Effizienz aus, erzeugen aber sehr teerhaltige Gase; Gleichstromvergaser sind weniger effizient, liefern aber reinere Rohgase. Die Vergasung erfolgt autotherm; als Vergasungsmittel kann Luft, Sauerstoff oder Sauerstoff/Dampf eingesetzt werden. Weitere Unterscheidungsmerkmale sind die Entaschung (nass = schmelzflüssig oder trocken) und der Druckbereich. Alle Festbettvergaser erfordern stückigen Brennstoff, also für Stroh z.B. ggf. eine Pelletierung. Zumindest beim Einsatz von Biomasse sollen Festbettvergaser nur für kleine Leistungen geeignet sein [Hofbauer, Kaltschmitt et al. 2004, Meyer et al. 2004].

Wirbelschichtvergaser

Bei diesen Verfahren werden stationäre und zirkulierende Wirbelschichten unterschieden. In beiden Fällen wird durch das einströmende Vergasungsmittel Sand, der als Wärmeträger dient, in der Schwebelage gehalten. Bei der stationären Wirbelschicht bleibt der Sand im Reaktor, bei der zirkulierenden wird er ausgetragen und in einem Zyklon abgeschieden und rückgeführt. Die Vergasung erfolgt autotherm oder allotherm, indem bei zirkulierenden Wirbelschichten der Sand vor der Rückführung erhitzt wird; als Vergasungsmittel kann Luft, Sauerstoff und/oder Dampf eingesetzt werden. Weiteres Unterscheidungsmerkmal ist der Druckbereich. Die Rohgasqualität ist mäßig. Hinsichtlich der Stückigkeit des Brennstoffs ist die Wirbelschichtvergasung relativ robust. Große Leistungen lassen sich wahrscheinlich gut realisieren. Allerdings haben sich WS-Vergaser auch für fossile Brennstoffe nicht durchgesetzt (Beispiel Berrenrath).

Flugstromvergaser

Flugstromvergasung ist für fossile Brennstoffe neben der Festbettvergasung das wichtigste Konzept. Wegen der nötigen Feinteiligkeit des Brennstoffs werden FSV bei Biomasse praktisch nur im Rahmen mehrstufiger Verfahren (siehe unten) diskutiert (Pyrolysekoks lässt

sich leichter auf Staubkorngröße bringen als Holz oder Stroh). FSV können auto- oder allotherm und mit Luft, Sauerstoff und/oder Dampf betrieben werden.

Mehrstufige Verfahren

In diesen Verfahren ist der eigentlichen Synthesegaserzeugung eine thermische Vorkonditionierung der Biomasse vorangestellt. Der Zweck dieser Verfahren besteht darin, saubere Rohgase zu erzeugen und Stoffe, die die Syngaserzeugung stören, aus den Vergasern fernzuhalten (z.B. niedrignschmelzende Aschen). Zugleich wird damit die Inputbasis verbreitert, da insbesondere Halmgüter für einstufige Verfahren problematisch sind (siehe oben). Relevante Konzepte sind das Carbo-V-Verfahren von Choren und das Verfahren des Forschungszentrums Karlsruhe (Details siehe Abschnitt 6.2).

Tabelle 6-1 Merkmale der Konzepte

	Festbett	Wirbelschicht	Flugstrom
Einsatzstoff	grobkörnig	feinkörnig	staubförmig
Aufbereitungsaufwand	ggf. Agglomeration	gering	Mahlung
Sauerstoffbedarf	gering-mittel	mittel	hoch
Kohlenwasserstoff-zersetzung	kaum	überwiegend	vollständig
C-Vergasungsgrad			
von	80 %	80 %	95 %
bis	90 %	95 %	
Raum-Zeit-Ausbeute	niedrig-mittel	mittel-hoch	sehr hoch
Regelbarkeit	gut	sehr gut	sehr gut
Typische Vertreter	Lurgi, BGL	HTW, KRW, IGT, U-Gas	Texaco, SCGP, GSP, Destec, Prenflo
[Meyer et al. 2004]			IFEU 2006

Tabelle 6-2 Existierenden Anlagen (Auswahl) nach Vergasungskonzepten

Ort/Land	Leist. therm. MW	Brennstoff	Prinzip	Anwendung	Status
Festbettvergasung					
Gazel / Belgien	0,15	Hackschnitzel (Kurzumtrieb)	Gleichstrom, autotherm (Luft)	Strom (Gasmotor)	seit 2000 3000 h/a
Eckernförde / Deutschland	0,18	Hackschnitzel	2-Zonen-Gleichstrom, autotherm (Luft)	Strom (Gasmotor)	seit 2001
Legnano / Italien	1		Gleichstrom	KWK	im Bau
Rossano / Italien	3,8	Oliventrester	Gegenstrom	KWK	kurz vor Inbetriebnahme
Herning / Dänemark	0,4	Hackschnitzel	Gleichstrom	KWK (Gasmotor)	7000 h
Wiener Neustadt / Österreich	2	Hackschnitzel	2-Zonen-Gleichstrom, autotherm (Luft)	KWK (Gasmotor)	seit 2004
Wirbelschichtvergasung					
Burlington / USA	60	Hackschnitzel	2 zirkul. (Silva Gas-Verfahren), allotherm	Zuheizung	seit 2000
Lahti / Finnland	70	Waldrestholz, feuchte Biomasse	Foster-Wheeler-Vergaser	Zuheizung KWK	seit 1998
Värnamo / Schweden	7	Waldrestholz	zirkul., druckaufgeladen, autotherm (Luft)	IGCC	nach Demo stillgelegt
Arbre / UK	9	Hackschnitzel	zirkul., atmosphär., autotherm (Luft)	IGCC	seit 1999
Güssing / Österreich	8	Hackschnitzel	stat. 2-Bettwirbelschicht, allotherm	KWK (Gasmotor)	seit 2001
Flugstromvergasung					
New Bern / USA	60	„Black Liquor“ (Rückstand der Papierherstellung)	autotherm (Luft)	Wärme, Dampf	seit 1997
Freiberg / Deutschland	1	Pyrolyseprodukte (Koksstaub)	Carbo-V-Verfahren, autotherm (O ₂ /Dampf)	KWK, Methanol, Synfuels	Versuchskampagnen
Freiberg / Deutschland	3	Bioöl/Koks-Slurry	GSP-Verfahren, druckaufgeladen, autotherm (O ₂ /Dampf)	Syngas	Versuchskampagnen
[Meyer et al. 2004]					IFEU 2006

6.1.2 Rohgasreinigung und -aufbereitung

Kein Verfahren der Synthesegaserzeugung liefert ein Rohgas, das direkt zur Fischer-Tropsch- oder MTS-Synthese verwendet werden könnte. Die Gase müssen dazu weiter entstaubt, von Teer und Inertgasen befreit und auf ein für die FT-Synthese geeignetes H₂/CO-Verhältnis (Shift) eingestellt werden. Für jede dieser Aufgaben gibt es mehrere Hauptverfahren und eine Vielzahl von Varianten. Entsprechend groß ist die Anzahl mögli-

cher Kombinationen (auch wenn z.B. wegen bestimmter Temperatur- oder Druckbedingungen nicht jede formal mögliche auch technisch möglich ist).

Verfahren und Entwicklungsstand der Synthesegasreinigung [Meyer et al. 2004]:

- Staub und Asche: Stand der Technik: verschiedene nass und trocken arbeitende Filtertypen und Abscheider
- Halogen-, S- und N-Verbindungen: Stand der Technik: Wäscher (Absorber) mit verschiedenen Waschflüssigkeiten; in der Entwicklung: Adsorber
- Kohlenwasserstoffen/Teer: Stand der Technik: Abscheider, Wäscher und Teercracker; in der Entwicklung: katalytische Systeme

Auch wenn die Rohgase der einzelnen Verfahren unterschiedliche Eigenschaften haben, sind die Reinigungsschritte in der einen oder anderen Form für alle notwendig. Die Einstellung des H_2/CO -Verhältnisses erfolgt katalytisch unter Zusatz von Dampf. Je nach Katalysator sind die Anforderungen an das Rohgas unterschiedlich. Anschließend wird ggf. CO_2 abgetrennt.

6.1.3 Kraftstoffsynthese

Für die eigentliche Kraftstoffsynthese sind zwei Verfahren in der Diskussion: die Fischer-Tropsch-Synthese, die seit Jahrzehnten zur Kraftstoffsynthese auf Kohlebasis eingesetzt wird und die Synthese aus Methanol als Zwischenprodukt (MTS: Methanol To Synfuel).

FT-Verfahren lassen sich nach verschiedenen Kriterien unterscheiden:

Temperatur: Hochtemperaturverfahren im wesentlichen zur Ottokraftstoffproduktion (300-350 °C) und Niedertemperaturverfahren zur Dieselproduktion (200-240 °C)

Restgasverwertung: Full Conversion mit Rückführung zur Ausbeutemaximierung und Once Through mit Verstromung

Katalysatormetall: Eisen: weniger Methan, katalysiert CO-Shift, stark gehemmt durch Wasser; Kobalt: mehr Methan, robuster gegen Wasser

Reaktorbauformen:

- Slurry bubble column reactor (SBCR - vor allem NT)
- (Festbett-)Rohrbündelreaktor (Tubular fixed bedreactor – TFBR, vor allem NT)
- Wirbelschichtreaktoren (vor allem HT), zirkulierend und stationär

Die beiden NT-Reaktoren, SBCR und TFBR weisen unterschiedliche Vor- und Nachteile auf. Der TFBR ist das ältere Konzept mit größerem Wartungsaufwand, aber leichter Wachsabtrennung.

Neben Mitteldestillaten, die noch einem Hydrotreating unterzogen werden, bilden Wachse einen Hauptbestandteil der NT-FT-Synthese. Die Aufbereitung der Wachse erfolgt durch Hydrocracking.

Beim MTS-Verfahren wird aus dem Synthesegas zunächst in einem etablierten Verfahren Methanol erzeugt. Das Methanol wird zu Kraftstoffen oligomerisiert. Für das Verfahren wird von einem Teil der BTL-Entwickler eine Selektivität und Ausbeute erwartet, die über der der FT-Synthese liegen.

6.2 Untersuchte Konzepte

Im Folgenden werden die einzelnen BTL-Konzepte in der Form beschrieben, wie sie in kommerziellen Großanlagen realisiert werden sollen. Aus den unterschiedlichen Entwicklungsständen der einzelnen Konzepte und Schwerpunkten der F&E-Tätigkeiten ergeben sich unterschiedlich konkrete Aussagen zu einzelnen Punkten.

6.2.1 Carbo-V, Choren

Choren favorisiert zur Zeit die Kombination des Carbo-V-Verfahrens, eines mehrstufigen Biomassevergasungsprozesses, zur Synthesegaserzeugung mit der SMDS (Shell Middle Distillate Synthesis), einer FT-Synthese incl. Aufbereitung.

Entwicklungsstand

In einer Pilotanlage (Alpha-Anlage) in Freiberg können aus stückiger Biomasse einige Hundert Liter BTL-Kraftstoff pro Tag produziert werden. Der Vergaser hat eine Leistung von etwa 1 MW.

Für 2007 ist die Inbetriebnahme einer Anlage mit einem Output von 1,7 Tonnen pro Stunde (Vergaserleistung 45 MW) geplant, ebenfalls in Freiberg (Beta-Anlage). Die Anlage soll kostendeckend arbeiten.

Der Baubeginn zu ersten Standardanlagen (Sigma-Anlagen) ist für 2007 geplant (200.000 t Kraftstoff aus 900.000 t Trocken-Biomasse pro Jahr).

Technik

Einsatzstoffe: Das Konzept ist grundsätzlich darauf ausgelegt, verschiedene Biomassearten einzusetzen. Die meisten Erfahrungen liegen für Holz vor, eine Reihe anderer Biomassen wurden aber ebenfalls in der Alpha-Anlage getestet. Die Biomasse wird mit einem Wassergehalt von etwa 15 % dem Prozess zugeführt. Die Trocknung von etwa 35 bis auf 15 % Wassergehalt kann falls erforderlich durch Prozessabwärme am Standort erfolgen.

Niedertemperaturvergasung: In der ersten Stufe der Synthesegaserzeugung wird Biomasse bei etwa 400-500 °C mit Sauerstoff (ggf. mit Zusatz von Inertgas und Wasserdampf) verschwelt (partielle Oxidation). Dabei entstehen ein teerhaltiges Gas und Biokoks.

Hochtemperaturvergasung: Die eigentliche Synthesegaserzeugung erfolgt in einem Flugstromvergaser. Das teerhaltige Schwelgas wird in der oberen Reaktorzone mit Sauerstoff exotherm bei etwa 1.400 °C teiloxidiert. In der unteren Reaktorzone wird der gemahlene Biokoks in das Gas eingeblasen. Dort entsteht endotherm Syntheserohgas, wobei die Temperatur des Gasstroms auf etwa 800 °C sinkt. Die entstehende Schlacke ist im Straßen- und Wegebau einsetzbar oder schlechtestenfalls direkt deponierbar.

Gaskonditionierung: Das Rohgas wird abgekühlt und die Abwärme zur Dampferzeugung genutzt. Anschließend wird das Rohgas entstaubt (Rückführung des Staubs in den Vergaser), gewaschen (Schwefel- und Chlorabtrennung) und konvertiert (Wasserstoffshift). Im Folgenden wird CO₂ ausgewaschen und das Gas einer Feinstreinigung unterzogen.

Kraftstoffsynthese: Das Syngas wird verdichtet und in einer FT-Synthese (Co-Katalysator) werden als Rohprodukte Diesel und Wachse erzeugt, die weiter zu Kraftstoffen aufbereitet werden. Die FT-Technik stammt von Shell.

Energieversorgung: Biomasse stellt den einzigen energetischen Input dar. Die Anlage ist damit hinsichtlich eingesetzter Endenergien autark. Die Stromerzeugung kann auf verschiedene Art erfolgen. Eine Möglichkeit besteht im Einsatz von Dampfturbinen. Der Dampf wird dabei aus dem Prozess (z.B. Rohgaskühlung) mit Stützung durch die Verbrennung von Restgasen gewonnen.

6.2.2 FZK

Das FZK-Konzept basiert auf einem zweistufigen Verfahren zur Synthesegaserzeugung. Die erste Stufe der thermischen Konversion von Biomasse erfolgt dezentral in relativ kleinen Anlagen. Das Produkt ist ein transport- und pumpfähiger Slurry mit hoher Volumen-Energiedichte. Das Konzept zielt darauf ab, durch die erste Stufe auch Stroh als BTL-Input zu nutzen und die Logistik kostengünstiger als mit zentralen Großanlagen zu gestalten.

Entwicklungsstand

Die Pyrolysetechnik ist für andere Anwendungen als die Biomassepyrolyse ausgereift. Die Anpassung an Biomasse ist weit fortgeschritten. Der Flugstromreaktor ist ebenfalls weitentwickelt. Entwicklungsbedarf besteht hinsichtlich des Gesamtdesigns, also u.a. der Qualifizierung der Slurries als Input für einen Druckvergaser sowie der Integration von Gaskonditionierung und Kraftstoffsynthese, und damit verbundenen Optimierungen. Entsprechende Arbeiten werden in einem von der FNR geförderten Projekt zum Bau einer Pilotanlage (Durchsatz 0,5 t/h) im FZK durchgeführt.

Technik

Einsatzstoffe: Das Konzept ist explizit angelegt auf die Nutzung problematischer Biomassen, zu denen vor allem Halmgüter gehören. In der Pyrolyse können Halmgüter verarbeitet werden, der Wassergehalt sollte unter 15 % liegen. Im Druck-Flugstromreaktor wurden bisher zahlreiche verschiedene Slurries mit sehr unterschiedlichen Anteilen an Koks, Asche usw. und Heizwerten umgesetzt.

Pyrolyse: In der ersten Stufe wird Biomasse bei etwa 500 °C und Normaldruck in kleinen dezentralen Anlagen pyrolysiert. Dazu wird die Biomasse schnell mit einem etwa zehnfachen Überschuss an heißem Sand gemischt und durch einen Doppel-Schraubenreaktor (Lurgi) transportiert. Es entstehen drei Fraktionen: Pyrolysegas, Pyrolyseöl und Pyrolysekoks. Mit dem Pyrolysegas wird der Prozess beheizt und Strom erzeugt. Der Pyrolysekoks wird gemahlen und mit dem Öl zu einem gut lager- und transportfähigen Slurry gemischt. Der Slurry wird zur Weiterverarbeitung zu zentralen Großanlagen transportiert.

Synthesegaserzeugung: Die Synthesegaserzeugung erfolgt in einem druckaufgeladenen Flugstromreaktor. Der Slurry wird mit Sauerstoff bei etwa 1.200 °C und 25 bar umgesetzt (Deutsches Brennstoffinstitut, Future Energy); für Großanlagen sind mehr als 60 bar vorgesehen.

Auslegung der Gaskonditionierung, Kraftstoffsynthese und Energieversorgung für zukünftige Großanlagen sind noch relativ unbestimmt.

6.2.3 TU Freiberg

Die im BTL-Konzept der TU Freiberg vorgeschlagene Konversionslinie umfasst die druckaufgeladene Wirbelschichtvergasung, die zweistufige Gaskonditionierung, die Methanolsynthese und die MtS[®]-Synthese. Für die großtechnische Anwendung favorisieren die Entwickler aus Gründen der Biomasselogistik eine Trennung der BTL-Kette. Die dezentralen Konversionseinheiten Vergasung-Methanolsynthese sind räumlich von der Kraftstoffherstellung getrennt. In zentralen Großanlagen an Raffinerie- oder Chemiestandorten findet die Verarbeitung des Methanols zu BTL-Kraftstoff statt. Die Bereitstellung des Inputs einer solchen BTL-Zentralanlage wird konzeptgemäß von mehreren Methanolanlagen übernommen.

Entwicklungsstand

Das Konzept wurde in einer Planungsstudie mit Förderung der FNR entwickelt. Die Komponenten sind in unterschiedlichen Realisierungsmaßstäben als Einzeltechnologie demonstriert. Der sich in Planung befindliche Wirbelschichtvergaser wird im Pilotmaßstab 10 MW_{th} betrieben werden. Die Komponenten Gaskonditionierung und Methanolsynthese sind Stand der Technik und im Industriemaßstab nachgewiesen. Entwicklungsbedarf besteht hinsichtlich des Gesamtdesigns, also der Integration und Verknüpfung der einzelnen Prozessschritte. In einer laufenden Engineering-Studie, die bis Ende 2006 vorliegen soll, wird mit Förderung des BMVEL (FNR) das Basic Engineering für eine schlüsselfertige Pilotanlage zur Herstellung von Methanol aus Biomasse erarbeitet. Die MTS-Synthese wird in einem gesonderten Projekt bearbeitet.

Technik

Einsatzstoffe: Die Biomasse wird in Form von Hackgut oder Pellets dem Vergasungsreaktor zugeführt (Wassergehalt bis 12 %). Holz und Stroh können damit gleichermaßen konvertiert werden.

Synthesegaserzeugung: Die Biomasse wird in einem druckaufgeladenen Wirbelschichtvergaser bei etwa 30 bar mit Dampf und Sauerstoff autotherm umgesetzt. Vergaserkonstruktion und Betriebsweise sind darauf ausgerichtet, eine in der Landwirtschaft rezyklierbare Asche zu liefern.

Gaskonditionierung: Das Rohgas wird unter Nutzung der Abwärme zur Dampferzeugung gekühlt. Nach der Entstaubung erfolgen Konvertierung (CO-Shift) und Gaswäsche (Rectisol-Verfahren zur CO₂- und H₂S-Abtrennung).

Kraftstoffsynthese: Aus dem konditionierten Synthesegas wird Methanol erzeugt (Lurgi-Verfahren). Die Kraftstoffsynthese (Olefinsynthese, Oligomerisierung und Upgrading) kann entweder am Ort der Methanolerzeugung realisiert werden (zentrales Konzept) oder – bevorzugt – in Großanlagen (dezentrales Konzept). Das MtS[®]-Verfahren wurde u.a. aufgrund der erwarteten höheren Kohlenstoffeffizienz und Produktflexibilität sowie besseren Dieselselektivität für die Kraftstoffsynthese vorgeschlagen. Methanol als gut lager- und transportfähiges Zwischenprodukt mit verschiedenen Verwendungsmöglichkeiten in zukünftigen Antriebskonzepten ermöglicht die als strategisch wichtig betrachtete Trennung der BTL-Prozesskette. Die Option der Einbindung extern erzeugten Methanols sichert die Verfügbarkeit synthetischer Kraftstoffe.

Energieversorgung: Im Fokus des laufenden Projektes steht der technische Nachweis der Konversionslinie bis zur Methanolsynthese mit der stofflichen und energetischen Bilanzie-

rung der Einzelkomponenten. Das interne Energiemanagement eines ganzen Konversionskomplexes wird erst im darauf folgenden Entwicklungsschritt von der Pilot- zur Demonstrationsanlage Gegenstand sein.

6.2.4 TU Wien

Das Konzept der TU Wien umfasst eine Wirbelschichtvergasung, mehrere Gaskonditionierungsschritte, FT-Synthese und Aufbereitung der FT-Rohprodukte. Die Aufbereitung der FT-Rohprodukte soll in Raffinerien erfolgen. Das Konzept wurde in einer zentralen und einer dezentralen Variante entwickelt. Die Begriffe zentral/dezentral beziehen sich hier nicht auf eine räumliche Teilung der Prozesskette sondern auf die Struktur eines umfassenden BTL-Produktionssystems. Der Unterschied zwischen den beiden Konzepten besteht erstens in der Anlagengröße und damit -anzahl zur Produktion einer bestimmten Menge BTL-Kraftstoff (zentral: „wenige große“ Anlagen; dezentral: größere Anzahl kleinerer Anlagen) und zweitens darin, dass die zentralen Anlagen auf eine hohe BTL-Ausbeute optimiert sind, während in den dezentralen nutzbare Wärmeüberschüsse anfallen (die Aufarbeitung der FT-Rohprodukte erfolgt in beiden Fällen in Raffinerien). Ein wichtiger technischer Unterschied betrifft den Betrieb der Vergaser, der bei der dezentralen Anlage atmosphärisch und bei der zentralen Anlage druckaufgeladen erfolgt. In beiden Konzepten fallen erhebliche Mengen Überschussstrom an. Die energetischen Nebenprodukte sind wesentlich für die Wirtschaftlichkeit der Konzepte. Die Entwickler bevorzugen das dezentrale Konzept (einfachere Biomasselogistik, einfachere FT-Technik, Absatzmöglichkeit für Wärmeüberschüsse).

Entwicklungsstand

Für den Vergasertyp bestehen unter allerdings anderen Betriebsbedingungen umfangreiche Betriebserfahrungen aus einer Anlage in Güssing (KWK-Anlage mit Gasmotor zur Erzeugung von Strom und Wärme). Eine Pilotanlage für die gesamte Prozesskette (Biomasse zu Roh-FT-Produkt) befindet sich zurzeit im Probebetrieb, wobei im Jahr 2005 die ersten Liter Dieselmotoröl bereits erzeugt und untersucht wurden. Unter anderem im Rahmen des EU-Projekts RENEW finden Arbeiten zu verschiedenen Teilschritten des Konzepts statt.

Technik

Einsatzstoffe: Zur Zeit wird vor allem Holz betrachtet, das mit Abwärme aus der Anlage auf einen Wassergehalt von etwa 15 % getrocknet wird.

Synthesegaserzeugung dezentral: Der atmosphärisch betriebene Wirbelschichtreaktor besteht aus zwei Zonen. Die Biomasse wird in der Vergasungszone mit Dampf allotherm umgesetzt. Die nicht umgesetzte Biomasse wird mit Bettmaterial in die Verbrennungszone transportiert und dort mit Luft zum Aufheizen des Bettmaterials verbrannt. Durch die allotherme Prozessführung ist der CO₂-Gehalt des Rohgases relativ gering und macht damit eine CO₂-Wäsche entbehrlich.

Synthesegaserzeugung zentral: Der druckaufgeladene Wirbelschichtreaktor besteht analog zum dezentralen Konzept auch aus zwei Zonen. Die Biomasse wird in der Vergasungszone bei 20 bar mit Dampf allotherm umgesetzt. Die nicht umgesetzte Biomasse wird mit Bettmaterial in die Verbrennungszone transportiert und dort mit Luft zum Aufheizen des Bettmaterials verbrannt. Wie im dezentralen Konzept ist eine CO₂-Wäsche entbehrlich.

Gaskonditionierung: Das Rohgas wird gekühlt und in mehreren Schritten entstaubt und von Teer befreit. Die abgeschiedenen Stoffe werden in den Wirbelschichtreaktor rückgeführt, so dass keine Abfälle anfallen. Beim dezentralen Konzept wird nach der Entfernung von Staub und Teer das Gas auf ca. 20 bar verdichtet. In beiden Konzepten werden HCl und Schwefel bei ca. 20 bar mit Absorbentien entfernt. Im zentralen Konzept wird das Methan im Syngas durch Dampfreformierung zu H_2 und CO konvertiert.

Kraftstoffsynthese: Das Syngas wird in einem FT-Slurry-Reaktor zu BTL-Rohdiesel, -Rohbenzin und Wachs umgesetzt. Im zentralen Konzept wird ein Teil des unumgesetzten Syngases rückgeführt. Die FT-Rohprodukte werden sowohl im zentralen als auch im dezentralen Konzept in Raffinerien aufbereitet.

Energieversorgung: Das Konzept ist auf die Erzeugung von Strom und Wärme als vermarktbarere Kuppelprodukte der BTL-Kraftstoffe ausgelegt. Die Stromerzeugung erfolgt im dezentralen Konzept überwiegend mit Gasmotoren, kleinere Anteile werden durch die Entspannung des Brenngases vor dem Gasmotor und aus einem ORC-Prozess gewonnen. Außerdem fällt ein Wärmeüberschuss an. Im zentralen Konzept erfolgt die Stromerzeugung zu je etwas mehr als einem Drittel mit Dampf und Heißluftturbinen, der Rest mit Gasturbinen.

7 Datengenerierung

Wie in Abschnitt 3.3 dargestellt, lassen sich die Basisdaten hinsichtlich Quellen und Generierung in zwei Hauptkategorien unterteilen:

- Daten zur Produktion von BTL-Kraftstoffen aus bereitgestellter Biomasse
- Daten zu „Vorketten“ wie der Bereitstellung von Biomasse, den dazu notwendigen Betriebsstoffen wie Düngemitteln usw., und zur Nutzung von BTL

Die Daten zur BTL-Produktion wurden im Wesentlichen für diese Studie abgeleitet. Unterschieden werden können folgende Kategorien:

- Energetische In- und Outputs (Ausbeuten bzw. Wirkungsgrade)
- Sonstige In- und Outputs

Im Folgenden werden einige konzeptübergreifende Aspekte der BTL-Produktion erläutert. Anschließend wird die Datengenerierung für die einzelnen Konzepte dokumentiert. Abschließend werden Vorkettendaten und Daten zur Nutzung beschrieben.

7.1 In- und Outputs der BTL-Produktion

Entsprechend der Zielsetzung der Studie sollen die Basisdaten zur BTL-Produktion repräsentativ für zukünftige großtechnische Anlage sein. Entsprechend dem Ansatz der Bilanzierung sollen sich die In- und Outputdaten auf den gesamten Prozess „Biomasse zu Kraftstoff“ beziehen. Für In- und Outputs, die an verschiedenen Stellen anfallen, bedeutet das, dass sie summarisch erfasst werden.

Energetische In- und Outputs (Ausbeuten bzw. Wirkungsgrade)

Als Input wird (mit Ausnahme eines Konzepts in einem Szenario) nur Biomasse eingesetzt. Bilanzierungstechnisch wird der Input berechnet aus dem Wirkungsgrad der BTL-Produktion, der betrachteten Kraftstoffmenge und ggf. dem Heizwert. Der massenbezogene Biomasse-Input wird für alle Konzepte mit dem gleichen Heizwert und Wassergehalt berechnet. Die hier verwendeten massenbezogenen Daten können daher von Angaben der Entwickler abweichen. Wirksam werden diese Unterschiede nur auf der Ebene der Biomassetransporte, die für alle Konzepte gleich behandelt werden müssen.

Daten zu energetischen Wirkungsgraden wurden von den Entwicklern geliefert (Szenario „Ziel“) bzw. mit ihnen abgestimmt (Szenarien „Minimum“ und „H2-Import“). Über das Szenario „Minimum“ werden Unsicherheiten der Wirkungsgrade der gesamten Prozesskette erfasst.

Sonstige In- und Outputs

Zu diesen In- und Outputs zählen Betriebsstoffe, prozessspezifische Emissionen, Emissionen aus der Stromerzeugung, Nebenprodukte und Abfälle, für die generische Daten aus verschiedenen Quellen (IFEU-Datenbank, Berechnungen) usw. angesetzt werden. Zu Betriebsstoffen liegen auch einzelne Daten von Entwicklern vor, die, wo dies sinnvoll ist, auch für die übrigen Konzepte angesetzt werden. Die Daten zu sonstigen In- und Outputs sind mit höheren Unsicherheiten behaftet als die energetischen Daten.

Das gilt u.E. besonders für Betriebsstoffe zur Gaskonditionierung. Für einzelne Konzepte liegen zwar bereits Daten vor, für andere ist aber die Verfahrensfestlegung noch relativ vage. Außerdem sind noch Änderungen bis zum Betrieb großtechnischer Anlagen möglich – ein effizienter, betriebssicherer Vergasertyp wird falls nötig eine zusätzliche, zunächst nicht geplante Gaskonditionierungsstufe erhalten, wenn das Gesamtsystem damit besser funktioniert. Um die Umweltwirkungen der Gaskonditionierung zukünftiger großtechnischer Anlage zumindest größenordnungsmäßig zu erfassen, nehmen wir für alle Konzepte eine fiktive „mittlere“ Gasreinigung mit drei Waschadditiven an (NaOH, Methanol, Amin). Wenn entsprechende Wäschen seitens der Entwickler zur Zeit nicht vorgesehen sind, wird ausdrücklich darauf hingewiesen. Die Ergebnisse der Bilanzen zeigen, dass diese Betriebsstoffe nicht ergebnisrelevant sind.

7.1.1 Carbo-V, Choren

Die Daten der einzelnen In- und Outputflüsse werden aus verschiedenen Quellen und nach verschiedenen Ansätzen abgeleitet.

- Der BTL-Output und Stromüberschuss wird gemäß Angaben von Choren angesetzt.
- Emissionen aus der Stromerzeugung werden basierend auf Angaben von Choren zu Heizwert und Menge von Abgasen aus der Verbrennung von Restgasen abgeleitet.
- Zur Ableitung der Mengen der Betriebsstoffe und prozessspezifischer Emissionen werden Informationen aus weiteren Quellen verwendet.
- Unterschieden werden vier Szenarien:
 - Ziel (energieautark, in etwa entsprechend der Zielvorstellungen der Entwickler),
 - Minimum (energieautark, untere Abschätzung),

- H₂-Import (optimiert auf Kraftstoffausbeute durch H₂-Import),
- MTS (Kraftstoffsynthese via Methanol statt Fischer-Tropsch-Synthese)

7.1.1.1 Szenario „Ziel“

Die zentralen Informationen sind die von Choren zur Verfügung gestellten Daten, die die Energie-In- und -Outputs beschreiben. Diese Daten und ihre Verwendung werden zunächst beschrieben. Anschließend wird die Erfassung der übrigen In- und Outputs skizziert.

Basisdaten von Choren: energetische In- und Outputs

Choren hat eine Energiebilanz des Gesamtprozesses „Biomasse zu Dieselkraftstoff“ und ergänzende Informationen zur Verfügung gestellt [Rudloff 2005/06]. Die Energieflüsse sind als Leistungen ausgewiesen. Die Referenzgröße ist ein Biomassedurchsatz (Holz) von 500 MW. Die Daten werden auf einen Input von 1 MJ Biomasse umgerechnet. Neben dem BTL-Output liegen alle relevanten Daten zu Stromversorgung vor (erzeugte und verbrauchte Menge, Brennstoffmenge zur Emissionsberechnung). Die Stromerzeugung erfolgt mit Dampfturbinen; der Dampf wird aus dem Prozess (z.B. Rohgaskühlung) mit Stützung durch die Verbrennung von Restgasen gewonnen. Ein Wärmeüberschuss wird nicht ausgewiesen.

Die Daten zu BTL-Ausbeute und Stromüberschuss werden direkt übernommen und unterschiedslos für Holz und Stroh, die beide als Biomasseinput eingesetzt werden können, verwendet. Die Emissionen aus der Verbrennung der Restgase (als „Weitere Emissionen“ in den Abbildungen) werden gemäß [GEMIS 2005] angesetzt.

Übrige In- und Outputs

Waschadditive: NaOH, Methanol, Amin: generische Daten, identisch für alle Verfahren, Ableitung u.a. aus [BVT Raffinerie 2003] (in der aktuellen Konzeption von Choren sind keine Methanol- und Aminwäschen vorgesehen; zur Begründung des Ansatzes hier siehe Abschnitt 7.1, Thema „Sonstige In- und Outputs“)

Fischer-Tropsch-Katalysator: generische Daten, identisch für alle Verfahren

Schwefel: aus der Biomassezusammensetzung, identisch für alle Verfahren (in der aktuellen Konzeption von Choren wird Schwefel mit dem Abwasser beseitigt; zur Begründung des Ansatzes hier siehe Abschnitt 7.1, Thema „Sonstige In- und Outputs“)

Asche/Schlacke: aus der Biomassezusammensetzung, identisch für alle Verfahren. Die Schlacke ist deponiefähig und verwertbar.

Prozessspezifische Emissionen: SO₂ (Entschwefelung; in der aktuellen Konzeption von Choren ist keine Schwefelerzeugung mit SO₂-Emissionen vorgesehen; zur Begründung des Ansatzes hier siehe Abschnitt 7.1, Thema „Sonstige In- und Outputs“) und Kohlenwasserstoffe (Kraftstoffsynthese): generische Daten, identisch für alle Verfahren, abgeleitet aus [IZT_UBA 2003]

Die In- und Outputs sind in Abb. 7-18 zusammengefasst.

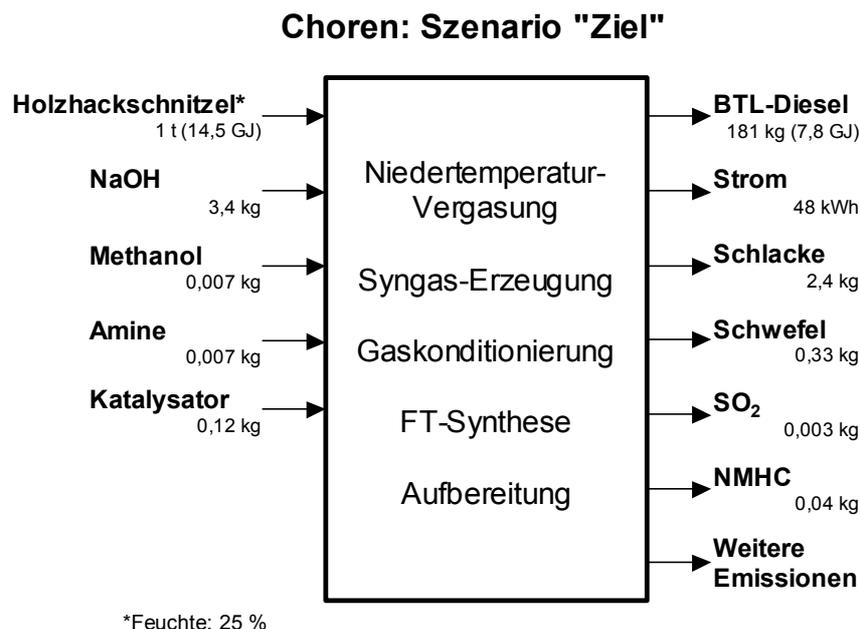


Abb. 7-18 In dieser Studie für das Choren-Konzept im Szenario „Ziel“ bilanzierte In- und Outputs

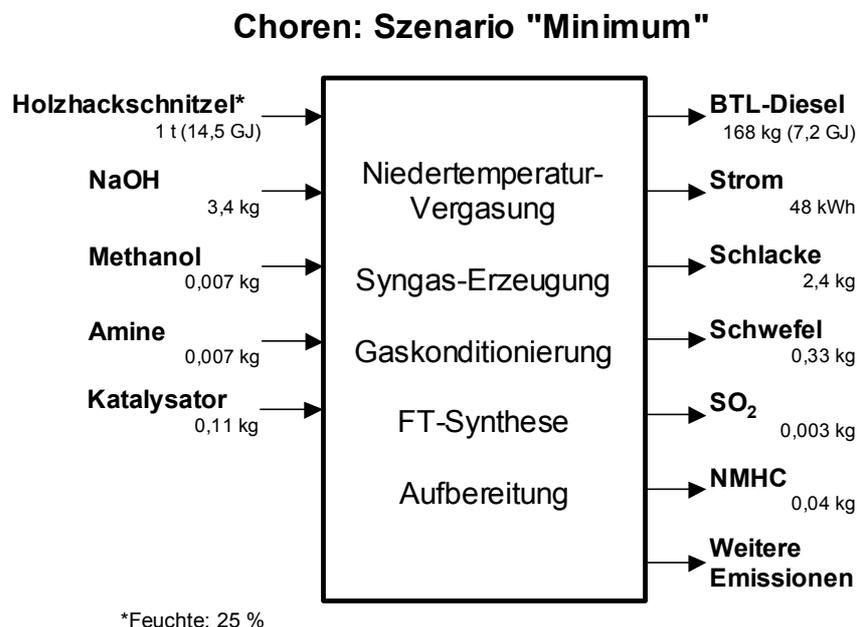


Abb. 7-19 In dieser Studie für das Choren-Konzept im Szenario „Minimum“ bilanzierte In- und Outputs

7.1.1.2 Szenario „Minimum“

Im Basisszenario „Ziel“ werden die Daten von Choren, insbesondere die Kraftstoffausbeute, angesetzt. Da möglicherweise nicht alle zur Zielerreichung notwendigen technischen Teilziele erreicht werden, wird hier eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, in der eine gegen-

über „Ziel“ um 4 %-Punkte (etwa 7,5 %) reduzierte BTL-Ausbeute angesetzt wird. Weitere Änderungen werden nicht modelliert.

Die In- und Outputs sind in Abb. 7-19 zusammengefasst.

7.1.1.3 Szenario „H2-Import“

Für eine maximale Nutzung des Kohlenstoffinventars in BTL wird allgemein auch der Import von Wasserstoff in den BTL-Prozess diskutiert. Allerdings ist aus Sicht von Choren dieser Pfad zumindest für mitteleuropäische Verhältnisse unrealistisch; insbesondere regenerativer Strom sollte, solange er sinnvoll im europäischen Stromnetz untergebracht werden kann, nicht zur Wasserstofferzeugung verwendet werden. Trotz dieser Einschätzung der Entwickler wird hier - ohne Bewertung der insbesondere ökonomischen Realitätsnähe - ein H2-Importszenario angesetzt und von IFEU modelliert, um einen vollständigen Vergleich des Einflusses dieser Konzeption auf alle untersuchten Verfahren zu ermöglichen.

Zur Abschätzung der Umwelteffekte wird hier vereinfacht angenommen, dass die BTL-Ausbeute um 50 % erhöht wird und die entsprechende Menge Wasserstoff aus externen Quellen importiert wird. Weitere Änderungen, etwa bei der Gaskonditionierung oder Stromerzeugung, werden nicht modelliert.

Die In- und Outputs sind in Abb. 7-20 zusammengefasst.

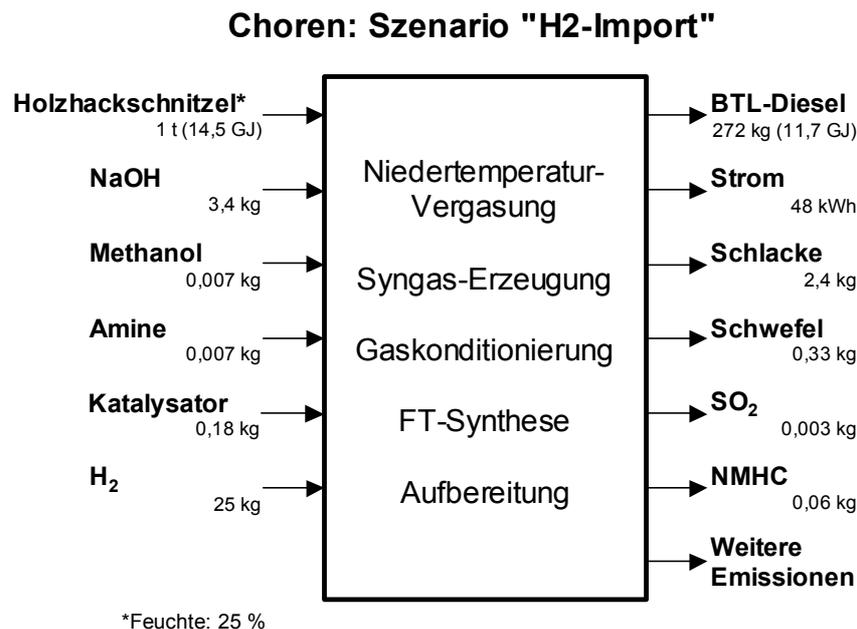


Abb. 7-20 In dieser Studie für das Choren-Konzept im Szenario „H2-Import“ bilanzierte In- und Outputs

7.1.1.4 Szenario „MTS“

Als Alternative zur FT-Synthese wird auch für das Carbo-V-Verfahren der MTS-Pfad betrachtet. Die Modellierung erfolgt anhand von Daten von Choren. Die BTL-Ausbeute wird höher angesetzt als im Basisszenario. Zusätzlich ist der Einsatz von Erdgas erforderlich. Weitere Änderungen werden nicht modelliert.

Die In- und Outputs sind in Abb. 7-21 zusammengefasst.

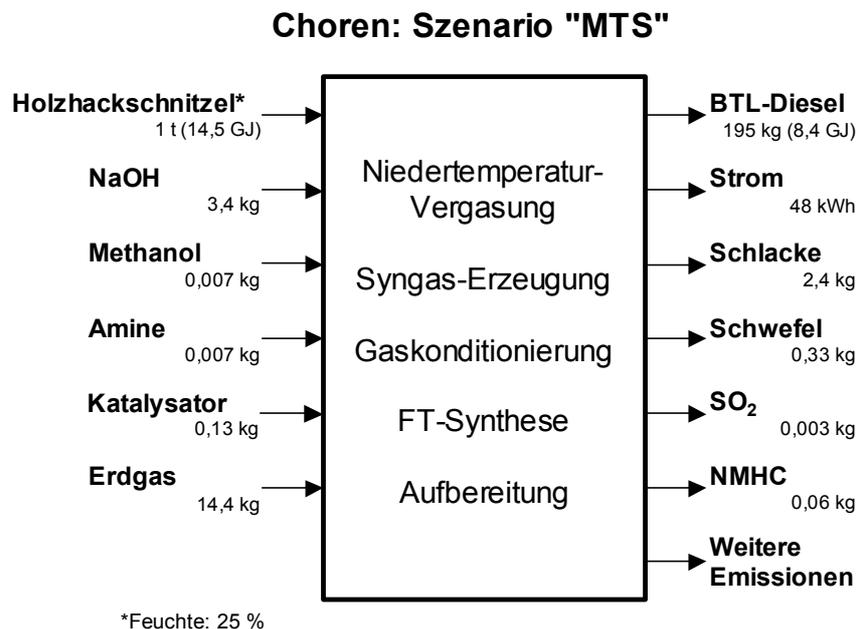


Abb. 7-21 In dieser Studie für das Choren-Konzept im Szenario „MTS“ bilanzierte In- und Outputs

Die Wirkungsgrade in den einzelnen Szenarien sind in Tabelle 7-1 zusammengefasst.

7.1.2 FZK

Die Daten der einzelnen In- und Outputflüsse werden aus verschiedenen Quellen und nach verschiedenen Ansätzen abgeleitet.

- Der BTL-Output wird gemäß Angaben des FZK angesetzt.
- Der Stromüberschuss wird gemäß Angaben des FZK und zusätzlichen Annahmen berechnet.
- Emissionen aus der Stromerzeugung werden aus Angaben des FZK zur produzierten Strommenge und generischen Emissionsfaktoren berechnet.
- Zur Ableitung der Betriebsstoffverbräuche, Reststoffmengen und prozessspezifischen Emissionen werden Informationen aus weiteren Quellen verwendet.
- Unterschieden werden drei Szenarien:
 - Ziel (energieautark, in etwa entsprechend der Zielvorstellungen der Entwickler),
 - Minimum (energieautark, untere Abschätzung),
 - H₂-Import (optimiert auf Kraftstoffausbeute durch H₂-Import).

7.1.2.1 Szenario „Ziel“

Die zentralen Informationen sind die von vom FZK zur Verfügung gestellten Daten, die die energetischen In- und Outputs beschreiben. Diese Daten und ihre Verwendung werden zunächst beschrieben. Anschließend wird die Erfassung der übrigen In- und Outputs skizziert.

Basisdaten des FZK und zusätzliche Annahmen

Das FZK hat Daten bzw. qualitative Informationen zu folgenden Parametern zur Verfügung gestellt [Arendt 2005/06]:

- BTL-Ausbeute (Minimal- und optimistisches Ziel)
- heizwertbezogene Anteile von Pyrolysegas und Slurry und Slurrymasse
- heizwertbezogene Anteile der Pyrolysegasnutzung zur Strom- und Wärmeproduktion (Gasmotor und Brenner)
- Stromproduktion der zentralen Prozessschritte (Dampfturbine; Dampf aus Rohgasabhitze und Reaktionswärme der Kraftstoffsynthese plus Stützfeuerung mit Restgasen)
- Stromeigenverbrauch von Pyrolyse und von zentralen Prozessschritten
- Sandverbrauch der Pyrolyse (grobe Maximalschätzung)

Mit Ausnahme der BTL-Ausbeute beziehen sich die Daten überwiegend auf Masseneinheiten Biomasse, deren Heizwert mit 16 bis 18 MJ / kg angegeben wird. Mit einem Heizwert von 16 bis 18 MJ / kg werden die Daten auf 1 MJ Biomasse umgerechnet.

Die Daten zu BTL-Ausbeute und zum Sandverbrauch werden direkt übernommen. Zur Höhe des Stromeigenverbrauchs der Pyrolyse und zum Wirkungsgrad der Stromerzeugung sind Zusatzannahmen erforderlich. Wärmeüberschüsse werden nicht berücksichtigt. Die Verbrennungsemissionen (als „Weitere Emissionen“ in den Abbildungen) werden gemäß [GEMIS 2005] angesetzt. Die Daten werden unterschiedslos für Holz und Stroh, die beide als Biomasseinput eingesetzt werden können, verwendet.

Übrige In- und Outputs

Waschadditive: NaOH, Methanol, Amin: generische Daten, identisch für alle Verfahren, Ableitung u.a. aus [BVT Raffinerie 2003] (zur Begründung des Ansatzes hier siehe Abschnitt 7.1, Thema „Sonstige In- und Outputs“)

Fischer-Tropsch-Katalysator: generische Daten, identisch für alle Verfahren

Schwefel: aus der Biomassezusammensetzung, identisch für alle Verfahren (zur Begründung des Ansatzes hier siehe Abschnitt 7.1, Thema „Sonstige In- und Outputs“)

Asche/Schlacke: aus der Biomassezusammensetzung (identisch für alle Verfahren) und dem Sandverbrauch

Prozessspezifische Emissionen: SO₂ (Entschwefelung) und Kohlenwasserstoffe (Kraftstoffsynthese): generische Daten, identisch für alle Verfahren; abgeleitet aus [IZT_UBA 2003]

Die In- und Outputs sind in Abb. 7-22 zusammengefasst.

FZK, dezentral: Szenario "Ziel"

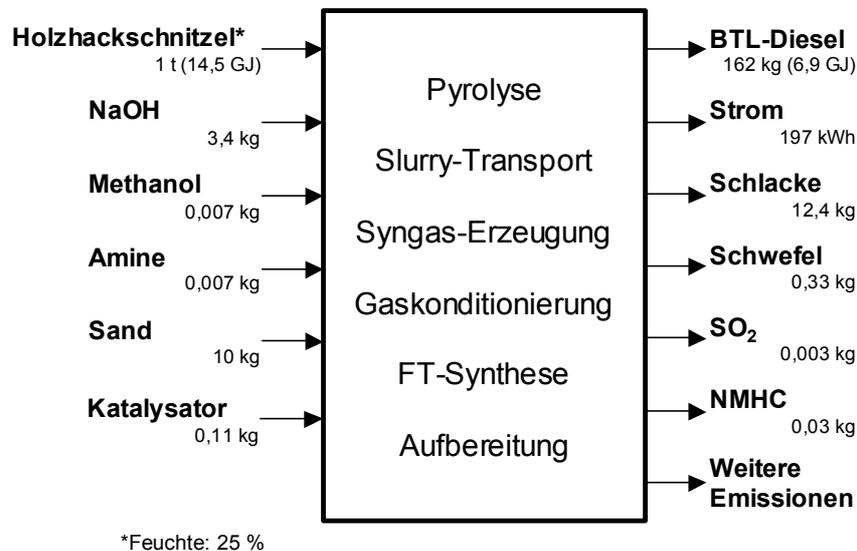


Abb. 7-22 In dieser Studie für das FZK-Konzept im Szenario „Ziel“ bilanzierte In- und Outputs

FZK, dezentral: Szenario "Minimum"

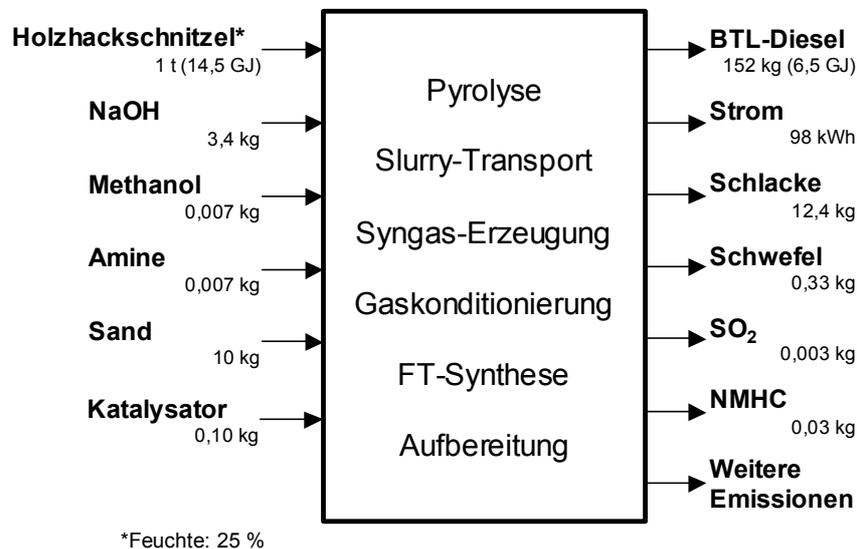


Abb. 7-23 In dieser Studie für das FZK-Konzept im Szenario „Minimum“ bilanzierte In- und Outputs

7.1.2.2 Szenario „Minimum“

Im Basisszenario „Ziel“ werden die Daten des FZK, insbesondere die Kraftstoffausbeute, angesetzt. Da möglicherweise nicht alle zur Zielerreichung notwendigen technischen Teilziele erreicht werden, wird hier eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, in der die vom FZK

als mindestens erreichbar eingeschätzte BTL-Ausbeute angesetzt wird [Arendt 2005/06]. Außerdem nehmen wir für den Stromüberschuss eine Halbierung an (ohne Spezifizierung, ob die Produktion geringer und/oder der Eigenverbrauch höher ist als in „Ziel“). Weitere Änderungen werden nicht modelliert.

Die In- und Outputs sind in Abb. 7-23 zusammengefasst.

7.1.2.3 Szenario „H2-Import“

Für eine maximale Nutzung des Kohlenstoffinventars in BTL wird allgemein auch der Import von Wasserstoff in den BTL-Prozess diskutiert. Auch aus Sicht des FZK kann dies unter bestimmten Bedingungen und für bestimmte Arten der Wasserstoffherzeugung sinnvoll sein. In dieser Studie werden diese Bedingung allerdings evtl. nicht betrachtet; das H2-Importszenario wird vielmehr für alle untersuchten Verfahren gleich angesetzt, um einen vollständigen Vergleich des Einflusses dieser Konzeption auf alle untersuchten Verfahren zu ermöglichen.

Zur Abschätzung der Umwelteffekte wird hier vereinfacht angenommen, dass die BTL-Ausbeute um 50 % erhöht wird und die entsprechende Menge Wasserstoff aus externen Quellen importiert wird. Weitere Änderungen, etwa bei der Gaskonditionierung oder Stromerzeugung, werden nicht modelliert. Aus Sicht des FZK ist eine detailliertere Betrachtung allerdings dringend empfehlenswert.

Die In- und Outputs sind in Abb. 7-24 zusammengefasst.

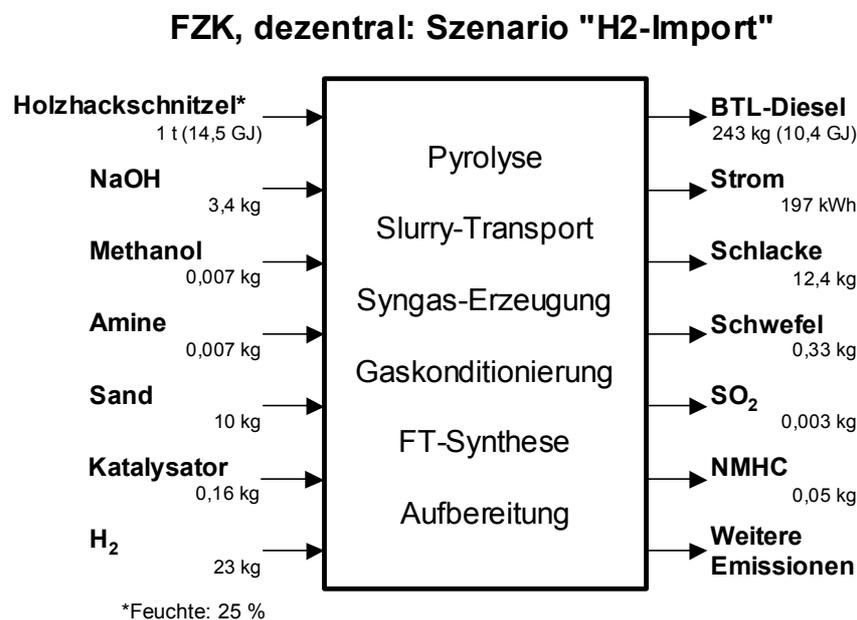


Abb. 7-24 In dieser Studie für das FZK-Konzept im Szenario „H2-Import“ bilanzierte In- und Outputs

Die Wirkungsgrade in den einzelnen Szenarien sind in Tabelle 7-1 zusammengefasst.

7.1.3 TU Freiberg

Die Daten der einzelnen In- und Outputflüsse werden aus verschiedenen Quellen und nach verschiedenen Ansätzen abgeleitet.

- Der BTL-Output wird abgestimmt mit der TU Freiberg angesetzt.
- Zur Ableitung der Betriebsstoffe und Emissionen werden Informationen aus weiteren Quellen verwendet.
- Unterschieden werden drei Szenarien:
 - Ziel (energieautark, in etwa entsprechend der Zielvorstellungen der Entwickler),
 - Minimum (energieautark, untere Abschätzung),
 - H2-Import (optimiert auf Kraftstoffausbeute durch H2-Import)

Im zentralen Konzept erfolgen Methanolsynthese und BTL-Synthese am gleichen Standort, im dezentralen räumlich getrennt. Außerdem unterscheiden sich die Anlagen in ihrer Größe. Im dezentralen Konzept wird eine BTL-Anlage von jeweils mehreren Methanolanlagen beliefert.

7.1.3.1 Szenario „Ziel“

Die wichtigsten Informationen sind die von der TU Freiberg zur Verfügung gestellten Daten, die die energetischen In- und Outputs beschreiben, und Einschätzungen zu deren Anwendung bzw. Modifikation. Diese Daten und ihre Verwendung werden zunächst beschrieben. Anschließend wird die Erfassung der übrigen In- und Outputs skizziert.

Basisdaten der TU Freiberg: energetische In- und Outputs

Die TU Freiberg hat umfangreiche Daten zu energetischen In- und Outputs bzw. Wirkungsgraden der einzelnen Prozessstufen einer zentralen Anlage zur Verfügung gestellt (neben Biomasse, Energieinhalt bzw. energetische Vorleistungen von Dampf, Sauerstoff usw.) [IEC 2004, Radig 2005/06]. Die Daten für die einzelnen Prozessstufen wurden jedoch – u. a. abhängig vom Entwicklungsstand der jeweiligen Stufe – mit unterschiedlichen Methoden und für unterschiedliche Anlagengrößen berechnet bzw. erhoben. Darüber hinaus ist in den Basisdaten das interne Energiemanagement (Strom- und Wärmeproduktion und -eigenverbrauch) noch nicht abgebildet.

Basierend auf diesen Daten und abgestimmt mit der TU Freiberg wurden daher Rechenwerte für die Wirkungsgrade der zentralen und dezentralen BTL-Produktion, die u.a. auch die Energieversorgung des BTL-Prozesses allein auf Biomassebasis mit erfassen, festgelegt [Radig 2005/06]. Für das zentrale Konzept wurden höhere Wirkungsgrade angesetzt (größere Anlagen und höhere Integrationsdichte). Für beide Konzepte wird davon ausgegangen, dass keine Strom- oder Wärmeüberschüsse anfallen. Zur Energieerzeugung werden u.a. Restgase genutzt. Die Verbrennungsemissionen (als „Weitere Emissionen“ in den Abbildungen) werden aus den Gasmengen und Emissionsfaktoren gemäß [GEMIS 2005] berechnet. Die Daten werden unterschiedslos für Holz und Stroh, die beide als Biomasseinput (Pellets) eingesetzt werden können, verwendet.

Übrige In- und Outputs

Pelletierung: Die hier abgeleiteten Daten beziehen sich auf Pellets als Input. Die Pelletierung von Holz und Stroh wird als gesonderter Prozess (generisch) erfasst.

Bettmaterial: Kalkstein und Olivin gemäß einem anderen Wirbelschichtverfahren [Rauch 2005/06]

Methanol- und MTS-Synthesekatalysatoren: generische Daten

Waschadditive: NaOH, Methanol, Amin: generische Daten, identisch für alle Verfahren, Ableitung u.a. aus [BVT Raffinerie 2003], Methanolbereitstellung intern (in der aktuellen Konzeption der TU Freiberg sind keine NaOH- und Aminwäschen vorgesehen; zur Begründung des Ansatzes hier siehe Abschnitt 7.1, Thema „Sonstige In- und Outputs“)

Schwefel: aus der Biomassezusammensetzung, identisch für alle Verfahren

Asche/Schlacke: aus Biomasse zuzüglich Bettmaterial (abzüglich CO₂ aus Kalkstein)

Prozessspezifische Emissionen: SO₂ (Entschwefelung) und Kohlenwasserstoffe (Kraftstoffsynthese): generische Daten, abgeleitet aus [IZT_UBA 2003]; CO₂ aus dem Einsatz von Kalkstein

Die In- und Outputs sind in Abb. 7-25 zusammengefasst.

7.1.3.2 Szenario „Minimum“

Im Basisszenario „Ziel“ werden für die beiden Konzepte (zentral und dezentral) für die Kraftstoffausbeuten optimistische Zielvorgaben angesetzt. Da möglicherweise nicht alle zur Zielerreichung notwendigen technischen Teilziele erreicht werden, wird hier eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dazu werden mit der TU Freiberg abgestimmt mindestens erreichbare BTL-Ausbeuten abgeschätzt. Die Ausbeuten werden gegenüber „Ziel“ um 20 % (also etwa 10%-Punkte) reduziert angesetzt. Weitere Änderungen werden nicht modelliert.

Die In- und Outputs sind in Abb. 7-26 zusammengefasst.

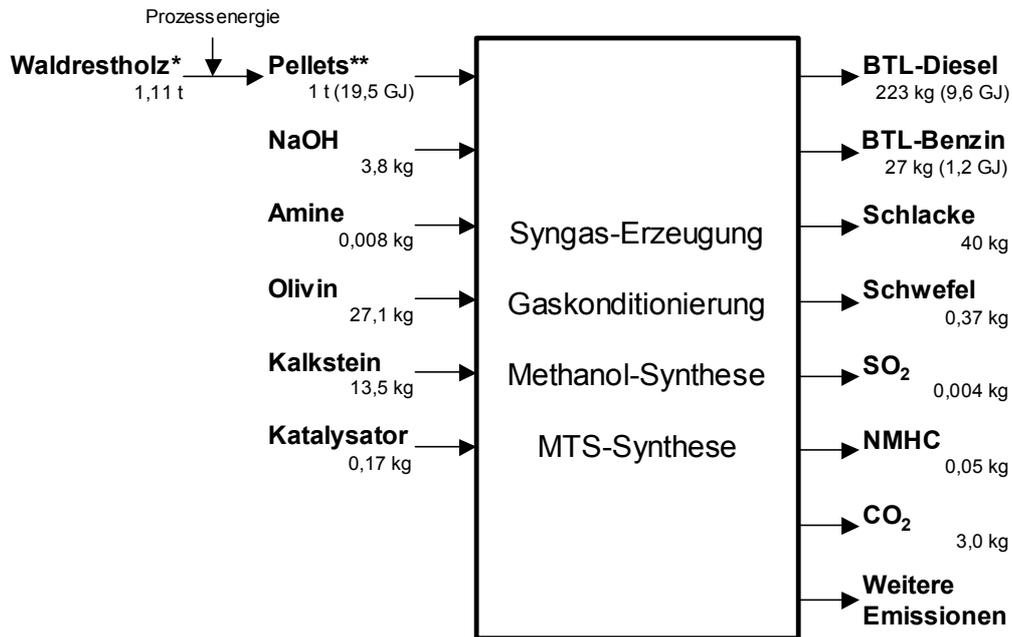
7.1.3.3 Szenario „H2-Import“

Für eine maximale Nutzung des Kohlenstoffinventars in BTL wird der Import von Wasserstoff in den BTL-Prozess diskutiert. Zur Abschätzung der Umwelteffekte setzen wir in beiden Konzepten (zentral und dezentral) vereinfacht eine um 50 % erhöhte BTL-Ausbeute an; die entsprechende Menge Wasserstoff wird aus externen Quellen importiert. Weitere Änderungen, etwa bei der Gaskonditionierung oder Stromerzeugung, werden nicht modelliert.

Die In- und Outputs sind in Abb. 7-27 zusammengefasst.

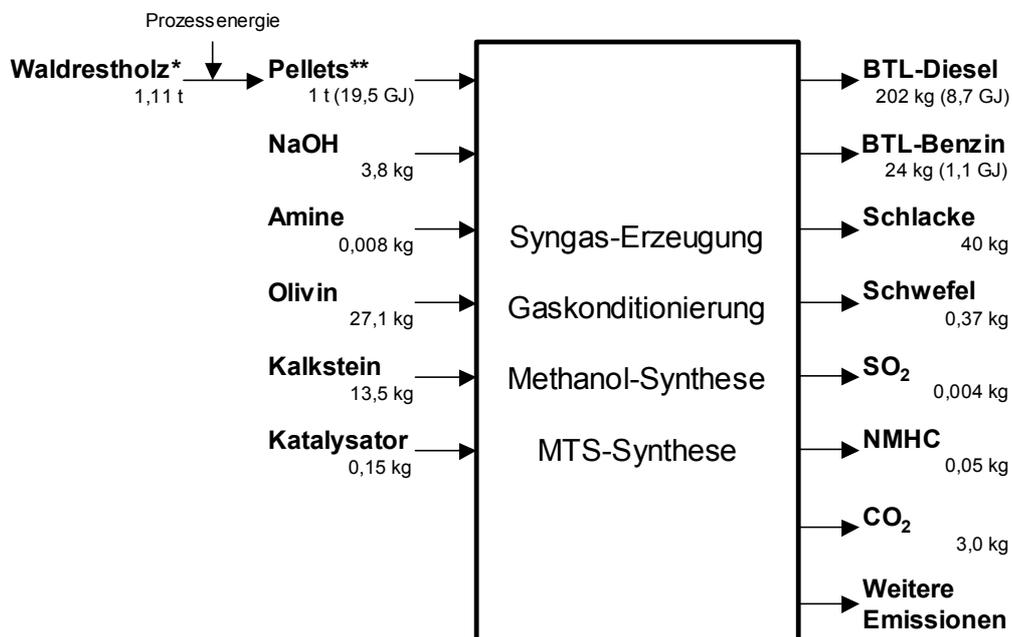
Die Wirkungsgrade in den einzelnen Szenarien sind in Tabelle 7-1 zusammengefasst.

TU Freiberg, zentral: Szenario "Ziel"



*Feuchte: 25 %; **Feuchte: 13%

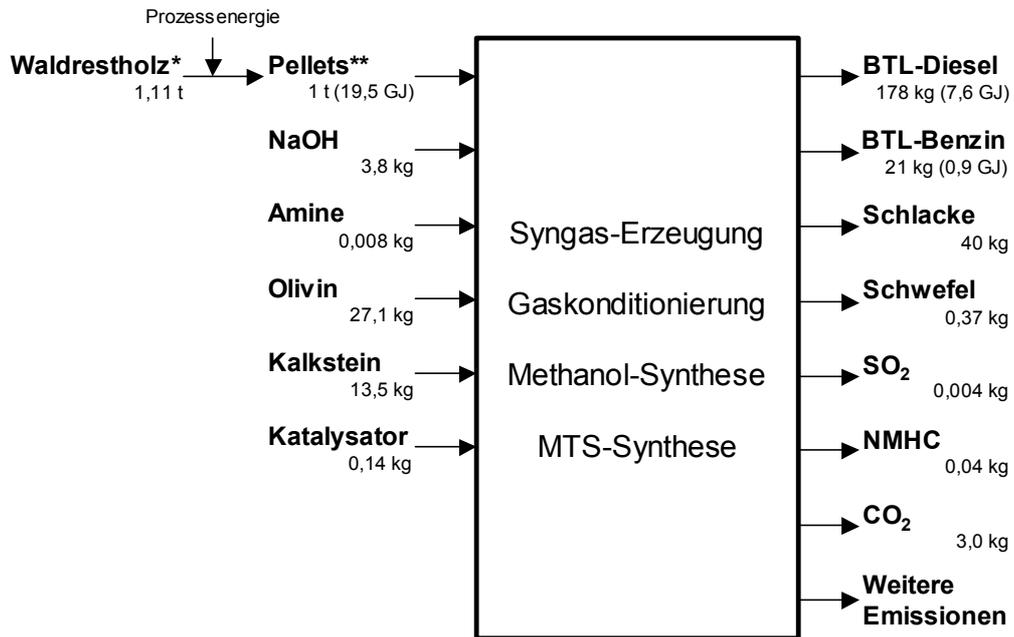
TU Freiberg, dezentral: Szenario "Ziel"



*Feuchte: 25 %; **Feuchte: 13%

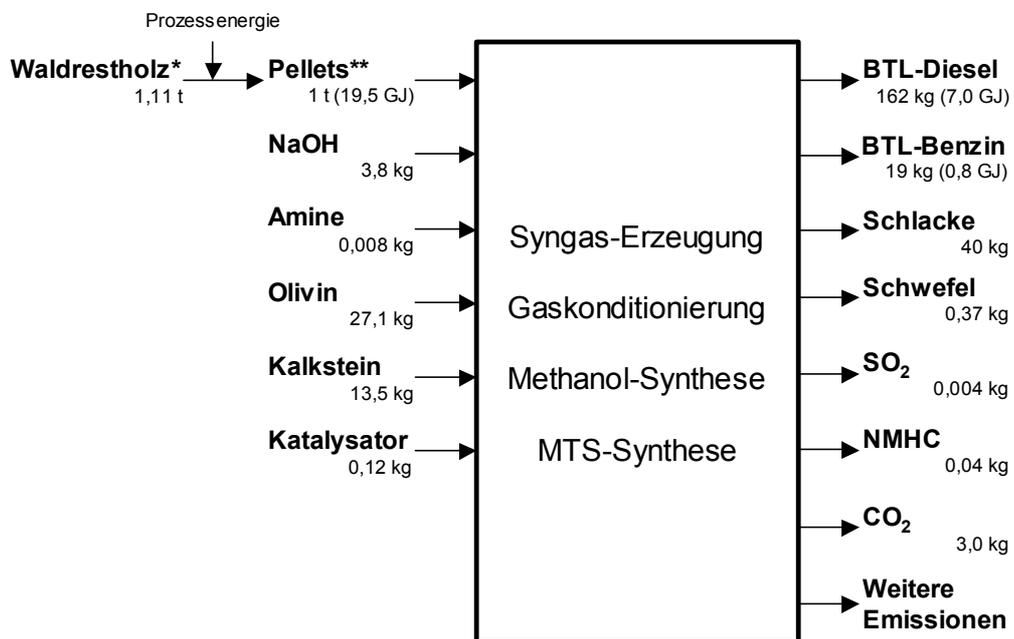
Abb. 7-25 In dieser Studie für das Konzept der TU Freiberg (zentral und dezentral) im Szenario „Ziel“ bilanzierte In- und Outputs

TU Freiberg, zentral: Szenario "Minimum"



*Feuchte: 25 %; **Feuchte: 13%

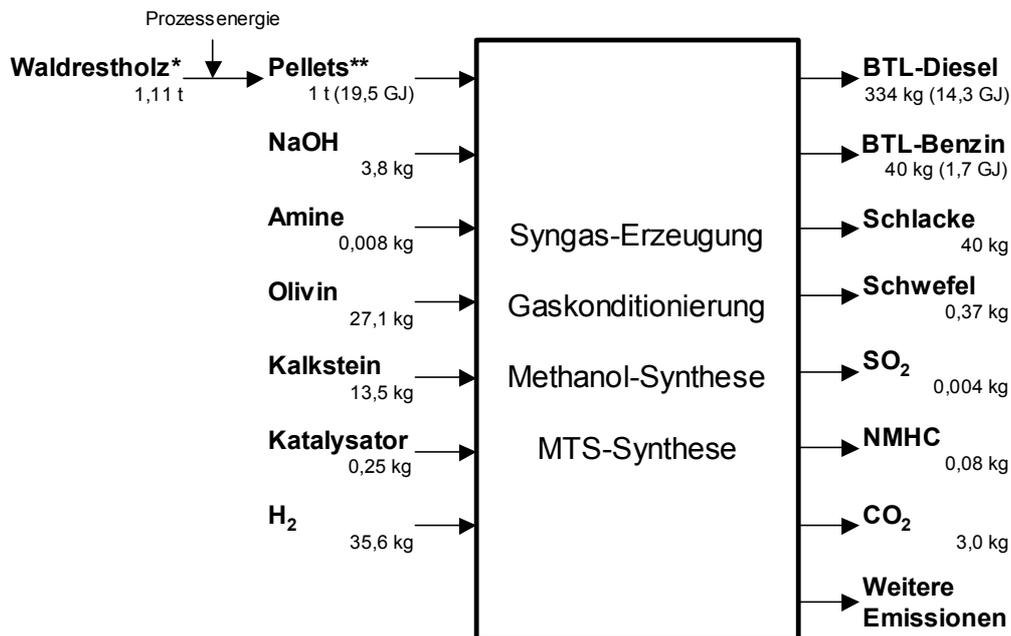
TU Freiberg, dezentral: Szenario "Minimum"



*Feuchte: 25 %; **Feuchte: 13%

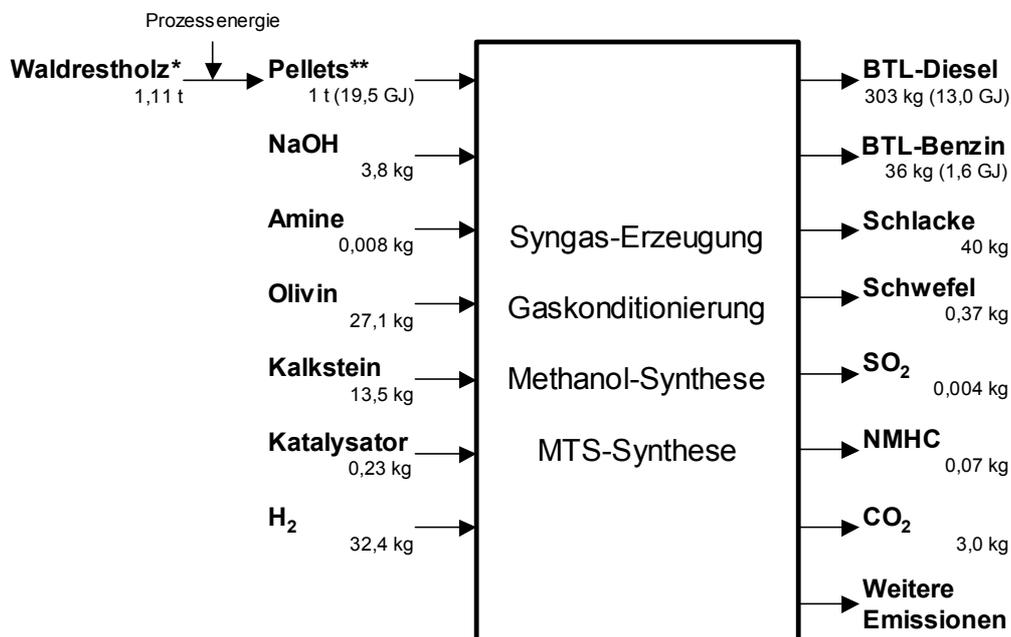
Abb. 7-26 In dieser Studie für das Konzept der TU Freiberg (zentral und dezentral) im Szenario „Minimum“ bilanzierte In- und Outputs

TU Freiberg, zentral: Szenario "H2-Import"



*Feuchte: 25 %; **Feuchte: 13%

TU Freiberg, dezentral: Szenario "H2-Import"



*Feuchte: 25 %; **Feuchte: 13%

Abb. 7-27 In dieser Studie für das Konzept der TU Freiberg (zentral und dezentral) im Szenario „H2-Import“ bilanzierte In- und Outputs

7.1.4 TU Wien

Die Daten der einzelnen In- und Outputflüsse werden aus verschiedenen Quellen und nach verschiedenen Ansätzen abgeleitet.

- Der BTL-Output, Stromüberschuss und Betriebsstoffverbräuche werden gemäß Angaben der TU Wien angesetzt.
- Emissionen aus der Stromerzeugung werden basierend auf Angaben der TU Wien abgeleitet.
- Zur Ableitung weiterer Betriebsstoffverbräuche, Reststoffmengen und prozessspezifischer Emissionen werden Informationen aus weiteren Quellen verwendet.
- Unterschieden werden drei Szenarien:
 - Ziel (energieautark, in etwa entsprechend der Zielvorstellungen der Entwickler),
 - Minimum (energieautark, untere Abschätzung),
 - H2-Import (optimiert auf Kraftstoffausbeute durch H2-Import).

Die Unterscheidung zentral/dezentral bezieht sich auf die Größe der Anlagen und damit den Zentralisierungsgrad eines zukünftigen BTL-Produktionssystems mit einer größeren Anzahl von Anlagen (außerdem wird der größere zentrale Vergaser druckaufgeladen, der kleinere dezentrale bei Atmosphärendruck betrieben). Gemeint ist also nicht eine *unterschiedliche* Teilung der Prozesskette zwischen verschiedenen Prozessstufen. Sowohl im zentralen als auch im dezentralen Konzept wird Biomasse an einem Standort zu Roh-BTL verarbeitet, das in Raffinerien zu Kraftstoff aufgearbeitet wird. Das zentrale Konzept ist außerdem auf maximale BTL-Ausbeute ausgelegt, das dezentrale auf geringere BTL-Ausbeute und externe Nutzung von Wärmeüberschüssen, die im zentralen Konzept nicht anfallen (Stromüberschüsse fallen in beiden an). Die Entwickler bevorzugen aus wirtschaftlichen Gründen das dezentrale Konzept.

7.1.4.1 Szenario „Ziel“

Die zentralen Informationen sind die von der TU Wien zur Verfügung gestellten Daten, die die energetischen und einige stoffliche In- und Outputs beschreiben. Diese Daten und ihre Verwendung werden zunächst erläutert. Anschließend wird die Erfassung der übrigen In- und Outputs skizziert.

Basisdaten der TU Wien

Die TU Wien hat Energiebilanzen der Gesamtprozesse „Biomasse zu Diesel- und Ottokraftstoff, Strom und Wärme“ (Wärme nur bei dezentral), Daten zu stofflichen In- und Outputs (Betriebsstoffe und Emissionen) und ergänzende Informationen zur Verfügung gestellt [Rauch 2005/06]. Die Energieflüsse sind als Leistungen ausgewiesen. Die Referenzgröße ist ein Biomassedurchsatz (Holz) von 100 MW (zentral) bzw. 30 MW (dezentral). Die Angaben für das zentrale Konzept werden in dieser Studie für eine größere Anlage (500 MW) angewendet, um für alle untersuchten Konzepte vergleichbare Bedingungen bei der Biomasse-Logistik einzuhalten. Die Daten werden auf einen Input von 1 MJ Biomasse umgerechnet.

Als BTL-Produkte werden Diesel, Benzin und Wachse ausgewiesen, die beiden letzten jeweils mit Angaben zu Crack- und Finishingverlusten. Die Wachse werden dem Dieselmotorkraftstoff zugeschlagen.

Neben dem BTL-Output liegen alle relevanten Daten zur Stromversorgung vor (erzeugte und verbrauchte Menge, Anteile aus Gasmotoren und -turbinen zur Emissionsberechnung). Die Stromerzeugung erfolgt im dezentralen Konzept überwiegend mit Gasmotoren, kleinere Anteile werden durch die Entspannung des Brenngases vor dem Gasmotor und aus einem ORC-Prozess gewonnen. Außerdem wird ein Wärmeüberschuss ausgewiesen. Im zentralen Konzept erfolgt die Stromerzeugung zu je etwas mehr als einem Drittel mit Dampf und Heißluftturbinen, der Rest mit Gasturbinen.

Zu folgenden Betriebsstoffen werden Mengenangaben gemacht: Bettmaterial (Olivin), Precoatmaterial (Kalksteinmehl), Biodiesel (RME) und Stickstoff.

Die Daten zu BTL-Ausbeute und Stromüberschuss werden direkt übernommen und unterschiedslos für Holz und Stroh verwendet. Allerdings ist das Verfahren seitens der Entwickler *nicht* auf Stroh als Input ausgelegt. Trotz dieser Einschätzung der Entwickler werden die Daten hier auch für Stroh angesetzt, um einen vollständigen Vergleich des Einflusses verschiedener Biomassevorketten auf alle untersuchten Verfahren zu ermöglichen.

Die Verbrennungsemissionen (als „Weitere Emissionen“ in den Abbildungen) werden gemäß [GEMIS 2005] angesetzt. Die für das dezentrale Konzept vorliegenden Daten zu CO- und NO_x-Emissionen von Gasmotoren werden aus Gründen der Datensymmetrie nicht verwendet.

Übrige In- und Outputs

Waschadditive: NaOH, Methanol, Amin: generische Daten, identisch für alle Verfahren, Ableitung u.a. aus [BVT Raffinerie 2003] (in der aktuellen Konzeption der TU Wien sind keine Methanol- und Aminwäschen vorgesehen; zur Begründung des Ansatzes hier siehe Abschnitt 7.1, Thema „Sonstige In- und Outputs“)

Fischer-Tropsch-Katalysator: generische Daten, identisch für alle Verfahren

Schwefel: aus der Biomassezusammensetzung, identisch für alle Verfahren

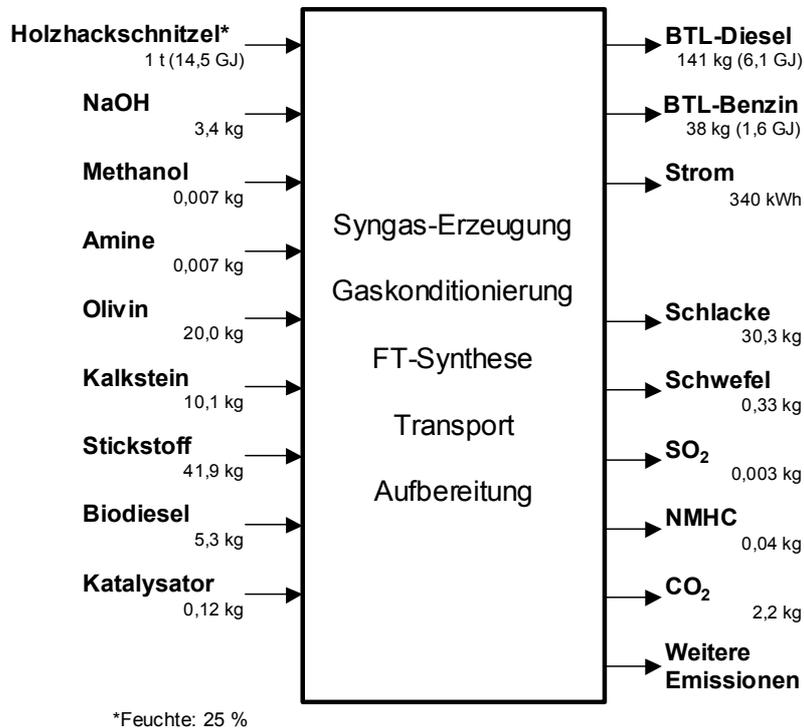
Asche/Schlacke: aus der Biomassezusammensetzung (identisch für alle Verfahren) zuzüglich Bettmaterial (abzüglich CO₂ aus Kalkstein). Die Asche ist deponiefähig.

Prozessspezifische Emissionen: SO₂ (Entschwefelung) und Kohlenwasserstoffe (Kraftstoffsynthese): generische Daten, identisch für alle Verfahren, abgeleitet aus [IZT_UBA 2003]

Emissionen aus der Wärmebereitstellung in der Raffinerie: Emissionsfaktoren nach [GEMIS 2005]; der Brennstoffeinsatz wird auf 5% vom Heizwert von Benzin und Wachs abgeschätzt.

Die In- und Outputs sind in Abb. 7-28 zusammengefasst.

TU Wien, zentral: Szenario "Ziel"



TU Wien, dezentral: Szenario "Ziel"

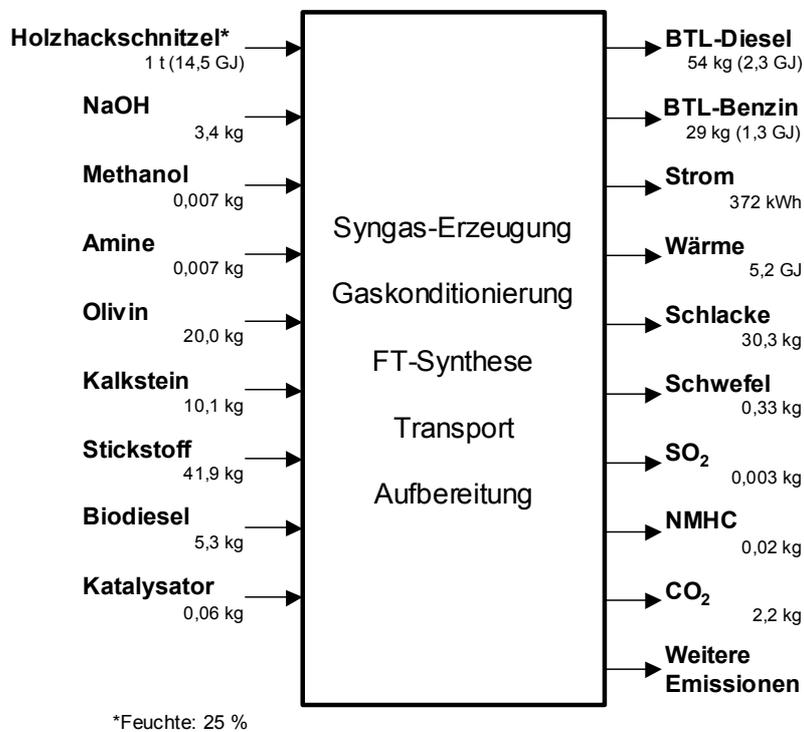


Abb. 7-28 In dieser Studie für das Konzept der TU Wien (zentral und dezentral) im Szenario „Ziel“ bilanzierte In- und Outputs

7.1.4.2 Szenario „Minimum“

In den Basisszenarien „Ziel“ werden für die beiden Konzepte (zentral und dezentral) die Daten der TU Wien, insbesondere die Kraftstoffausbeute, angesetzt. Da möglicherweise nicht alle zur Zielerreichung notwendigen technischen Teilziele erreicht werden, werden hier Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Die BTL-Ausbeute wird um 20 % (zentral) bzw. 10 % (dezentral) reduziert (also etwa 10 bzw. 3 %-Punkte); für „zentral“ wird eine größere Reduktion angesetzt als für „dezentral“, da „Ziel zentral“ besonders ambitioniert erscheint. Für Strom und Wärme nehmen wir eine Reduktion der Überschüsse um 20 % an (ohne Spezifizierung, ob die Produktion geringer und/oder der Eigenverbrauch höher ist als in „Ziel“). Weitere Änderungen werden nicht modelliert.

Die In- und Outputs sind in Abb. 7-29 zusammengefasst.

7.1.4.3 Szenario „H2-Import“

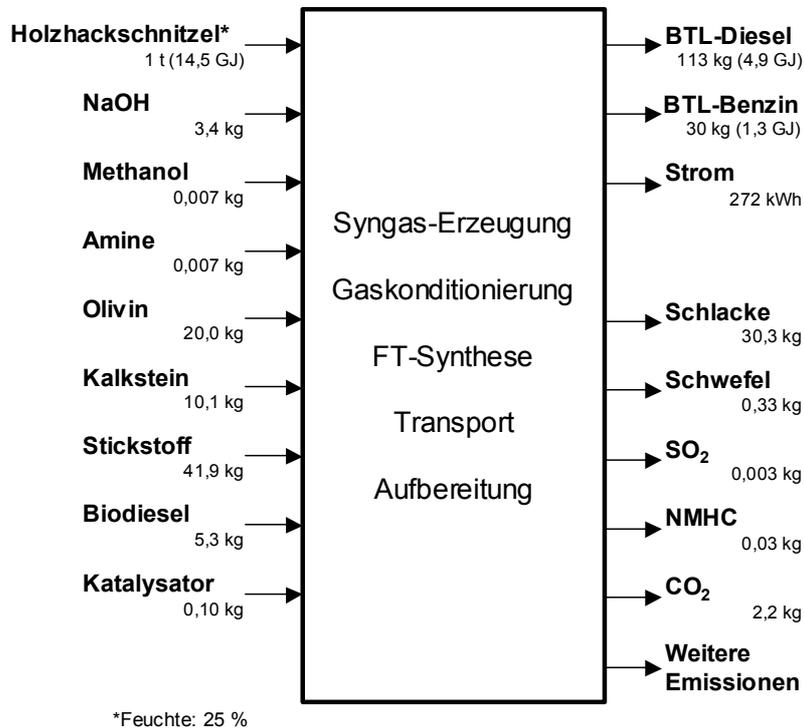
Für eine maximale Nutzung des Kohlenstoffinventars in BTL wird allgemein auch der Import von Wasserstoff in den BTL-Prozess diskutiert. Allerdings besteht aus Sicht der TU Wien keine Notwendigkeit zum H₂-Import, da die Synthesegaserzeugung gezielt auf H₂-reiche Gase ausgelegt ist. Trotz dieser Einschätzung der Entwickler wird hier – ohne Bewertung der insbesondere ökonomischen Realitätsnähe – ein H₂-Importszenario angesetzt, um einen vollständigen Vergleich des Einflusses dieser Konzeption auf alle untersuchten Verfahren zu ermöglichen.

Zur Abschätzung der Umwelteffekte wird hier vereinfacht angenommen, dass die BTL-Ausbeute um 50 % erhöht wird und die entsprechende Menge Wasserstoff aus externen Quellen importiert wird. Weitere Änderungen, etwa bei der Gaskonditionierung oder Stromerzeugung, werden nicht modelliert. Aus Sicht der Entwickler ist allerdings (wenn das Szenario unabhängig von der grundsätzlichen Sinnhaftigkeit untersucht wird) eine detailliertere Betrachtung dringend empfehlenswert.

Die In- und Outputs sind in Abb. 7-30 zusammengefasst.

Die Wirkungsgrade in den einzelnen Szenarien sind in Tabelle 7-1 zusammengefasst.

TU Wien, zentral: Szenario "Minimum"



TU Wien, dezentral: Szenario "Minimum"

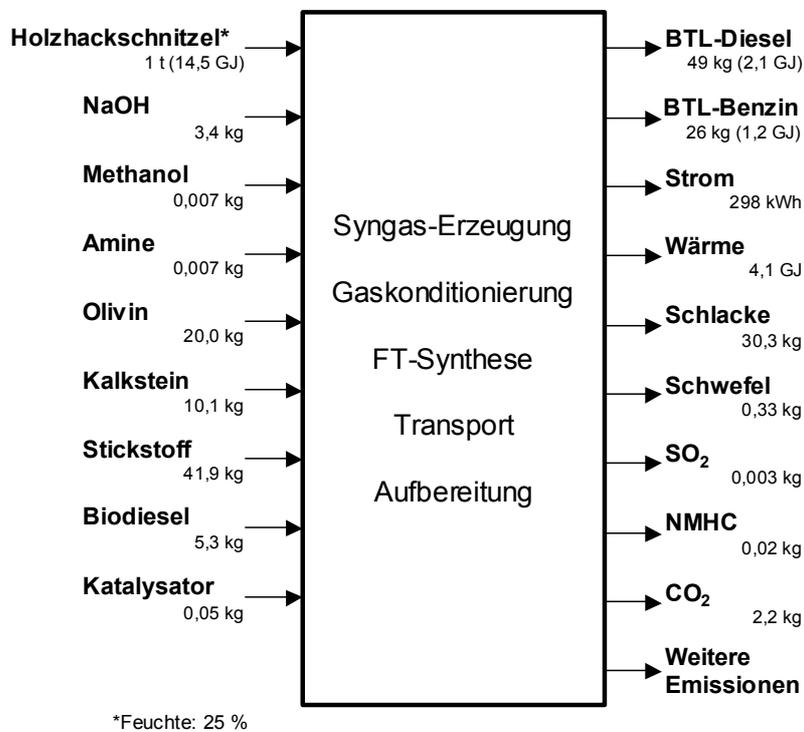
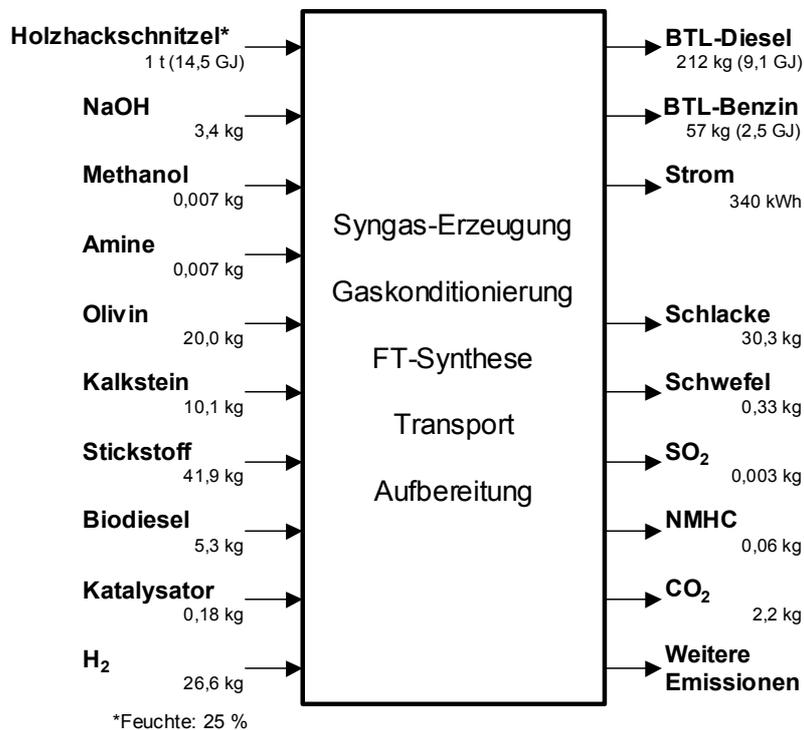


Abb. 7-29 In dieser Studie für das Konzept der TU Wien (zentral und dezentral) im Szenario „Minimum“ bilanzierte In- und Outputs

TU Wien, zentral: Szenario "H2-Import"



TU Wien, dezentral: Szenario "H2-Import"

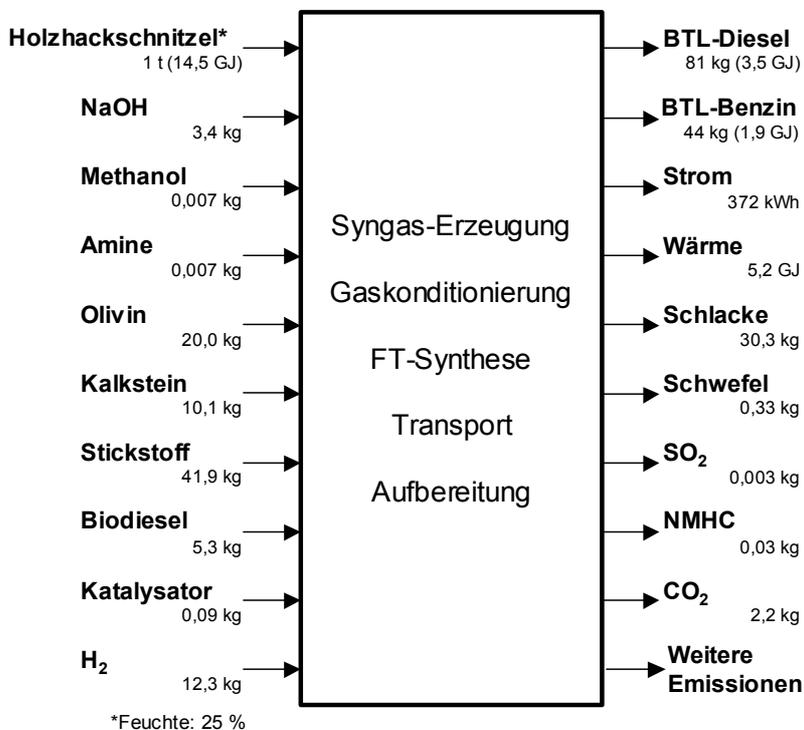


Abb. 7-30 In dieser Studie für das Konzept der TU Wien (zentral und dezentral) im Szenario „H2-Import“ bilanzierte In- und Outputs

7.1.5 Wirkungsgrade der BTL-Konzepte

Tabelle 7-1 fasst die Wirkungsgrade der BTL-Konzepte in den einzelnen Szenarien zusammen.

Tabelle 7-1 Wirkungsgrade der Produktion von BTL-Kraftstoffen und energetischen Kuppelprodukten in den untersuchten Konzepten und Szenarien

Produkt	Szenario	Choren	FZK	TU Wien		TU Freiberg	
				zentral	dezentral	zentral	dezentral
Synfuel	Ziel	54 %	48 %	53 %	25 %	55 %	50 %
	Minimum	50 %	45 %	43 %	22 %	44 %	40 %
	H2-Import	81 %	72 %	80 %	37 %	83 %	75 %
	MTS	58 %	–	–	–	55 %	50 %
Strom	Ziel	1,2 %	4,9 %	8,5 %	9,3 %	–	–
	Minimum	1,2 %	2,4 %	6,8 %	7,4 %	–	–
	H2-Import	1,2 %	4,9 %	8,5 %	9,3 %	–	–
	MTS	1,2 %	–	–	–	–	–
Wärme	Ziel	–	–	–	36 %	–	–
	Minimum	–	–	–	29 %	–	–
	H2-Import	–	–	–	36 %	–	–
	MTS	–	–	–	–	–	–
Summe*	Ziel	55 %	53 %	62 %	70 %	55 %	50 %
	Minimum	51 %	47 %	49 %	58 %	44 %	40 %
	H2-Import	82 %	77 %	88 %	82 %	83 %	75 %
	MTS	59 %	–	–	–	55 %	50 %

*: Summen nur für bestimmte Fragen sinnvoll

Quellen: Angaben der Entwickler, eigene Berechnungen und Abschätzungen

IFEU 2006

7.2 BTL-Vorketten und -Nutzung, konventionelle Kraftstoffe, sonstige Prozesse

Zu den „BTL-Vorketten“ gehören vor allem die Bereitstellung von Biomasse und von den dazu notwendigen landwirtschaftlichen Betriebsstoffen wie Düngemittel. Außerdem fallen die Produktion und Bereitstellung der Betriebsstoffe der BTL-Produktion in diese Kategorie.

Die Nutzung von BTL besteht aus ihrem Einsatz in KFZ.

BTL-Kraftstoffe werden mit fossilen verglichen. Damit sind für die fossilen Kraftstoffe Daten erforderlich, die denen zu BTL-Kraftstoffen hinsichtlich Systemgrenzen usw. entsprechen.

In allen Vorketten bzw. zwischen verschiedenen Prozessen und Lebenswegabschnitten finden außerdem Transporte statt.

Die Daten zu Vorketten usw. werden im Wesentlichen aus der IFEU-Datenbank entnommen. Es handelt sich um Daten, die in zahlreichen Studien des IFEU erarbeitet und validiert wurden und allgemein akzeptiert sind.

7.2.1 Biomassebereitstellung

Zu unterscheiden ist zwischen Anbaubiomasse und Reststoffen.

Anbaubiomasse

Erfasst wird die vollständige landwirtschaftliche Produktion – Saatbettbereitung, Saat bzw. Anpflanzung, Düngung, Pflanzenschutz und Ernte – sowie anschließende Logistikprozesse (Transport; Lagerung). Energieverbrauch und Emissionen der maschinellen Feldarbeit werden mit einem Modell berechnet, in dem die einzelnen Arbeiten (weiter differenziert in Haupt- und verschiedene Nebenzeiten) mit verschiedenen Lastpunkten im Motorkennfeld korreliert werden. Das Modell und die hinterlegten spezifischen Zeitaufwendungen pro Hektar, Energieverbräuche pro Zeiteinheit und Emissionsfaktoren sind in [Borken et al. 1999] dokumentiert. Die gesamten Bereitstellungsketten wurden in früheren Projekten zusammengestellt und validiert.

Für den Hektarertrag von Triticale wurde der Wert nach [Öko-Institut, IFEU et. al. 2004] für die Zeit um 2020 angesetzt, der eine Steigerung aufgrund von Züchtungserfolgen beinhaltet. In Analogie dazu wurde bei der Pappel ausgehend von [Kaltschmitt & Reinhardt 1997] ein gesteigerter Ertrag für 2020 abgeschätzt. Die Düngemittelmengen werden jeweils entsprechend den Nährstoffmengen angesetzt, die dem Boden durch den Abtransport des Ernteguts entzogen werden [Kaltschmitt & Reinhardt 1997].

Zur Bereitstellung von Düngemittel wurden umfangreiche Stoffstromanalysen durchgeführt, in denen die einzelnen Prozesse der Düngemittelproduktion quantifiziert wurden [Patyk & Reinhardt 1997]. In den Analysen wurden für N- und P-Dünger die Herkunftsstrukturen des in Deutschland eingesetzten Düngers berücksichtigt. Für N-Dünger wurden neben Erdgas auch Erdöl und Kohle als Feedstock erfasst. Auf [Patyk & Reinhardt 1997] aufbauend wurden, wo erforderlich, IFEU-intern Aktualisierungen vorgenommen.

Reststoffe

Für Waldrestholz und Stroh fallen lediglich die Sammelaufwendungen an. Die spezifischen Daten stammen aus [Kaltschmitt & Reinhardt 1997]. Dabei wird berücksichtigt, dass das Stroh, wenn es nicht für die BTL-Nutzung verwendet würde, auf dem Feld verbliebe und dort zur Bodenverbesserung und Nährstoffrückführung diene. Der somit im Falle der BTL-Nutzung zusätzlich einzusetzende Dünger wird dem BTL-Lebensweg angelastet. Die für die Berechnung der Transportentfernungen nötigen Flächenerträge der Reststoffe sind IFEU-interne Ableitungen nach [Kaltschmitt & Reinhardt 1997] und [Öko-Institut, IFEU et. al. 2004].

Lagerung, Transport

Für die Lagerung der Biomasse wurden die Verhältnisse nach [Kaltschmitt & Reinhardt 1997] unterstellt. Für die Hölzer wird zusätzlich angenommen, dass im Lager an der BTL-Anlage (bzw. der dezentralen Konversionsanlage) mit Hilfe sonst ungenutzter Abwärme die Feuchte auf 25 % reduziert werden kann.

Die Durchschnittsentfernung für den **Transport der Biomasse** zur Verarbeitung wird folgendermaßen abgeschätzt: Die Flächen, die erforderlich sind um den Jahresbedarf einer Konversionsanlage zu decken, sollen gleichmäßig mit einem Anteil von 20 % an der

Gesamtfläche in einem Kreis um die Anlage verteilt sein. Aus der Kreisfläche ergibt sich der Radius, von dem 70 % als Durchschnittsweglänge angesetzt werden.

Für die **Zwischenprodukt-Transporte** bei dezentralen Technologien wurden die Entfernungen analog zum Biomassetransport abgeschätzt.

Für die **BTL-Kraftstofftransporte** zu Tankstellen wurden typische Entfernungen des Mineralöltransports angesetzt.

Die Relevanz der Transportentfernungen für die Gesamtlebenswege wurde in Sensitivitätsanalysen überprüft.

Die Transportdaten sind in Tabelle 7-2 zusammengefasst

Tabelle 7-2 Transportweiten und Hintergrunddaten

Biomasseart	Ertrag t TM/ha	Anlagen- größe MW	Flächen- bedarf ha	Transport zur Konversion	
				(Basis) km	(lang) km
Kurzumtriebsholz	12,5	30	3.980	5	10
		50	6.630	5	10
		150	19.890	10	20
		500	66.290	20	40
Triticale	15,2	30	3.260	5	10
		50	5.430	5	10
		150	16.280	10	20
		500	54.270	20	40
Waldrestholz	1,76	30	26.690	15	30
		50	44.480	20	40
		150	133.430	30	60
		500	444.780	60	120
Reststroh	6,8	30	7.750	10	20
		50	12.910	10	20
		150	38.730	20	40
		500	129.100	30	60
Eigene Annahmen und Berechnungen					IFEU 2006

7.2.2 Nutzung

Die ökologisch relevanten Größen sind Verbrauch und Emissionen der Fahrzeuge. Emissionen, die von der Kraftstoffzusammensetzung abhängen (CO₂ und SO₂), sind praktisch direkt proportional zum Kraftstoffverbrauch. Für andere Schadstoffe besteht dieser direkte Zusammenhang nicht, vielmehr hängen Verbrauch und Emissionen in unterschiedlicher Weise vom Nutzungsmuster (abgebildet in Fahrzyklen), Fahrzeugtyp und Emissionsgrenzwert ab. D. h., dass für die Nutzung der Kraftstoffe Fahrzyklus und Fahrzeugtyp ausgewählt und entsprechende Verbräuche und Emissionsfaktoren angesetzt werden müssen. Alternativ können auch Daten für einen definierten Mix verschiedener Fahrzeuge angesetzt werden. Für diese Studie wird angenommen, dass es in Bezug auf die energiebezogenen Verbräuche zwischen fossilen Kraftstoffen und BTL keinen Unterschied gibt (siehe hierzu

auch [IFEU 2004]). Darüber hinaus wird Folgendes angenommen: CO₂ wird zu 100 % aus dem Kraftstoffinventar berechnet (und bei BTL als rezentes CO₂ gewertet). SO₂ wird bei den fossilen Kraftstoffen ebenfalls zu 100 % aus dem Kraftstoffinventar berechnet bzw. bei BTL auf Null gesetzt.

Bezüglich der anderen Schadstoffemissionen wird wie folgt unterschieden:

Es gibt Hinweise darauf, dass unter bestimmten Randbedingungen mit synthetischen Kraftstoffen niedrigere Emissionen anfallen als mit konventionellen Kraftstoffen. Beispielsweise wird beim Einsatz von GTL, so genannten gas-to-liquids, in Euro-3-Pkw von bis zu 90 % Emissionsreduktionen bei HC und CO sowie 30-50 % bei Partikeln gegenüber Dieselmotoren berichtet. Bei Euro-4-Pkw wird die entsprechende Emissionsminderung mit etwa 50 % bei HC und CO beziffert (keine Partikelemissionsreduktion). D. h., die im Verkehrssektor meist sehr wichtigen NO_x werden in diesen Fällen durch GTL nicht reduziert. Auch finden sich Angaben, die ca. 50 % NO_x-Reduktionen zum Beispiel für besondere Motorkonzepte, die von dem üblichen Diesel- bzw. Otto-Prinzip abweichen und möglicherweise zukünftig eine wichtige Rolle spielen könnten, ausweisen. Einzelne Literaturquellen weisen bei Nutzfahrzeugen höhere Reduktionspotenziale aus als bei Pkw, was aber nicht von allen Untersuchungen bestätigt wird. Auch hängen die Ergebnisse der Untersuchungen neben den Fahrzeugen bzw. Fahrzeugkonzepten auch von der Qualität des gemessenen GTL sowie des verglichenen Dieselmotors ab ([IFEU 2006] auf Basis u. a. von [IFEU 2005], [Herrmann, Keppeler et al. 2006], [Frank et al. 2004], [Schubert et al. 2002], [Shell 2003] und [Volkswagen AG 2003]).

Durch die Vielzahl der Einzelaussagen einerseits, in Ermangelung systematischer Messungen andererseits und durch den in dieser Studie zugrunde gelegten Betrachtungshorizont von 2020 und der Folgejahre kann keine belastbare Einschätzung über die Emissionsunterschiede zwischen BTL und Dieselmotoren abgeleitet werden. Aus diesem Grunde werden hierzu Szenarien gebildet, die die mögliche Bandbreite aufzeigen sollen. Dabei werden die Ergebnisse der vorhandenen Studien zu GTL als Basis verwendet, da wir davon ausgehen, dass zwischen den GTL und BTL in der Nutzungsphase keine Unterschiede bestehen.

Aus unserer Sicht gibt es keine direkten Hinweise und keinen zwingenden Grund, für 2020 und die Folgejahre bei einem Fahrzeugmarkt von Euro-5- und über Euro-5 hinausgehenden Standards von Emissionsunterschieden auszugehen. Die Emissionen von BTL und Dieselmotoren für die Basisszenarien werden daher gleich angesetzt.

Um aber den verschiedenen Optionen von Einsatz in Altfahrzeugen (beispielsweise in Flotten) oder Weiterentwicklungen von Motorenkonzepten Rechnung zu tragen, werden für die Nutzungsemissionen zwei Szenarien in Sensitivitätsanalysen betrachtet:

Flotte: Dieses Szenario betrachtet den Fall, dass BTL-Kraftstoffe in 2020 oder den Folgejahren gezielt vor allem in Flotten eingesetzt werden, bei denen die BTL zu Emissionsminderungen gegenüber Dieselmotoren führen, wie dies beispielsweise in Euro-4-Fahrzeugen der Fall ist. Für diesen Fall werden bei Nutzung von BTL gegenüber fossilem Dieselmotoren Reduktionen für HC und CO von jeweils 50 % angesetzt.

Motor: Dieses Szenario betrachtet den Fall besonderer Motorkonzepte mit einer NO_x-Reduktion um 50 %.

Die jeweils spezifischen Daten werden dem vom IFEU entwickelten offiziellen Modell des UBA zur Berechnung verkehrlicher Emissionen TREMOD entnommen ([TREMOD 2006]).

7.2.3 Konventionelle Kraftstoffe, sonstige konventionelle Energieträger

Konventionelle Kraftstoffe bilden den Vergleichsmaßstab zu BTL-Kraftstoffen, entsprechend Netzstrom für die Stromüberschüsse einiger BTL-Konzepte. Außerdem werden konventionelle Energieträger in den Vorketten eingesetzt.

Die Bereitstellung konventioneller fossiler Kraftstoffe umfasst Förderung, Aufbereitung und Transport von Rohöl, die Verarbeitung in der Raffinerie und den Transport der Kraftstoffe zu den Tankstellen. Die einzelnen Prozessschritte wurden in umfangreichen Stoffstromanalysen quantifiziert. Für die Rohölbereitstellung werden verschiedene Herkunftsregionen und Fördertechnologien berücksichtigt. Das Vorgehen ist in [Borken et al. 1999] und [Patyk & Reinhardt 1997] dokumentiert. Die Daten liegen für vergangene und zukünftige Bezugsjahre vor.

Die Bilanzierung der Bereitstellung von Strom wurde in analogen Differenzierungen durchgeführt.

7.2.4 Transporte

Der Transport der Biomasse, der BTL-Kraftstoffe und der Reststoffe erfolgt überwiegend mit LKW. In den Vorketten spielen auch andere Transportmittel, insbesondere Seeschiffe eine wichtige Rolle. Die spezifischen Verbräuche und Emissionen beziehen sich auf die Transportleistung in tkm. Die Daten für LKW basieren auf fahrleistungsbezogenen Daten in [TREMODO 2006]. Die Ableitung der Daten in tkm ist in [Borken et al. 1999] dokumentiert.

8 Literatur

- [Arendt 2005/06] Herr F. Arendt (FZK), persönliche Mitteilungen, 2005/06
- [Berger & Hein 2003] Berger, R.; Hein, K.R.G.: Verfahrensübersicht: Synthesegaserzeugung aus Biomasse. In: Fachtagung „Regenerative Kraftstoffe“, Wolfsburg 13./14. November 2003
- [Borken et al. 1999] Borken, J., Patyk, A. Reinhardt, G. A.: Basisdaten für ökologische Bilanzierungen. Einsatz von Nutzfahrzeugen in Transport, Landwirtschaft und Bergbau. Verlag Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden 1999
- [BREF Raffinerie 2003] Best available techniques reference document „Refineries“ (Herausgeber: EIPPCB). Sevilla 2003
- [BVT Raffinerie 2003] European Commission: Reference document on best available techniques for mineral oil and gas refineries. Sevilla 2003
- [Choren 2004] Rudloff, M.: SunDiesel made by Choren – Erfahrungen und neueste Entwicklungen. In BMVEL, DaimlerChrysler, VW (Hrsg.): Proceedings (downloads: http://fnr-server.de/cms35/Beitraege_Scripts.889.0.html) der Konferenz „Synthetische Biokraftstoffe“, Wolfsburg 3-4 November 2004
- [CML 1992] Center of Environmental Service (CML), Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (TNO), Fuels and Raw Materials Bureau (B&G): Environmental life cycle assessment of products - Guide and backgrounds. Leiden, 1992
- [CML et al. 2002] Guinée, J. B. (Hrsg.) – Centre of Environmental Science – Leiden University (CML), de Bruijn, H., van Duin, R., Huijbregts, M. Lindeneijer, E. Roorda, A. van der Ven, B., Weidema, B.: Handbook on Life Cycle Assessment. Operational Guide to the ISO Standards. Eco-Efficiency and Science Vol. 7. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 2002.
- [Dimmich & Meyer 2004] Dimmich, T.; Meyer, B.: Die BTL-Pilotanlage an der TU Freiberg – ein Zwischenbericht. In BMVEL, DaimlerChrysler, VW (Hrsg.): Proceedings (downloads: http://fnr-server.de/cms35/Beitraege_Scripts.889.0.html) der Konferenz „Synthetische Biokraftstoffe“, Wolfsburg 3-4 November 2004
- [DIN 14040ff.] Deutsches Institut für Normung (DIN) (Hrsg.): DIN EN ISO 14040 bis 14043. Deutsche Normen. Beuth Verlag, Berlin 1997 bis 2000
- [DM2 2005] Internet-Seite der D.M.2 Projekt GmbH i.Gr.: <http://www.dm1-2.de/>
- [ecoinvent 2003] Frischknecht, R. et al.: Ecoinvent – Ökoinventare für Energiesysteme. Im Auftrag verschiedener schweizerischen Bundesbehörden, 2003
- [Frank et al. 2004] Frank, B. P., et al.: A study of the effects of fuel type and emission control systems on regulated emissions from heavy-duty diesel engines. In: SAE Technical Paper Series, 2004
- [GEMIS 2005] Fritsche, U. et al.: Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme, Version 4.3. Darmstadt 2005
- [Henrich et al. 2002] Henrich, E.: Kraftstoff aus Stroh. In: Was Tanken wir morgen? Oberhausen, November 2002
- [Henrich et al. 2005] Henrich, E. et al.: Proposal zum BMBF-Programm „Klima“
- [Herrmann, Keppeler et al. 2006] Herrmann, H.-O., Keppeler, S., Frieß, W., Botha, J.J., Schaberg, P., Schnell, M.: The Potential of Synthetic Fuels to meet Future Emission

- Regulations (Potenzial synthetischer Kraftstoffe zur Einhaltung zukünftiger Emissionsgrenzwerte). DaimlerChrysler AG, Stuttgart, Sasol Technology (Pty) Ltd., Rosebank, RSA, Sasol Advanced Fuel Laboratory, University of Cape Town, RSA, Sasol-Chevron Consulting Ltd., London, UK. Proceedings des 27. Internationales Wiener Motorensymposium, 16. Januar 2006
- [Hofbauer, Kaltschmitt et al. 2004] Hofbauer, H.; Kaltschmitt, M.; Bolhar-Nordenkamp, M.; Vogel, A.: Systemkonzepte für die Produktion von Fischer-Tropsch-Biokraftstoffen. Brennstoff-Wärme-Kraft 56/3 (2004), 57
- [IEC 2004] Meyer, B. et al.: Planungsstudie für die Errichtung einer Pilotanlage zur Technologievalidierung BTL-Kraftstoffe, Teil B: Technischer Bericht. Freiberg 2004
- [IFEU 2004] Quirin, M., Gärtner, S. O., Pehnt, M., Reinhardt, G. A.: CO₂-neutrale Wege zukünftiger Mobilität durch Biokraftstoffe: Eine Bestandsaufnahme. IFEU, im Auftrag der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen. Heidelberg 2004
- [IFEU 2005] Helms, H., Lambrecht, U.: Emission Factors for the Combustion of Fuels in Road Vehicles. Im Auftrag von Sasol Chevron, Heidelberg 2005
- [IFEU 2006] IFEU-interne Berechnungen und Datenbankabfragen. Heidelberg 2006
- [IPCC 2001] Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 2001 – Third Assessment Report. Cambridge UK 2001
- [IRIS 1996] Environmental Protection Agency (US-EPA): Environmental Risk Assessment Software. Washington D.C., 1996
- [IZT_UBA 2003] Jörß, W.; Handke, V. (IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung): Emissionen 2000 und Referenzprognose 2010 (außer Landwirtschaft): Bericht der Bundesrepublik Deutschland nach Art. 6 der Richtlinie 2001/81/EG (NEC-Richtlinie) über die Emissionen von SO₂, NO_x, NH₃ und NMVOC sowie die Maßnahmen zur Einhaltung der NECs; Anhang 1 zum Nationalen Programm. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin 2003
- [Jenkin & Hayman 1999] Jenkin, M. E., Hayman, G. D.: Photochemical ozone creation potentials for oxygenated volatile organic compounds: sensitivity to various kinetic and mechanistic parameters. Atmospheric Environment 33: 1275-1293
- [Kaltschmitt & Reinhardt 1997] Kaltschmitt, M., Reinhardt, G. A. (Hrsg.): Nachwachsende Energieträger: Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung. Verlag Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden 1997
- [Klöpffer 1995] Methodik der Wirkungsbilanz im Rahmen von Produkt-Ökobilanzen unter Berücksichtigung nicht oder nur schwer quantifizierbarer Umwelt-Kategorien. UBA-Texte 23/95, Berlin 1995.
- [Kuntze et al. 1995] Kuntze, T; Kedden, K.; Jess, A.: "From natural gas to liquid hydrocarbons. Part 3. Kinetics of the Fischer-Tropsch-synthesis using a nitrogen-rich synthesis gas". Erdöl, Erdgas, Kohle 111/2 (1995), 67-71
- [Leeuw 2002] A set of emission indicators for long-range transboundary air pollution. Environmental Science & Policy, 5, 135-145
- [Meyer et al. 2004] Meyer, B.; Krzack, S.; Radig, W.: Stand der Entwicklung der Synthesegasproduktion aus Biomasse. In BMVEL, DaimlerChrysler, VW (Hrsg.): Proceedings (downloads: http://fnr-server.de/cms35/Beitraege_Scripts.889.0.html) der Konferenz „Synthetische Biokraftstoffe“, Wolfsburg 3-4 November 2004
- [Öko-Institut, IFEU et. al. 2004] Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse. Öko-Institut (Koordinator), Fraunhofer UMSICHT, IE Leipzig, IFEU,

- IZES, TU Braunschweig, TU München; gefördert vom BMU im Rahmen des Zukunftsinvestitionsprogramms; abgeschlossen 2004
- [Patyk & Reinhardt 1997] Patyk, A., Reinhardt, G. A.: Düngemittel - Energie- und Stoffstrombilanzen. Vieweg Braunschweig/Wiesbaden 1997
- [PE 2004] Baitz, M., Deimling, S., Binder, M. (PE Europe GmbH): Vergleichende Ökobilanz von SunDiesel (Choren-Verfahren) und konventionellem Dieselkraftstoff. Auftraggeber: Volkswagen AG und DaimlerChrysler AG. Leinfelden-Echterdingen, 2004
- [ProBas 2005] Öko-Institut: Internet-Seite <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php>. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, 2005
- [Radig 2005/06] Herr Dr. W. Radig, IEC/TU Freiberg, persönliche Mitteilungen, 2005/06
- [Rauch 2005/06] Herr Dr. R. Rauch, TU Wien, persönliche Mitteilung, 2005/06
- [Reinhardt & Zemanek 2000] Reinhardt, G. A., Zemanek, G.: Ökobilanz Bioenergieträger. Basisdaten, Ergebnisse, Bewertungen. Erich Schmidt Berlin 2000
- [Rudloff 2005/06] Herr M. Rudloff, Choren Industries, persönliche Mitteilungen, 2005/06
- [Schubert et al. 2002] Schubert, P. F., et al.: Impact of ultra-clean Fischer-Tropsch diesel fuel on emissions in a light-duty passenger car diesel engine. In: SAE Technical Paper Series, 2002
- [Shell 2003] Clark, R. H., et al.: The environmental benefits of Shell GTL diesel. Conference Proceedings: Fuels. Esslingen 2003
- [Tijmensen et al. 2002] Tijmensen, M.; Faaij, A.; Hamelinck, C.; van Hardeveld, M.: "Exploration of the possibilities for production of Fischer-Tropsch liquids and power via biomass gasification". Biomass and Bioenergy 23/2 (2002), 129-152
- [TREMODO 2006] Knörr, W., Reuter, C. et al., IFEU: TREMOD (Transport Emission Model), Version 4: Aktuelle Arbeiten des IFEU: Fortschreibung 'Daten- und Rechenmodell': Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030; im Auftrag des Umweltbundesamtes; F+E Vorhaben 204 45 139; Dessau/Heidelberg 2005; „Weiterentwicklung von TREMOD“; im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen. Heidelberg 2006
- [UBA 1995] Umweltbundesamt (Hrsg.): Ökobilanz für Getränkeverpackungen. Datengrundlagen. Berlin, 1995 (unveröffentlicht)
- [Ullmann A7 1986] Ullmann's Encyclopedia of industrial chemistry, Band A7. Weinheim 1986
- [Volkswagen AG 2003] Hannen, H.: Future fuels and future powertrains. Conference Proceedings: Fuels. Esslingen 2003
- [WI, DLR & IFEU 2006] Ramesohl, S., Pehnt, M., Krewitt, W., Fishedick, M., Knörr, W., Merten, F., Schmid, S., Viebahn, P.: Entwicklung einer Gesamtstrategie zur Einführung alternativer Kraftstoffe, insbesondere regenerativ erzeugtem Wasserstoff als Kraftstoff für den mobilen Bereich. Wuppertal Institut, DLR Stuttgart, IFEU Heidelberg; gefördert vom UBA im Rahmen des UFOPLAN; Endbericht 2006
- [Wolf 2002] Wolf, B.: Wasserstoff aus Biomasse. Brennstoff-Wärme-Kraft 54/12 (2002), 57

Glossar und Abkürzungsverzeichnis

allotherm	Wärmeeintrag in die Reaktionszone von außen
autotherm	Wärmeerzeugung für den Prozess in der Reaktionszone
BHKW	Blockheizkraftwerk
BTL	Biomass-To-Liquid, Verfahren zur Kraftstoffproduktion aus Biomasse sowie Kurzbegriff für den damit erzeugten Kraftstoff
Carbo-V [®]	Vergasungsverfahren der Firma Choren für die Erzeugung von Gasen zur Kraftstoffsynthese
Choren	Choren Industries GmbH
CO ₂	Kohlendioxid
η	eta, Wirkungsgrad (hier der Quotient aus BTL-Energie und Biomasse-Energie)
EG	Erdgas
F&E	Forschung und Entwicklung
FCKW	Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe
FM	Feuchtmasse
FT	Fischer-Tropsch, Syntheseverfahren für Kraftstoffe aus Gasen
Fz	Fahrzeug
FZK	Forschungszentrum Karlsruhe
H ₂	Wasserstoff
HC	Hydrocarbons, Kohlenwasserstoffe
HEL	Heizöl extraleicht
HKW	Heizkraftwerk
HW	Heizwerk
IEC	Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen der Technischen Universität Bergakademie Freiberg
KS	Kraftstoff
KUP	Kurzumtriebsanlage
KW	Kraftwerk
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
MTS	Methanol-to-Synfuel, Kraftstoffherstellung aus Methanol
N ₂	Stickstoff
NaOH	Natriumhydroxid, Natronlauge
NcPOCP	Nitrogen-corrected POCP, Indikator für den Sommersmog, der auch Stickoxide berücksichtigt
NMHC	Non-methane hydrocarbons, Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe
NO _x	Stickoxide
PM10	Particulate matter unter 10 μ m, Feinstaub
POCP	Photochemical Ozone Creation Potential, Indikator für den Sommersmog
RME	Rapsöl-Methyl-Ester, Biodiesel aus Raps
SO ₂	Schwefeldioxid
Syngas	Synthesegas, bei der Vergasung entstehendes Gas zur Nutzung in der Kraftstoffsynthese
T	in Grafiken hier für: Transport
TM	Trockenmasse
TU	Technische Universität
ZR	Zuckerrübe

**ifeu -
Institut für Energie-
und Umweltforschung
Heidelberg GmbH
Deutschland**

Wilckensstr. 3
69120 Heidelberg
Tel. +49-(0)6221-4767-0
Fax +49-(0)6221-4767-19
E-Mail: ifeu@ifeu.de