

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

28/05/2018

Projekttitlel: Bioenergie aus Speisefetten- Potential gemischt erfasster Fettabfälle als Ressource für Biodiesel

Projektnummer: 853580

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische
Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	2. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01/09/2016
Projektende	28/02/2018
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	18 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	Arbeitsbereich Umwelttechnik, Institut für Infrastruktur, Universität Innsbruck
AnsprechpartnerIn	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Anke Bockreis
Postadresse	Technikerstraße 13, 6020 Innsbruck
Telefon	+43 512 507 62101
Fax	+43 512 507 62199
E-mail	anke.bockreis@uibk.ac.at
Website	www.uibk.ac.at/umwelttechnik/

Bioenergie aus Speisefetten

Potential gemischt erfasster Fettabfälle als Ressource für Biodiesel

AutorInnen:

Dipl.-Ing. Julika Knapp
Thomas Lichtmannegger, Msc
Dr. Sabine Robra
Dipl.-Biol. Dr. techn. Carolina Kinzel
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Anke Bockreis

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zusammenfassung	6
2	Inhaltliche Darstellung.....	8
3	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	9
3.1	Labormethoden	9
3.2	Abfallgewinnung – Einfluss von Lagerung und Erfassungssystem	10
3.2.1	Erfassungssysteme für Fettabscheiderabfälle	10
3.2.2	Klassische Gravitations-Fettabscheider.....	10
3.2.3	Direktfettabscheider	11
3.2.4	Direktfettabscheider kombiniert mit Nassmüll-Entsorgungssystem.....	12
3.2.5	Lagerversuche im Labormaßstab	15
3.3	Abfallaufarbeitung – Gewinnung hochwertiger Fraktionen.....	22
3.3.1	Beurteilung der Fettabscheiderinhalte	23
3.3.2	Aufbereitung eines Fettabscheiders mit wenig Störstoffen	25
3.3.3	Aufbereitung eines Fettabscheiders mit mittlerem Störstoffanteil.....	26
3.3.4	Aufbereitung von Fettabscheiderinhalten mit hohem Störstoffanteil	28
3.3.5	Zusammenfassung.....	32
3.4	Abfallverwertung – Erzeugung erneuerbarer Energie durch Biodiesel und Biogas	33
3.4.1	Biodiesel-Herstellung	33
3.4.2	Qualität der Fettabscheiderfette für die Biodieselherstellung	41
3.4.3	Gasbildungspotential von Fettabscheiderinhalten	46
3.4.4	Schlußfolgerungen	47
3.5	Ökobilanzielle und wirtschaftliche Bewertung	48
3.5.1	Methodik der Ökobilanz.....	48
3.5.2	Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens	49
3.5.3	Sachbilanz und Wirkungsabschätzung der Szenarien	58
3.5.4	Sensitivitätsanalyse.....	78
3.5.5	Fazit der ökobilanziellen Bewertung	83
3.5.6	Wirtschaftliche Gesichtspunkte	84
4	Ausblick und Empfehlungen.....	86
5	Literaturverzeichnis	87
6	Anhang	92
7	Kontaktdaten.....	93

Abkürzungsverzeichnis

A.d	demineralisiertes Wasser
ARA	Abwasserreinigungsanlage
BHKW	Blockheizkraftwerk
CFPP	Filterverstopfungspunkt, cold filter plugging point
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
FA	Fettabscheider
FAME	Fettsäuremethylester (fatty acid methyl ester)
FFA	freie Fettsäuren (free fatty acids)
FOG	Fat, oil and grease (Fett und Öl)
FFS	freie Fettsäuren
GB21	Gasbildungspotential in 21 Tagen
GTW	Grease Trap Waste
LCA	Life Cycle Analysis
oTS	organische Trockensubstanz
SZ	Säurezahl

1 Einleitung und Zusammenfassung

Im Rahmen der zur Reduzierung des Klimawandels notwendigen Energiewende wird unter anderem auf Biodiesel gesetzt, z.B. im Rahmen der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (2009/28/EG). Das Problem ist jedoch, dass dieser Biodiesel zu großen Teilen aus essbaren Pflanzenölen hergestellt wird und damit in direkter Konkurrenz zur Nahrungsmittelerzeugung steht. Durch den Anbau der Ölpflanzen werden zusätzlich auch Wasserressourcen verbraucht (Chhetri et al. 2008; Dominguez-Faus et al. 2009). Der Einsatz von nicht essbaren Pflanzenölen und Abfallölen ist daher eine interessante Option (Balat 2011). Die Biodieselherstellung aus getrennt gesammelten Alt Speiseölen ist in Österreich bereits etabliert und ist eine sehr gute Option, um Treibhausgasemissionen zu reduzieren (Ortner et al. 2016). Aber auch Fette noch geringwertigerer Qualität wie Fettabscheiderfette können unter bestimmten Bedingungen ökologisch sinnvoll zu Biodiesel umgewandelt werden. Entscheidend für die positive Umweltwirkung ist der Fettgehalt der Fettabscheiderinhalte, so dass eine Abtrennung von Wasser und anderen Stoffe, wie z.B. Speiseresten vor der Biodieselerzeugung notwendig ist (Hums et al. 2016). Tu und McDonnell (2016) untersuchten die ökologische Wirkung der Biodieselerzeugung aus Fettabscheiderinhalten mit Hilfe einer LCA und zeigten, dass Fettabscheiderinhalte eine Ressource zur Biodieselerzeugung mit geringem Energieverbrauch und geringen Treibhausgasemissionen sein können, wenn das System mit der Vergärung der abgetrennten Feststoffe kombiniert wird (Tu und McDonnell 2016).

Ziel dieses Projekts war es, das Potential von Fettabscheiderinhalte zur Erzeugung erneuerbarer Energie in Form von Biodiesel zu untersuchen.

Dazu wurden einerseits Fettabscheider untersucht, um festzustellen, welchen Einfluss die Art des Fettabscheiders und die Aufenthaltszeit im Fettabscheider auf die Qualität der abgeschiedenen Fette haben. Die Untersuchungen zeigen, dass klassische gravimetrische Fettabscheider meist zu selten gewartet und falsch betrieben werden. Dadurch sind sowohl die Fettqualität als auch die abgeschiedene Fettmenge suboptimal. Auch bei dem untersuchten Direktfettabscheider war der Gehalt an freien Fettsäuren ähnlich hoch wie in den klassischen Fettabscheidern. Lagerversuche zeigten, dass vor allem die an das Fettabscheidermilieu angepassten Mikroorganismen unter den dortigen für sie günstigen Bedingungen mit Wasser und Nährstoffen rasch die Fettsäuren abspalten.

Des Weiteren wurde untersucht, wie aus den Abfällen das Fett möglichst quantitativ und in guter Qualität abgetrennt werden kann. Es zeigte sich, dass bei gut betriebenen Fettabscheidern Erwärmung und Absetzen ausreichend sind. Für Fettabscheiderfette mit hohem Gehalten an Speiseresten kann dieses durch einen anschließenden Zentrifugationsschritt erreicht werden.

Die Qualität der Fettabscheiderfette ist geeignet für die Biodieselherstellung, wenn entsprechende Verfahren eingesetzt werden. Der ausschlaggebende Parameter ist ihr hoher Gehalt an freien Fettsäuren, wobei jedoch eine Vielzahl an geeigneten Verfahren existiert (Wallace et al. 2017).

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Die ökobilanzielle Betrachtung zeigte, dass die Erzeugung erneuerbarer Energie aus den Fettabscheiderfetten eine ökologisch sinnvolle Option ist. Es wurde einerseits die Biogaserzeugung mittels Co-Vergärung des gesamten Fettabscheiderinhalts, andererseits eine Kombination aus Co-Vergärung (Speisereste und Wasser) und Biodieselherstellung (Fette) untersucht. Beide Varianten waren ähnlich gut bei den Treibhausgaseinsparungen, wobei die absoluten Einsparungen letztendlich davon abhängen, mit welcher Art von Strom die Gutschriften für den substituierten Strom berechnet werden. Der Einfluss des Transportweges war jedoch von untergeordneter Bedeutung, was dafür spricht, dass die Erzeugung erneuerbarer Energie aus Fettabscheiderinhalten immer eine gute Option ist. Ob die Biodieselerzeugung auch ökonomisch eine profitable Option sein kann, hängt von der Rohstoffmenge und Marktvariablen wie dem Biodieselverkaufspreis ab.

Der Fettabscheider als Ressource bietet kostengünstige Rohstoffe für erneuerbare Energieerzeugung. Eine optimale Nutzung dieser Ressource kann durch die Trennung der Stofffraktionen in Fette und Speisereste erreicht werden. Während die Speisereste in der (Co-) Vergärung zur Erzeugung von Biogas genutzt werden können, kann das abgetrennte Fett als Substrat für die Biodieselherstellung dienen. Dieser Biodiesel aus Reststoffen stellt im Gegensatz zu Energiepflanzen keine Konkurrenz zur Nahrungsmittelerzeugung dar und trägt zu einer nachhaltigen und ressourcenschonenden Energieerzeugung bei. Durch die ungünstige Rohstoffqualität (hohe Konzentration freier Fettsäuren und Schwefel) sind moderne Biodiesel-Herstellungsprozesse notwendig. Die abgetrennten Speisereste mit ihrem erhöhten Restölgehalt erzielen in der Co-Fermentation immer noch hohe Biogaserträge, wodurch eine optimale energetische Nutzung möglich wird.

2 Inhaltliche Darstellung

Das Projekt gliedert sich in die Arbeitspakete “Abfallgewinnung – Einfluss von Lagerung und Erfassungssystem”, “Abfallaufarbeitung – Gewinnung hochwertiger Fraktionen”, “Abfallverwertung – Erzeugung erneuerbarer Energie durch Biodiesel und Biogas” und “Ökobilanzielle und wirtschaftliche Bewertung”.

Im Arbeitspaket “Abfallgewinnung – Einfluss von Lagerung und Erfassungssystem” wurden Proben verschiedener Fettabscheider gezogen und untersucht. Weiters wurden Lagerversuche durchgeführt, um den Einfluss von Wassergehalt, Mikroorganismen oder Nährstoffen auf den Fettverderb zu quantifizieren. Es zeigte sich, dass der Fettverderb im Fettabscheider sehr schnell erfolgt. Das bedeutet, dass auch verkürzte Wartungsintervalle keine so viel bessere Fettqualität ergeben, so dass auch diese Fettabscheiderfette mittels speziell auf höhere FFS-Gehalte ausgelegte Biodieselherstellungsverfahren verarbeitet werden müssten.

Im Arbeitspaket “Abfallaufarbeitung – Gewinnung hochwertiger Fraktionen” wurden verschiedene Aufarbeitungsmethoden verglichen wie Erwärmung, Hexan Extraktion oder Zentrifugation. Dabei stellte sich heraus, dass sich bereits mit der relativ einfachen Methode Erwärmung mit anschließender Zentrifugation sehr gute Ergebnisse der Fettabtrennung erzielen lassen.

Das Arbeitspaket “Abfallverwertung – Erzeugung erneuerbarer Energie durch Biodiesel und Biogas” wurden verschiedene Methoden der Biodieselherstellung zusammengetragen. Es hat sich gezeigt, dass die Probleme bei der Umsetzung der Biodieselherstellung aus Fettabscheiderfetten nicht bei den Biodieself Verfahren liegen, sondern in der mangelhaften Umsetzung der ÖNORM EN 1825-1 (fehlende oder falsch ausgeführte Fettabscheider) sowie unzureichender Wartung der Anlagen.

Im Arbeitspaket “Ökobilanzielle und wirtschaftliche Bewertung” wurden die potentiellen Umweltwirkungen des Untersuchungssystems (Sammlung, Lagerung, Aufbereitungsoptionen und erneuerbare Energieerzeugungsmöglichkeiten) mittels einer ökobilanziellen Analyse untersucht werden. Die Analyse erfolgte in Anlehnung an DIN ISO 14040 ff mit Hilfe des Softwareprogramms „EASETECH“ der Dänischen Technischen Universität DTU, das speziell für die ökobilanzielle Betrachtung von umwelttechnischen und abfallwirtschaftlichen Fragestellungen entwickelt wurde. Ökologisch verglichen wurden jeweils die Sammlung der Fettabscheiderinhalte und der Transport zur Kläranlage und dann im Szenario 1 die Co-Vergärung und Biogasgewinnung aus den gesamten Fettabscheiderinhalten sowie im Szenario 2 die Trennung der Fettabscheiderinhalte in die Fette, die zur Biodieselerzeugung genutzt werden, und in die übrigen Bestandteile, die weiterhin auf der Kläranlage zur Biogasgewinnung eingesetzt werden.

3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

3.1 Labormethoden

Freien Fettsäuren

Für die Messung der freien Fettsäuren/Säurezahl wurden die gefilterten Fettproben auf 60°C erhitzt und mit einem Metrohm Titrand 888 nach (DIN EN ISO 660:2009-10) untersucht. Die Ergebnisse werden als Prozent freie Fettsäuren (%) dargestellt.

Hydroxylzahl

Für die Messung der Hydroxylzahl wurden die gefilterten Fettproben auf 60°C erhitzt und mit einem Metrohm Titrand 888 nach (ASTM E1899-16 2016) untersucht. Die Ergebnisse werden als Hydroxylzahl in mg/g KOH dargestellt.

Karl-Fischer Titration

Für die Messung des Wassergehalts wurden die gefilterten Fettproben auf 60°C erhitzt und mit einem Metrohm Titrand 888 nach (DIN EN ISO 8534:2008-10 2008) untersucht. Die Ergebnisse werden als Wassergehalt in Prozent (%) dargestellt.

Peroxidzahl

Für die Messung der Peroxidzahl wurden die gefilterten Fettproben auf 60°C erhitzt und mit einem Metrohm Titrand 888 angelehnt an die (DIN EN ISO 27107:2010-08 2010) untersucht. Die Ergebnisse werden als milliäquivalent Sauerstoff/kg Fett dargestellt.

Fettsäurespektrum

Für die Analyse des Fettsäurespektrums wurden die Fettproben mit TMSH zu Fettsäuremethylestern (FAME) verestert (DGF-Einheitmethoden C-VI 11e (98)) und im Anschluss mit einem Gaschromatograph (Shimadzu GC2010 plus mit Macherey Nagel Optima Biodiesel F Säule) gemessen (DGF-Einheitmethoden C-VI 10a).

Schwefel

Die Schwefelmessung wurde von der Firma ASG Analytik durchgeführt (DIN EN ISO 20884:2011-07).

Gasbildungspotential von Fettabscheiderinhalten im Gärtest (GB21)

Der Gärtest erfolgte nach VDI 4630:2016-11, die Gasbildung wurde mittels automatischem Methanpotential Test-System (AMPTS) der Firma Bioprocess Control bestimmt. Aus dem Fettabscheider eines Restaurants mit ca. 550 Essen pro Tag wurden Proben der fetthaltigen Schwimmschicht und der Flüssigphase genommen. Die homogenisierte Probe wurde zentrifugiert, um das Speisereste-Öl-Gemisch in der Schwimmschicht effektiv zu trennen. Im Anschluss wurde das Gaspotential der gesamten Schwimmschichtprobe (Speisereste+Öl) und der Einzelkomponenten (Speisereste, Öl, wässrige Phase) bestimmt.

3.2 Abfallgewinnung – Einfluss von Lagerung und Erfassungssystem

3.2.1 Erfassungssysteme für Fettabscheiderabfälle

Im Laufe des Projekts wurden drei verschiedenen Erfassungssysteme untersucht:

- Klassische Gravitations-Fettabscheider
- Direktfettabscheider mit gesonderter Lagerung Fett/Speisereste
- Direktfettabscheider kombiniert mit Nassaufbereitung von Speiseresten und kombinierte Lagerung im Tanksystem

Die entnommenen Proben aus allen drei Systemen wurden auf die wichtigsten Fett-Parameter, die für die Biodieselherstellung relevant sind, untersucht. Im nachfolgenden Kapitel sind die getesteten Systeme kurz beschrieben und die wichtigsten Erkenntnisse dargestellt.

3.2.2 Klassische Gravitations-Fettabscheider

In Abbildung 1 ist ein schematisches Bild eines Gravitations-Fettabscheiders dargestellt. Das Funktionsprinzip beruht darauf, dass Fett leichter ist als Wasser und sich so an der Oberfläche sammelt. Die Feststoffe sinken ab und sammeln sich am Boden. Es kommt zu einer gravimetrischen Drei-Phasen-Trennung und das vom Fett gereinigte Wasser wird in einem Tauchrohr abgeleitet.



Abbildung 1: Schema eines Fettabscheiders (TECE Basika 2007a)

Ist der Fettabscheider voll, so wird von einem Entsorgungsunternehmen der gesamte Inhalt abgesaugt. Hierbei ist zu beachten, dass der Großteil eines Fettabscheiders aus der wässrigen Phase besteht. Laut Ragauskas et al. (2013) liegt der Gehalt an Fett bei 2%, der Feststoffgehalt bei 3% und 95% entfallen auf den Anteil des Wassers. Die Entsorgungs-

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

(mind. halbjährlich) und Wartungsintervalle (monatlich) sind laut ÖNORM EN 1825-2: 2002 09 01 festgelegt.

Bei den Untersuchungen wurden zehn Gravitations-Fettabscheider beprobt. Es wurden der pH-Wert und die lipophilen Stoffe im Ablauf erfasst und der Gesamtzustand des Abscheiders beurteilt. Um die Qualität der Fette für die Biodieselherstellung zu beurteilen, wurde bei allen Proben der Gehalt an FFS bestimmt. Die letzte Entleerung und Wartung der Fettabscheider war bekannt und somit konnte zugeordnet werden, wie lange die Abfälle in den Abscheidern gelagert wurden. Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden in Lichtmannegger et al. (2018) veröffentlicht.

Zusammenfassend ergaben die Untersuchungen, dass nur vier der Fettabscheider in einem guten Zustand waren. Einer der Abscheider wies einen baulichen Mangel auf, da die Tauchrohre fehlten und eine Fettabscheidung daher nicht möglich war. Bei fünf Abscheidern war eine Entleerung überfällig, wodurch auch die Funktion nicht mehr gewährleistet war. Die Ergebnisse der FFS-Messung der Fettabscheider-Fette ist in Kapitel 0 dargestellt.

Generell war der Gehalt an freien Fettsäuren in allen Proben sehr hoch (>50%). Ein Zusammenhang zwischen Lagerdauer und dem Gehalt an FFS konnte nicht erkannt werden.

3.2.3 Direktfettabscheider

Ein Direktfettabscheider arbeitet nach einem sogenannten Teil-Entsorgungssystem (Abbildung 2). Das Küchenabwasser wird vor dem Fettabscheider über ein Sieb geleitet und die Störstoffe (Abfall und Speisereste) werden aus dem Abwasser ausgetragen. Im eigentlichen Fettabscheideraum werden nun die Fette gravimetrisch vom Abwasser getrennt. Die aufschwimmenden Öle werden beheizt und regelmäßig abgezogen. Die Lagerung beider Fraktionen erfolgt in Sammelfässern.



Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Direktfettabscheiders (TECE Basika 2007b).

Diese Fettabscheidersysteme haben gegenüber den klassischen Abscheidern den Vorteil, dass die anfallenden Fette sehr zeitnah aus dem Fettabscheider ausgeschleust und in einem separaten Gefäß gelagert werden. Die Öle haben einen sehr geringen Anteil an Störstoffen, der mit einfacher Filtration entfernt werden könnte. Die Größe des Fettabscheiders reduziert

sich durch die separate Lagerung der Störstoffe und Fette maßgeblich. Des Weiteren ist eine komplette Entleerung (inklusive Wasserkörper) des Abscheiders nur im Rahmen einer Generalrevision nötig, wodurch sich die Gesamtmenge des Entsorgungsguts drastisch reduziert.

Ein solches Fettabscheidesystem wurde im Rahmen des Projekts mehrmals beprobt. Abbildung 3 zeigt die hochwertige Ölfraction direkt nachdem sie aus dem Lagerfass entnommen wurde.



Abbildung 3: Ölfraction aus einem Direktfettabscheider.

Bei Betrachtung der genommenen Probe konnten keine groben Verunreinigungen durch Speisereste oder Wasser festgestellt werden. Die Analyse der freien Fettsäuren ergab aber auch hier sehr hohe Werte ähnlich den klassischen Fettabscheidern. Die freien Fettsäuren bewegten sich hier zwischen 57-82%. Eine mögliche Erklärung dieser hohen Werte ist, dass das Fett während der Verweilzeit im Fettabscheider schon stark hydrolysiert wird. Während des Betriebs eines Fettabscheiders kann sich bestens adaptierte Mikrobiota etablieren. Viele dieser Organismen sind fähig, Lipasen zu produzieren, die freie Fettsäuren von den Triglyceriden abspalten können (Shon et al. 2002).

Zusammenfassend hat ein solches System hinsichtlich freier Fettsäuren keine Vorteile gegenüber dem klassischen Fettabscheider. Dadurch, dass bei den Fettabscheidern jedoch immer dieselbe Menge an Fetten im Abscheideraum verbleibt, ist die Abscheideleistung über lange Zeit sehr gut. Das Wasser im Fettabscheider muss zudem nur bei der Wartung komplett entleert und entsorgt werden, was die zu entsorgende Menge aus dem Fettabscheider erheblich reduziert. Ein Stoffaustrag durch Überladung des Fettabscheiders kann also ausgeschlossen werden. Des Weiteren sind die abgetrennten Fette nicht mit Speiseresten oder sonstigen Abfällen verunreinigt.

3.2.4 Direktfettabscheider kombiniert mit Nassmüll-Entsorgungssystem

Es gibt Fettabscheidesysteme, die mit einer Nassmüllentsorgung kombiniert sind. Hierbei geht es darum, die Speiseabfälle und die Fettabscheiderabfälle gesammelt zu entsorgen. Die Speiseabfälle werden in einer Vorrichtung mit Wasser verdünnt und zerkleinert. Danach werden sie in das Tanksystem geleitet und können dort bis zur Abholung durch einen Entsorger gelagert werden (Abbildung 4).



Abbildung 4: Direktfettabscheider kombiniert mit Nassmüllentsorgung der Firma ACO.

Die Abwässer aus der Küche werden über einen Direktfettabscheider geleitet. Das Fett und die groben Reststoffe werden dort abgetrennt und regelmäßig abgezogen. Hierbei werden die Stofffraktionen nicht separat gesammelt, sondern den aufbereiteten Speiseresten beigemischt. Die wässrige Phase im Lagertank kann nach einer Absetzzeit abgesaugt werden und so wird der Tank über die Zeit mit Fett und Speiseresten gefüllt. Ist das Tanksystem voll, so wird es mit einem Saugwagen abgepumpt und kann entsorgt werden. Laut der diversen Hersteller sind die Vorteile eines solchen Systems, dass es zu keiner Geruchsbildung kommt und die Entsorgung generell hygienischer ablaufen kann. Des Weiteren werden Fettabscheiderinhalt und Speisereste gemeinsam entsorgt, dies kann Kosten sparen.

Problematisch wird es allerdings, wenn man die hochwertige Fraktion aus dem Gemisch wieder trennen muss. Pro Essensportion fallen zwischen 100 und 300 g an Speiseresten an (Pladerer 2015). Für die Menge an abtrennbarem Fett im Küchenabwasser finden sich keine belastbaren Daten. Wenn man vorhandene Näherungswerte von ca. 7-10 g Fett pro Mahlzeit zu Grunde legt, ist die anfallende Menge um den Faktor 10-30 geringer (Bachon 1987). Je nach Gewerbe gibt es beim Zubereiten der Mahlzeiten auch einen deutlichen Unterschied beim Einsatz von Fetten. So wird in Kantinen von Krankenhäusern fettärmer gekocht als in Hotelküchen. Die extrahierbaren Fettmengen sind auch stark abhängig von der eingesetzten Menge an Putz- und Reinigungsmitteln, dem Zustand des Fettabscheiders und von der Abwassertemperatur.

Ein solches kombiniertes Entsorgungssystem, installiert in einem Krankenhaus, wo auf Hygiene ein besonderes Augenmerk gelegt wird, wurde beprobt. Es wurden Proben aus dem Mix-Tank genommen, in dem Fettabscheiderinhalt und zerkleinerte Speisereste gemischt werden, bevor sie in den Lagertank gepumpt werden. Die Proben wurden anschließend im Labor weiterverarbeitet und es wurde versucht, die hochwertige Ölfraction aus der gemischten Probe zu extrahieren.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Abbildung 5: Speisereste nach gravimetrischer Trennung bei 60°C; links: Nach 2h zeigt sich ein gelblicher Schaum auf der Oberfläche; rechts: nach gravimetrischer Trennung über Nacht zeigen sich kleine Fetteinschlüsse.

Hierbei zeigte sich nach zwei Stunden noch keinerlei Trennung der auf 60°C temperierten Probe. Auch die Trennung über Nacht lieferte keinerlei klare, abtrennbare Phase einer hochwertigen Ölfraction. Es zeigten sich lediglich kleinere Fetteinschlüsse im obersten Teil des Becherglases (Abbildung 5).

Betrachtet man die gewonnenen Erkenntnisse, so zeigt sich, dass der Fettgehalt in den gemischten Proben des kombinierten Erfassungssystems im Verhältnis zu den Speiseresten relativ gering ist. Die Abtrennung der hochwertigen Fraktion müsste also mittels Zentrifugation erfolgen. Wobei eine sehr große Menge an Material erhitzt und im Anschluss zentrifugiert werden muss.

Ein anderer Lösungsansatz könnte hingegen sein, die hochwertige Fraktion gesondert zu sammeln, da sie durch die Abtrennung im Fettabscheider in relativ Störstoff-freier Qualität vorliegen und nur mehr filtriert werden müssen. Lediglich die partikulären Stoffe aus dem Fettabscheider werden dem Nassmüll-Entsorgungssystem zugeführt.

Zusammenfassung:

Die Erkenntnisse die im Laufe des Projekts zu verschiedenen Fettabscheider-Systemen gesammelt wurden, kann man folgendermaßen zusammenfassen:

- Die Qualität der Fettabscheiderinhalte variiert sehr stark. Es wurden viele Fettabscheider gefunden, die stark mit Speiseresten oder Abfällen verunreinigt waren. Diese Fehlwürfe werden durch mangelhafte Schulung des Küchenpersonals oder der Reinigungskräfte verursacht. Ein geringer Störstoffanteil (Abfälle/Speisereste) in den Fettabscheidern erleichtert die Abtrennung der hochwertigen Fraktion. Hierbei ist vor allem das Küchenpersonal gefordert die Speisereste und andere Küchenabfälle dem richtigen Entsorgungssystem zuzuführen. Generell lieferten Systeme mit einer eingebauten Störstoff Abtrennung gleichbleibend saubere Ölfractionen.
- Fünf der Gravitations-Fettabscheider waren in einem schlechten Wartungszustand. Dadurch kam es zu einer verringerten Abscheideleistung und in weiterer Folge zu einem Austrag an Fetten in den Kanal. Hierbei gehen nicht nur wertvolle Ressourcen verloren, es kann trotz Vorhandenseins einer Abscheideanlage zu massiven Betriebsproblemen im Kanalsystem durch Fettablagerungen kommen. Direktfettabscheider können durch die regelmäßige Abtrennung von Störstoffen und hochwertiger Fraktion eine gleichbleibende Abscheideleistung über einen langen Zeitraum aufrechterhalten. Ein Austrag von Fett in den Kanal wird dadurch verhindert.
- Das Fettabscheider Milieu ist für die Fettqualität sehr nachteilig. In allen beprobten Fettabscheidern lagen die freien Fettsäuren bei Werten über 50%, auch bei Fettabscheidern mit einer sehr geringen Lagerdauer (<60 Tage) oder Direkt-Fettabscheidern mit separierten Fraktionen.
- Direktfettabscheider kombiniert mit einem Nassmüll-Entsorgungssystem sind sehr gut geeignet um die anfallenden Abfälle bis zur Entsorgung hygienisch zu lagern. Des Weiteren werden bei der Abholung Fettabscheiderinhalte und aufbereitete Speisereste kombiniert entsorgt, was Entsorgungskosten reduziert. Eine Abtrennung der hochwertigen Fraktion für die Biodieselherstellung gestaltet sich jedoch herausfordernd.

3.2.5 Lagerversuche im Labormaßstab

Die Ergebnisse hinsichtlich der Fettqualität der verschiedenen Erfassungssysteme waren, dass in allen untersuchten Systemen das Fett sehr schnell hydrolysiert wird und der Gehalt an freien Fettsäuren sehr schnell zunimmt. Dies ist für die Biodieselherstellung sehr von Nachteil, da befragte österreichische Biodieselhersteller Fette und Öle nur annehmen, wenn der Gehalt an freien Fettsäuren unter 5% (Münzer Bioindustrie GmbH, Wien), beziehungsweise unter 15% (Biodiesel Kärnten GmbH, Arnoldstein) liegt. In einer Studie von Montefrio et al. (2010) lag der Gehalt an freien Fettsäuren über den Versuchszeitraum bei maximal 15%. Dies wurde durch den stetigen Eintrag an frischem Fett in den Fettabscheider erklärt. Diese Erkenntnisse decken sich jedoch nicht mit den Ergebnissen aus den beprobten Fettabscheider-Systemen. Hier lag der Gehalt an freien Fettsäuren im Median bei 80%.

Das Ziel der Lagerversuche war herauszufinden welches Entleerungsintervall für Fettabscheider geeignet wäre, um freie Fettsäuren <15% einzuhalten. Des Weiteren wurden in den Laborversuchen verschiedene Betriebszustände simuliert, um herauszufinden, welche Parameter den größten Einfluss auf den Fettverderb haben. Aus der Literatur ist bekannt, dass vor allem Mikroorganismen und der Wassergehalt einen starken Einfluss auf den Fettverderb haben (Shon et al. 2002).

Folgende Versuchsansätze wurden hergestellt um die Fragestellungen zu beantworten:

- V1: Lagerversuch mit Altspeiseöl [Kontrolle]
- V2: Lagerversuch mit Altspeiseöl und Zugabe von Wasser
- V3: Lagerversuch mit Altspeiseöl und Zugabe von Wasser, Mikroorganismen aus Fettabscheidern und einem synthetischen Nährmedium
- V4: Lagerversuch mit Altspeiseöl und entölten Speiseresten aus einem Fettabscheider

Die verschiedenen Versuchsansätze wurden in 1,8L Einweg Plastikemern hergestellt. Das Altspeiseöl stammte aus einer Mensa-Küche und wurde filtriert, um Frittier-Rückstände zu entfernen. Die Analyse der wichtigsten Parameter ergab für das Altspeiseöl freie Fettsäuren zwischen 0,21 und 0,34% und einen Wassergehalt von 0,07-0,09%. Die Peroxidzahl bewegte sich zwischen 2,08 und 4,43 milliäquivalente O₂/kg Fett und ist ein Maß für den Gehalt an peroxidisch gebundenem Sauerstoff, insbesondere an Hydroperoxiden. Sie dient als Parameter für den Oxidationsgrad des Fetts und ist ein Maß für die Verderbtheit. Die Ergebnisse zeigen, dass das verwendete Altspeiseöl eine sehr gute Qualität hatte und für die Biodieselherstellung sehr gut geeignet wäre. Alle Versuchsansätze waren Batch-Tests, es wurde daher nach dem Ansatz kein weiteres Substrat mehr hinzugegeben. Das synthetische Nährmedium wurde nach den OECD guidelines for testing Chemicals; Test No. 209 (OECD 2010) hergestellt. Die Speisereste aus dem Fettabscheider wurden aus dem Fettabscheider der Mensa Küche entnommen und entölt. Sie besaßen einen Restfettgehalt von ca. 33% (w/w) nach Hexan Extraktion.

Für die Isolierung von Mikroorganismen wurde der Fettabscheiderinhalt einer Mensaküche auf 1 mm gesiebt und mit physiologischer NaCl 0,9% verdünnt. Im Anschluss wurde die Suspension auf 0,5 mm gesiebt und der Siebdurchgang bei ca. 12000 rfc für 5 min abzentrifugiert. Das Pellet wurde in physiologischer Kochsalzlösung resuspendiert und diente als Inokulum für die Versuche mit Mikroorganismen. Die Mikrobiota wurde im Rahmen der Untersuchungen auf Genus-Ebene eine dreifach-bestimmung durchgeführt und ist in Abbildung 6 dargestellt. Vertreter der Gattungen Selenomonas und Prevotella sind in der Probe die dominanten Vertreter. Vertreter dieser Gattungen sind strikt anaerob und verwerten in ihrem Stoffwechsel hauptsächlich Kohlenhydrate. Neben Abwasserproben kommen sie auch im Gastrointestinaltrakt (z.B. Pansen) von Säugern vor.

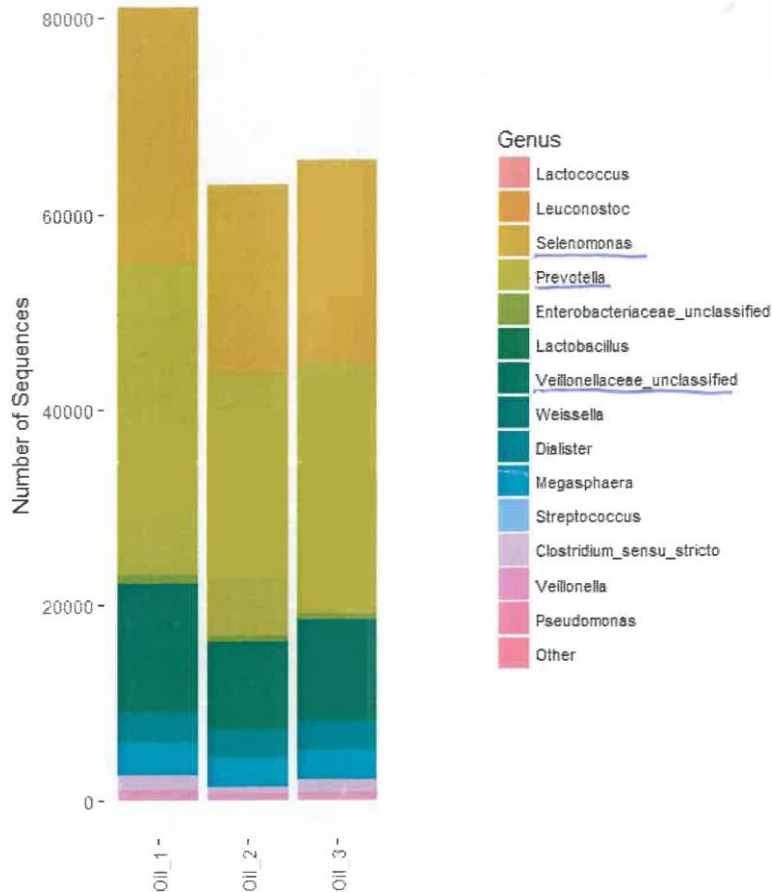


Abbildung 6: Zusammensetzung der Mikroorganismen-Gemeinschaft in einem untersuchten Fettabscheider der Mensaküche (FA 5) in einer dreifach-Bestimmung.

Die Ansätze setzten sich wie folgt zusammen (s. Tabelle 1):

Tabelle 1: Versuchsaufbau Lagerversuch

	Altspeseöl [g]	Wasser [g]	synthetische Nährstoffe [ml]	Mikroorg. [mL]	Speisereste [g]
Versuchsansatz 1	200	-	-	-	-
Versuchsansatz 2	100	250	-	-	-
Versuchsansatz 3	150	250	2,5	2	-
Versuchsansatz 4	200	200	-	-	50

Die Ansätze wurden wöchentlich geschwenkt, um den Kontakt zwischen den einzelnen Phasen zu gewährleisten. Pro Zeitpunkt wurde jeweils ein kompletter Batch-Lagerversuch aufgearbeitet. Die hochwertige Öl-Fraktion wurde gravimetrisch bei 60°C abgetrennt, filtriert und bei 4°C bis zur Messung der Fett-Parameter gelagert.

Ergebnisse:

Die freien Fettsäuren sind der wichtigste Parameter für das zu wählende Verfahren in der Biodiesel-Herstellung. In den Versuchen zeigte sich, dass es einen großen Unterschied zwischen den verschiedenen Ansätzen hinsichtlich Anstieg von FFS gab (Abbildung 7).

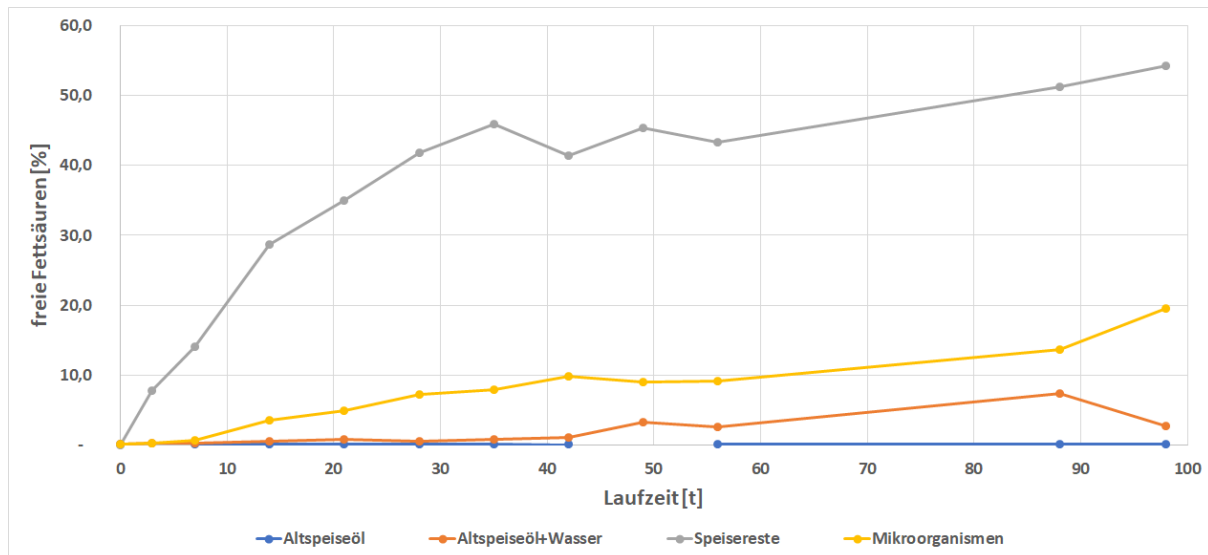


Abbildung 7: Lagerversuch; Anstieg an freien Fettsäuren über 98 Tage.

Die freien Fettsäuren stiegen beim Altspeseöl, welches in den Versuchen als Kontrolle dient, über den gesamten Versuchszeitraum nicht an und blieben unter 1% freie Fettsäuren. Auch in Gegenwart von Wasser kam es zu keiner gravierenden Änderung beim Gehalt an freien Fettsäuren über den gesamten Versuchszeitraum; der Wert bewegte sich um 3% FFS. Im Versuchsansatz mit Mikroorganismen extrahiert aus einem Fettabscheider und synthetischen Nährmedium lag der Gehalt an FFS bereits nach 21 Tagen bei 5%. Dies bedeutet, dass das Altspeseöl bei der Lagerung in Präsenz von Mikroorganismen schon nach drei Wochen für ein basisches Verfahren nicht mehr geeignet wäre. Die FFS stiegen im Versuchsverlauf langsam an und erreichten nach 98 Tagen 20% FFS. Beim Versuchsansatz mit entölten Speiseresten aus einem Fettabscheider hingegen kam es zu einem rasanten Anstieg an freien Fettsäuren. Da die Speisereste noch einen Restgehalt an Öl aus dem Fettabscheider aufwiesen, wurde der FFS Blindwert für die Ausgangsmischung bestimmt und für alle nachfolgenden Werte abgezogen. Bereits nach sieben Tagen wurden 14% an freien Fettsäuren erreicht. Dies bedeutet, dass Öl, welches in den simulierten Fettabscheider gelangt, bereits nach dieser geringen Zeit in Österreich nicht mehr von den Biodieselherstellern verwendet werden könnte. Die freien Fettsäuren erreichten bereits nach vier Wochen einen Wert von über 40% und erst danach verlangsamte sich der Anstieg. Der Endwert nach 98 Tagen Lagerung betrug 54% FFS.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich Altspeseöl, welches trocken gelagert wird, sehr stabil in Bezug auf den Gehalt an freien Fettsäuren ist. Über 98 Tage kommt es zu keinem

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

gravierenden Anstieg und das Öl ist immer noch bestens für die Biodieselherstellung geeignet. Im Versuch mit Altspeiseölen und Wasser kam nur zu einem geringfügigen Anstieg der freien Fettsäuren. Hierbei spaltet sich das Öl/ Fett in Präsenz von Wasser hydrolytisch. Mit einem Endwert von 3% freien Fettsäuren ist das Altspeiseöl aber immer noch für die Biodieselherstellung geeignet. Vergleicht man nun diese Ergebnisse zwischen den Speiseresten und den Mikroorganismen mit synthetischen Nährstoffen, so zeigt sich, dass vor allem diese Ansätze einen starken Einfluss auf die freien Fettsäuren haben. Vor allem im Ansatz mit Speiseresten aus einem Fettabscheider, in dem die darin enthaltenen Mikroorganismen bestens auf den Abbau von Altspeisefetten adaptiert sind, zeigt sich eine rasante Zunahme an freien Fettsäuren. Im Versuch mit Mikroorganismen und synthetischem Medium geht die Fettspaltung bedeutend langsamer. Hierbei ist vor allem die Konzentration an Mikroorganismen im Ansatz unterschiedlich. Im Versuch mit Speiseresten wurden 50 g entölter Speisereste aus einem Fettabscheider zugegeben, wohingegen im Versuchsansatz mit Mikroorganismen und synthetischem Medium nur 2 ml an isoliertem Inokulum zugegeben wurde. Vergleicht man nun diese zwei Ansätze, so ist der Wert bei dem Ansatz mit Speiseresten bereits nach 3 Wochen um 30 Prozentpunkte höher als bei Mikroorganismen mit synthetischem Medium. Über die restliche Lagerdauer bleibt dieser Abstand relativ gleich und pendelt zwischen 32 und 38 Prozentpunkten. Dadurch, dass es sich bei den Laborversuchen um Batch-Ansätze handelt und keine frischen Nährstoffe zugegeben wurde, kam es zu einer Nährstofflimitierung der Mikroorganismen. Vor allem im Ansatz mit Speiseresten aus dem Fettabscheider sieht man bei der Zunahme an freien Fettsäuren eine deutliche Abflachung der Kurve nach 35 Tagen. Betrug die Zunahme an freien Fettsäuren in den ersten Tagen 42 Prozentpunkte, so lag sie in den restlichen 63 Tagen lediglich bei 12 Prozentpunkten.

Die Proben wurden auch auf andere Parameter für Biodieselrohstoffqualität hin untersucht, wie Wassergehalt, Hydroxylzahl, Peroxidzahl. Die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt (Abbildung 8, Abbildung 9, Abbildung 10).

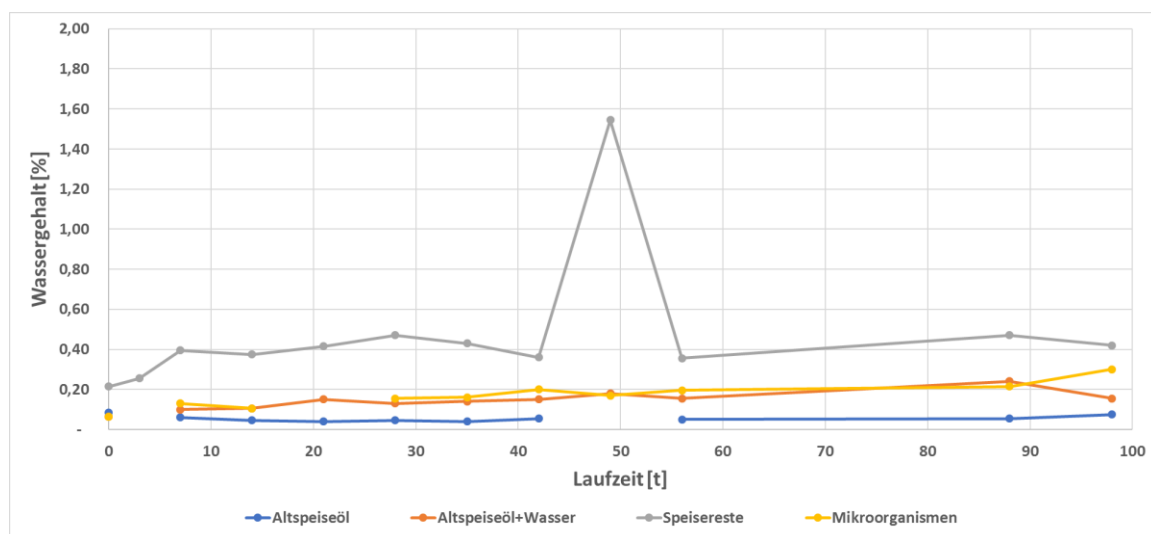


Abbildung 8: Wassergehalt der untersuchten Öle nach Karl Fischer Titration.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

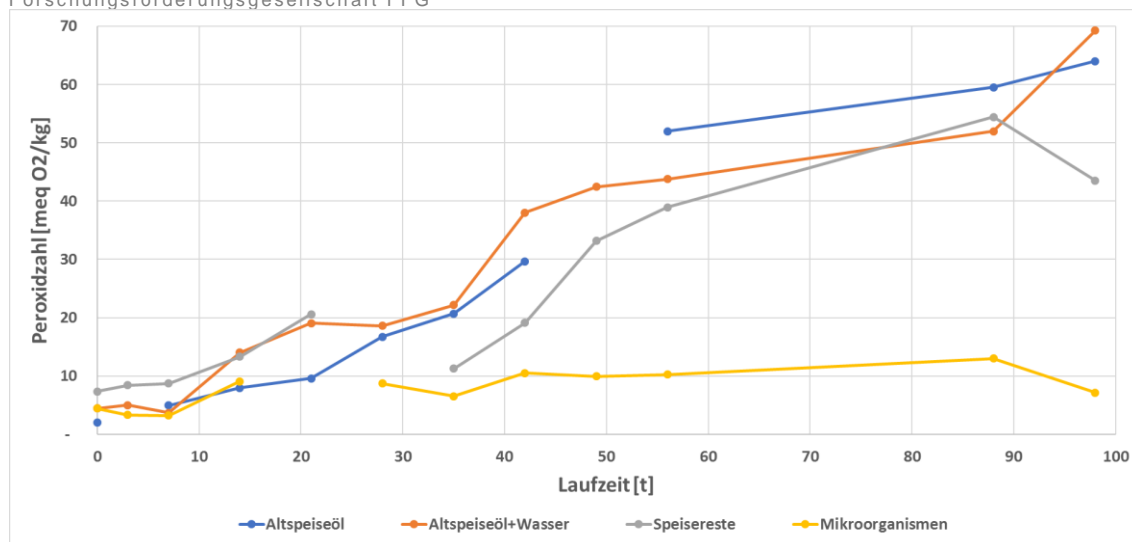


Abbildung 9: Peroxidzahl der untersuchten Öl-Proben nach Titration.

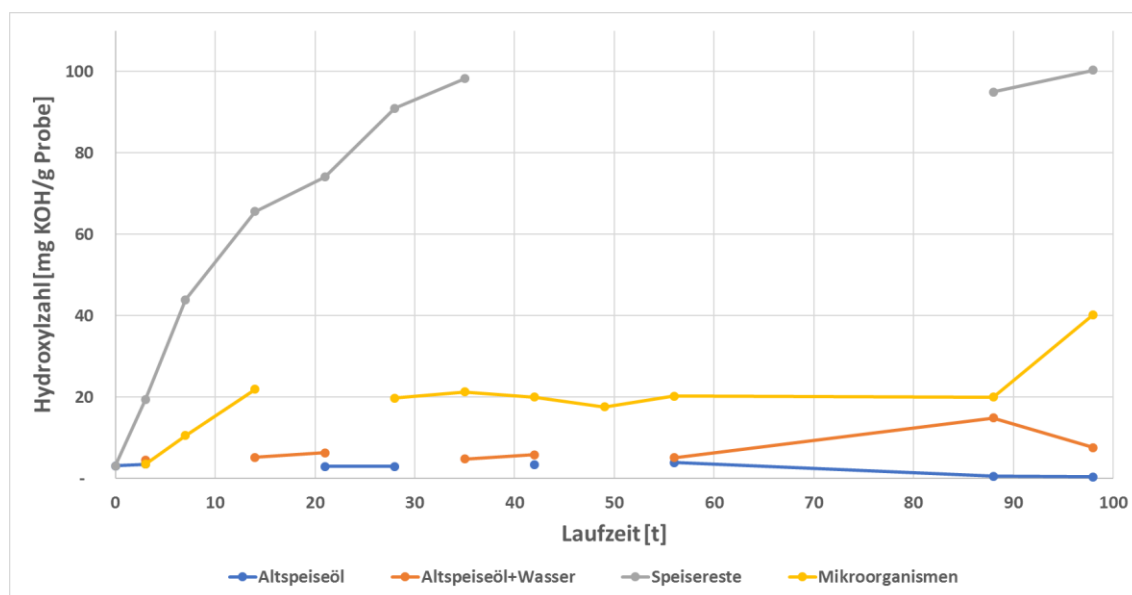


Abbildung 10: Hydroxylzahl der untersuchten Öl-Proben nach Titration.

Hierbei ist vor allem der Wassergehalt ein Kriterium für die Biodieselherstellung. Dieser sollte unter 0,5% liegen, da Wasser den basisch katalysierten Umesterungsprozess in der Biodieselherstellung stört. Für die Parameter Peroxidzahl und Hydroxylzahl sind hingegen für Altspeiseöle keine Grenzwerte seitens der Hersteller festgelegt.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische
Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Fazit:

Vergleicht man die Ergebnisse der Lagerversuche mit denen des Direktfettabscheiders, so decken sich diese sehr gut. Selbst bei einem System, wo die hochwertigen Fraktionen eine relativ geringe Verweilzeit (< 14 Tage) im Fettabscheider haben, geht der Fettverderb sehr schnell. Dies ist bedingt durch die Hydrolyse der Fette und Öle durch adaptierte Mikrobiota, die im System verweilen. Der stetige Zulauf an Nährstoffen verhindert eine Limitierung der Organismen. Durch den Eintrag an Speiseresten in den Fettabscheider wird die Kontaktfläche und Eindringtiefe der Mikroorganismen in die Öl-/Fettphase noch weiter erhöht. Will man niedrige Werte an freien Fettsäuren erreichen, so muss vor allem sichergestellt werden, dass die Fettabscheider bei der Entleerung gut gereinigt werden und so ein Großteil der Mikroorganismen entfernt wird. Des Weiteren sind Entleerungsintervalle zu wählen, die relativ kurz sind (4 Wochen). Dies ist jedoch nur für Betriebe möglich, die einen entsprechend großen Anfall an Fetten im Abwasser haben, da ansonsten die Wirtschaftlichkeit bei den Entleerungen nicht gegeben ist.

3.3 Abfallaufarbeitung – Gewinnung hochwertiger Fraktionen

In diesem Kapitel werden verschiedene Methoden präsentiert, die im Rahmen des Projektes untersucht wurden, um eine möglichst effiziente und günstige Trennung der hochwertigen Fraktion zu bewerkstelligen. Eine umfassende Literaturrecherche lieferte hierbei verschiedene Trenn- und Extraktionstechniken.

Eine einfache Trennmethode ist das Aufheizen der Fettabscheiderinhalte und die gravimetrische Trennung der verschiedenen Phasen über die Zeit. Die Proben werden meist über mehrere Stunden bei Temperaturen zwischen 35-80°C gravimetrisch getrennt (Noshadi et al. 2014; Wu et al. 2016; Chakrabarti et al. 2008). Befinden sich jedoch Verunreinigungen in Form von Speiseresten in Fettabscheidern, so ist die gravimetrische Trennung von Fettabscheiderinhalten unter Umständen sehr ineffizient. Vor allem Stärke führt hierbei zu einer Emulsionsbildung mit Fett und verringert die Abtrennbarkeit drastisch. Durch Zugabe von Säuren können diese Emulsionen teilweise gebrochen werden und es kommt wieder zu einer besseren Separation des Öls. Tu et al. (2016) verwendeten in ihrer Arbeit Altspeisefette, um die hochwertige Lipidfraktion aus entwässerten Fettabscheiderinhalten und Fetten aus der Kanalisation zu extrahieren. Die Extraktion wurde bei 70°C, einem Verhältnis von 3,2:1 (Altspeisefette/Fettabscheider Fett) für 240 min durchgeführt. Es wurde hierbei eine Extraktionseffizienz von 95% erreicht.

Eine weitere Möglichkeit ist die Extraktion von Fett mit Lösemitteln wie z.B. Hexan (Pokoo-Aikins et al. 2010), jedoch sind diese Methoden für den großtechnischen Einsatz nur begrenzt anwendbar (Siddiquee und Rohani 2011).

Für die großtechnische Aufbereitung von Fettabscheiderinhalten werden in bestehenden Anlagen aktuell sogenannte Drei-Phasen Zentrifugen eingesetzt. Um die Ausbeute zu erhöhen, wird vor der Zentrifugation Phosphorsäure zugesetzt und das Substrat auf ca. 80°C erhitzt. In der Zentrifuge kommt es zu einer Auftrennung in eine Öl Phase (liquid), einer wässrigen Phase und Speiseresten wie in Abbildung 11 dargestellt.

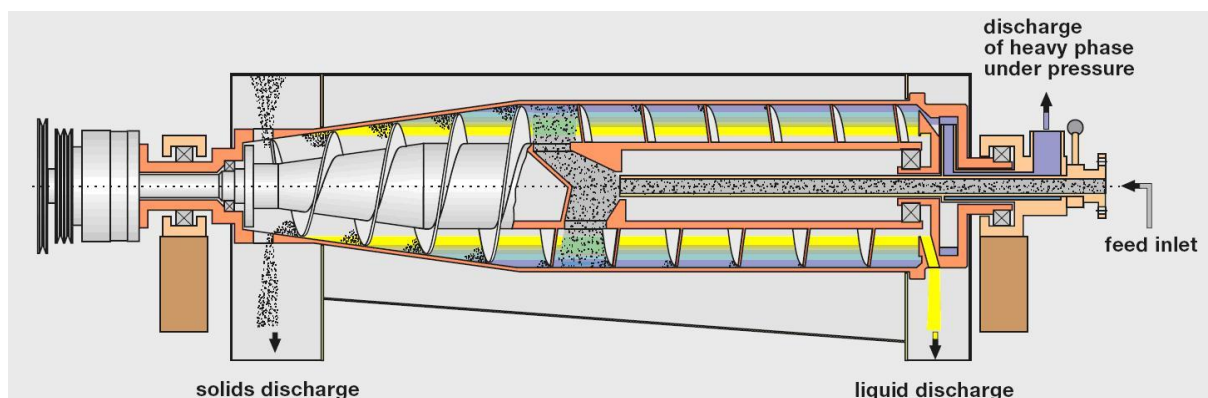


Abbildung 11: Drei-Phasen Zentrifuge, Schematische Darstellung (C&D INGENIERIA 2012).

3.3.1 Beurteilung der Fettabscheiderinhalte

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurde die fetthaltige Schwimmschicht von zwölf Fettabscheidern, hinsichtlich der Extraktion der hochwertigen Öl-Fraktion, beprobt. Insgesamt kann die Qualität der Fettabscheiderinhalte grob nach folgendem Schema eingeteilt werden:

- Schwimmschicht bestehend aus Fett (hochwertige Fraktion), Speiseresten und Abfall (Störstoffen):
 - *geringer Störstoffgehalt*: Anteil an Störstoffen und Speiseresten bis 20% (v/v), bei einer gravimetrischen Trennung (60°C) kommt es zu einer klaren Phasentrennung.
 - *mittlerer Störstoffgehalt*: Anteil an Störstoffen und Speiseresten zwischen 20 und 70% (v/v), bei einer gravimetrischen Trennung (60°C) kommt es noch zu einer klaren Phasentrennung.
 - *hoher Störstoffgehalt*: Anteil an Störstoffen und Speiseresten deutlich größer 70% (v/v), bei einer gravimetrischen Trennung (60°C) kommt es zu keiner klaren Phasentrennung; die Speisereste und Öle bilden eine Emulsion.

Von den 12 Fettabscheidern war ein Fettabscheider nicht funktionsfähig und es konnte keine Abscheidewirkung von Fett erzielt werden. Ein Modell, ein sogenannter Direktfettabscheider, trennt die einzelnen Fraktionen bereits bei der Abscheidung aus dem Abwasser und die abgeschiedenen Fraktionen (Öl und Speisereste) werden in getrennten Gebinden gelagert.

Von den restlichen zehn Fettabscheidern waren zwei mit geringem Störstoffgehalt, vier mit mittlerem Störstoffgehalt und vier mit hohem Störstoffgehalt. In den folgenden Abbildungen (Abbildung 12, Abbildung 13) sind die Ergebnisse von Proben mit geringem, mittlerem und hohem Störstoffgehalt dargestellt. Alle Proben wurden über Nacht bei 60°C gravimetrisch in die Fraktionen aufgetrennt.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

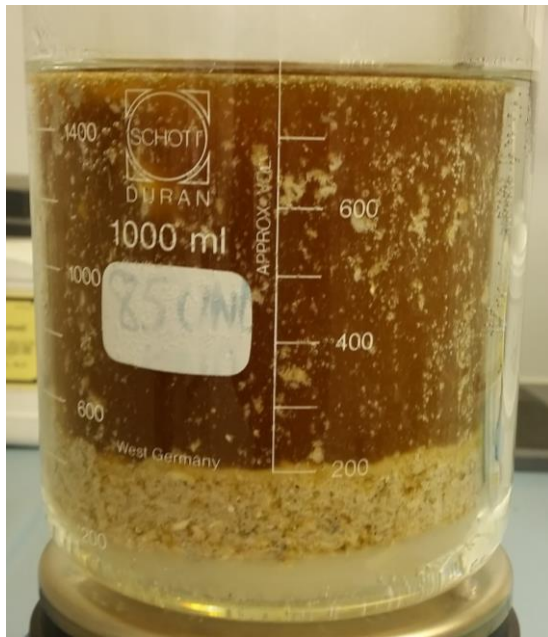


Abbildung 12: links: Fettabscheiderinhalt nach der Trennung über mit leichten Verunreinigungen; rechts: Probe mit mittleren Verunreinigungen;



Abbildung 13: Fettabscheiderinhalte mit hohem Anteil an Störstoffen (Speiseresten). Eine klare Phasentrennung ist nicht mehr möglich.

Die getesteten Aufbereitungsmethoden sind für verschiedene Fettabscheiderqualitäten nachfolgend beschrieben.

3.3.2 Aufbereitung eines Fettabscheiders mit wenig Störstoffen

Hierbei wurde eine Fettprobe aus dem Überstand des Zulaufrohrs entnommen (Abbildung 14). Man kann Zulauf (rechtes Rohr), Ablauf (linkes Rohr) und die Hauptabscheidekammer klar erkennen.



Abbildung 14: Rechtes Rohr: Zulauf mit dem frischen Fett, Linkes Rohr: Ablauf mit dem vom Fett gereinigten Abwasser; Hauptkammer des Fettabscheiders mit bräunlich, rötlich gefärbtem Fett.

Das Zulaufrohr ist mit frischem Fett gefüllt, erkennbar an der noch gelben Farbe. Die Hauptkammer ist mit einer dicken, stichfesten Schicht aus bräunlich-rötlichem Fett gefüllt. Ein Teil der Probe aus der Hauptkammer wurde in einem Wasserbad bei 60°C erhitzt. Abbildung 15 zeigt die Fettprobe nach 10 min und nach 80 min im Wasserbad bei 60°C.

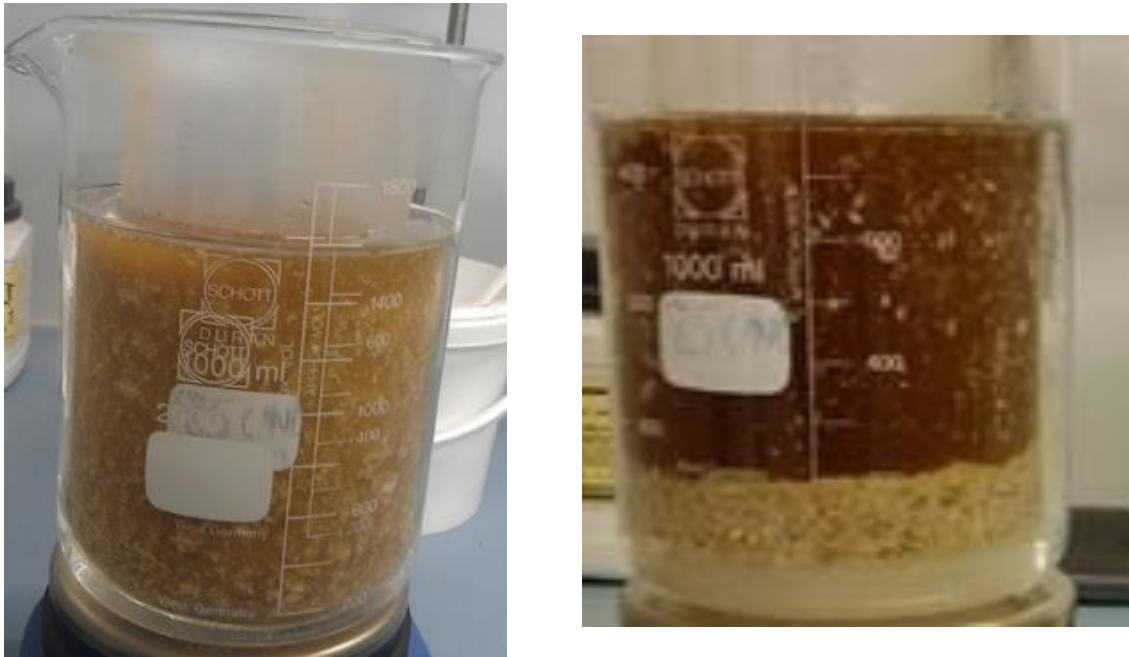


Abbildung 15: Fettprobe links: 10 min bei 60°C; rechts: Probe nach 80 min, 60°C;

Nach 80 min war eine klare Trennung der Phasen eingetreten. Die obere braune Phase bestehend aus dem Öl, die mittlere gelbe Phase bestehend aus Feststoffen und die untere milchig, wässrige Phase. Die ölreiche Phase wurde abgehoben und der Rest in einem Scheidetrichter erneut aufgetrennt, um eine bessere Ausbeute an Öl zu erhalten. Das abgetrennte Öl wurde im Anschluss filtriert, um feine Partikel abzutrennen. Das so fertige Öl-Extrakt wurde im Anschluss gemessen und eine Ausbeute an hochwertiger Ölfraction von 71% berechnet.

3.3.3 Aufbereitung eines Fettabscheiders mit mittlerem Störstoffanteil

Die Aufbereitung der Fettabscheider-Proben wurde ebenfalls bei 60°C mittels gravimetrischer Trennung gemacht. Die Effizienz dieser Trennmethode für Proben mit mittleren Verunreinigungen reichte von sehr gut bis nicht zufriedenstellend. Abbildung 16 zeigt die Auftrennung einer solchen Fettabscheider-Probe über die Zeit.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

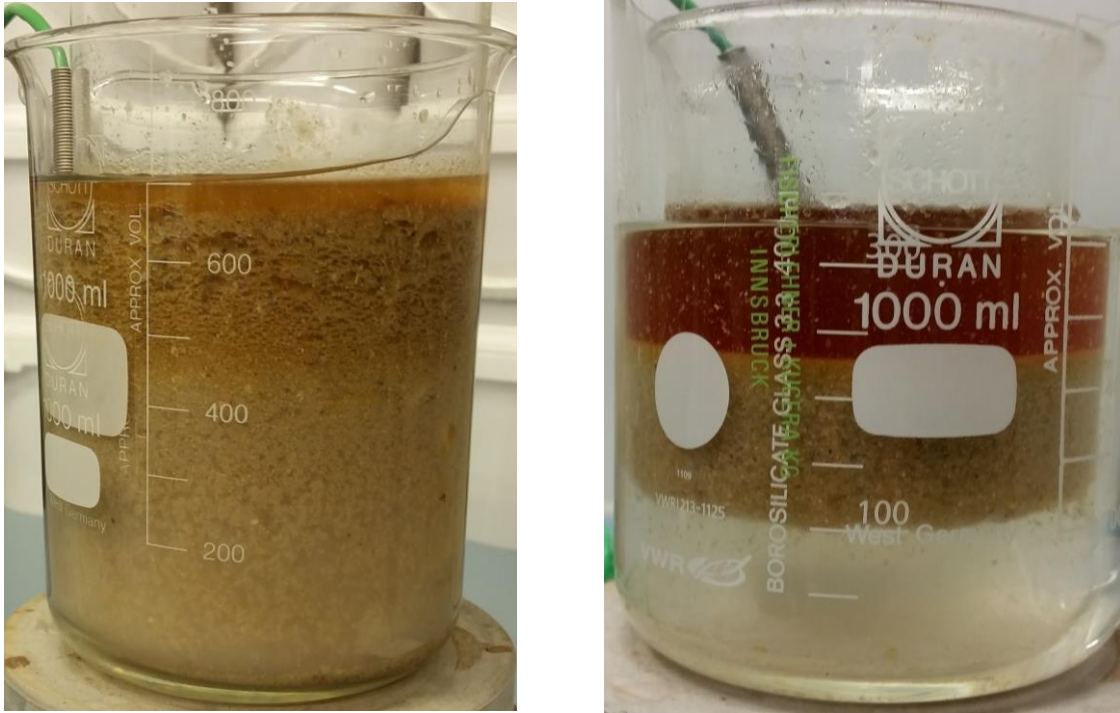


Abbildung 16: Aufbereitung einer Fettabscheider-Probe; links: Auftrennung nach 1h; rechts: Auftrennung über Nacht.

In dieser Probe kam es zu einer sehr guten Drei-Phasen-Trennung. Die Speisereste sind durch eine sehr scharfe Phasengrenze von der hochwertigen Öl-Schicht getrennt. Eine saubere Abtrennung ist hier sehr einfach möglich, ähnlich den Proben mit geringem Störstoffanteil.

Abbildung 17 zeigt eine Fettabscheider-Probe bei der die Phasentrennung nicht sauber ausgeprägt ist. In der Speisereste-Phase sind größere Mengen an Wasser- und Öl-Einschlüssen erkennbar. Die Ölphase wäre hier auch relativ einfach abzutrennen, indem man den Überstand abhebt, durch die unsaubere Phasengrenze und die Einschlüsse an hochwertigem Öl ist die Ausbeute aber deutlich erniedrigt.



Abbildung 17: Fettabscheider-Probe nach gravimetrischer Trennung bei 60°C über Nacht.

3.3.4 Aufbereitung von Fettabscheiderinhalten mit hohem Störstoffanteil

- Gravimetrische Trennung bei 60°C

Aus dem kombinierten Sand- und Fettfang einer Kläranlage wurde die Schwimmschicht entnommen. In dieser Fraktion sollte die hochwertige Fraktion (Öl Phase) vorhanden sein. Das Substrat bestand zu einem großen Teil aus Feststoffen (Plastik, Hygieneartikel, Samen, Hülsen) und hatte eine pastös, körnige Konsistenz (Abbildung 18).



Abbildung 18: Substrat aus dem Fett-, Sandfang

Eine gravimetrische Extraktion über Nacht bei 60°C führte zu keiner Phasentrennung der Ölschicht. Um eine bessere Trennung zu ermöglichen, wurde der Probe Wasser zugesetzt. So wurden zu 700 g Substrat 500 mL deionisiertes Wasser hinzugegeben. Die Probe wurde im Anschluss auf einer Heizplatte gerührt und auf 60°C erhitzt, um das Fett zu extrahieren.

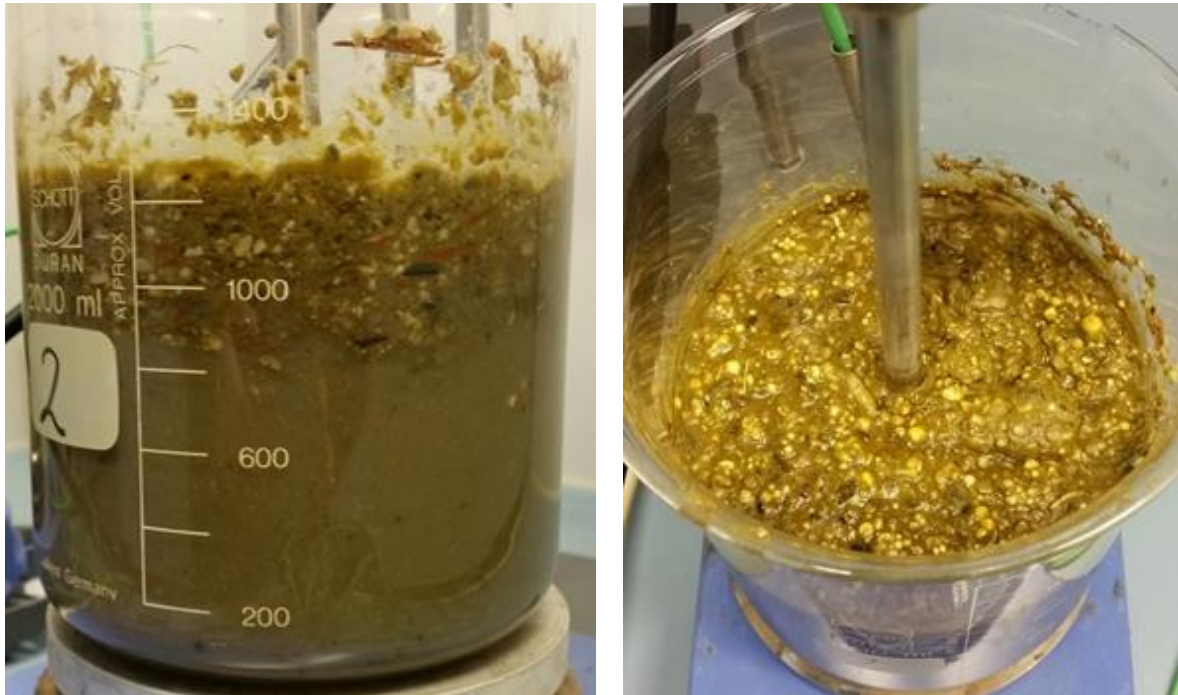


Abbildung 19: Fettabscheider-Wasser Gemisch mit fetthaltigem Überstand.

Abbildung 19 zeigt die Probe nach Wasserzugabe. Es ist deutlich eine wässrige und eine feste Phase zu erkennen, eine klare Ölschicht fehlt. Der fetthaltige Überstand (rechtes Bild), ist nicht klar von den Feststoffen zu unterscheiden. Insgesamt ist das Substrat aus dem Fettfang sehr stark mit Störstoffen verunreinigt, wie die wässrige Phase im linken Bild sehr gut zeigt. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine saubere Extraktion des Fetts/Öls aus dem Fettfang mittels Erhitzen nicht möglich ist. Dies ist bedingt durch die zahlreichen Feststoff-Verunreinigungen. Eine Verdünnung mit Wasser, die die Trennung der Phasen unterstützen sollte, brachte auch keinerlei Verbesserung. Die gravimetrische Trennung von stark verunreinigten Fettabscheiderinhalten liefert keine zufriedenstellenden Ergebnisse bei der Gewinnung einer hochwertigen Ölfraction.

- **Trennung der hochwertigen Fraktion mittels Lösemittel**

Zu einer Fettabscheider-Probe mit einem sehr hohen Anteil an Speiseresten wurde 100 mL Hexan zugegeben, um das darin enthaltene Fett zu extrahieren. Die Probe wurde für 15 min auf einem Überkopfschüttler geschüttelt, um das Fett mit dem Hexan in Kontakt zu bringen.

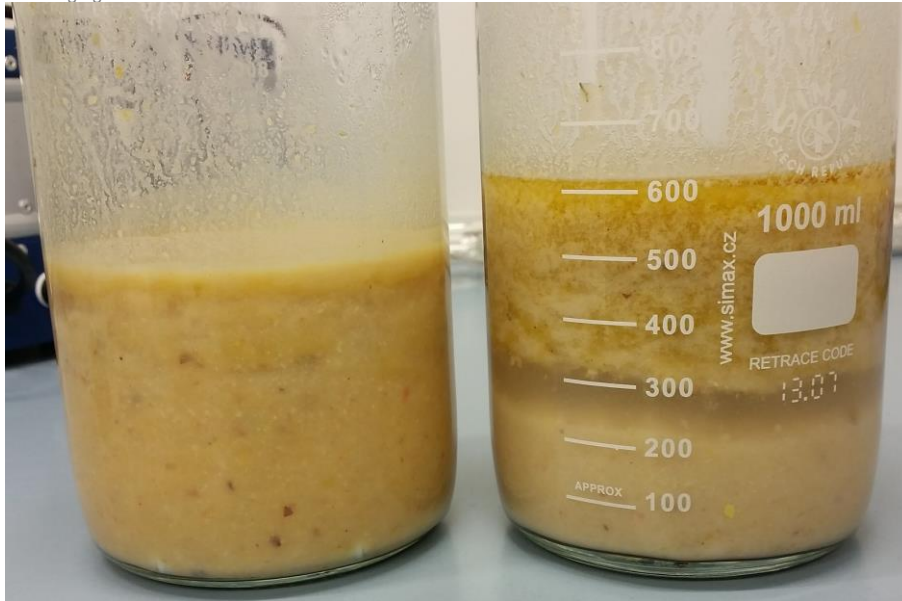


Abbildung 20 : Fettabscheiderinhalt versetzt mit Hexan für die Extraktion der hochwertigen Öl Phase.

Während des Schüttelns kam es zu einer starken Emulsionsbildung zwischen dem Lösemittel und den Speiseresten (Abbildung 20). Wie auf der vorigen Abbildung ersichtlich ist, setzten sich die einzelnen Phasen nach einer zehninütigen Absetzzeit sehr gut ab. Jedoch war die ölhaltige Hexan Phase weiterhin sehr stark mit Speiseresten versetzt, was eine weitere direkte Verarbeitung verhinderte. Die Probe wurde in einen Scheidetrichter überführt, um sie dort weiter aufzutrennen. Die Emulsion trennte sich jedoch auch nach längerer Absetzzeit (2h) nicht. Erst mittels eines Zentrifugationsschritts konnte die Emulsion gebrochen werden (5 min, 12000 rcf) und das Hexan war klar von den Störstoffen abzutrennen.

Zusammenfassend kann man anmerken, dass eine Extraktion mit Lösemittel sehr aufwändig ist, da das Hexan/Öl - Gemisch anschließend wieder abgetrennt werden muss (Destillation). Es sind insgesamt viele Verfahrensschritte nötig, bis man die hochwertige Fraktion aufgetrennt hat, jedoch ist die Öl Phase nach Hexan Extraktion wasser- und partikelfrei.

- Trennung der hochwertigen Fraktion mittels Zentrifugation

Die Trennung von Fettabscheiderinhalten mit einem hohen Anteil an Speiseresten ist mittels gravimetrischer Trennung bei 60°C nicht mehr effizient zu bewerkstelligen (Abbildung 21).

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Abbildung 21: Fettabscheiderinhalt mit sehr hohem Anteil an Speiseresten. Absetzversuch bei 60°C über Nacht.

Es wurden 406 g der Probe zentrifugiert (ca. 7500 rcf für 5 min). Für die Einwaage der Fettprobe in die Zentrifugengefäße wurde die Probe stark gerührt. Das Zentrifugieren führte zu einer sehr guten Separation von Fett, Speiseresten und dem Wasser (Abbildung 22).



Abbildung 22: links: Zentrifugengefäß mit getrennter Fettabscheiderprobe, die Öl Phase ist deutlich zu erkennen; rechts: separierte Fraktionen nach der Zentrifugation.

Die Ausbeute der hochwertigen Fraktion lag bei 53,6% (Öl), der Anteil an Speiseresten betrug 10,3% und der Speiseresteanteil 36,1% (w/w). Insgesamt war in der behandelten Probe ein sehr hoher Anteil der hochwertigen Fraktion enthalten. Durch die starke Emulsionsbildung war diese jedoch gravimetrisch nicht zu trennen. Im großtechnischen Maßstab werden bereits Zentrifugen zur Auftrennung von Fettabscheiderinhalten eingesetzt

und die Ausbeute durch Zugabe von Säure (pH-Erniedrigung auf pH 2) noch weiter erhöht werden kann (BDI – BioEnergy International GmbH, Graz).

Weitere Behandlung der hochwertigen Fraktion

Nachdem die Ölfraction von den Störstoffen getrennt werden konnte, wurden die Proben durch einen Faltenfilter filtriert (Macherey Nagel, MN 615), um noch vorhandene Schwebstoffe zu entfernen. Bei allen angewendeten Methoden konnte vorhandenes Restwasser sehr gut abgetrennt werden, indem man den Öl-Überstand gesondert abhob. Das Ergebnis war eine Ölfraction frei von sichtbarem Wasser und Schwebstoffen.

3.3.5 Zusammenfassung

Es wurden verschiedene Methoden für die Extraktion der hochwertigen Ölfraction aus Fettabscheidern getestet. Hierbei ist die einfachste und kostengünstigste Trennmethode das Aufheizen auf 60-80°C und die gravimetrische Trennung des Öls und der Störstoffe in einem Absetztank. Diese Methode stößt aber ab einem gewissen Verunreinigungsgrad der Substrate an ihre Grenzen. Hierbei wird bereits bei einem mittleren Verunreinigungsgrad (20-70%) die Ausbeute so weit verschlechtert, dass alternative Trennmethoden bessere Ergebnisse liefern. Vor allem Speisereste in Fettabscheidern führen zu Emulsionsbildung und führen zu einem Drei-Phasen Gemisch bestehend aus Wasser-Speiseresten-Öl.

Auch bei einer Extraktion der hochwertigen Phase mit Lösemitteln ist diese Emulsion sehr problematisch. In den durchgeführten Versuchen konnte das Wasser aus der Emulsion verdrängt werden, die Speisereste verblieben jedoch in der Hexan-Phase. So konnte keine gravimetrische Trennung von Hexan/Öl und den Speiseresten erreicht werden und erst das Zentrifugieren der Probe lieferte eine klare Hexan/Öl Phase getrennt von Speiseresten.

Die besten Ergebnisse konnten erzielt werden, indem die Fettabscheider Proben in einer Zentrifuge getrennt wurden. Innerhalb von 5 min bei einer RCF (Relative Zentrifugalbeschleunigung) von ca. 10000 konnte eine sehr effiziente und saubere Auftrennung der Fettabscheider-Proben beobachtet werden. Großtechnisch wird die Auftrennung der Fettabscheiderinhalte mit einer Drei-Phasen-Zentrifuge realisiert, deren Ausbeute noch durch das Ansäuern der Probe erhöht werden kann.

3.4 Abfallverwertung – Erzeugung erneuerbarer Energie durch Biodiesel und Biogas

3.4.1 Biodiesel-Herstellung

Es existieren verschieden Arten von Verfahren, um aus Pflanzenölen oder Altspeiseölen Biodiesel herzustellen: Base-katalysierte Umesterung, Säure-katalysierte Umesterung, zweistufige Verfahren, Enzym-katalysierte Umesterung und auch katalysatorfreie Prozesse (Kulkarni und Dalai 2006). Viele Studien haben gezeigt, dass die Eigenschaften von Biodiesel denen von Diesel ähnlich sind (Canakci 2007). Biodiesel aus Pflanzenölen mit Lebensmittelqualität ist unter anderem wegen der hohen Rohstoffpreise nicht ökonomisch praktikabel (Canakci 2007; Ngo et al. 2011).

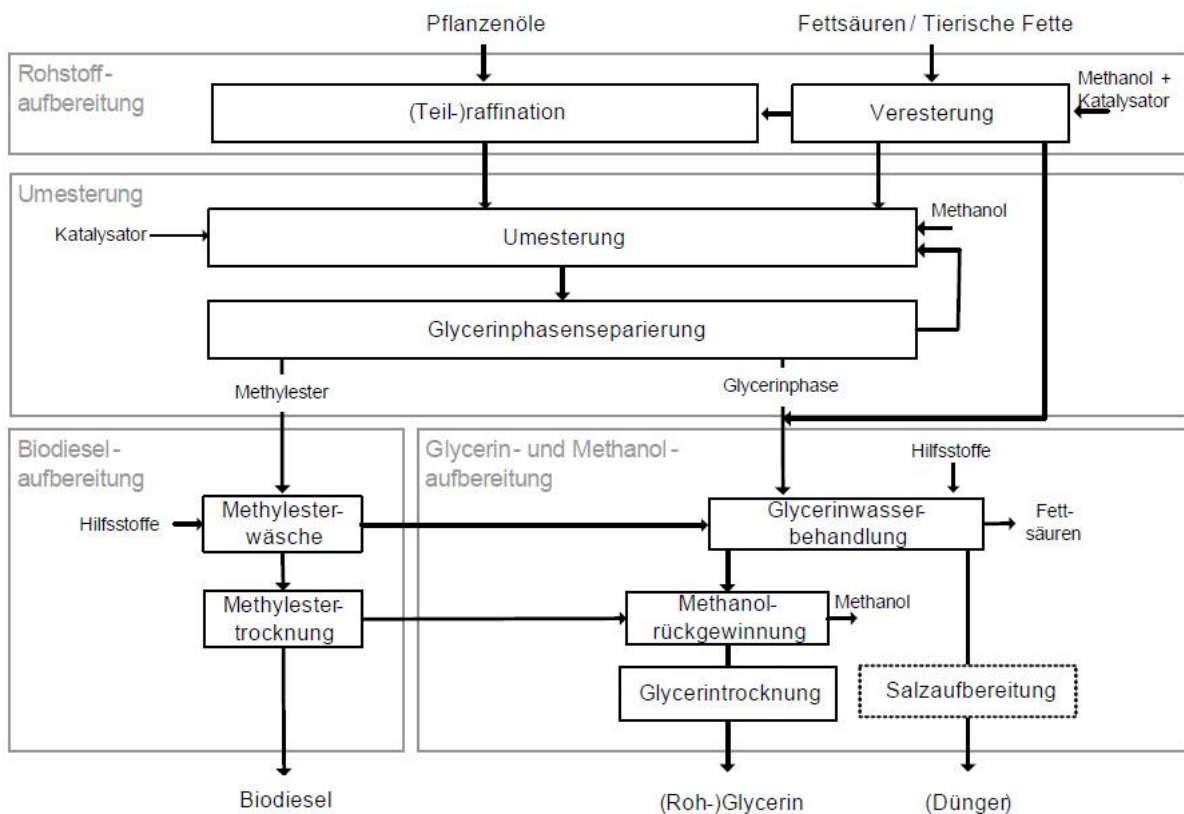


Abbildung 23: Verfahrensablauf bei der Biodieselherstellung durch Umesterung (Kaltschmitt et al. 2009)

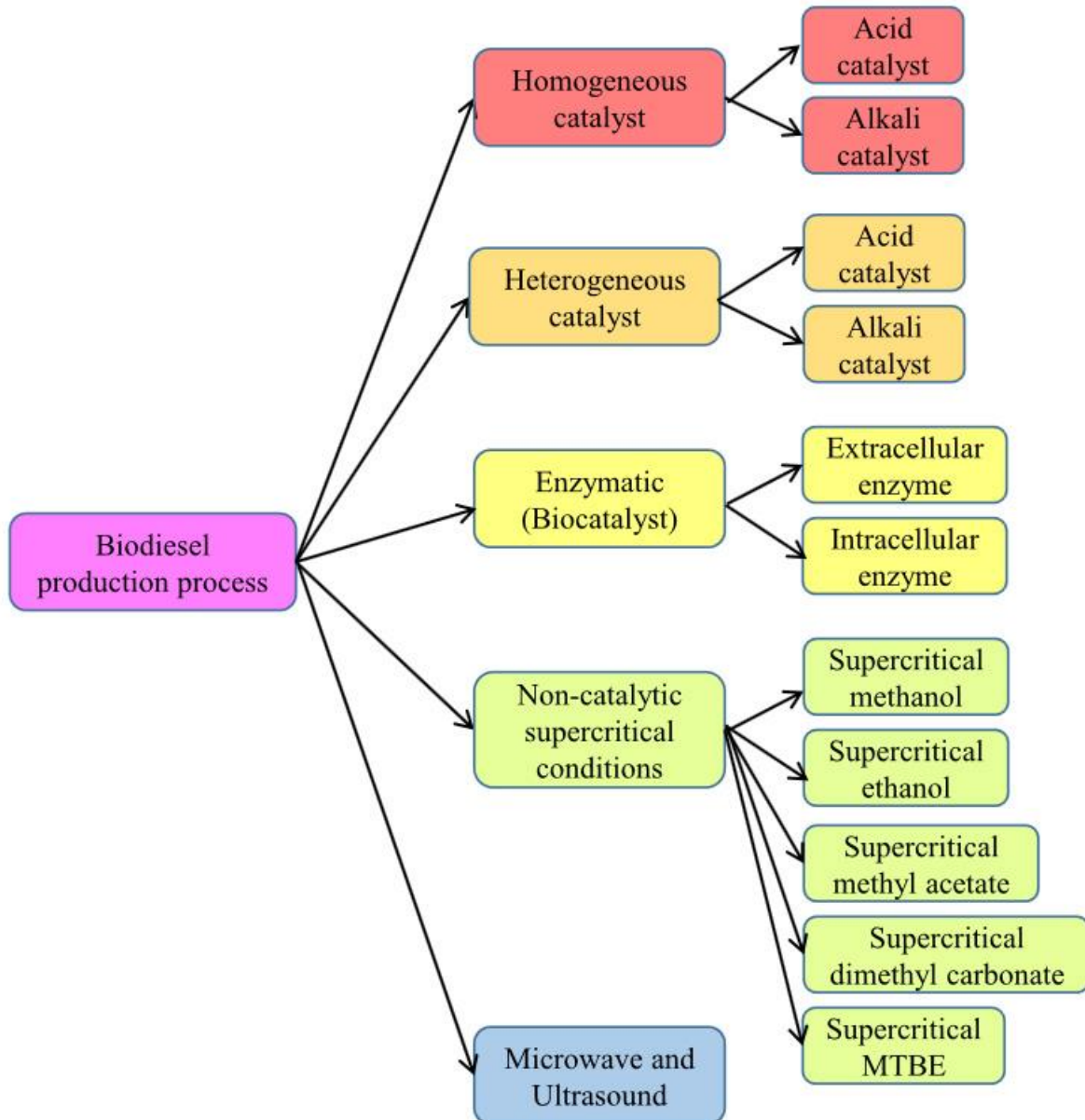


Abbildung 24: Verschiedene Methoden der Biodieselproduktion (Farobie und Matsumura 2017)

Base-katalysierte Umesterung

Base-katalysierte Umesterungen (z.B. Natronlauge (NaOH), Kalilauge (KOH), und Natriummethanolat (NaOCH₃)) sind weit verbreitet, da sie relativ kostengünstig sind und schnell ablaufen. Effektive Base-katalysierte Umesterung setzt allerdings Gehalte der freien Fettsäuren unter 1% und geringen Wassergehalt voraus, da sonst Seifen gebildet werden (s. Abbildung 25). Seifenbildung durch Verseifung freier Fettsäuren reduziert nicht nur die Ausbeute, sondern führt auch noch zu Problemen bei der weiteren Verarbeitung durch die Bildung von Emulsionen (Guldhe et al. 2015). Die Aufbereitung von Ölen schlechter Qualität (d.h. hoher Anteil an FFS, Wasser oder Polymeren) vor einer Base-katalysierte Umesterung kann die Ausbeute und Qualität der Ester erhöhen (Kulkarni und Dalai 2006).

Base-katalysierte Umesterungen können auch mit flüssigen Aminen (Diethylamin (DEA), Dimethylaminoethanol (DMAE), Tetramethylethyldiamin (TEMED) oder

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

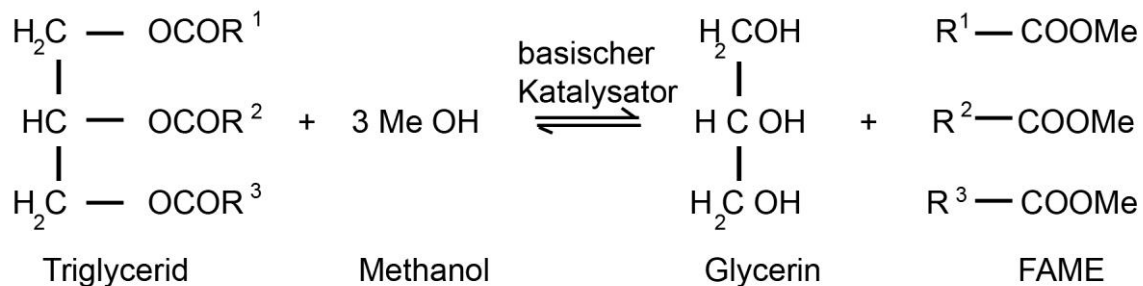
Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Tetramethylammoniumhydroxid (TMAH)) durchgeführt werden. Die Amine dienen dabei nicht nur als Lösungsmittel für die Edukte sondern auch für die Produkte, was das chemische Gleichgewicht auf die rechte Seite verschiebt und zu mehr Produkt führt. Allerdings brauchen diese Umesterungen eine große Menge Katalysator und die Abtrennung des Katalysators aus der Esterphase ist teuer (Kulkarni und Dalai 2006).

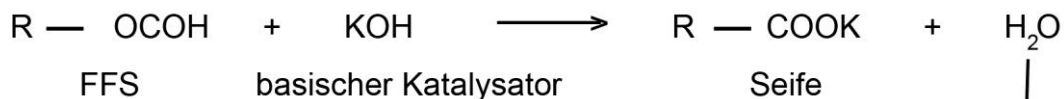
Verschiedene homogene Basekatalysatoren werden (NaOH, KOH oder CH₃ONa) mit Methanol verwendet (Vyas et al. 2010). Neben den homogenen Katalysatoren werden auch heterogene Katalysatoren eingesetzt (homogene Katalysatoren liegen in derselben Phase vor (hier flüssig und flüssig), heterogene in unterschiedlichen Phasen (hier flüssig und fest)). Heterogene Basekatalysatoren sind z.B. Zeolithe wie KOH/NaX Zeolith, Erdalkalimetalloxide (CaO, MgO) oder Hydrotalkit (Guldhe et al. 2015; Vyas et al. 2010). Diese haben den Vorteil, dass sie wiederverwendet werden können und Waschschriffe vermieden, was die Kosten reduziert (Guldhe et al. 2015). Kosten verursacht die Regenerierung der Katalysatoren, um ihre Aktivität wieder herzustellen (Huynh et al. 2011). Ein Problem heterogener Katalysatoren ist das Auslaugen des Katalysators, was zu Verunreinigungen des Produkts führt (Guldhe et al. 2015).

Im industriellen Bereich ist die alkalisch-katalysierte Biodieselherstellung mit Methanol als Acyl-Akzeptor aufgrund seiner hohen Ausbeute und ökonomischen Realisierbarkeit weit verbreitet (Guldhe et al. 2015).

Reaktion 1:



Reaktion 2:



Reaktion 3:

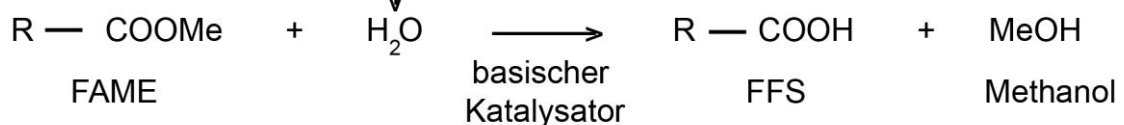


Abbildung 25: Base-katalysierte Umesterung (nach Montefrio et al. (2010))

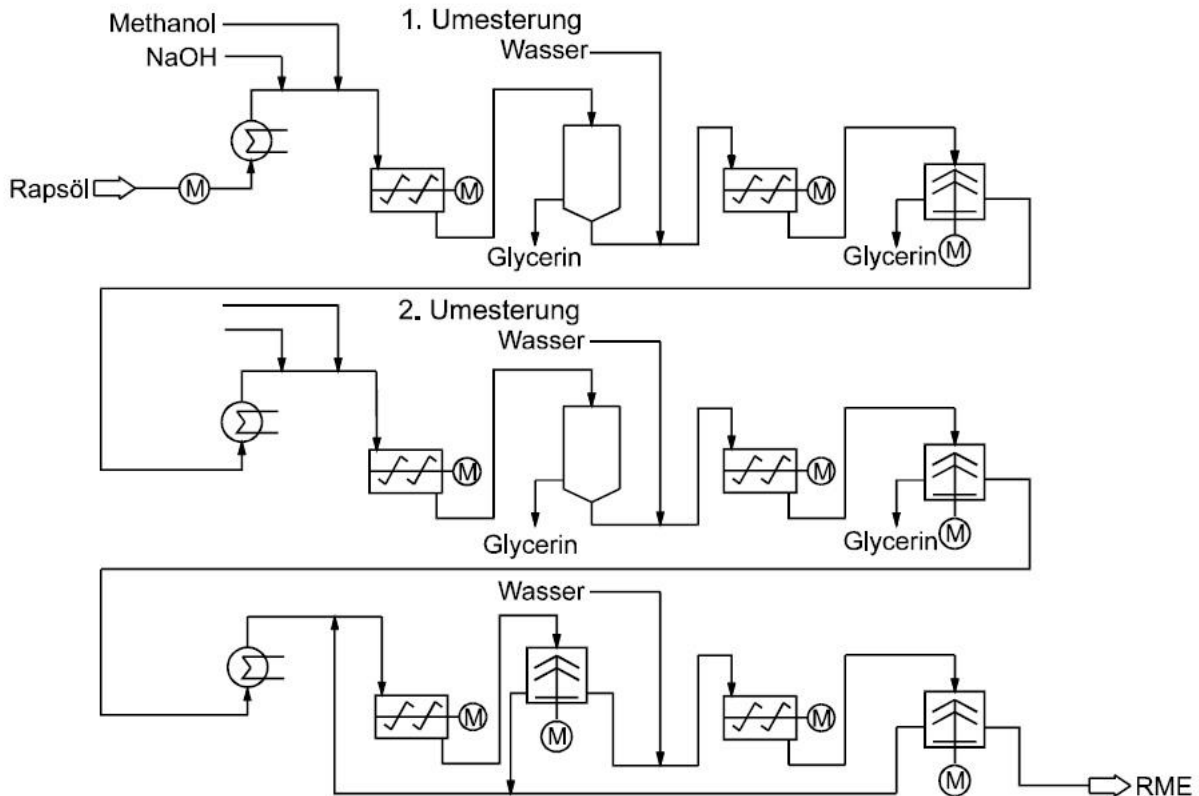


Abbildung 26: Beispiel für ein kontinuierliches basisch-katalysiertes Umesterungsverfahren für Rapsöl, RME: Rapsölmethylester (Kaltschmitt et al. 2009)

Säure-katalysierte Umesterungen

Säure-katalysierte Umesterungen (Salzsäure, Schwefelsäure, aber auch Lewis-Säure basierend auf Carbonsäuresalzen der Metalle Cd, Mn, Pb, Zn) laufen wesentlich langsamer ab, sind aber weniger störungsanfällig und somit auch für Öle mit schlechter Qualität geeignet. Die Umesterung mit starken Säuren (Salzsäure, Schwefelsäure) ist Stand der Technik (Kulkarni und Dalai 2006). Die Veresterung ist eine Gleichgewichtsreaktion, bei der die Bildung von Wasser die Umwandlung zu Fettsäuremethylester (FAME) hemmt. Eine kontinuierliche Entfernung des Wassers kann die Ausbeute an FAME deutlich steigern. Neben der Entfernung des Wassers kann die Reaktionsrate auch durch Erhöhung der Temperatur oder Erhöhung der Katalysatorkonzentration erhöht werden (Stacy et al. 2014). Um gute Reaktionsraten zu erhalten, kann man die Reaktoren mit Temperaturen über dem Siedepunkt von Methanol betreiben, was aber einen erhöhten Druck notwendig macht, um das Methanol in der flüssigen Phase zu halten. Stacy et al. (2014) entwickelten einen Reaktor, der bei atmosphärischem Druck betrieben wird und das Methanol gasförmig eingebracht wird und erreichten so für Ausgangsprodukte mit hohem Anteil freier Fettsäuren (u.a. Fettabscheiderfett) schnelle und effektive Umesterung.

Um die Probleme mit der Abtrennung des Katalysators zu reduzieren, wird nach festen (heterogenen) Säurekatalysatoren gesucht (Kulkarni und Dalai 2006).

Säure-katalysierte Biodieselherstellung aus Fetten geringer Qualität könnte eine wirtschaftliche Option sein. Mondala et al. (2009) entwickelten eine Methode zur

Biodieselherstellung aus Primär- und Belebtschlamm einer Kläranlage, bei der die Biodieselherstellung weniger als 1€/Liter kostet.

Verschiedene homogene Säurekatalysatoren werden verwendet (Schwefelsäure, Salzsäure, BF_3 , Phosphorsäure oder organische Sulfonsäuren), neben Methanol werden auch Ethanol oder Butanol eingesetzt (Vyas et al. 2010). Miao et al. (2009) verwendeten Trifluoressigsäure. Neben den homogenen Katalysatoren werden auch heterogene Katalysatoren eingesetzt. Heterogene Säurekatalysatoren sind z.B. S-ZrO_2 (sulfatisiertes Zirkonoxid) oder sulfatisiertes Zinnoxid (Guldhe et al. 2015; Vyas et al. 2010).

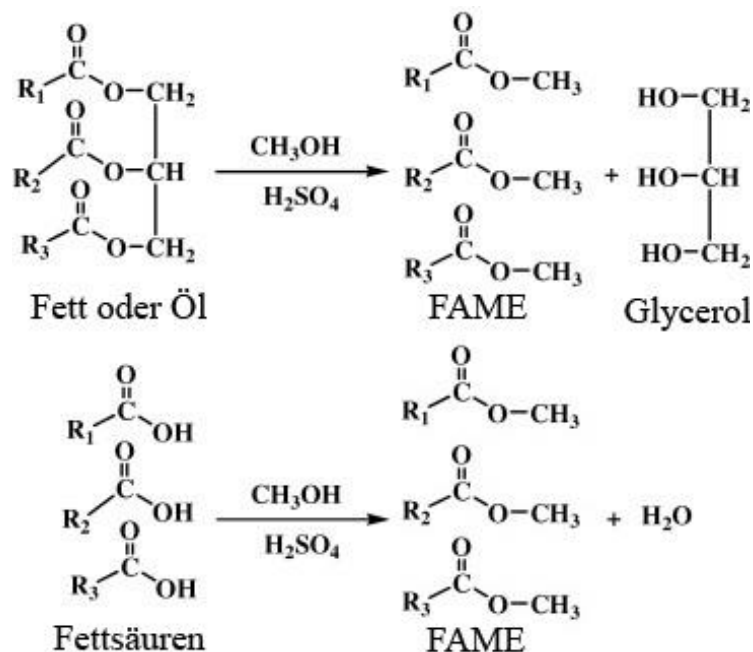


Abbildung 27: Säure-katalysierte Umesterung von Triglyceriden und freien Fettsäuren (nach Mondala et al. (2009))

Zweistufige Umesterungsverfahren

Um Öle schlechter Qualität mit hohen Reaktionsraten umzuestern, wurden 2-stufige Verfahren entwickelt. Es gibt verschiedene zweistufige Biodieselherstellungsverfahren wie z.B. zweistufige Base-katalysierte Verseifungs-Umesterung, zweistufige Säure-katalysierte Veresterung-Umesterung und zweistufige Säure-katalysierte Veresterung mit anschließender Base-katalysierter Umesterung (Huynh et al. 2011).

Bei der zweistufigen Base-katalysierten Verseifungs-Umesterung wird zuerst die Lauge zur Entfernung der freien Fettsäuren eingeleitet. Dabei werden die freien Fettsäuren durch Verseifung entfernt (Huynh et al. 2011). Das Verfahren bietet sich nicht für Altöle mit sehr hohen Gehalten freier Fettsäuren an, da die Ausbeute entsprechend reduziert wird.

Bei der zweistufigen Säure-katalysierten Veresterung mit anschließender Base-katalysierter Umesterung werden zuerst mit einem Säure-Katalysator die freien Fettsäuren in Ester umgewandelt und die Konzentration an freien Fettsäuren auf für die basische Umesterung geeignete Level von kleiner 1% gesenkt. Im zweiten Schritt wird das Öl mittels eines

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

basischen Katalysators umgeestert (Kulkarni und Dalai 2006). Dieser Prozess ist eine der besten Alternativen zur Biodieselherstellung (Huynh et al. 2011). Verschiedene Autoren haben mit unterschiedlichen Katalysatoren (Methanol, Ethanol) und deren Verhältnis experimentiert, um die Ausbeute zu verbessern (z.B. Canakci und Van Gerpen (2001), Issariyakul et al. (2007)). Bei der zweistufigen Umesterung muß bei beiden Stufen der Katalysator entfernt werden oder die Säure der ersten Stufe mit der Base der zweiten Stufe neutralisiert werden, dieses bedeutet erhöhte Kosten (Kulkarni und Dalai 2006). Chai et al. (2014) haben verschiedene Studien zur Vorbehandlung bei Ölen mit hohem Gehalt freier Fettsäuren (FFS) zusammengetragen, die Öle hatten zwischen 1%-93% freier Fettsäuren, die verwendeten Verhältnisse Methanol zu FFS und Säure zu FFS variierten stark. Um eine wirtschaftliche erste Stufe zu betreiben, müssen diese Verhältnisse optimiert werden. Bei Chai et al. (2014) lagen die optimalen Verhältnisse bei 19.8:1 Methanol zu freien Fettsäuren (molares Verhältnis) im Bereich 15-25% FFS und 5% Schwefelsäure im Bereich 15-35% FFS.

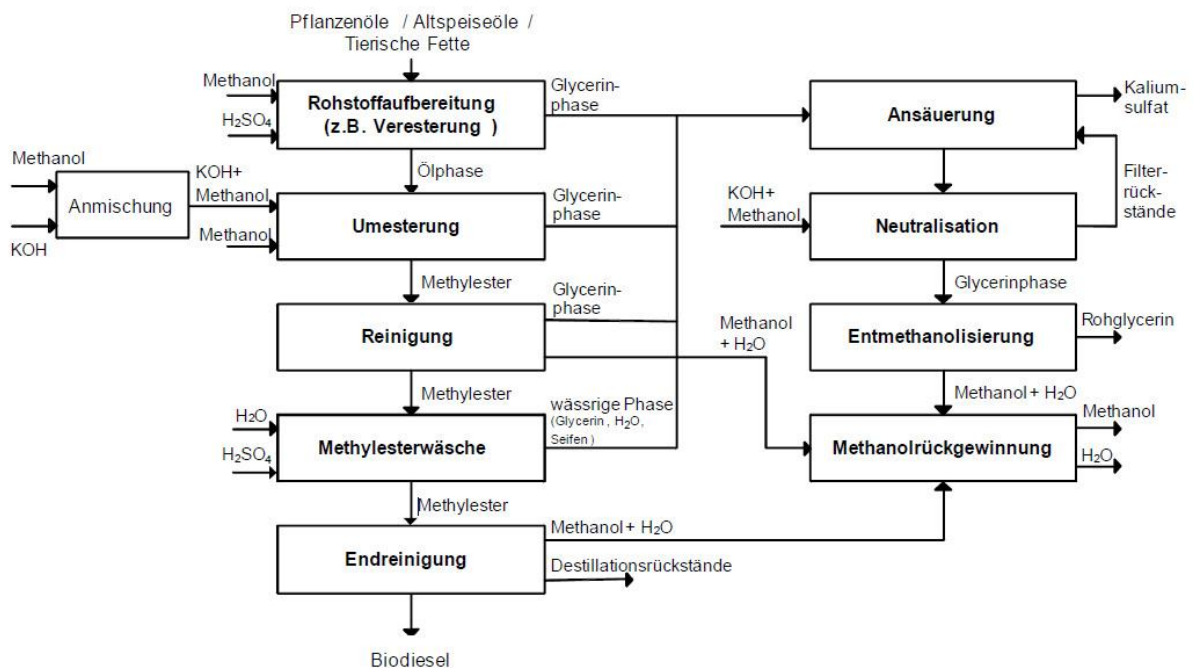


Abbildung 28: Diskontinuierliches Verfahren zur Biodieselherstellung (zweistufige Säurekatalysierte Veresterung mit anschließender Base-katalysierter Umesterung) (Kaltschmitt et al. 2009)

Enzym-katalysierte Umesterung

Enzym-katalysierte Umesterungen gibt es in der wissenschaftlichen Literatur verschiedene, sie basieren zumeist auf Lipasen, also Enzymen, die von Lipiden die freien Fettsäuren abspalten. Diese Umesterungsverfahren sind für Rohstoffe mit hohem Gehalt an freien Fettsäuren und Wasser geeignet. Es werden keine Nebenprodukte gebildet, das Produkt kann leicht abgetrennt werden, es braucht nur milde Reaktionsbedingungen und der Katalysator kann recycelt werden (Kulkarni und Dalai 2006). Biodiesel und Glycerin aus enzymatisch-katalysierter Herstellung weisen eine hohe Qualität auf. Lipasen weisen eine

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

hohe katalytische Effizienz und spezifische Wirksamkeit auf und sind von daher sehr gut für die Biodieselherstellung geeignet. Jedoch sind Enzyme sehr teuer und werden durch Alkohol und Glycerin gehemmt. Lipasen können von Pilzen und Bakterien relativ einfach gewonnen werden, da sie extrazelluläre Enzyme sind (Guldhe et al. 2015).

Superkritische Biodieselproduktion

Katalysatorfreie Prozesse haben die Nachteile der Katalysatorabtrennung nicht. Eine solche Technologie ist die Nutzung von superkritischem Methanol. Die Vorteile von Biodieselproduktion unter superkritischen Bedingungen sind kein Bedarf eines Katalysators, kurze Aufenthaltszeit, hohe Reaktionsrate, keine Vorbehandlung erforderlich und Anwendbarkeit für eine Reihe verschiedener Ausgangsmaterialien. Neben der Biodieselproduktion mit Methanol und Ethanol wurden in den letzten Jahren auch Verfahren entwickelt, bei denen kein Glycerin als Nebenprodukt entsteht, wie die Biodieselproduktion mit superkritischem Essigsäuremethylester, Dimethylkarbonat (DMC) oder Methyl-tert-butylether (MTBE). Trotz der Vorteile bestehen jedoch noch technologische und ökonomische Hürden (Farobie und Matsumura 2017).

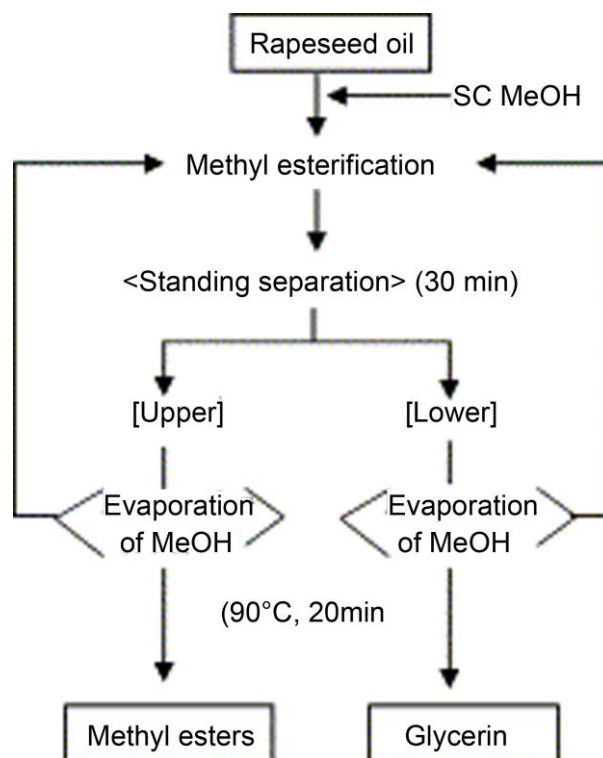


Abbildung 29: Schema eines Herstellungsprozesses von Biodiesel mit superkritischem Methanol (Saka und Kusdiana 2001)

Qualitätsparameter für Biodiesel und -ausgangssubstrate

Da man annehmen kann, dass während der Umesterung sich die Zusammensetzung der Fettsäuren nicht ändert (Sajjadi et al. 2016), kann man aus der Zusammensetzung der Ausgangssubstrate bereits Rückschlüsse auf die Zusammensetzung des daraus entstehenden Biodiesels ziehen. Beispiele dafür sind die Cetanzahl und der Filterverstopfungspunkt.

Cetanzahl

Die Cetanzahl beschreibt die Zündwilligkeit von Kraftstoffen. Dabei wirken sich hohe Cetanzahlen positiv auf das Kaltstartverhalten aus (Kaltschmitt et al. 2009). Anhand der Fettsäuremuster kann man die zu erwartende Cetanzahl mit nachfolgender Formel (Gl.1) berechnen (Bamgboye und Hansen 2008):

$$CN = 61.1 + 0.088x_2 + 0.133x_3 + 0.152x_4 - 0.101x_5 - 0.039x_6 - 0.243x_7 - 0.395x_8 \quad (\text{Gl.1})$$

x_2 bis x_8 sind die prozentuale Zusammensetzung der gemessenen Fettsäuren (x_2 Myristinsäure (C14:0); x_3 Palminsäure (C16:0); x_4 Stearinsäure (C18:0); x_5 Palmitoleinsäure (C16:1); x_6 Ölsäure (C18:1); x_7 Linolsäure (C18:2); x_8 Linolensäure (C18:3)).

Filterverstopfungspunkt

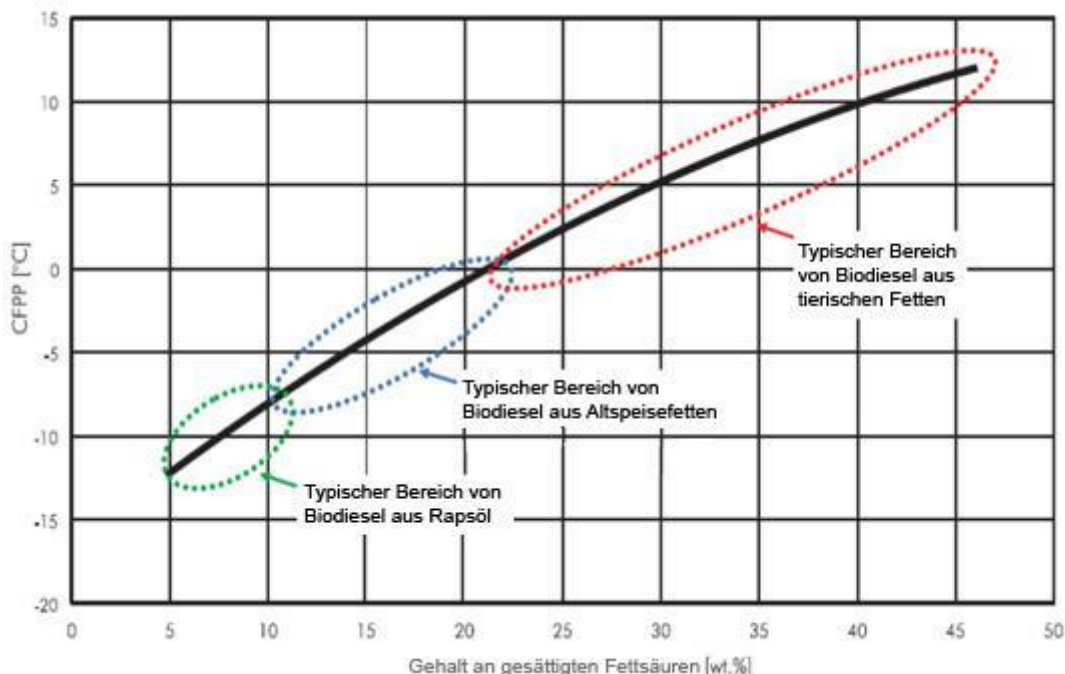


Abbildung 30: Zusammenhang zwischen gesättigten Fettsäurenketten im Biodiesel und seinem CFPP-Wert (cold filter plugging point, Filterverstopfungspunkt), nach Chhetri et al. (2008)

Der CFPP-Wert (Cold Filter Plugging Point) ist ein Maß für die Fließfähigkeit und Filtergängigkeit von Dieselkraftstoff und beschreibt das Kälteverhalten. Er wird als die

Temperatur angegeben, bei der ein Prüffilter unter definierten Bedingungen durch ausgefallene Paraffine verstopft (Kaltschmitt et al. 2009). Fettsäureketten, besonders gesättigte Fettsäureketten, spielen eine wichtige Rolle bei der Bestimmung der Kältefließfähigkeit von Biodiesel. Je höher der Gehalt an gesättigten Fettsäureketten, bei umso höheren Temperaturen tritt bereits der Filterverstopfungspunkt (cold filter plugging point, CFPP) auf (s. Abbildung 30). Aus Sicht des CFPP schneiden Altfette mit weniger gesättigten Fettsäuren besser ab als tierische Fette oder andere Öle mit einem höheren Gehalt an gesättigten Fettsäuren wie Palmöl (Chhetri et al. 2008).

Rapsöl hat nur ca. 4,5% gesättigte Fettsäuren (Sajjadi et al. 2016), daher lässt sich daraus ein Biodiesel mit sehr gutem Filterverstopfungspunkt herstellen (s. Abbildung 30). Auch andere Pflanzenöle haben vergleichsweise geringe Anteile gesättigter Fettsäuren, Sonnenblumenöl hat weniger 10% gesättigte Fettsäuren (Sajjadi et al. 2016).

3.4.2 Qualität der Fettabscheiderfette für die Biodieselherstellung

Freie Fettsäuren in den Fettabscheiderproben

Für die Nutzung der Fettabscheider -Fette für die Biodieselherstellung ist der Parameter freie Fettsäuren (FFS) ausschlaggebend. Der Gehalt an freien Fettsäuren in den beprobten Fettabscheidern war bei allen untersuchten Fettabscheidern hoch, im Median 80% freie Fettsäuren (52%-88%). Die Verteilung ist in Abbildung 31 dargestellt (s. auch Lichtmanegger et al. (2018)).

Der Gehalt an freien Fettsäuren unabhängig von der Art des Fettabscheiders hoch, auch in der Probe aus dem Direkt-Fettabscheider (FA6). Es konnte auch kein direkter Zusammenhang zwischen der Zeit seit der letzten Leerung des Fettabscheiders und dem FFS Gehalt gefunden werden, die Fettabscheider mit den am kürzesten zurückliegenden Wartungen sind FA8, FA5 und FA3. Tendenziell waren in den Fettabscheidern mit den geringeren FFS Konzentration weniger Speisereste in der Schwimmschicht.



Abbildung 31: Gehalt an freien Fettsäuren (FFS) in den beprobten Fettabscheidern (FA).

Schwefelgehalt

Ein weiterer wichtiger Parameter für die Biodieselherstellung ist der Schwefelgehalt aus den Fettabscheider-FOG. In Abbildung 32 sind die Ergebnisse der Schwefelmessungen der Fettabscheiderproben dargestellt (s. auch Lichtmannegger et al. (2018)).

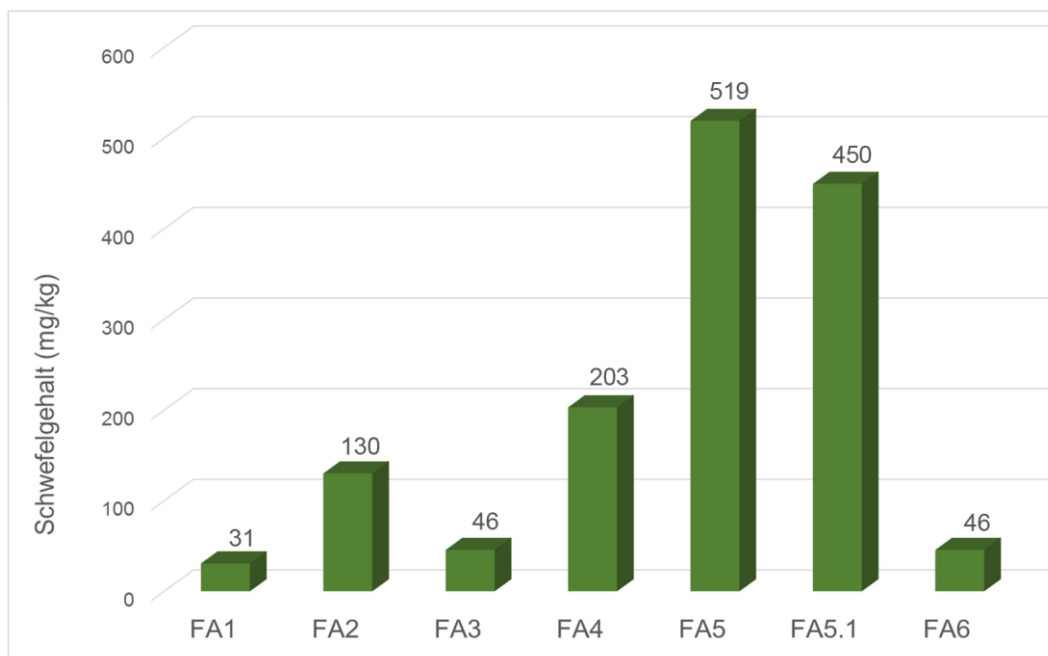


Abbildung 32: Schwefelgehalt in Fetten aus Fettabscheidern (FA).

Bei den untersuchten Fettabscheidern lagen die Werte zwischen 31 und 519 mg/kg. Drei Fettabscheider (FA1, FA3, FA6) zeigten sehr niedrige Schwefelkonzentrationen. Zieht man hierbei die Erkenntnisse der Probenahme in Hinsicht auf den Zustand des Fettabscheiders heran (vgl. Tabelle 7 im Anhang), so zeigt sich, dass alle diese Fettabscheider nur einen

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

geringen Anteil an Speiseresten aufwiesen. Die Fettabscheider FA2, FA4, FA5 und FA7 hingegen hatten einen hohen Anteil an Speiseresten in der Fettschicht (Abbildung 32, s. auch Lichtmanegger et al. (2018)).

Der Schwefelgehalt von Biodiesel aus Fettabscheiderfetten wird daher deutlich höher liegen als bei Biodiesel aus getrennt gesammelten Altspeiseölen. Hier liegen die Werte deutlich niedriger, Chhetri et al. (2008) maßen in ihrem Biodiesel aus Altspeiseölen 2 mg/kg Schwefel. Die Fettabscheiderfette eignen sich von daher vor allem für Biodieselherstellungsverfahren, in welchen ein Destillationsschritt für die Aufreinigung des Produkts eingesetzt wird, bei dem der Schwefel nicht in das Endprodukt übergeht.

Cetanzahl

Die zu erwartende Cetanzahl kann anhand der Fettsäuren im Ausgangssubstrat abgeschätzt werden. Dafür wird von den Fetten das Fettsäureprofil bestimmt. In Abbildung 33 und Tabelle 2 sind die Anteile der enthaltenen Fettsäuren in den beprobten Fettabscheidern dargestellt (s. auch Lichtmanegger et al. (2018)).

Tabelle 2: Fettsäurenverteilung der Fettabscheiderfette und sich daraus ergebende Cetanzahlen

		FA1	FA2	FA3	FA4	FA5	FA6	FA7	FA8	FA9	FA10
Lauric	C12:0	1,1	2,2	0,6	0,7	0,5	0,6	0,4	0,7	0,8	1,9
Mystic	C14:0	3,2	5,9	2,9	1,8	3,6	2,9	1,7	2,2	2,7	7,4
Palmitic	C16:0	19,2	20,8	23,6	12,4	21,2	23,0	19,8	19,1	17,1	31,0
Stearic	C18:0	6,2	7,9	6,5	4,3	5,6	6,4	5,7	4,9	6,1	9,0
Palmitoleic	C16:1	0,8	1,1	1,8	1,0	1,4	1,5	0,7	0,9	0,9	1,2
Oleic	C18:1	41,5	33,7	41,5	37,2	37,0	42,1	47,8	38,1	40,5	33,5
Linoleic	C18:2	23,2	24,3	18,8	39,2	26,4	19,3	19,4	30,0	27,9	9,3
Linolenic	C18:3	2,0	0,6	1,4	0,6	0,9	1,5	1,6	1,8	1,5	0,4
	C20:1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4
	C22:1	0,3	0,4	0,4	0,6	0,8	0,4	0,0	0,5	0,5	0,7
	Rest	2,3	2,9	2,1	2,0	2,1	1,9	2,5	1,5	1,7	5,2
Cetanzahl		57	58	59	52	57	58	57	55	55	63

Die zu erwartenden Cetanzahl des Biodiesels wurde mit Hilfe der von Bamgboye und Hansen (2008) entwickelten Formel (Gleichung 1) berechnet. Die so erhaltenen Cetanzahlen liegen zwischen 52 und 63 in den gemessenen Fettabscheiderproben (Median 57) (Tabelle 2) und erfüllen somit die Anforderungen für Biodiesel. Sie liegen in einem ähnlichen Bereich wie Chhetri *et al.* (2008) für Biodiesel aus Altspeisefetten (61) gemessen haben.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

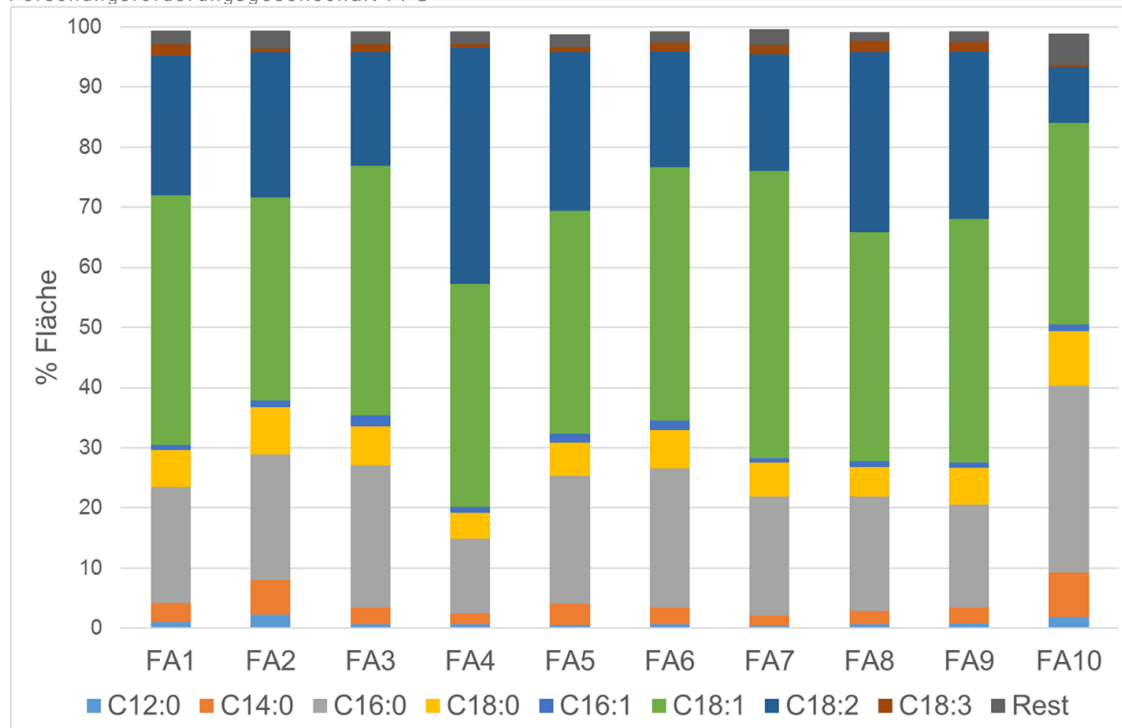


Abbildung 33: Verteilung der Fettsäuren (C12 bis C24) in den Fettabscheider (FA)-Proben.

Die Cetanzahl wurde nach unterschiedlichen Autoren (Bamgboye und Hansen 2008; Gopinath et al. 2009; Piloto-Rodríguez et al. 2013) berechnet. Unabhängig von der verwendeten Formel liegen die Werte relativ nahe beieinander (s. Tabelle 3).

Tabelle 3: Vergleich der berechneten Cetanzahlen nach unterschiedlichen Autoren

	Bamgboye und Hansen (2008)	Gopinath et al. (2009)	Piloto-Rodríguez et al. (2013)
Median	57	54	55
Min	52	49	50
Max	63	61	61

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Filterverstopfungspunkt

Der Filterverstopfungspunkt sagt etwas über das Verhalten des Biodiesels bei niedrigen Temperaturen aus.

Tabelle 4: Filterverstopfungspunkt (CFPP) für Biodiesel aus den Fettabscheiderproben, geschätzt nach Chhetri et al. (2008) Abbildung 30

	Summe gesättigte Fettsäuren (%)	geschätzter Filterverstopfungspunkt (CFPP)
FA1	30	4,8°C
FA2	37	8,3°C
FA3	34	7 °C
FA4	19	-2°C
FA5	31	5,5°C
FA6	33	6,4°C
FA7	28	3,5°C
FA8	27	3°C
FA9	27	3°C
FA10	49	außerhalb Kurve

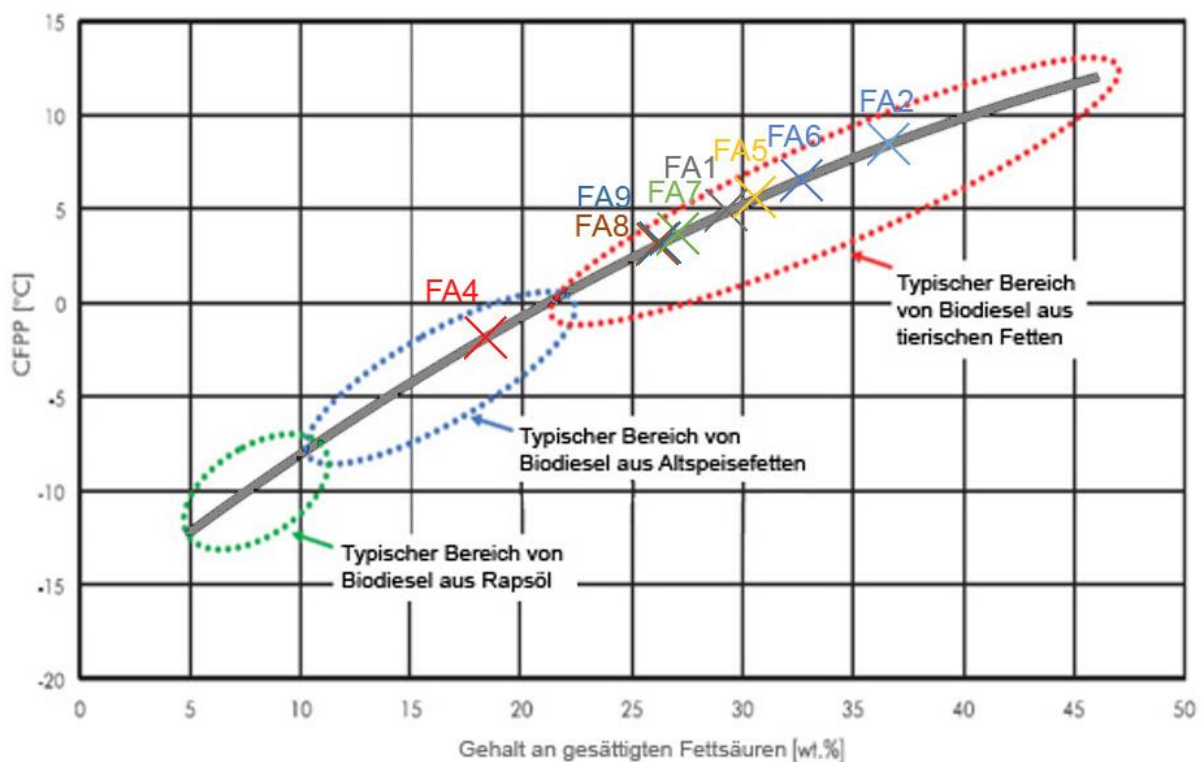


Abbildung 34: Ergebnisse der Fettabscheiderproben für CFPP nach Chhetri et al. (2008)

Für die Fettabscheiderproben wurde der Filterverstopfungspunkt (CFPP) aus dem Diagramm von Chhetri et al. (2008) abgelesen. Alle Proben aus den Fettabscheidern weisen einen schlechten Filterverstopfungspunkt auf. Sie liegen im Bereich Biodiesel aus tierischen Fetten (s. Abbildung 34), lediglich eine Probe hat einen geringeren Wert gesättigter Fettsäuren (FA4).

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Der hohe Gehalt an Palmitinsäure (C16:0, s. Abbildung 33) in den Fettabscheiderproben (Median 20%) spricht für einen hohen Anteil tierischer Fette im Fettabscheiderfett. Butterfett oder Schweineschmalz bestehen zu einem Viertel bis einem Drittel aus Palmitinsäure (de.wikipedia.org/wiki/Palmitinsäure), während Sonnenblumenöl nur 6,6% Palmitinsäure enthält (Sajjadi et al. 2016).

Die schlechten Filterverstopfungspunkte für Biodiesel aus Fettabscheiderfetten bedeuten, dass man diesen Biodiesel entweder mit Additiven versetzen oder mit anderem (Bio-) Diesel verschneiden muss.

3.4.3 Gasbildungspotential von Fettabscheiderinhalten

Die Co-Vergärung von Fettabscheiderinhalten ist in Österreich gängige Praxis. Um das Gasbildungspotential der einzelnen Bestandteile zu beurteilen, wurde der GB_{21} der verschiedenen Fraktionen bestimmt. Die Biogaserträge der einzelnen Fraktionen sind in Abbildung 35 dargestellt.

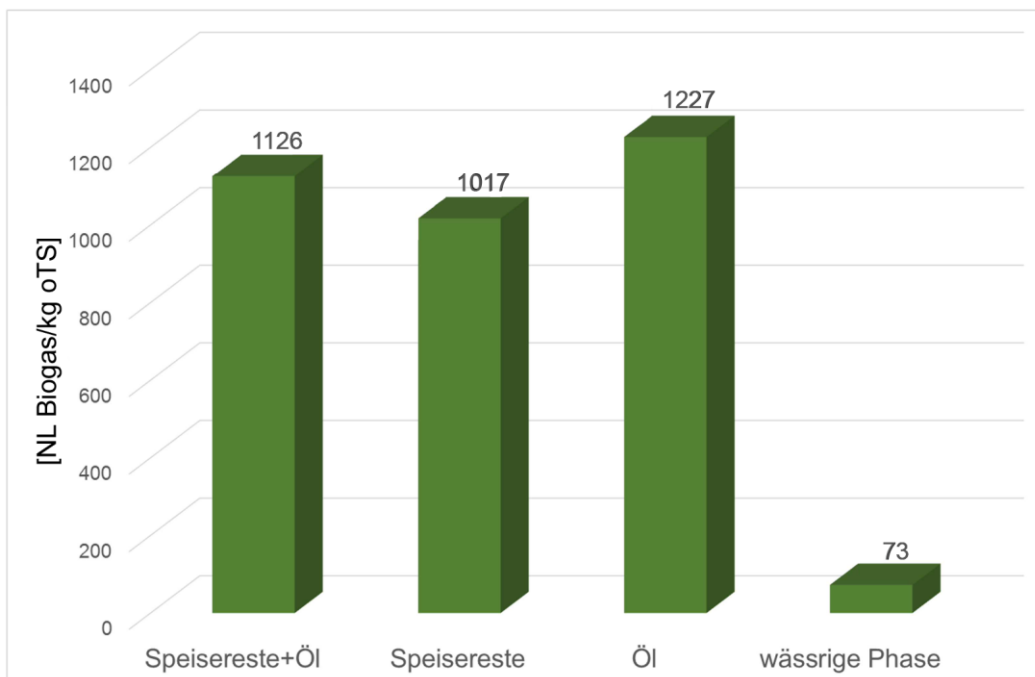


Abbildung 35: Gasbildungspotential der getrennten Fraktionen - Speisereste+Öl, entölte Speisereste, Öl und wässrige Phase.

Den größten Biogasertrag liefert hierbei das Öl mit 1227 NL/kg oTS (± 8), gefolgt von Speisereste+Öl mit 1126 NL/kg oTS (± 8) und den abgetrennten Speiseresten mit 1017 NL/kg (± 17) oTS. Die wässrige Phase hingegen liefert kaum Biogas und ist mit 73 NL/kg oTS (± 39) für die Biogaserzeugung kaum interessant.

Vergleicht man hier jedoch den Biogasertrag der Speisereste mit Öl und der entölte Speisereste so ergibt sich hier lediglich eine Differenz von 109 NL/kg oTS. Der Ertrag der entölte Speisereste-Fraktion ist also lediglich ca. 10% geringer, wenn man das Öl aus den

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Fettabscheiderabfällen entfernt. Ein Grund für den hohen Biogasertrag der entölten Speisereste ist der immer noch hohe Anteil an Lipiden (Restölgehalt 18%).

Das Biogaspotential der Fettabscheider liegt im erwarteten Bereich. So gibt die Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft z.B. für Altfrittierfett einen Biogasertrag von 1000 NI / kg oTS und für reine Pflanzenöle einen Ertrag von bis zu 1225 NI / kg oTS an (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft 2017). Dengg (2009) beziffert den Biogasertrag von Fetten aus dem Abwasser mit 1250 NI / kg oTS.

3.4.4 Schlußfolgerungen

Der Gehalt an freien Fettsäuren in den Fettabscheiderfetten steigt sehr rasch an aufgrund der ungünstigen Bedingungen im Fettabscheider (angepasste Mikroorganismen, Nährstoffe und Wasser). Daher müssen Fette aus Fettabscheidern mit speziell dafür geeigneten Verfahren zu Biodiesel umgewandelt werden. Dafür eignen sich unter anderem zweistufige Verfahren oder superkritische Katalyse.

Der Schwefelgehalt in den Fettabscheiderfetten lag hoch, vor allem bei schlecht betriebenen Fettabscheidern mit einem hohen Anteil an Speiseresten im Fettabscheider. Bei der Biodieselherstellung muss daher ein Entschwefelungsschritt enthalten sein.

Die Fette aus den Fettabscheidern enthalten offensichtlich einen großen Anteil tierischer Fette, der Gehalt gesättigter Fettsäuren war in den meisten Proben etwa ein Drittel. Daher ist zu erwarten, dass der daraus hergestellte Biodiesel ein relativ schlechtes Kälteverhalten haben wird. Eine Abschätzung des Filterverstopfungspunkts nach Chhetri et al. (2008) ergab für fast alle Proben einen Filterverstopfungspunkt bei Plusgraden.

Das Biogaspotential der Fettabscheider lag erwartungsgemäß hoch. Ein zu hoher Anteil an reinen Fetten kann bei der Co-Vergärung in der Kläranlage jedoch zu Problemen führen (Davidsson et al. 2008).

3.5 Ökobilanzielle und wirtschaftliche Bewertung

3.5.1 Methodik der Ökobilanz

Die ökologische Bewertung der vorliegenden Studie erfolgt in methodischer Anlehnung an die DIN EN ISO 14040ff, welche die methodische Vorgehensweise zur Erstellung einer Ökobilanz normiert (vgl. Abbildung 36). Hierin wird eine Ökobilanz (engl. auch LCA – Life Cycle Assessment) als eine systematische Analyse der Umweltwirkungen von Produkten während des gesamten Lebensweges („von der Wiege bis zur Bahre“) definiert.



Abbildung 36: Aufbau einer Ökobilanz gemäß DIN ISO 14044ff

Die potenziellen Umweltwirkungen des Untersuchungssystems (Sammlung, Lagerung, Aufbereitungsoptionen und erneuerbare Energieerzeugungsmöglichkeiten) werden mittels einer ökobilanziellen Analyse untersucht. Die Analyse erfolgt in Anlehnung an DIN ISO 14040 ff mit Hilfe des Softwareprogramms „EASETECH“ der Dänischen Technischen Universität DTU, das speziell für die ökobilanzielle Betrachtung von umwelttechnischen und abfallwirtschaftlichen Fragestellungen entwickelt wurde.

Input- und Output-Flüsse wurden durch die Befragung relevanter Akteure, mittels Literaturrecherche sowie auf Basis der Ergebnisse der vorhergehenden Arbeitspakete definiert. Anschließend erfolgt die Quantifizierung der Input- und Outputflüsse in Form einer Sachbilanz. In der Phase der Wirkungsabschätzung werden die potenziellen Umweltwirkungen für die gewählten Wirkungskategorien berechnet. Für die Auswertung werden die Ergebnisse vergleichend zueinander betrachtet und mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse bewertet.

3.5.2 Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens

Ziel der Ökobilanz

Ziel der Untersuchung ist ein ökobilanzieller Vergleich von folgenden Verwertungspfaden von Fettabscheiderinhalten:

1. Co-Vergärung der Fettabscheiderinhalte auf einer Kläranlage zur Biogasgewinnung
2. Verwertung der abgetrennten Fette aus Fettabscheiderinhalten zu Biodiesel und Co-Vergärung der übrigen Fettabscheiderinhalte

Als Vergleichsparameter wird die Wirkungskategorie Treibhauspotential (Global Warming Potential = GWP) ausgedrückt in CO₂-Äquivalenten gewählt.

Mit Hilfe der ökobilanziellen Analyse sollen Energiebedarf, Energieproduktion und Treibhausgasemissionen der Untersuchungsszenarien dargestellt werden. Dadurch soll gezeigt werden, ob und wenn ja welche Vorteile durch die Erzeugung von Biodiesel aus nicht emulgierten Fetten aus dem Abwasser/Fettabscheiderinhalten zu erwarten sind im Vergleich zur konventionellen Co-Vergärung der Fette.

Die Entsorgung der Fette über die Kanalisation und die Erzeugung von Biodiesel aus kombiniert erfassten Fett- und Speiseabfällen wurden nicht ökobilanziell betrachtet (vgl. dazu das Kapitel "Untersuchte Systeme").

Untersuchungsrahmen der Ökobilanz

Funktionelle Einheit

Als funktionelle Einheit (FE) wird der Inhalt eines Standard-Schwerkraft-Fettabscheiders eines durchschnittlichen Gastronomiebetriebs in Tirol, inklusive anfallendes Spülwasser zur Reinigung des Fettabscheiders, definiert.

Festlegung der Zusammensetzung und der Menge:

Die Festlegung der Zusammensetzung und der Menge basiert auf eigenen Untersuchungen, auf der Befragung von Tiroler Entsorgern/Kanaldienstleistern (s.u.) und auf folgender Literatur zur Zusammensetzung und zu den Eigenschaften von Fettabscheiderinhalten (Callegari 2002; Haider 2009; Haider und Praxmarer 2010; Hums et al. 2016; Jolis et al. 2013; Kobayashi et al. 2014; Long et al. 2012; Lopez et al. 2014; Morais et al. 2010; Razaviarani et al. 2013; Schneider 2015; Tu und McDonnell 2016; Tu et al. 2012; Tu et al. 2016; Wallace et al. 2017)

Zusammensetzung:

- 10 % Fett (Anteil an freien Fettsäuren: 80 %)
- 20 % Schlamm / Schlacke (= Speisereste)
- 70 % Wasser

Menge: 3000 kg

Zusammensetzung der „Material Fractions“ in EASETECH:

Schlamm/Schlacke = Vegetable food waste

Wasser = Water: selbst definiert (100 % Wasser, 0 % TS und VS, 0 MJ/kg TS Energie)

Fett = Lipids: selbst definiert:

- 0,2 % Water / 99,8 % TS (TS = oTS)
- Aschegehalt laut Prüfbericht der Fette der Anlage des Abwasserverbands Hall in Tirol/Fritzens: <0,005 % à 99,995 VS %TS / 0,005 Ash %TS (ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH, 2015)
- Energiegehalt: in EASETECH: Energy = lower heating value dry for solids: unterer Heizwert laut Prüfbericht der Fette der Anlage des Abwasserverbands Hall in Tirol/Fritzens: ~ 37 MJ/kg (ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH, 2015)
- Berechnung von C_{bio} über die Molmasse von freien Fettsäuren (Ölsäure bzw. Linolensäure à C_{bio} = ~ 77 %TS; C_{fossil} = 0 %TS)
- Ölsäure: C₁₈H₃₄O₂, molare Masse: 282,46 g·mol⁻¹, Anteil C: 216 g/mol; Anteil H: 34 g/mol; Anteil O: 32 g/mol à C (%TS) = 76.5 %; H (%TS) = 12 %; O (%TS) = 11,3 %
- Linolensäure: C₁₈H₃₀O₂, molare Masse: 278,44 g·mol⁻¹, Anteil C: 216 g/mol; Anteil H: 30 g/mol; Anteil O: 32 G/mol à C (%TS) = 77.7 %; H (%TS) = 10.8 %; O (%TS) = 11.5 %
- Für Easetech: C_{bio_and} = C_{bio} = C (%TS) = 77 %; H (%TS) = 11.5 %; O (%TS) = 11.5 %
- Aus der EASETECH-Formel (S. 47 des User Manuals; ergänzt um „*100“) ergibt sich mit C_{bio_and} = 77 %, VS = 99.995 %TS und 68 % CH₄ im Biogas ein CH₄-Potential von 977 m³/tVS, kombiniert mit dem „yield“ von 90 % ergibt sich 879 m³ CH₄ /t VS
- CH₄-Potential: 1 kg Fett (kg oTS) = ~ 1,25 m³ Biogas mit 70 % CH₄ (Dengg, 2009) à 875 m³ CH₄ /t VS
- Dichte CH₄ in EASETECH: 0,71 kg/m³; Dichte CO₂: 1,96 kg/m³

Sich ergebende Zusammensetzung der drei Fraktionen in EASETECH:

Eigenschaften der Parameter:

Abbildung 37: Zusammensetzung der „Material Fractions“ in EASETECH

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Befragung von Tiroler Kanal-Dienstleistern zur Fettabscheiderentleerung:

DaWi - Daka Winkler (Unternehmen der IKB) am 12.9.2017 um 11 Uhr Telefonat mit Andreas Meixner (Vertriebsleitung, Außendienst) Tel. 0800 24 00 00 oder 0664-430 40 94

- FA-Nenngröße: 0,5 - 10 m³, Durchschnitt: 2,5 - 3 m³ + 200-300 l Spülwasser
- Fahrzeuge: 10 m³ Spülwagen (Euro 5 oder 6, wenige Euro 4), für weite Touren ein 16 m³ Fahrzeug (Euro 6)
- Touren: Wenn möglich mehrere FA pro Tour, kommt aber ganz auf Größe und Lage der FA an.
- Gebiet: ganz Tirol und Anfang von Salzburg
- Anlieferung an Kläranlagen, die in der Nähe liegen, z.B. Innsbruck, Strass, etc.

Kanal Mayr Innsbruck am 11.9.2017 um 16 Uhr Telefonat mit Michael Mayr Tel. 0664-849 56 44

- FA-Nenngröße: 1 - 20 m³, Durchschnitt 3 - 4 m³ + 1 m³ Spülwasser
- Fahrzeuge: 10 oder 20 m³ Spülwagen (Euro 5 oder 6, wenige Euro 4)
- Touren: Wenn möglich mehrere FA pro Tour, kommt aber ganz auf Größe und Lage der FA an.
- Anlieferung zur ARA Zirl

Alpe Kanal Service GmbH in Thaur, Telefonat am 11.9.2017 um 16:30 Uhr, Tel. 05223-49 34 30

- FA-Nenngröße: 2 - 10 m³, Durchschnitt: 2,5 - 3 m³ + Spülwasser je nach Verschmutzung (Mengenangabe nicht möglich)
- Fahrzeuge: LKW mit 2 oder 3 Achsen 7 m³ (Euro 4)
- Touren: Wenn möglich mehrere FA pro Tour, kommt aber ganz auf Größe und Lage der FA an.
- Gebiet: ganz Tirol
- Anlieferung zur Kläranlage Strass

Untersuchte Systeme

Die Auswahl der untersuchten Systeme basiert auf den Untersuchungsergebnisse der vorangegangenen Arbeiten (vgl. Kapitel 3.2 - 3.4), auf der Befragung von Tiroler Kläranlagenbetreibern und Entsorgern/Kanaldienstleistern sowie auf Literaturrecherche (Hums et al. 2016).

Die folgenden Szenarien werden ökobilanziell betrachtet:

Szenario 1: Co-Vergärung:

Sammlung der Fettabscheiderinhalte und Transport zur Kläranlage, anschließende Verwertung der gesamten Fettabscheiderinhalte als Substrat für die Co-Vergärung in der Kläranlage zur Biogasgewinnung, Nutzung des Biogases im Blockheizkraftwerk (BHKW) zur Stromerzeugung

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Szenario 2: Biodiesel:

Sammlung der Fettabscheiderinhalte und Transport zur Kläranlage, anschließende Trennung der Fettabscheiderinhalte in nicht emulgierte Fette und übrige Bestandteile (Speisereste und Spülwasser), Verwertung der Fette zur Biodieselerzeugung, der Biodiesel wird anschließend als Ersatz für fossilen Diesel genutzt, Verwertung der übrigen Bestandteile der Fettabscheiderinhalte (Speisereste und Spülwasser) auf der Kläranlage zur Biogasgewinnung und Stromerzeugung im BHKW

Die Entsorgung nicht emulgierter Fette mit dem Abwasser über die Kanalisation und die Behandlung dieser im Abwasser verbliebenen Fette in der Kläranlage wird nicht ökobilanziell betrachtet, da für diesen in Österreich nicht legalen Entsorgungspfad keine belastbaren Daten vorliegen, die eine Abschätzung ermöglichen würden, vor allem nicht zum Umfang der Anhaftung und Ablagerung der Fette in der Kanalisation. Bei dieser Art der Entsorgung lagern sich die Fette teilweise im Kanal ab und müssen dort aufwendig und kostenintensiv entfernt werden. Fette, die bis zur Kläranlage gelangen, werden dort zum Teil über den Fettfang abgeschieden. Die im Abwasser verbliebenen Fette werden in der biologischen Stufe der Kläranlage abgebaut (vgl. dazu: Dengg und Rostek (2004), Dengg (2009), Wallace et al. (2017), Jolis et al. (2013), Schneider (2015) und Fimml (2007)).

Die Erzeugung von Biodiesel aus kombiniert erfassten Fett- und Speiseabfällen wird nicht betrachtet, da sich im Zuge der Projektbearbeitung bei den vorangegangenen Untersuchung Bearbeitung zeigte, dass eine spätere Abtrennung der Fette nicht möglich ist (vgl. Kapitel 3.3).

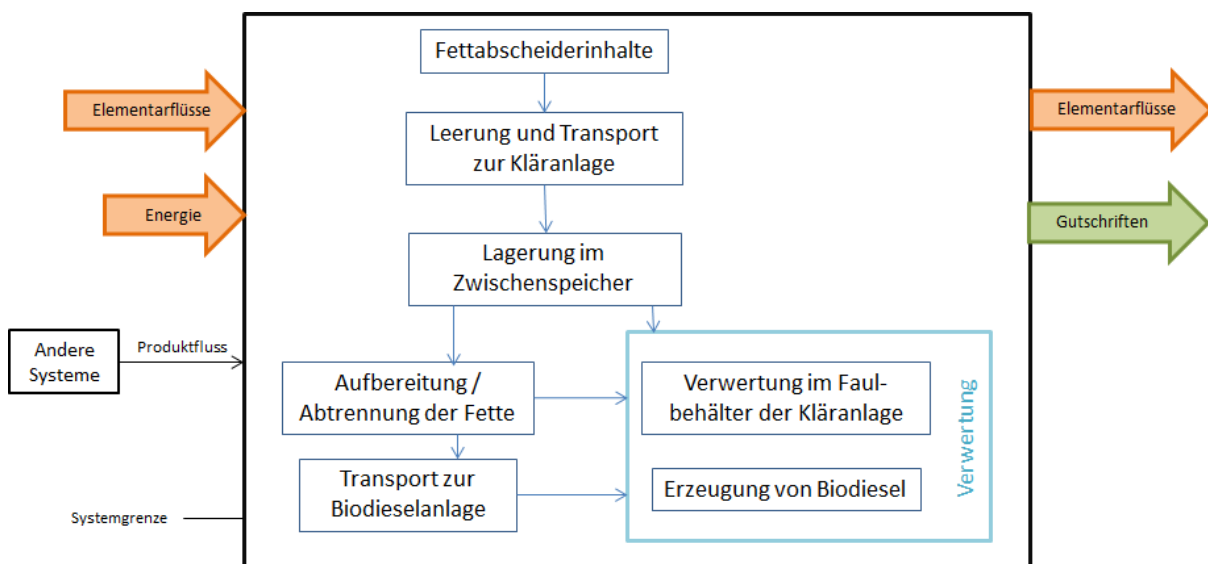


Abbildung 38: Systemgrenzen des Untersuchungsgegenstandes

Abbildung 38 zeigt das qualitative Systemfließbild und die Systemgrenze für die untersuchten Varianten der ökologischen Bewertung. Mit den Systemgrenzen wird festgelegt, welche Prozesse und Flüsse mit in die Bewertung aufgenommen werden und welche unter Umständen vernachlässigt werden. Auf der linken Seite sind jene Flüsse abgebildet, die in das System eintreten und verbraucht werden, wie beispielsweise

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Energieträger in Form von Strom, Wärme oder Treibstoffen. Des Weiteren werden Produktflüsse aus anderen Systemen benötigt, zum Beispiel Methanol und Phosphorsäure. Zur rechten Seite treten Emissionen, z.B. in Form von treibhauswirksamen Gasen, aus dem System aus. Wesentlicher Aspekt hierbei ist, dass auch Umweltentlastungen erzielt werden. Beispielsweise im Falle der Co-Vergärung der Fettabscheiderihhalte in einer Kläranlage würde die Verwertung des Klärgases über eine Stromerzeugung eine wahrscheinliche Option darstellen, eventuell wäre auch eine Verwertung der Wärme möglich (z.B. zur Klärschlamm-trocknung). Im Falle der reinen Stromerzeugung würde die sich ergebende spezifische Menge elektrischer Energie rechnerisch die analoge Strommenge, die auf konventionellem Wege erzeugt würde, substituieren.

Geographische und zeitliche Systemgrenze

Betrachtet werden die Systeme für Tirol, beispielhaft für das Zillertal. Die verwendeten Daten sollten möglichst nicht älter als 2010 sein.

Allokationsverfahren

Es wird das Konzept der folgeorientierten Ökobilanz (engl. Consequential LCA) gewählt (Hums et al. 2016; Morais et al. 2010; Tu und McDonnell 2016).

Software

Die ökobilanzielle Bewertung wird mit der Software „EASETECH“, die von der Dänischen Technischen Universität – DTU entwickelt wurde, durchgeführt.

Ausgewählte Wirkungskategorien und Methoden für die Wirkungsabschätzung

Als Wirkungskategorie für die vergleichende Bewertung wird das Treibhauspotential (Global Warming Potential = GWP) gewählt (European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability 2012). In EASETECH wird dafür die im ILCD-Handbuch der Europäischen Kommission empfohlene Methode „ILCD 2011, Climate change w/o LT; midpoint; GWP100; IPCC2007“ (angegeben in kg CO₂-Eq.) verwendet (ILCD = International Reference Life Cycle Data System) (European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability 2011).

Die konkret in EASETECH dafür verwendete LCIA-Methode (LCIA = Life Cycle Impact Assessment) heißt: „ILCD recommended - 2013 Prosuit Global NR_DTU resource w/o LT“.

Verwendete Datenquellen

Folgende Datenquellen wurden verwendet:

- Ergebnisse der vorhergehenden Untersuchungen
- Quellen aus Literaturrecherche und Datenerhebung (Interviews und Telefonate)
- Datenbank ecoinvent
- in EASETECH enthaltenen Prozesse und Daten

Äquivalenzsysteme

Vergleicht man verschiedene Abfallsammel- und Verwertungsoptionen miteinander, so muss eine Nutzengleichheit zwischen diesen hergestellt werden. Einerseits gleichen sich die Sammel- und Verwertungsoptionen für Fettabscheiderinhalte in der Dienstleistung der Entsorgung des Abfallproduktes. Andererseits unterscheidet sich der erzeugte Nutzen der Verwertungsoptionen. Bei der Co-Vergärung und der anschließenden energetischen Verwertung des entstehenden Biogases im Blockheizkraftwerk erhält man die Produkte Strom und Wärme. Auch die Veresterung der Fettabscheiderinhalte zu Biodiesel stellt eine energetische Verwertung dar, da der Energiegehalt der Fettabscheiderinhalte im Verbrennungsmotor eines Fahrzeuges genutzt wird und somit herkömmlichen Diesel ersetzt.

Um die genannten Verwertungswege miteinander auf ihre Umweltwirkungen zu vergleichen, werden die entsprechenden substituierten Prozesse (Äquivalenzsysteme) als eingesparte Umweltwirkung dem eigentlichen Verwertungsprozess gutgeschrieben.

Im Rahmen der Untersuchung werden alle spezifischen Aufbereitungsschritte sowie die sich daraus errechnenden Mengen an Produkten und Nebenprodukten, wie beispielsweise Strom und Wärme aus Biogas, Biodiesel und Glycerin aus den Fetten, quantifiziert und bilanziert. Diese substituieren in ihrer Wirkungsweise fossile und somit nicht regenerative Produkte (Äquivalenzprodukte und -prozesse) und deren Primärproduktion. Die eingesparten Umweltbelastungen, die mit diesen Primärproduktionen verbunden sind, werden den jeweiligen Untersuchungsvarianten gutgeschrieben. Die mit der Erzeugung der erneuerbaren Produkte verbundenen Emissionen gehen dagegen als Lastschrift in die Bilanzierung mit ein. Im Folgenden werden die im Rahmen der Studie eingesetzten Äquivalenzsysteme genauer beschrieben und erläutert.

Strom und Wärme

Bei beiden Verwertungsszenarien werden durch die Co-Vergärung (der Fettabscheiderinhalte bzw. der abgetrennten Speisereste) als energetische Endprodukte Strom und Wärme gewonnen. Je nachdem welcher Äquivalenzprozess verwendet wird, fällt die Höhe der Stromgutschriften sehr unterschiedlich aus. Wie in Abbildung 39 ersichtlich, verursacht Strom aus Wasserkraft, Windenergie oder Biomasse nur einen geringeren Anteil an Treibhausgas-Emissionen, im Vergleich zu einem Strom aus vorwiegend Steinkohle.

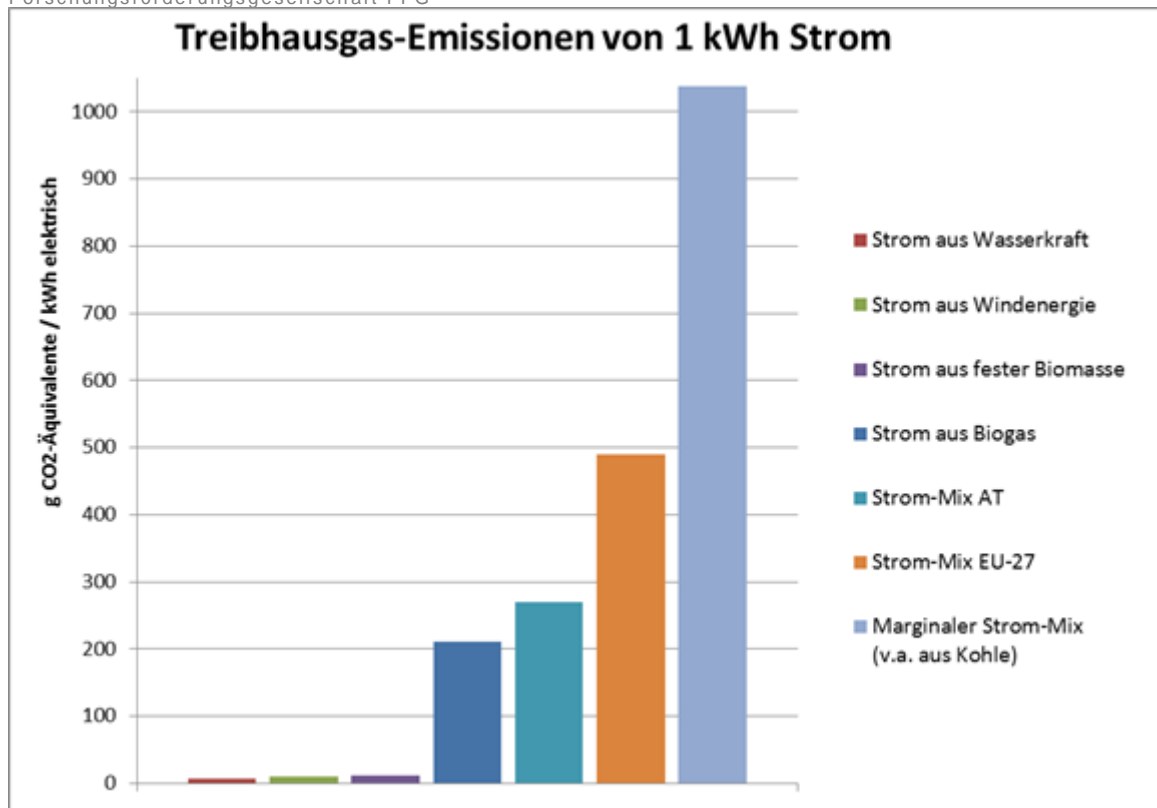


Abbildung 39: Umweltwirkungen von unterschiedlichen Energieträgern bei der Bereitstellung von einer kWh elektrischen Strom (ausgedrückt in CO₂-Äquivalente pro kWh, berechnet mit EASETECH).

Für die Berechnung der Umweltwirkungen in Abbildung 39 wurden die folgenden Prozesse aus EASETECH und Ecoinvent verwendet:

EASETECH:

- Electricity from wood, DK 2010
- Electricity from biogas, DK 2010
- Marginal Electricity Consumption incl. Fuel Production, Coal, Energy Quality, DK, kWh, 2006

Ecoinvent:

- Electricity production, hydro, reservoir, alpine region; AT
- Electricity from wind power, <1kV, 2008, RER, ELCD
- Electricity, high voltage, production mix; AT
- Electricity Mix; < 1kV (low voltage) for final consumer, 2008, EU-27. ELCD

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Im Rahmen von ökobilanziellen Untersuchungen wird in der Regel (gemäß DIN ISO 14044:2009) der Strommix des untersuchten Einzugsgebietes als Äquivalenzsystem für die erzeugte elektrische Energie eingesetzt. In Österreich besteht dieser Strommix zu rund 78 % aus erneuerbaren Energieträgern mit Strom aus Wasserkraft als Hauptbestandteil (Energie-Control Austria 2017). Die Verwendung dieses österreichischen Strommixes als Äquivalenzsystem Energie würde u.a. dazu führen, dass eine aus Fettabscheiderinhalten gewonnene Kilowattstunde Strom in anderen Ländern, die einen geringeren Anteil an erneuerbarer Energie im Strommix haben, zu einer höheren Umweltentlastung (Gutschrift) führt, als in Österreich. Verwendet man nun im Rahmen einer ökologischen Bewertung den österreichischen Strommix als Äquivalenzsystem für den produzierten Strom aus Fettabscheiderinhalten, so erhält man eine geringere Umweltentlastung.

Für die Wahl des Äquivalenzprozesses für die produzierte thermische Energie gelten die gleichen Überlegungen wie oben angeführt. Je nachdem welcher Energieträger zur Wärmebereitstellung verwendet wird (Biomasse, Biogas, Erdgas, Öl, Kohle), entstehen unterschiedlich große Umweltwirkungen pro kWh thermische Energie. Außerdem stellt sich bei der Betrachtung der Gutschriften durch die Wärmeerzeugung noch die entscheidende Frage, ob es überhaupt einen Nutzer für die erzeugte Wärme gibt. Ist dies nicht der Fall, können für die erzeugte Wärme auch keine Gutschriften berücksichtigt werden.

Die Wahl des Äquivalenzsystems beeinflusst daher maßgeblich das Endergebnis einer Ökobilanz. Je umweltschädlicher der Äquivalenzprozess, umso höher die Gutschriften. Da die in den Untersuchungsszenarien erzeugte Energie in Form von Strom und Wärme eine erneuerbare Energiequelle darstellt, können durch ihren Einsatz fossile Energiequellen ersetzt werden. Daher wird als Äquivalenzsystem für den erzeugten Strom in dieser Ökobilanz zunächst der marginale Strommix, d.h. Strom aus Energiequellen, die am ehesten ersetzt werden, wenn der Anteil an erneuerbaren Energiequellen steigt, verwendet. Der marginale Strommix besteht in Österreich vor allem Strom aus Steinkohle (Anteil an der Stromerzeugung: 3,0 %), Kohlederivaten (Anteil an der Stromerzeugung: 2,8 %) und Erdölderivaten (Anteil an der Stromerzeugung: 1,4 %) (Energie-Control Austria, 2017). Bei der Modellierung in EASETECH wurde als Äquivalenzprozess für die Stromerzeugung ein marginaler Strommix aus EASETECH verwendet (Marginal Electricity Consumption incl. Fuel Production, Coal, Energy Quality, DK, kWh, 2006). Der Strom wird vor allem aus Kohle und teilweise aus Erdöl erzeugt. In der Sensitivitätsanalyse wird anschließend untersucht, welche Auswirkungen die Verwendung eines anderen Äquivalenzsystems auf die Ergebnisse hat, d.h. wenn stattdessen z.B. der österreichische Strommix, der einen hohen Anteil an erneuerbarer Energie enthält, verwendet wird.

Bezüglich der Wärmeerzeugung als Co-Produkt des im BHKW erzeugten Stroms bei der Verbrennung des Biogases wird davon ausgegangen, dass diese durch die Co-Vergärung erzeugte zusätzliche Wärme nicht genutzt werden kann, da in einer Kläranlage bereits durch die Nutzung des eigentlichen Klärgases mehr Wärme erzeugt wird als vor Ort benötigt wird. Im Gegenzug wird bei der Modellierung kein zusätzlicher Wärmeverbrauch berücksichtigt, da

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

davon ausgegangen wird, dass dafür die vor Ort erzeugte Wärme, die im Überschuss vorhanden ist, genutzt wird. In der Sensitivitätsanalyse wird anschließend untersucht, welche Auswirkung die Berücksichtigung der Gutschriften der Wärmeerzeugung auf die Ergebnisse hat. Dabei wird dann ebenfalls der durch die Co-Vergärung hervorgerufene Wärmeverbrauch berücksichtigt und von den Gutschriften subtrahiert. Als Äquivalenzprozess dafür wird die Erzeugung von Wärme aus Erdgas betrachtet. In EASETECH wird dafür der Prozess „Heat production, natural gas, at boiler modulating >100kW; Europe without Switzerland“ von Ecoinvent verwendet.

Biodiesel

Der aus Fettabscheiderinhalten erzeugte Biodiesel ersetzt die Herstellung und den Einsatz von Dieselkraftstoffen aus fossilen Rohstoffen. Für die Ermittlung der durch Biodiesel entstehenden Gutschriften, müssen daher sowohl die Produktion und die damit verbundenen Vorketten als auch die Nutzung (=Verbrennung im Motor eines Fahrzeuges) des fossilen Diesels berücksichtigt werden.

In der Modellierung wird der in EASETECH enthaltene Prozess „Production and combustion of of diesel oil in truck, EU2, 1998“ als Äquivalenzsystem für die Substitution des fossilen Diesels verwendet. Dieser Prozess berücksichtigt für den substituierten fossilen Diesel -3,6 kg CO₂-Äq pro kg Biodiesel. Laut anderer Quellen werden pro 1 kg substituierten Diesel zwischen -2,9 und -3,6 CO₂-Äq berücksichtigt

(<http://www.klimaneutral-handeln.de/php/kompens-berechnen.php#rechner>,

<http://www5.umweltbundesamt.at/emas/co2mon/co2mon.html>,

<https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/290536>). In der Sensitivitätsanalyse wird daher auch betrachtet, welche Auswirkungen es auf das Ergebnis hat, wenn nur eine Gutschrift von -2,9 CO₂-Äq pro 1 kg Diesel verwendet wird.

Die Verbrennung des Biodiesels wird bei der Modellierung nicht berücksichtigt, da dabei biogenes CO₂ entsteht.

Glycerin

Glycerin fällt als Nebenprodukt bei der Biodieselerzeugung an. Bei der Biodieselerzeugung aus Fettabscheiderinhalten fällt das Glycerin in einer Qualität an, die nicht für die stoffliche Verwertung in der Pharma- und Futtermittelindustrie genutzt werden darf, da es aus Abfallstoffen erzeugt worden ist. Es handelt sich um technisches Glycerin/Rohglycerin (80 % Glycerin), das zur energetischen Verwertung als Co-Substrat in Biogasanlagen genutzt werden kann (Nitzsche 2011).

Laut der „Marktübersicht Zusatz- und Hilfsstoffe in Biogasanlagen“ des Biogas Forums Bayern wird der Energieertrag von Glycerin im EEG 2012 in der Biomasse-Verordnung mit 421 m³ Methan pro Tonne Frischmasse angegeben und ist so in der Vergütungsberechnung anzurechnen (Henkelmann et al. 2018).

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

In der Modellierung wird daher berücksichtigt, dass pro kg Glycerin bei der Vergärung 0,421 m³ CH₄ entstehen. Für dieses erzeugte Glycerin wird die Gutschrift für den Strom, der aus dem Methan erzeugt wird, angerechnet, mit einem Wirkungsgrad von 0,39 %. Für die Stromgutschrift wird der marginale Strommix verwendet.

3.5.3 Sachbilanz und Wirkungsabschätzung der Szenarien

In diesem Kapitel werden die in EASETECH berechneten Ergebnisse für die Massenflüsse und die Wirkungsabschätzung vorgestellt.

Szenario 1 - Co-Vergärung

Bei diesem Szenario wird in acht Prozessschritten die Sammlung der Fettabscheiderinhalte und der Transport zur Kläranlage, die darauf folgende Verwertung der gesamten Fettabscheiderinhalte als Substrat in der Co-Vergärung und die anschließende Nutzung des erzeugten Biogases im BHKW zur Stromerzeugung modelliert.

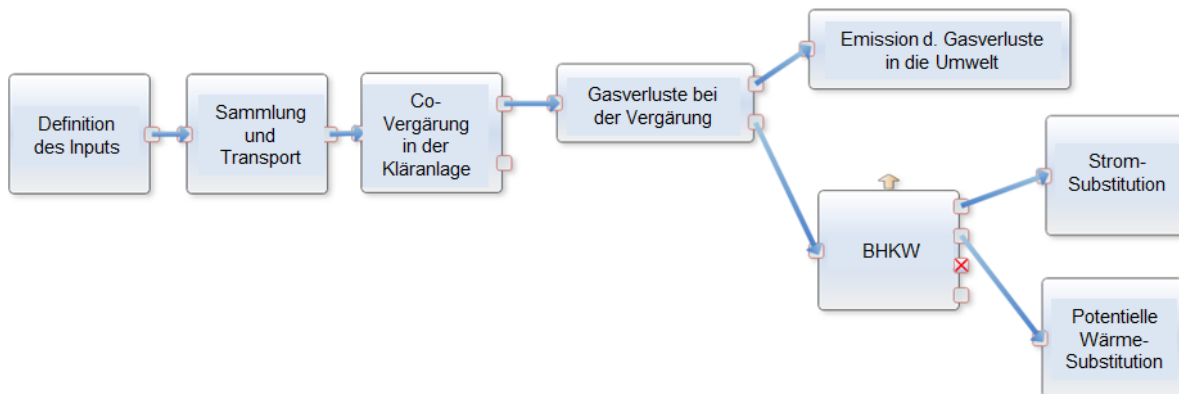


Abbildung 40: Übersicht über die Modellierung des Szenarios 1 – Co-Vergärung in EASETECH

Prozess 1: Definition des Inputs

Die Modellierung beginnt mit der Definition des Inputs. Input ist eine FE (Funktionelle Einheit) mit 3000 kg Fettabscheiderinhalt der folgenden Zusammensetzung (vgl. auch Abbildung 37: Zusammensetzung der „Material Fractions“ in EASETECH):

- 10 % Fett (Anteil an freien Fettsäuren: 80 %)
- 20 % Schlamm / Schlacke (= Speisereste)
- 70 % Wasser

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Zusammensetzung des Inputs in EASETECH:

Fraction name	Total Wet Weight (kg)	TS (kg)	Water (kg)	VS (kg)	Ash (kg)	Energy (MJ)	CH4 (m ³)	CO2 (m ³)	CH4 potential (m ³)	C bio (kg)	C bio and (kg)	C fossil (kg)
Sum	3000	437.4	2562.6	430.2	7.191	1.36E+04	0	0	292.5	296.081	288.912	0.3298
Water from GTW	2100	0	2100	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lipids from GTW	300	299.4	0.6	299.4	0.01497	1.108E-04	0	0	292.5	230.538	230.538	0
Vegetable food waste from GTW	600	138	462	130.82	7.176	2525.4	0	0	0	65.55	58.374	0.3298

Prozess 2: Sammlung und Transport

Für die Modellierung von Sammlung und Transport der Fettabscheiderinhalte zur Kläranlage werden folgende Annahmen getroffen:

- Die zurückgelegte Distanz für die Sammlung der Fettabscheiderinhalte und den Transport zur Kläranlage wird mit 100 km großzügig abgeschätzt. Im beispielhaft betrachteten Zillertal beträgt z.B. die Strecke vom Talende bis zur Kläranlage am Taleingang ca. 50 km.
- Für den Transport wird ein Dieselfahrzeug der Klasse Euro 5 mit einem Ladevolumen von 10 m³ verwendet. (Prozess aus der EASETECH-Datenbank: „Truck, 7.5t-12t, Euro5, highway“).

Darstellung von Sammlung und Transport in EASETECH:

Name	Amount	Unit	Per
Truck, 7.5t-12t, Euro5, highway	100	kg*km	kg Total Wet Weight

Prozess 3: Co-Vergärung in der Kläranlage

Für die Modellierung der Co-Vergärung der Fettabscheiderinhalte in der Kläranlage werden folgende Annahmen getroffen:

- Der Prozess basiert auf dem EASETECH-Prozess „Biogas production, Thermophilic, Generic, 2007“
- Die gesamte angelieferte Mischung der FA-Inhalte wird in den Faultrum gegeben. Es erfolgt keine Abtrennung des Wassers. (Quelle: Auskunft von C. Ebner, ARA Zirl)
- Die Biogaserträge der Input-Fractionen werden folgendermaßen angesetzt: Fette 90% und Schlamm/Schlacke 70 %, Wasser keinen Ertrag
- Der CH₄-Gehalt im erzeugten Biogas beträgt 68 %.
- Der zusätzliche Energieverbrauch im Faultrum der Kläranlage für Pumpen und Ventilatoren wird mit 18.3 kWh pro kg Inputmaterial angesetzt.
- Der Energiebedarf zum Aufheizen der angelieferten FA-Inhalte und zum Heizen des Reaktors wird nicht berücksichtigt. Begründung: 1) Abwärme wird dafür genutzt und 2) die Zugabe der erwärmten Masse wirkt als Fermenterheizung (Quelle: Auskunft von C. Ebner, ARA Zirl).

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

- Ein Radlader wird nicht zum Transport der FA-Inhalte benötigt (EASETECH: Wheel loader = 0).
- Für die entstehende Wärme des BHKW werden keine Gutschriften berücksichtigt, da an einer „Standard-Kläranlage“ auch ohne Co-Vergärung immer mehr Wärme anfällt als genutzt werden kann (Quelle: Auskunft von C. Ebner, ARA Zirl).
- Als externer Prozess zur Berücksichtigung des Strombedarfs für Pumpen, Ventilatoren etc. wird der gleiche externe Prozess verwendet, der auch bei der Gutschrift für die Stromerzeugung aus dem Biogas verwendet wird.
- „Loss of VS related to loss of biogenic carbon“ wird im EASETECH-Prozess von der Standardeinstellung 1.89 auf 1.3 angepasst, damit der VS-Wert (organische Trockensubstanz) des Gärrestes nicht negativ wird, sondern ca. 10 % des Inputs der entspricht organische Trockensubstanz.

Mögliche Alternative bei der Sensitivitätsbetrachtung: Es werden Gutschriften für die Wärmeerzeugung berücksichtigt. Dann muss aber auch der Energiebedarf für die Erwärmung des Inputmaterials und des Reaktors berücksichtigt werden.

Modellierung der Co-Vergärung in EASETECH:

Biogas production, Thermophilic, Generic, 2007

Anaerobic digestion

Define gas yield as proportion of degradable carbon

[Add fraction](#)

Fraction name	Yields (% C bio and)
Vegetable food waste from GTW	70
Lipids from GTW	90
Water from GTW	0
Default	70

Parameters related to biogas generation

- Theoretical ratios of CH₄ in biogas [View CH₄ %](#)
- Partitioning of CO₂ between gas and liquid phases calculated with:
 - Part of CO₂ going to the liquid phase (%)
 - Measured CH₄ % in biogas

Parameters related to mass balance

Loss of VS related to loss of biogenic carbon

Externe Prozesse:

Process exchanges

Biogas production, Thermophilic, Generic, 2007

External processes

[Add external process](#)

Name	Amount	Unit	Per	Comment
Marginal Electricity Consumption incl. Fuel Production, Coal	0*0.049+0.0183	kWh	kg Total Wet Weight	Pumps, ventilator, etc. (18.3 kWh)
Wheel loader, combustion 1L of diesel, 2008/2011	0*0.0009	l	kg Total Wet Weight	Machinery at the plant
Heat from natural gas, DK 2010	0*(55-8)*4.2*0.9/1000	MJ	kg Total Wet Weight	Energy to heat up water (90% of v
Heat from natural gas, DK 2010	0*(55-8)*3*0.1/1000	MJ	kg Total Wet Weight	Energy to heat up solids (10% of v

Output Gas (Methanproduktion): 311 m³ Methan

Composition

Biogas production, Thermophilic, Generic, 2007 - Gas

Display

Fraction name	Total Wet Weight (kg)	TS (kg)	Energy (MJ)	CH ₄ (m ³)	CO ₂ (m ³)	CH ₄ potential (m ³)	C bio (kg)	C fossil (kg)
Sum	0	0	0	311.1	146.4	0	245.1	0
Mix	0	0	0	311.1	146.4	0	245.1	0

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische

Output Gärrest (Digestate):

Biogas production, Thermophilic, Generic, 2007 - Digestate

Fraction name	Total Wet Weight (kg)	TS (kg)	Water (kg)	VS (kg)	Ash (kg)	Energy (MJ)	CH4 (m ³)	CO2 (m ³)	CH4 potential (m ³)	C bio (kg)
Sum	2677	114.6	2562.6	107.4	7.191	2597	0	0	292.5	50.99
Water from GTW	2100	0	2100	0	0	0	0	0	0	0
Lipids from GTW	30.27	29.67	0.6	29.66	0.01497	1097	0	0	292.5	25.57
Vegetable food waste from GTW	546.9	84.88	462	77.7	7.176	1500	0	0	0	25.43

Fraction name	C bio and (kg)	C fossil (kg)	Lipids (kg)	H (kg)	O (kg)	Ca (kg)	Cl (kg)	F (kg)	K (kg)	N (kg)	Na (kg)	P (kg)	S (kg)
Sum	40.566	0.3298	299.4	43.539	88.941	0.7659	0.7728	0.0138	1.753	2.622	0.4306	0.3188	0.2539
Water from GTW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lipids from GTW	23.05	0	299.4	34.431	34.431	0	0	0	0	0	0	0	0
Vegetable food waste from GTW	17.51	0.3298	0	9.108	54.51	0.7659	0.7728	0.0138	1.753	2.622	0.4306	0.3188	0.2539

In der Kläranlage wird der Gärrest der Klärschlammfäulung entwässert. Die flüssige Phase wird behandelt und wieder der Kläranlage zugeführt. Die abgetrennten Feststoffe werden entsorgt. Durch die Co-Vergärung der Fette verringert sich der feste Gärrest, da der Abbau der organischen Substanz durch die Co-Vergärung verbessert wird (Long et al. 2012). Das Spülwasser, das mit den FA-Inhalten zusammen der Vergärung zugeführt wird, ist Frischwasser. Als vereinfachende Annahme wird daher die Behandlung des flüssigen Gärrestes aus der Co-Vergärung nicht betrachtet.

Prozess 4: Gasverluste bei der Vergärung

Laut einer Studie des BMLFUW (Parravicini et al. 2015) können Methanverluste aus Faultürmen einen bedeutsamen Beitrag zum CO₂-Footprint einer Kläranlage darstellen. Als Quelle für die Methanverluste werden vor allem die Faulschlammabzugrohre vermutet. In der Literatur ist wenig Information über das Ausmaß dieser Verluste vorhanden. Laut der Studie besteht hier noch Forschungsbedarf (Parravicini et al. 2015). Es wird abgeschätzt, dass bei der Biogaserzeugung ca. 2% Verluste (Leaking) auftreten.

Fraction name	Leaking (%)	Utilization (%)
Default	2	98

Prozess 5: Emission der Gasverluste in die Umwelt

Die 2 % Gasverluste bei der Vergärung werden in diesem Prozess als Emissionen in die Umwelt wirksam (Output Leaking = Input Emissions to the Environment).

2 % Leaking of biogas (CH4 & CO2) - Leaking

Fraction name	Total Wet Weight (kg)	TS (kg)	Energy (MJ)	CH4 (m ³)	CO2 (m ³)	CH4 potential (m ³)	C bio (kg)
Sum	0	0	0	6.222	2.928	0	4.902
Mix	0	0	0	6.222	2.928	0	4.902

Emissions-Mengen in kg pro FE:

Name	Compartment	Sub compartment	Unit	Total	Input-specific emissions
Methane, non-fossil	air	unspecified	kg	4.455	4.455
Carbon dioxide, non-fossil	air	unspecified	kg	5.753	5.753

Bei der Wirkungsabschätzung wird nur das (nicht-fossile) Methan berücksichtigt. Nicht-fossiles (biogenes) CO₂ wird bei einer ökobilanziellen Wirkungsabschätzung nicht bewertet:

Name	Compartment	Sub compartment	ILCD2011, Climate change w/o LT; midpoint; GWP100; IPCC2007 kg CO2-Eq
Sum			99.13
Methane, non-fossil	air	unspecified	99.13
Carbon dioxide, non-fossil	air	unspecified	0

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Prozess 6: BHKW

Hier werden der elektrische und der thermische Wirkungsgrad der Biogasverbrennung in Blockheizkraftwerk (BHKW) definiert und die bei der Verbrennung entstehenden Emissionen berücksichtigt. Der Prozess basiert auf den EASETECH-Prozess „Stationary engines, biogas per m³ CH₄“. Der elektrische Wirkungsgrad wird mit 39 % angesetzt. Es wird davon ausgegangen, dass die erzeugte Wärme nicht (bzw. nur intern auf der Kläranlage) genutzt werden kann. Daher werden für die erzeugte Wärme keine Gutschriften berücksichtigt. In der Sensitivitätsbetrachtung wird analysiert, welche Auswirkungen eine externe Wärmenutzung hat. Dann wird der thermische Wirkungsgrad mit 51 % angesetzt.

Input ins BHKW: 304,9 m³ Methan und 143,5 m³ CO₂.

Bei der Verbrennung des Biogases werden als klimarelevante Emissionen Methan und N₂O als „Elementary exchanges“ folgendermaßen berücksichtigt (bezogen auf m³ Methaninput):

Name	Compartment	Sub compartment	Amount	Unit	Per
Methane, non-fossil	air	unspecified	0.000434/CH ₄ _LHV	kg	m ³ CH ₄
Carbon monoxide, fossil	air	unspecified	0.00031/CH ₄ _LHV	kg	m ³ CH ₄
Nitrogen oxides	air	unspecified	0.000202/CH ₄ _LHV	kg	m ³ CH ₄

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Bei einer Dichte des Methans von ca. 0,659 kg/m³ bei 20 °C und 1 bar und einem Brennwert (LHV) von 38 MJ/Nm³ ergeben sich folgende Emissionen in die Umwelt:

LCI

Stationary engines, biogas per m3 CH4

Life cycle inventory per process

Show per material fraction

Name	Compartment	Sub compartment	Unit	Total	Input-specific emissions	Process-specific emissions
Carbon dioxide, non-fossil	air	unspecified	kg	880.7	880.7	0
Methane, non-fossil	air	unspecified	kg	0.003482	0	0.003482
Carbon monoxide, fossil	air	unspecified	kg	0.002487	0	0.002487
Nitrogen oxides	air	unspecified	kg	0.001621	0	0.001621
Sulfur dioxide	air	unspecified	kg	0.000154	0	0.000154
NMVOC, non-methane volatile organic	air	unspecified	kg	8.023E-05	0	8.023E-05
Particulates, > 10 um	air	unspecified	kg	1.749E-05	0	1.749E-05
Dinitrogen monoxide	air	unspecified	kg	1.284E-05	0	1.284E-05
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	air	unspecified	kg	1.966E-06	0	1.966E-06
Particulates, < 2.5 um	air	unspecified	kg	1.653E-06	0	1.653E-06
Zinc	air	unspecified	kg	3.37E-09	0	3.37E-09
Chromium	air	unspecified	kg	1.605E-09	0	1.605E-09
Copper	air	unspecified	kg	1.043E-09	0	1.043E-09
Mercury	air	unspecified	kg	9.628E-10	0	9.628E-10
Lead	air	unspecified	kg	9.628E-11	0	9.628E-11
Fluoranthene	air	unspecified	kg	4.814E-11	0	4.814E-11
Nickel	air	unspecified	kg	4.012E-11	0	4.012E-11
Arsenic	air	unspecified	kg	1.605E-11	0	1.605E-11
Selenium	air	unspecified	kg	1.605E-11	0	1.605E-11
Benzo(a)pyrene	air	unspecified	kg	1.043E-11	0	1.043E-11
Benzo(k)fluoranthene	air	unspecified	kg	9.628E-12	0	9.628E-12
Benzo(ghi)perylene	air	unspecified	kg	8.826E-12	0	8.826E-12
Cadmium	air	unspecified	kg	8.023E-12	0	8.023E-12
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	air	unspecified	kg	4.814E-12	0	4.814E-12
Benzene, hexachloro-	air	unspecified	kg	1.524E-12	0	1.524E-12
Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlor	air	unspecified	kg	7.702E-15	0	7.702E-15

Bei einem Input von 304,9 m³ Methan (~ 213 kg Methan) beträgt der Methanverlust bei der Verbrennung mit 0,003482 kg unter 0,002 %.

Bei der Bewertung des GWP werden nicht-fossiles (= biogenes) Methan und N₂O folgendermaßen berücksichtigt, bezogen auf die Inputmenge an Methan bzw. eine FE:

Charact. imp.

Stationary engines, biogas per m3 CH4

Life cycle impact assessment: characterised impacts

LCIA Method: ILCD recommended - 2013 F Show per process view

Name	Compartment	Sub compartment	ILCD2011, Climate change w/o LT; midpoint; GWP100; IPCC2007 kg CO2-Eq
Sum			0.0813
Methane, non-fossil	air	unspecified	0.07748
Dinitrogen monoxide	air	unspecified	0.003825

Prozess 7: Stromsubstitution

Bei der Gutschrift der Stromerzeugung ergeben folgende Prozesse folgende Gutschriften (-1302 und -340 kg CO₂-Eq):

Charact. imp.	
AD_Electricity substitution DK	
Life cycle impact assessment: characterised impacts	
LCIA Method:	ILCD recommended - 2013 F
Show per substance view	
Name	ILCD2011, Climate change w/o LT; midpoint; GWP100; IPCC2007 kg CO ₂ -Eq
Sum	-5174
electricity, high voltage, production mix; AT	-339.6
Electricity from natural gas, DK 2010	-608.8
Electricity Mix; < 1kV (low voltage) for final consumer, 2008, EU-27. ELCD	-614.9
electricity production, oil; AT	-1049
electricity production, hard coal; AT	-1259
Marginal Electricity Consumption incl. Fuel Production, Coal, Energy Quality, DK, kWh, 2006	-1302

Zunächst wird für die Berücksichtigung der Stromgutschriften die „Marginal Electricity Consumption incl. Fuel Production, Coal, Energy Quality, DK, kWh, 2006“ verwendet, da davon ausgegangen wird, dass der erzeugte Strom aus Biogas (= erneuerbare Energie) „schlechten“ Strom aus Kohle (und Erdöl) verdrängt. Dadurch ergeben sich hohe Gutschriften für den erzeugten Strom. In der Sensitivitätsanalyse wird betrachtet, wie sich die Verwendung anderer Prozesse auf das Ergebnis auswirkt.

Informationen zum verwendeten Substitutionsprozess:

Marginal Electricity Consumption incl. Fuel Production, Coal, Energy Quality, DK, kWh, 2006:

Informationen zur Technologie: Production of 1 kWh electricity as an average of seven Danish power plants (six combined heat and power (CHP) plants, one plant producing power only). These plants are identified as the ones capable of adjusting their electricity production to the demands of the market, thus being the "marginal" plants.

INPUT: Coal (main fuel) and oil. OUTPUT: 1 kWh electricity delivered to the consumer. The LCI includes a 2% loss in transmission and 5% loss in distribution.

Prozess 8: Wärmesubstitution

Zunächst werden keine Gutschriften für die Wärmeerzeugung berücksichtigt, da die auf der Kläranlage erzeugte Wärme normalerweise intern genutzt wird (daher auch kein Wärmeverbrauch für die Erwärmung des Fermenter-Inputs etc. berücksichtigt), aber darüber hinaus nicht genutzt werden kann. In der Sensitivitätsanalyse wird betrachtet, wie sich die Berücksichtigung der Wärmeerzeugung als Gutschrift auswirkt.

Gesamtergebnis des Szenario 1 - Co-Vergärung

Bezogen auf eine FE ergibt sich beim Szenario 1 insgesamt eine Umweltentlastung in Höhe von -1118 kg CO₂-Äq durch die Nutzung der Fettabscheiderinhalte als Co-Substrat.

Charact. imp.	
Co-digestion	
Life cycle impact assessment: characterised impacts	
LCIA Method:	ILCD recommended - 2013 F Show per substance view
Name	ILCD2011, Climate change w/o LT; midpoint; GWP100; IPCC2007 kg CO ₂ -Eq
Sum	-1118
Emission der Gasverluste in die Umwelt	99.13
Co-Vergärung in der Kläranlage	56.97
Sammlung und Transport	28.1
BHKW	0.0813
Potentielle Wärmesubstitution	0
Stromsubstitution	-1302

Die größte Umweltwirkung hat die Gutschrift für die Substitution von fossilem Strom durch den im BHKW erzeugten Strom (-1300 kg CO₂-Eq). Die höchste Umweltbelastung entsteht durch die Methanverluste bei der Vergärung (99 kg CO₂-Eq), gefolgt vom Energieverbrauch der Co-Vergärung (57 kg CO₂-Eq).

Szenario 2 – Biodiesel

Bei diesem Szenario wird die Sammlung der Fettabscheiderinhalte und der Transport zur Kläranlage, die anschließende Trennung der Fettabscheiderinhalte in nicht emulgierte Fette und übrige Bestandteile (Speisereste und Spülwasser), die Verwertung der Fette zur Biodieselerzeugung, sowie die Verwertung der übrigen Bestandteile der Fettabscheiderinhalte auf der Kläranlage zur Biogasgewinnung und anschließender Stromerzeugung im BHKW modelliert.

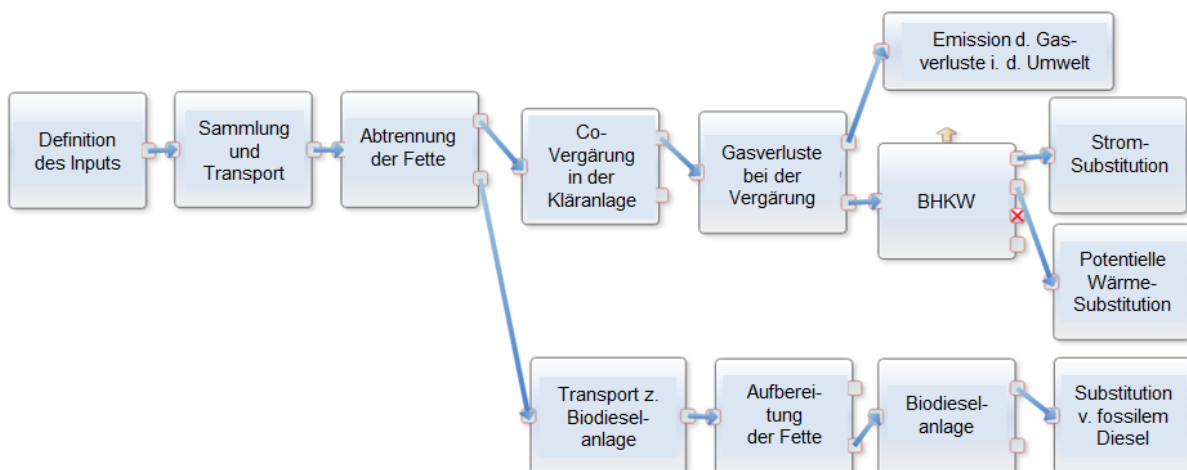


Abbildung 41: Übersicht über die Modellierung des Szenarios – Biodiesel in EASETECH

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Prozess 1: Definition des Inputs

Die Zusammensetzung des Inputs entspricht der Modellierung im Szenario 1 -Co-Vergärung.

Prozess 2: Sammlung und Transport

Die Modellierung von Sammlung und Transport entspricht der Modellierung im Szenario 1 - Co-Vergärung.

Prozess 3: Abtrennung der Fette

Die Abtrennung der Fette von den Fettabscheiderinhalten auf der Kläranlage erfolgt durch eine Zentrifuge. Die Trennschärfe wird wie folgt angenommen:

Material transfer
Separation of lipids
Mass transfer to outputs
Define transfer coefficients to each output column
Add fraction

Fraction name	Water & Solids (%)	Lipids (%)
Vegetable food waste	100	0
Lipids from GTW	10	90
Water from GTW	99	1
Default	0	100

Der Stromverbrauch der Zentrifuge wird mit ca. 1 kWh/m³ angenommen. Die Dichte des Inputs beträgt ungefähr 980 kg/m³ (Rak 2011). Damit ergibt sich ein Stromverbrauch von 1/980 kWh pro kg Inputmaterial.

Process exchanges
Separation of lipids
External processes
Add external process

Name	Amount	Unit	Per	Comment
electricity, high voltage, production mix, AT	1/980	kWh	kg Total Wet Weight	Stromverbrauch der Zentrifuge ca. 1 kWh/m ³ mit Dichte 980 kg/m ³

Output „Water & Solids“:

Die Fraktion „Water & solids“ wird als Co-Substrat dem Faultrum der Kläranlage zugegeben. Sie setzt sich folgendermaßen zusammen:

Composition
Separation of lipids - Water & Solids
Display: Default

Fraction name	Total Wet Weight (kg)	TS (kg)	Water (kg)	VS (kg)	Ash (kg)	Energy (MJ)
Sum	2709	167.94	2541.06	160.8	7.177	3633.18
Water from GTW	2079	0	2079	0	0	0
Lipids from GTW	30	29.94	0.06	29.94	0.001497	1107.78
Vegetable food waste from GTW	600	138	462	130.824	7.176	2525.4

Die Modellierung der Vergärung erfolgt entsprechend der Modellierung in Szenario 1 - Co-Vergärung. Im Szenario 2 werden nach Abtrennung der Fette aus der Schlacke 68,5 m³ CH₄ erzeugt (ca. 22% der in Szenario 1 erzeugten 311 m³ Methan,). Die TS-Menge, die nach

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Abtrennung der Fette in die Co-Vergärung geht, beträgt mit 186 kg 38% der Gesamt-TS-Menge.

Output „Lipids“:

Die Fraktion „Lipids“ wird zur Biodieselherstellung verwendet. Sie setzt sich folgendermaßen zusammen:

Fraction name	Total Wet Weight (kg)	TS (kg)	Water (kg)	VS (kg)	Ash (kg)	Energy (MJ)
Sum	291	269.46	21.54	269.4	0.01347	9970.02
Water from GTW	21	0	21	0	0	0
Lipids from GTW	270	269.46	0.54	269.4	0.01347	9970.02
Vegetable food waste from GTW	0	0	0	0	0	0

Prozess 4: Transport zur Biodieselanlage

Die abgetrennten Fette (= Fraktion „Lipids“) werden zur Biodieselanlage transportiert. Für die Modellierung des Transports der abgetrennten Fette zur Biodieselanlage werden folgende Annahmen getroffen:

- Die Transportdistanz von der Kläranlage zur Biodieselanlage wird mit 600 km für einen Transport innerhalb Österreichs großzügig abgeschätzt (ungefähr die max. Transportdistanz innerhalb Österreichs, vgl.: Entfernung von Bregenz nach Wien ca. 620 km).
- Für den Transport wird ein Dieselfahrzeug der Klasse Euro 5 mit einem Ladevolumen von 10 m³ verwendet. (Prozess aus der EASETECH-Datenbank: „Truck, 7.5t-12t, Euro5, highway“).

Darstellung in EASETECH:

The screenshot shows the 'Process exchanges' window for 'Transport to Biodiesel Plant'. It features a section for 'External processes' with an 'Add external process' button. Below this is a table with columns for Name, Amount, Unit, and Per. One entry is visible: 'Truck, 7.5t-12t, Euro5, highway' with an amount of 600, unit 'kg*km', and 'Per' 'kg Total Wet Weight'. There are also 'View' and 'Documentation' buttons next to the entry.

Name	Amount	Unit	Per
Truck, 7.5t-12t, Euro5, highway	600	kg*km	kg Total Wet Weight

Prozess 5: Aufbereitung der Fettabscheiderfette

Die Aufbereitung der abgetrennten Fette von den Fettabscheiderinhalten und die Biodieselerzeugung wurden mit Unterstützung der BDI - BioEnergy International AG modelliert, die entsprechende Anlagen zur Biodieselerzeugen aus Inputmaterial einer vergleichbaren Qualität in großtechnischem Maßstab in Betrieb genommen hat. Die Biodieselproduktion erfolgt in diesen Anlagen nach der superkritischen Methode, ohne Katalysator unter der Nutzung von superkritischem Methanol (vgl. Superkritische Biodieselproduktion in Kapitel 3.4.1). In Abbildung 42 sind die Verfahrensschritte der BDI-Technologie schematisch dargestellt.

BDI BioDiesel *Multi-Feedstock Technology*

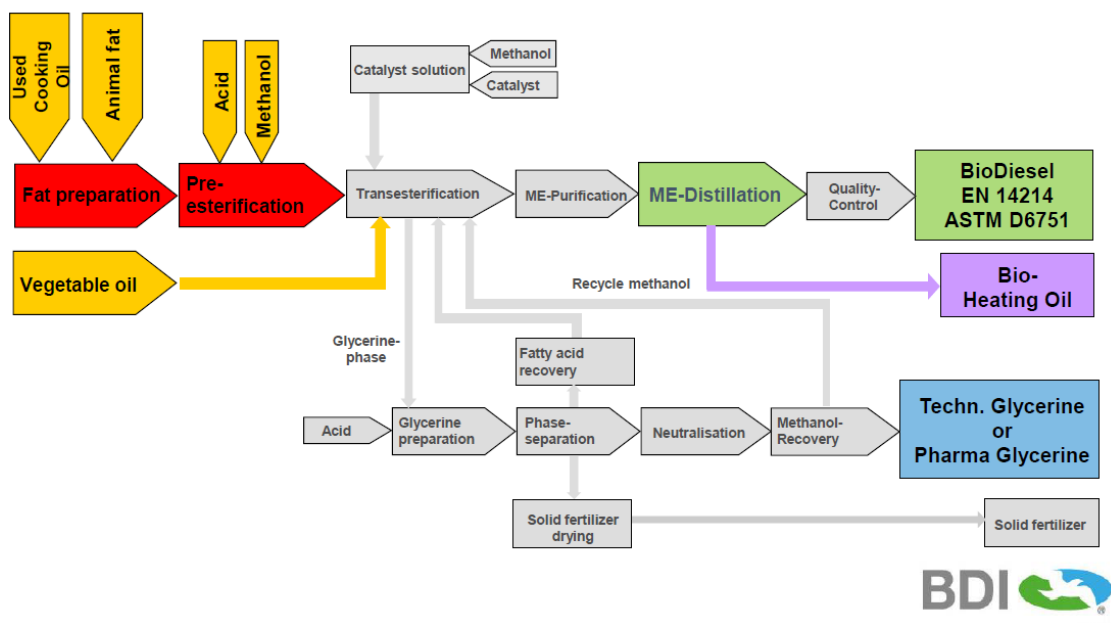


Abbildung 42: Multi-Feedstock Technologie von BDI zur Biodieselherstellung

BDI ist Markt- und Technologieführer für den Bau von Biodieselanlagen nach dem von ihnen entwickelten Multi-Feedstock Verfahren. Diese patentierte Technologie wurde entwickelt, um eine breite Palette von Rohstoffen wie Tierfett, Altspeiseöl, Fettabscheiderfett aber auch pflanzliche Öle in hochwertigen Biodiesel zu verwandeln. Für die Verarbeitung von Rohstoffen mit hohen Anteilen an freien Fettsäuren hat BDI die RepCat-Technologie entwickelt. Dabei reagieren die freien Fettsäuren während der Veresterung mit Methanol zu Methylester. Das RepCat-Verfahren kann Rohmaterial mit einem Anteil von bis zu 100 % freie Fettsäuren (FFA) verarbeiten (vgl. auch www.bdi-bioenergy.com/de-bdi_biodiesel-22.html).

Die Modellierung der Aufbereitung der Fette erfolgt in EASETECH in zwei Schritten, um auch von der Fraktion „Lipids from GTW“ das gesamte Wasser abzutrennen.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

1. Schritt: 2,5 % Verlust an Fett bei der Aufbereitung (Angabe von BDI):

Material transfer
Refining of Grease Trap Fat (1) (Loss of 2.5 % of lipids)

Mass transfer to outputs
Define transfer coefficients to each output column

Add fraction

Fraction name	purified GT fat (%)	Loss of lipids (2.5%)
Water from GTW	100	0
Lipids from GTW	97.5	2.5

Was mit dem abgetrennten Fett geschieht, wird in der Ökobilanz wegen Geringfügigkeit vernachlässigt.

2. Schritt: Abtrennen des Wassers aus der Fraktion „Lipids from GTW“:

Material transfer
Refining of Grease Trap Fat (2) - Removal of water

Water content
Define the new water content

Add fraction

Fraction name	% of wet weight
Lipids from GTW	0
Default	0

Es werden 21,53 kg Wasser abgetrennt. Das sind 7,6 % der Inputmasse. Was mit diesem Wasser geschieht, wird in der Ökobilanz wegen Geringfügigkeit vernachlässigt.

Der Verbrauch von Strom, Wärme und Phosphorsäure für die Aufbereitung der Fette (Refining) wird entsprechend der Angaben von BDI modelliert.

Modellierung in EASETECH durch externe Prozesse:

Process exchanges
Refining of Grease Trap Fat (1) (Loss of 2.5 % of lipids)

External processes
Add external process

Name	Amount	Unit	Per
electricity, high voltage, production mix; AT	0.0014*LHV_GreaseTrapFat/3.6	kWh	kg Lipids
Heat from natural gas, DK 2010	0.002853*LHV_GreaseTrapFat	MJ	kg Lipids
phosphoric acid production, dihydrate process; RoW	0.0000135*LHV_GreaseTrapFat	kg	kg Lipids

Umrechnungen der Angaben von BDI:

Stromverbrauch

laut BDI: 0,0014 MJElektr./MJOil,

Heating value oil = 37 MJOil/kg = LHV_GreaseTrapFat

1 kWh = 3,6 MJ / 1 MJ = 1/3,6 kWh

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Stromverbrauch in EASETECH:

$$0,0014 \text{ MJElekt.}/\text{MJOil} * 37 \text{ MJOil}/\text{kg} = 0,0014 * 37 \text{ MJElekt.}/\text{kg} = 0,0014 * 37 / 3,6 \text{ kWh}/\text{kg}$$

Wärmeverbrauch

laut BDI: 0,002853 MJ./MJOil,

Wärmeverbrauch in EASETECH:

$$0,002853 \text{ MJ.}/\text{MJOil} * 37 \text{ MJOil}/\text{kg} = 0,002853 * 37 \text{ MJ}/\text{kg}$$

Phosphorsäureverbrauch

laut BDI:0,0000135 kg/MJOil

Phosphorsäureverbrauch in EASETECH:

$$0,0000135 \text{ kg}/\text{MJOil} * 37 \text{ MJOil}/\text{kg} = 0,0000135 * 37 \text{ kg}/\text{kg}$$

Output der Aufbereitung (nach 2 Prozessschritten):

Fraction name	Total Wet Weight (kg)	TS (kg)	Water (kg)	VS (kg)	Ash (kg)	Energy (MJ)	CH4 (m ³)	CO2 (m ³)	CH4 potential (m ³)	C bio (kg)	C bio and (kg)	C fossil (kg)	Lipids (kg)	H (kg)	O (kg)
Sum	262.7	262.7	0	262.7	0.01314	9721	0	0	256.7	202.3	202.3	0	262.7	30.21	30.21
Water from GTW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lipids from GTW	262.7	262.7	0	262.7	0.01314	9721	0	0	256.7	202.3	202.3	0	262.7	30.21	30.21
Vegetable food waste from GTW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

256,7 kg aufbereitetes Fett werden in der Biodieselanlage verarbeitet.

Prozess 6: Biodieselanlage

Der Verbrauch von Strom, Wärme, Methanol, Kaliumhydroxid (KOH), Schwefelsäure und Phosphorsäure bei der Biodieselerzeugung und die Entstehung von Biodiesel, technischem Glycerin und K₂SO₄-Dünger werden entsprechend der Angaben von BDI modelliert. Durch die Wahl von Kaliumhydroxid als Katalysator und Schwefelsäure als Neutralisationsmittel kann der getrocknete Feststoff als Düngemittel verkauft werden.

Pro 1000 kg Input an Fett entstehen laut BDI 995,2 kg Biodiesel (FAME), d.h. der Verlust an Fett bei der Biodieselerzeugung beträgt 0,48 %.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Modellierung in EASETECH durch externe Prozesse:

Process exchanges					
Biodiesel Plant					
External processes					
Add external process					
	Name	Amount	Unit	Per	Comment
X	View Documentation electricity, high voltage, production mix; AT	$0.00978 \cdot 0.9952 \cdot \text{LHV_FAME} / 3.6$	kWh	kg Lipids	Stromverbrauch für den Prozess
X	View Documentation Heat from natural gas, DK 2010	$0.07075 \cdot 0.9952 \cdot \text{LHV_FAME}$	MJ	kg Lipids	Wärmeverbrauch für den Prozess
X	View Documentation Marginal Electricity Consumption incl. Fuel Production, Coal, E	$-1 \cdot 0.0293 \cdot 0.422 \cdot 0.39 \cdot \text{CH}_4 \cdot \text{LHV} / 3.6$	kWh	kg Lipids	Gutschrift für techn. Glycerin (Vergärung = Stromerzeugung)
X	View Documentation methanol production; GLO	0.1082	kg	kg Lipids	Methanolverbrauch
X	View Documentation phosphoric acid production, dihydrate process; RoW	0.001	kg	kg Lipids	Phosphorsäure-Verbrauch
X	View Documentation potassium hydroxide production; RER	0.0091	kg	kg Lipids	KOH-Verbrauch
X	View Documentation potassium sulfate production; RER	-0.0275	kg	kg Lipids	Gutschrift für K ₂ SO ₄ -Dünger
X	View Documentation sulfuric acid production; RER	0.014	kg	kg Lipids	Schwefelsäure-Verbrauch

Umrechnungen der Angaben von BDI:

Stromverbrauch

laut BDI: $0,00978 \text{ MJ}_{\text{Elektr.}} / \text{MJ}_{\text{FAME}}$,

heating value FAME = $37,2 \text{ MJ}_{\text{FAME}} / \text{kg}_{\text{FAME}} = \text{LHV_FAME}$

Output an FAME (= Biodiesel): $0,9952 \text{ kg}_{\text{FAME}} / \text{kg}_{\text{Oil}}$

$1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ} / 1 \text{ MJ} = 1/3,6 \text{ kWh}$

Stromverbrauch in EASETECH:

$0,00978 \text{ MJ}_{\text{Elektr.}} / \text{MJ}_{\text{FAME}} \cdot 37,2 \text{ MJ}_{\text{FAME}} / \text{kg}_{\text{FAME}} = 0,00978 \cdot 37,2 \text{ MJ}_{\text{Elektr.}} / \text{kg}_{\text{FAME}}$

$0,00978 \cdot 37,2 \text{ MJ}_{\text{Elektr.}} / \text{kg}_{\text{FAME}} \cdot 0,9952 \text{ kg}_{\text{FAME}} / \text{kg}_{\text{Oil}} = 0,00978 \cdot 37,2 \cdot 0,9952$
 $\text{MJ}_{\text{Elektr.}} / \text{kg}_{\text{Oil}}$

$0,00978 \cdot 37,2 \cdot 0,9952 \text{ MJ}_{\text{Elektr.}} / \text{kg}_{\text{Oil}} = 0,00978 \cdot 37,2 \cdot 0,9952 / 3,6 \text{ kWh} / \text{kg}_{\text{Oil}}$

$= 0,362 / 3,6 \text{ kWh} / \text{kg}_{\text{Oil}}$

Wärmeverbrauch

laut BDI: $0,07075 \text{ MJ} / \text{MJ}_{\text{FAME}}$,

Wärmeverbrauch in EASETECH:

$0,07075 \text{ MJ} / \text{MJ}_{\text{FAME}} \cdot 37,2 \text{ MJ}_{\text{FAME}} / \text{kg}_{\text{FAME}} = 0,07075 \cdot 37,2 \text{ MJ} / \text{kg}_{\text{FAME}}$

$0,07075 \cdot 37,2 \text{ MJ} / \text{kg}_{\text{FAME}} \cdot 0,9952 \text{ kg}_{\text{FAME}} / \text{kg}_{\text{Oil}} = 0,07075 \cdot 37,2 \cdot 0,9952 \text{ MJ} / \text{kg}_{\text{Oil}}$

$= 2,619 \text{ MJ} / \text{kg}_{\text{Oil}}$

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Gutschrift für das technische Glycerin:

Laut BDI entstehen pro 1 kg Fett-Input 0,0293 kg technisches Glycerin (= 2,93% des Inputmaterials). Laut Henkelmann et al. (2018) entstehen bei der Vergärung von Glycerin ~ 0,421 m³ CH₄ /kg Glycerin.

$$\rightarrow (0,0293 \text{ kg Glycerin} * 0,421 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg Glycerin}) / \text{kg Fett} = 0,02344 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg Fett}$$

Es wird die Gutschrift für den Strom, der aus dem Methan erzeugt wird, für das Glycerin angerechnet, mit einem Wirkungsgrad von 0,39 %. Der Heizwert von Methan beträgt: CH₄_LHV = 38 MJ /Nm³

Es ergibt sich die Formel: $-1 * 0.0293 * 0.421 * 0.39 * \text{CH}_4_LHV / 3.6 \text{ kWh} / \text{kg Lipids}$

Vereinfachung, da Transporte etc. für das Glycerin nicht berücksichtigt werden.

Umweltwirkung der externen Prozesse:

Charact. imp.	
Biodiesel Plant	
Life cycle impact assessment: characterised impacts	
LCIA Method:	ILCD recommended - 2013 F
Show per substance view	
Name	ILCD2011, Climate change w/o LT; midpoint; GWP100; IPCC2007 kg CO2-Eq
Sum	17.74
methanol production; GLO	15.89
Heat from natural gas, DK 2010	13.91
electricity, high voltage, production mix; AT	7.149
potassium hydroxide production; RER	4.43
sulfuric acid production; RER	0.3842
phosphoric acid production, dihydrate process; RoW	0.272
potassium sulfate production; RER	-10.45
Marginal Electricity Consumption incl. Fuel Production, Coal, Energy Quality, DK, kWh, 2006	-13.84

Outputs der Biodieselanlage:

Biodiesel (FAME):

Composition															
Biodiesel Plant - FAME															
Display: Default															
Fraction name	Total Wet Weight (kg)	TS (kg)	Water (kg)	VS (kg)	Ash (kg)	Energy (MJ)	CH4 (m³)	CO2 (m³)	CH4 potential (m³)	C bio (kg)	C bio and fossil (kg)	Lipids (kg)	H (kg)	O (kg)	
Sum	261.5	261.5	0	261.4	0.01307	9674	0	0	255.4	201.3	201.3	0	261.4	30.07	30.07
Water from GTW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Lipids from GTW	261.5	261.5	0	261.4	0.01307	9674	0	0	255.4	201.3	201.3	0	261.4	30.07	30.07
Vegetable food waste from GTW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Residues = Loss of input fat (0,48 %):

Fraction name	Total Wet Weight (kg)	TS (kg)	Water (kg)	VS (kg)	Ash (kg)	Energy (MJ)	CH4 (m ³)	CO2 (m ³)	CH4 potential (m ³)	C bio (kg)	C bio and (kg)	C fossil (kg)	Lipids (kg)
Sum	1.261	1.261	0	1.261	6.305E-05	46.66	0	0	1.232	0.971	0.971	0	1.261
Water from GTW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lipids from GTW	1.261	1.261	0	1.261	6.305E-05	46.66	0	0	1.232	0.971	0.971	0	1.261
Vegetable food waste from GTW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Vereinfachung: Die 0,48 % Verluste des Inputfetts werden nicht weiter modelliert.

Prozess 7: Substitution von fossilem Diesel

In der Modellierung wird der in EASETECH enthaltene Prozess „Production and combustion of of diesel oil in truck, EU2, 1998“ als Äquivalenzsystem für die Substitution des fossilen Diesels verwendet. Dieser Prozess berücksichtigt für den substituierten fossilen Diesel -3,6 kg CO₂-Äq pro kg Biodiesel. Die Verbrennung des Biodiesels wird bei der Modellierung nicht berücksichtigt, da dabei biogenes CO₂ entsteht.

Abbildung in EASETECH:

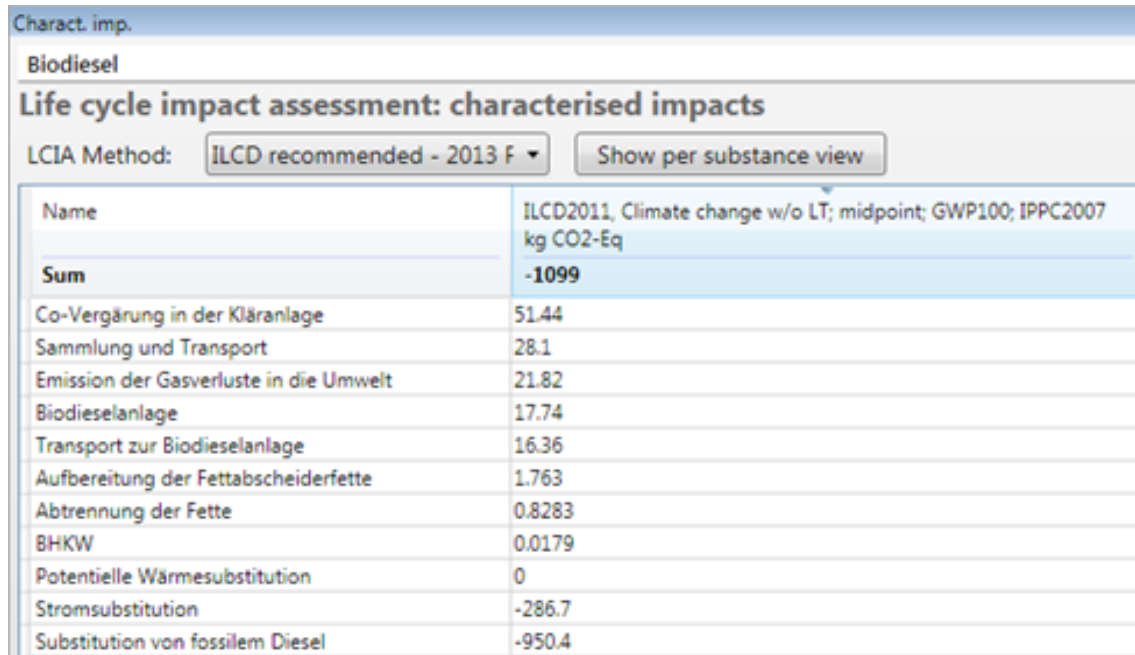
Name	Amount	Unit	Per
Production and Combustion of Diesel Oil in Truck, EU2, 1998	-1	kg	kg Total Wet Weight

Die Substitution von 261,5 kg fossilem Diesel durch Biodiesel erzeugt eine Umweltentlastung von -950,4 kg CO₂-Eq.

Name	Value
Sum	-950.4
Production and Combustion of Diesel Oil in Truck, EU2, 1998	-950.4

Gesamtergebnis des Szenario 2 – Biodiesel

Bezogen auf eine FE ergibt sich beim Szenario 2 insgesamt eine Umweltentlastung in Höhe von -1099 kg CO₂-Eq. durch die Nutzung der Fettabscheiderfette zur Biodieselerzeugung und durch die Verwertung der übrigen Bestandteile der Fettabscheiderinhalte als Co-Substrat.



Charact. imp.
Biodiesel

Life cycle impact assessment: characterised impacts

LCIA Method: ILCD recommended - 2013 F Show per substance view

Name	ILCD2011, Climate change w/o LT; midpoint; GWP100; IPCC2007 kg CO ₂ -Eq
Sum	-1099
Co-Vergärung in der Kläranlage	51.44
Sammlung und Transport	28.1
Emission der Gasverluste in die Umwelt	21.82
Biodieselanlage	17.74
Transport zur Biodieselanlage	16.36
Aufbereitung der Fettabscheiderfette	1.763
Abtrennung der Fette	0.8283
BHKW	0.0179
Potentielle Wärmesubstitution	0
Stromsubstitution	-286.7
Substitution von fossilem Diesel	-950.4

Die größte Umweltwirkung hat die Gutschrift für die Substitution von fossilem Diesel (-950 kg CO₂-Eq), gefolgt von der Gutschrift für die Stromerzeugung aus der Vergärung der abgetrennten übrigen Bestandteile der Fettabscheiderinhalte (-287 kg CO₂-Eq).

Im Prozess „Biodieselanlage“ sind neben Umweltbelastungen in Höhe 42 kg CO₂-Eq durch den Verbrauch von Energie (Wärme und Strom) und den Verbrauch von Chemikalien (Methanol, Kaliumhydroxid, Schwefelsäure und Phosphorsäure) auch Gutschriften für die bei der Biodieselerzeugung entstehenden Nebenprodukte technisches Glycerin (-14 kg CO₂-Eq) und K₂SO₄-Dünger (-10 kg CO₂-Eq) enthalten.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Biodieselanlage

Life cycle impact assessment: characterised impacts

LCIA Method: **ILCD recommended - 2013 F** Show per substance view

Name	ILCD2011, Climate change w/o LT; midpoint; GWP100; IPCC2007 kg CO2-Eq
Sum	17.74
methanol production; GLO	15.89
Heat from natural gas, DK 2010	13.91
electricity, high voltage, production mix; AT	7.149
potassium hydroxide production; RER	4.43
sulfuric acid production; RER	0.3842
phosphoric acid production, dihydrate process; RoW	0.272
potassium sulfate production; RER	-10.45
Marginal Electricity Consumption incl. Fuel Production, Coal	-13.84

Die höchste Lastschrift entsteht bei der Co-Vergärung der übrigen Bestandteile der Fettabscheiderinhalte (Schlacke und Wasser) (51 kg CO₂-Eq). Diese Lasten entstehen durch den Stromverbrauch für Pumpen und Ventilatoren, da es sich insgesamt um eine große Menge (Input = 2709 kg) handelt.

Vergleich der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

In Abbildung 43 werden die Ergebnisse der Treibhausgasbilanz der beiden untersuchten Verwertungsoptionen für die Fettabscheiderinhalte dargestellt, und zwar bezogen auf eine Tonne Fettabscheiderinhalt (definierte Mischung inklusive Spülwasser) und nicht auf die funktionelle Einheit (FE = 3 Tonnen Fettabscheiderinhalte).

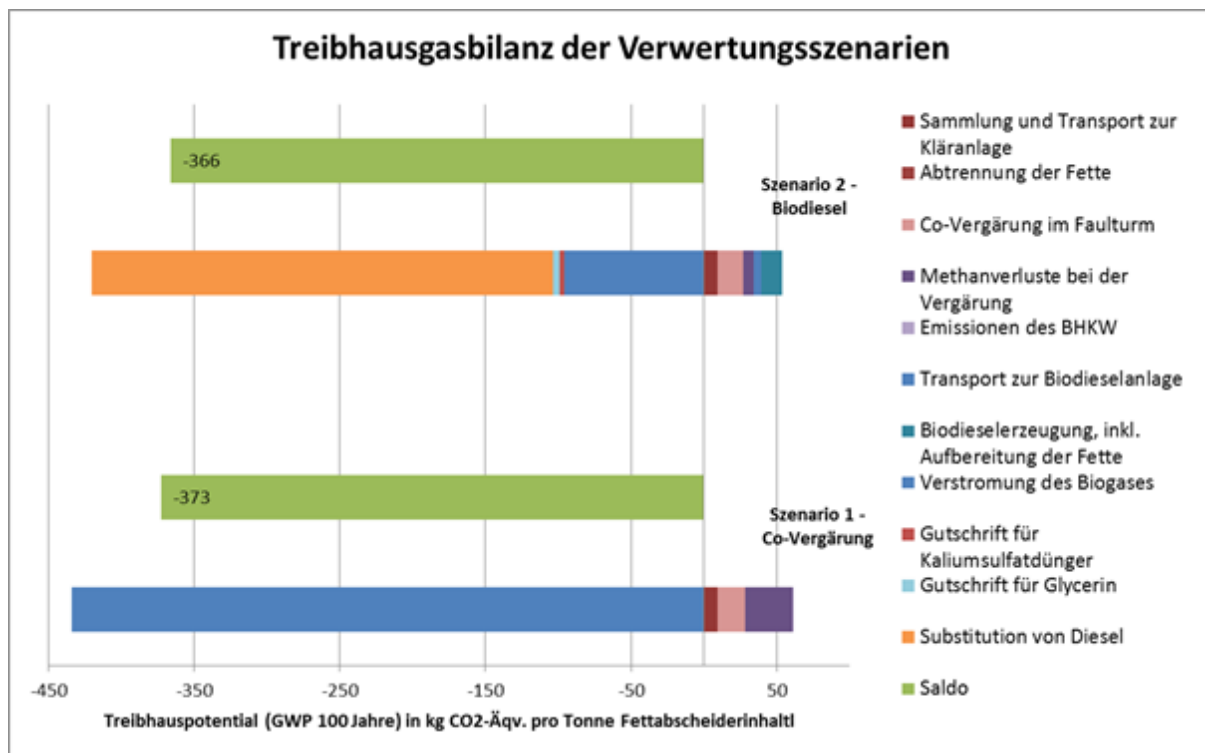


Abbildung 43: Treibhausgasbilanz der Verwertungsszenarien bezogen auf 1 Tonne Fettabscheiderinhalt

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Auf der rechten Skala (positiver Zahlenbereich) sind die Umweltbelastungen aufgetragen, die durch die Untersuchungssysteme entstehen. Die linke Skala (negativer Zahlenbereich) zeigt die Umweltentlastungen, die beispielsweise durch die Substitution von Strom und Diesel generiert werden. Beide Szenarien zeigen im Gesamtergebnis eine ökologische Entlastung (in der Abbildung dargestellt als Saldo).

Auf der Seite der Umweltbelastungen stehen beim Szenario der Co-Vergärung Sammlung und Transport zur Kläranlage, Co-Vergärung im Faulturm, Methanverluste bei der Vergärung und Emissionen des BHKW. Beim Szenario Biodiesel kommen zusätzlich Abtrennung der Fette, Transport zur Biodieselanlage, Aufbereitung der Fette in der Biodieselanlage und die Biodieselerzeugung hinzu.

Auf Seiten der Umweltentlastungen steht beim Szenario der Co-Vergärung die Gutschrift für die Erzeugung von Strom im BHKW aus dem Biogas. Beim Szenario Biodiesel kommen zusätzlich Gutschriften für die Erzeugung von Kaliumsulfat-Dünger, für die Vergärung und anschließende Verstromung des Glycerins und vor allem für die Substitution von fossilem Diesel hinzu.

Die Summe aus Umweltbelastungen und Umweltentlastungen ist in beiden Szenarien ungefähr gleich. Bei der Co-Vergärung sind die Umweltentlastungen etwas größer, dafür sind aber auch die Umweltbelastungen größer. In der Sensitivitätsanalyse werden die relevantesten Einflüsse auf dieses Gesamtergebnis näher betrachtet.

Tabelle 5: Treibhausgasbilanz der Szenarien Co-Vergärung und Biodieselerzeugung [Treibhauspotential (GWP 100 Jahre) in kg CO₂-Eq pro Tonne Fettabscheiderinhalt]

	Szenario 1: Co-Vergärung	Szenario 2: Biodiesel
Sammlung und Transport zur Kläranlage	9	9
Abtrennung der Fette		0.3
Co-Vergärung im Faulturm	19	17
Methanverluste bei der Vergärung	33	7
Emissionen des BHKW	0.03	0.01
Verstromung des Biogases	-434	-96
Transport zur Biodieselanlage		5
Aufbereitung der Fette		1
Biodieselerzeugung		14
Gutschrift für Kaliumsulfat-Dünger		-3
Gutschrift für Glycerin		-5
Substitution von Diesel		-317
Saldo	-373	-366

3.5.4 Sensitivitätsanalyse

Beitragsanalyse (contribution analysis)

Im ersten Schritt der Sensitivitätsanalyse wird untersucht, welche Prozesse das Ergebnis am meisten beeinflussen (contribution analysis).

Tabelle 6: Einfluss der einzelnen Prozesse auf das Gesamtergebnis der Szenarien

	Szenario 1: Co-Vergärung		Szenario 2: Biodiesel	
	GWP in kg CO ₂ - Eq /Tonne Fettabscheider- inhalt	Anteil in %	GWP in kg CO ₂ - Eq /Tonne Fettabscheider- inhalt	Anteil in %
Sammlung und Transport	9	1.9	9	2.0
Abtrennung der Fette			0.3	0.1
Co-Vergärung im Faulturm	19	3.8	17	3.6
Methanverluste bei der Vergärung	33	6.7	7	1.5
Emissionen des BHKW	0.03	0.01	0.01	0.001
Verstromung des Biogases	-434	87.6	-96	20.1
Transport zur Biodieselanlage			5	1.1
Aufbereitung der Fette			1	0.1
Biodieselerzeugung			14	3.0
Gutschrift für Kaliumsulfatdünger			-3	0.7
Gutschrift für Glycerin			-5	1.0
Substitution von Diesel			-317	66.7
Saldo	-373	100	-366	100

Beim Szenario 1 hat die Stromsubstitution mit fast 88 % den größten Einfluss, gefolgt von den Methanverlusten bei der Vergärung (7 %), dem Energieverbrauch der Vergärungsanlage (4 %) und den Transporten (2%).

Beim Szenario 2 hat die Substitution des fossilen Diesels mit 67 % den größten Einfluss, gefolgt von Stromsubstitution aus der Vergärung (20 %), dem Energieverbrauch der Vergärungsanlage (3,6 %), dem Energieverbrauch der Biodieselanlage (3 %) und den Transporten (2%).

Szenarienanalyse (scenario analysis)

Die Szenarienanalyse untersucht, welchen Effekt eine einzelne Änderung im Szenario auf das Ergebnis hat. Wie in Kapitel "Äquivalenzsysteme" (S.54) gezeigt, beeinflusst die Wahl des Äquivalenzsystems das Ergebnis, und das insbesondere, wenn der Substitutionsprozess einen großen Einfluss auf das Gesamtergebnis hat. Daher werden im Folgenden die Gesamtergebnisse für beide Szenarien mit unterschiedlichen Prozessen für die Stromsubstitution verglichen.

Variation des Äquivalenzsystems zur Strombereitstellung

Da die Substitution des Stroms vor allem in Szenario 1 einen sehr großen Einfluss auf das Gesamtergebnis hat, wird im Folgenden das Äquivalenzsystem zur Strombereitstellung variiert.

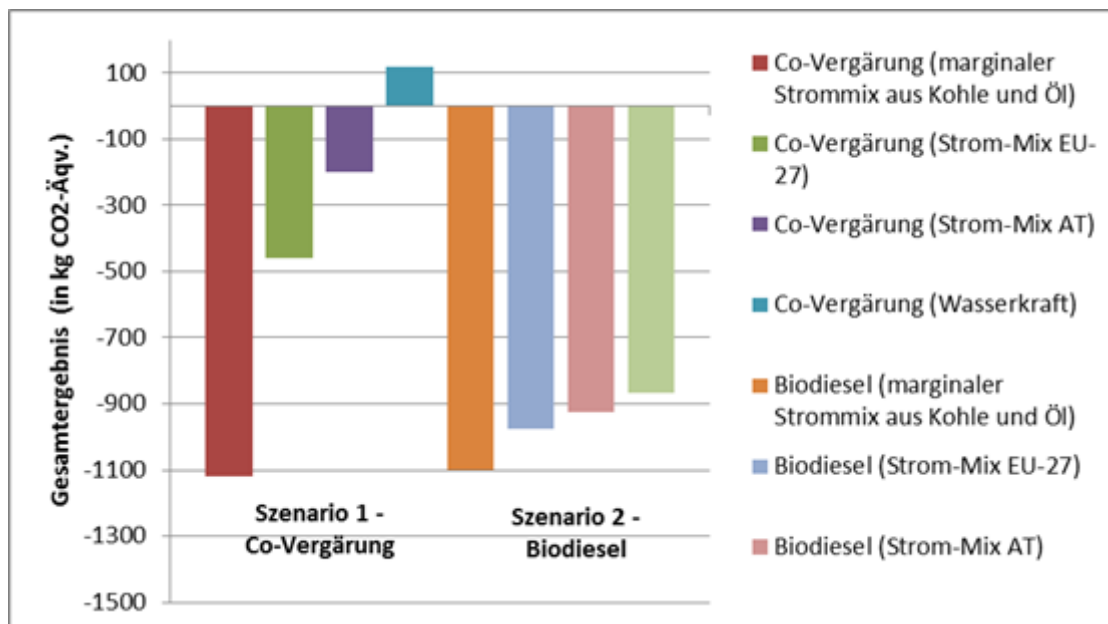


Abbildung 44: Variation des Äquivalenzsystems zur Strombereitstellung

Man erkennt, dass die Wahl des Äquivalenzsystems einen sehr großen Einfluss auf das Gesamtergebnis hat. Sobald nicht der marginale Strommix als Äquivalenzsystem genommen wird, ist das Gesamtergebnis vom Szenario 2 – Biodiesel deutlich besser als von Szenario 1 – Co-Vergärung. Wenn als Äquivalenzsystem zur Strombereitstellung Wasserkraft verwendet wird, ist das Gesamtergebnis bei Szenario 1 sogar positiv, d.h. es kommt insgesamt zu einer Umweltbelastung durch diese Verwertungsoption. Das liegt daran, dass der Einfluss der anderen Prozesse stark steigt, wenn der Einfluss der Stromsubstitution sinkt.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

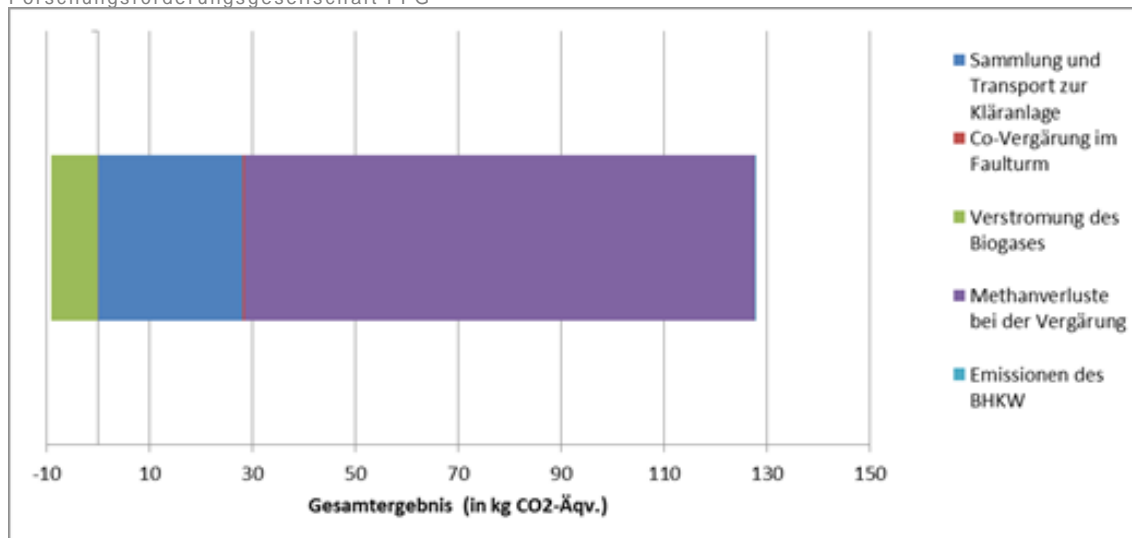


Abbildung 45: Szenario 1 – Co-Vergärung mit der Äquivalenzsystem Wasserkraft zur Stromsubstitution

Relevant werden dann vor allem die Methanverluste der Biogasanlage und auch die Transportaufwendungen.

Berücksichtigung von Gutschriften für im BHKW erzeugte Wärme

Unter der Annahme, dass auch die Wärme genutzt werden kann, die bei der Verbrennung des Biogases im BHKW erzeugt wird, verändern sich die Ergebnisse. Als Äquivalenzsystem für die Wärmesubstitution wird „Wärme aus Erdgas“ gewählt. Verwendet wird dafür der Ecoinvent-Prozess „Heat production, natural gas, at boiler modulating >100kW; Europe without Switzerland“.

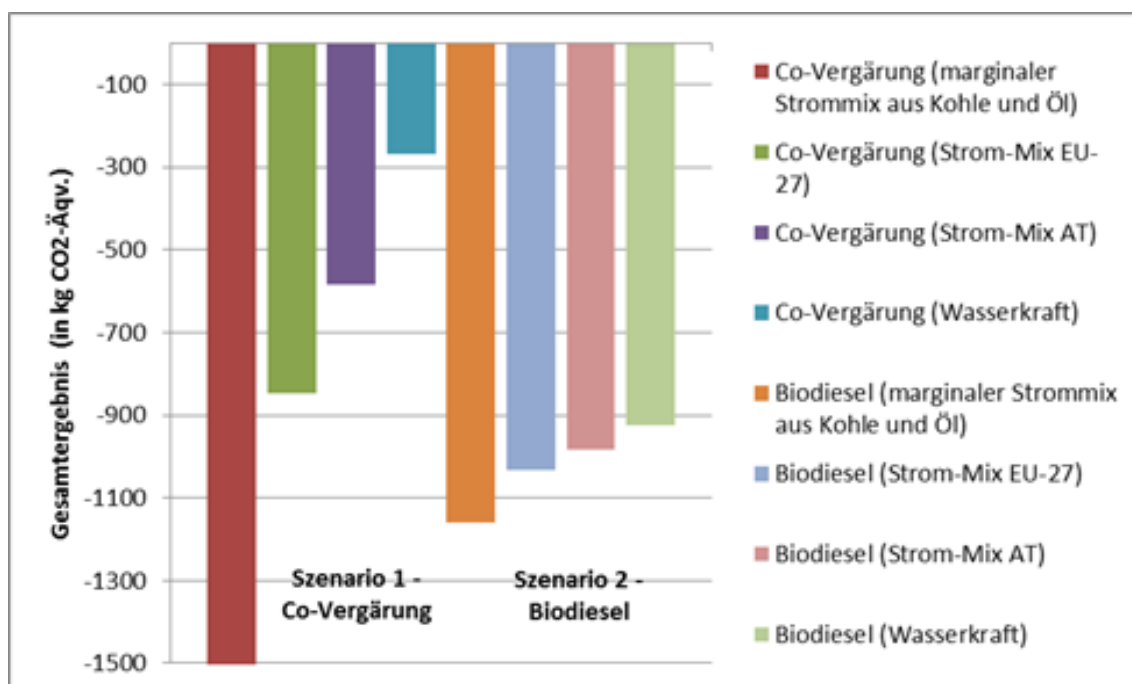


Abbildung 46: Variation des Äquivalenzsystems zur Strombereitstellung unter Berücksichtigung von Gutschriften für die im BHKW erzeugte Wärme

Durch die Berücksichtigung der Gutschriften für die erzeugte Ware werden die Umweltentlastungen für alle Systeme insgesamt größer. Aber auch hier ist das Gesamtergebnis von Szenario 2 – Biodiesel besser sobald nicht mehr der marginale Strommix als Äquivalenzsystem für die Stromsubstitution verwendet wird.

Störungsanalyse (perturbation analysis)

Die Störungsanalyse untersucht, bei welchen Parametern eine Änderung (Störung) einen deutlichen Einfluss auf das Ergebnis hat (perturbation analysis). Dazu wird von relevanten Parametern die „sensitivity ratio“ SR berechnet.

$$SR = \frac{\frac{(\text{Result 2} - \text{Result 1})}{\text{Result 1}}}{\frac{(\text{Parameter 2} - \text{Parameter 1})}{\text{Parameter 1}}} = \frac{(\text{Result 2} - \text{Result 1})}{\text{Result 1}} \cdot \frac{\text{Parameter 1}}{0.1}$$

Result 1: initial result

Result 2: the result obtained with the parameter value +10%

Parameter 1: default value

Parameter 2: default value +10%

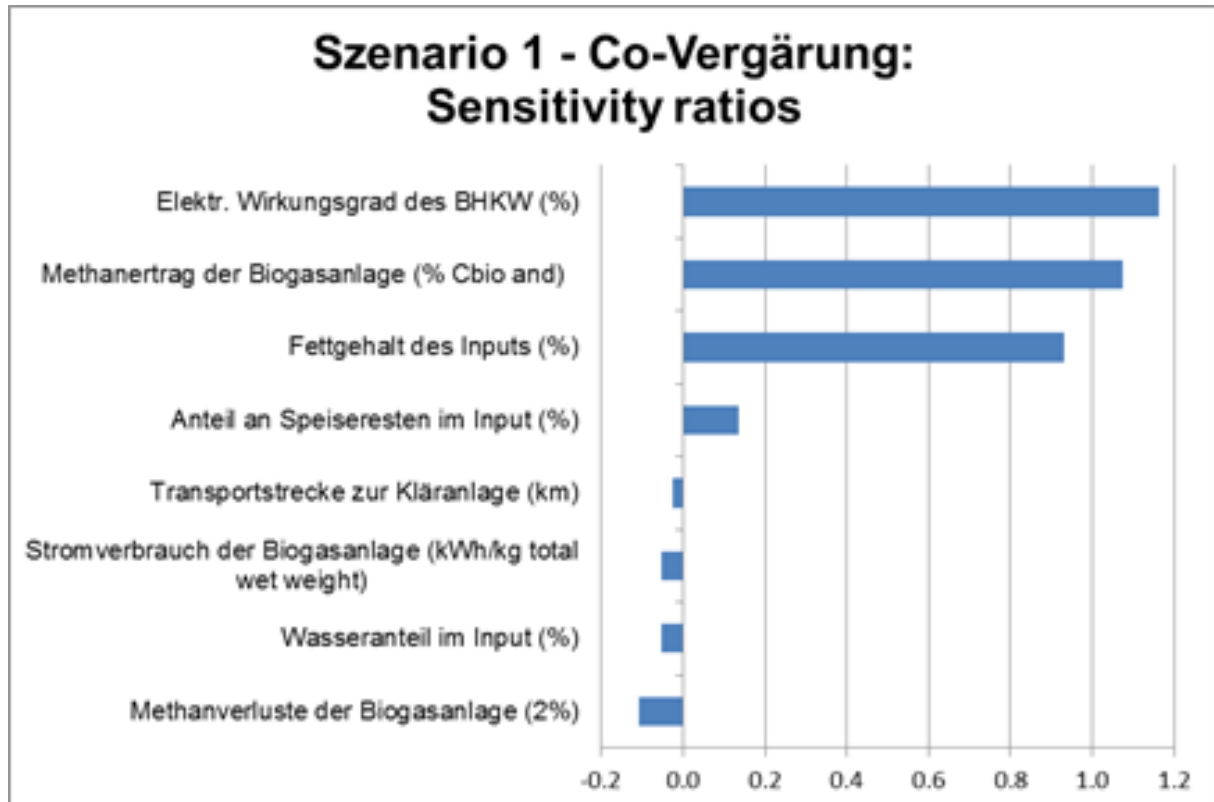


Abbildung 47: Sensitivity ratios bei Szenario 1 – Co-Vergärung mit dem Äquivalenzsystem „marginaler Strommix“

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Eine SR von 1 bedeutet, dass bei einer Änderung eines Parameters um 10 % sich auch das Gesamtergebnis um 10 % verändert. Man erkennt deutlich, dass bei Szenario 1 – Co-Vergärung der elektrische Wirkungsgrad des BHKW, der Methanertrag und der Fettgehalt des Inputs den größten Einfluss auf das Ergebnis haben.

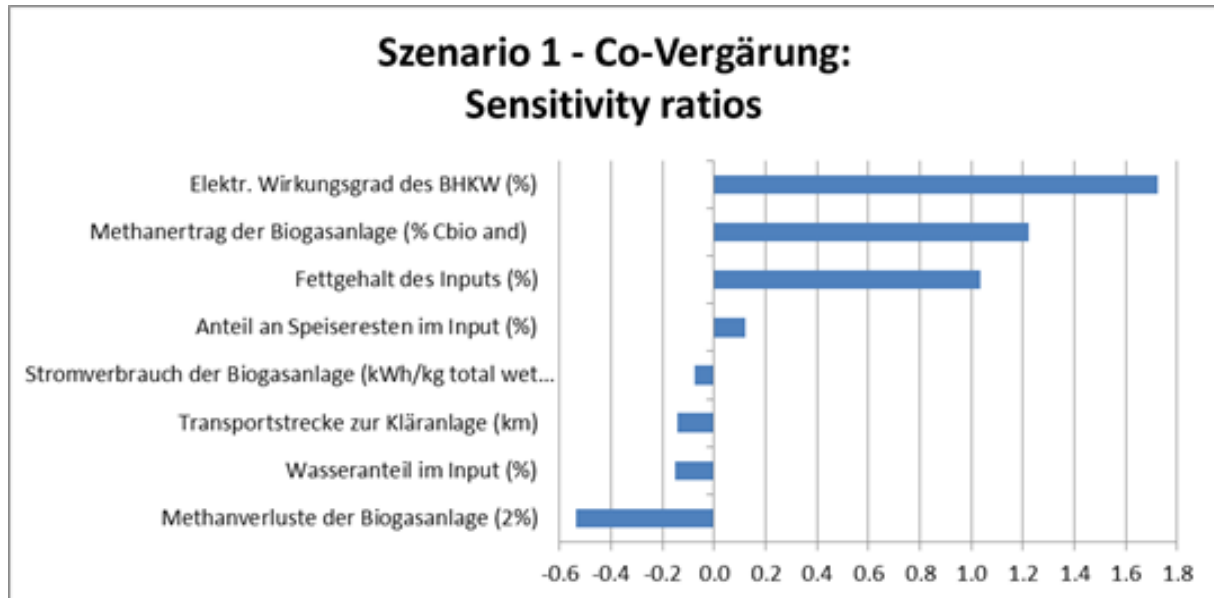


Abbildung 48: Sensitivity ratios bei Szenario 1 – Co-Vergärung mit dem Äquivalenzsystem „Strommix AT“

Da die Gutschriften für die Stromsubstitution einen großen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben (beim Äquivalenzsystem „marginaler Strommix“ 88 %), verändern sich auch die SR, wenn das Äquivalenzsystem für die Stromsubstitution geändert wird. In Abbildung 48 erkennt man, dass aber auch beim Äquivalenzsystem „Strommix AT“ die drei Parameter mit dem größten Einfluss auf das Ergebnis dieselben bleiben. Ihr Einfluss auf das Ergebnis verstärkt sich sogar. Außerdem steigt der Einfluss von anderen Parametern, wie z.B. der Anteil der Methanverluste an der Vergärungsanlage.

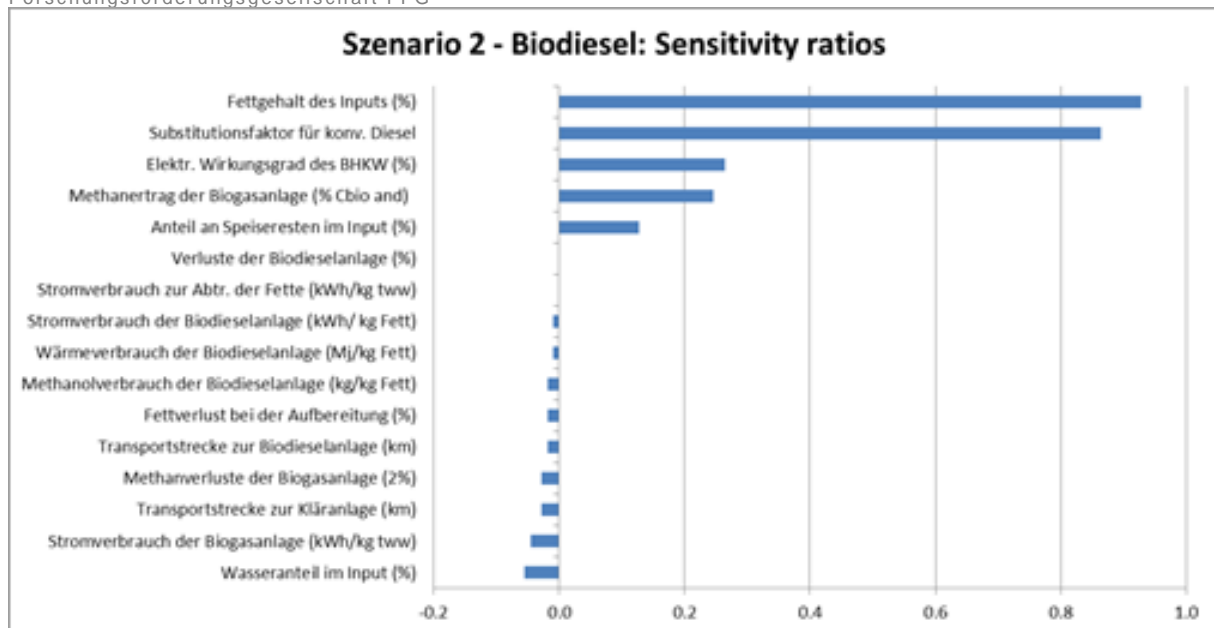


Abbildung 49: Sensitivity ratios bei Szenario 2 – Biodiesel mit dem Äquivalenzsystem „marginaler Strommix“

Beim Szenario 2 – Biodiesel sind die Parameter mit dem größten Einfluss auf das Ergebnis der Fettgehalt des Inputs und die Substitutionsrate des fossilen Diesels. Das sind Parameter, die auf die Menge des erzeugten Biodiesels bzw. auf die Menge des substituierten fossilen Diesels den größten Einfluss haben. Da die Substitution des fossilen Diesels durch Biodiesel den größten Einfluss auf das Gesamtergebnis (67 %) hat, sind auch die Parameter, die diese Menge beeinflussen, besonders relevant.

Werden z.B. für den substituierten fossilen Diesel anstelle der verwendeten $-3,6 \text{ kg CO}_2\text{-Eq}$ pro kg Biodiesel nur $-2,9 \text{ kg CO}_2\text{-Eq}$ pro kg Biodiesel als Gutschrift angerechnet (Verringerung um ca. 19 %), so wie es in anderen Quellen angegeben wird (vgl. Kap. „Äquivalenzsysteme“) verändert sich das Gesamtergebnis um ca. 17 %, die gesamte Umweltentlastung sinkt von $-1099 \text{ kg CO}_2\text{-Eq}$ auf $-909 \text{ kg CO}_2\text{-Eq}$.

3.5.5 Fazit der ökobilanziellen Bewertung

Unter den getroffenen Annahmen und mit den zugrundeliegenden Daten führt eine ökologische Bewertung der beiden untersuchten Verwertungsszenarien für Fettabscheiderinhalte zu einem ökologisch positiven Gesamtergebnis.

Auf Seiten der Energieproduktionen wurde bei beiden Untersuchungsszenarien ein fossiler Strommix als Äquivalenzsystem eingesetzt. Dies hat den Grund, dass das Hauptziel des Einsatzes von erneuerbaren Energieträgern in der Substitution von fossilen Energieträgern liegt. Wird als Äquivalenzsystem für die Substitution des Stroms dieser fossile, marginale Strommix verwendet, d.h. wird davon ausgegangen, dass der aus Biogas erzeugte zusätzliche Strom dazu führt, dass langfristig weniger Strom aus Kohle und Öl erzeugt wird, ist das Gesamtergebnis für beide Szenarien ungefähr gleich positiv.

In der Sensitivitätsbetrachtung wurde deutlich, dass vor allem das Ergebnis des Szenarios 1 – Co-Vergärung sehr stark von den Gutschriften für die Stromsubstitution beeinflusst ist. Sobald daher ein anderes Äquivalenzsystem für die Stromsubstitution verwendet wird, das klimafreundlichere oder erneuerbare Energien enthält, verringert sich die Umweltentlastung des Gesamtergebnisses deutlich. Da das Ergebnis von Szenario 2 - Biodiesel wesentlich weniger von der Stromsubstitution abhängt, verringert sich die Umweltentlastung hier weniger, so dass die Umweltentlastung von Szenario 2 dann deutlich größer ausfällt.

Setzt man nun jedoch als Äquivalenzsystem beispielsweise den österreichischen Strommix an, so werden teilweise erneuerbaren Energien durch erneuerbaren Energien ersetzt. Dies spiegelt nicht das wahre Ausmaß der ökologischen Vorteile wider, welche mit der Produktion von erneuerbarer Energie einhergehen.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsbetrachtungen bestätigen den großen Einfluss, welchen die Wahl des substituierten Primärprozesses auf das Gesamtergebnis einer ökologischen Bewertung hat. Vereinfacht kann gesagt werden, dass je umweltschädlicher der Äquivalenzprozess, umso höher die daraus resultierenden Gutschriften.

Weitere wesentliche Einflussfaktoren sind der Fettgehalt des Inputmaterials und der Methanertrag der Vergärung. D.h. die Erfassung und Sammlung von möglichst viel Fett, eine Verringerung der Fettverluste über die Kanalisation, eine möglichst hohe Qualität des Inputmaterials (wenig Störstoffe (Speisereste) und möglichst wenig Spülwasser) wirken sich deutlich positiv auf die ökologische Bewertung beider Systeme aus. Und auch eine möglichst optimal gesteuerte Vergärungsanlage zur Erhöhung des Gasertrags hat einen positiven Einfluss auf das Gesamtergebnis.

Auch die Methanverluste in der Vergärungsanlage beeinflussen das Ergebnis, so dass hier eine Verringerung dieser Emissionen angestrebt werden sollte.

Des Weiteren wurde gezeigt, dass die Umweltbelastungen auf Grund der Transportaufwendungen nur einen geringen Anteil an den Gesamtumweltwirkungen der Untersuchungsszenarien haben.

3.5.6 Wirtschaftliche Gesichtspunkte

Biodiesel wurde 2008 zu 95% aus essbaren Ölen hergestellt (Balat 2011). Der dafür verwendete Rohstoff hängt von den angebauten Ölsaaten ab: in Europa wird hauptsächlich Rapsöl verwendet, in den USA Öl aus Sojabohnen, in Malaysia und Indonesien Palmöl (Reşitoğlu et al. 2012). Damit steht die Biodieselproduktion in direkter Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion. Für Europa zeigt sich ein paralleler Trend zwischen der Steigerung der Biodieselproduktion und den Preisen für Rapsöl (Balat 2011). Bei der Biodieselherstellung aus essbaren Ölen haben die Rohstoffpreise den größten Anteil an den Produktionskosten (s. Abbildung 50). Die Angaben liegen meist zwischen 70% und 75% der

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Produktionskosten (Chhetri et al. 2008; Gebremariam und Marchetti 2018), könnten bei großen Anlagen aber auch bis 90% ausmachen (Gebremariam und Marchetti 2018).

Ein Vergleich verschiedener Studien zeigte Biodieselproduktionskosten abhängig von der verwendeten Methode zwischen 580 \$/t und 1167 \$/t, für enzymkatalysierte Prozesse bis zu 2415 \$/t (Gebremariam und Marchetti 2018).

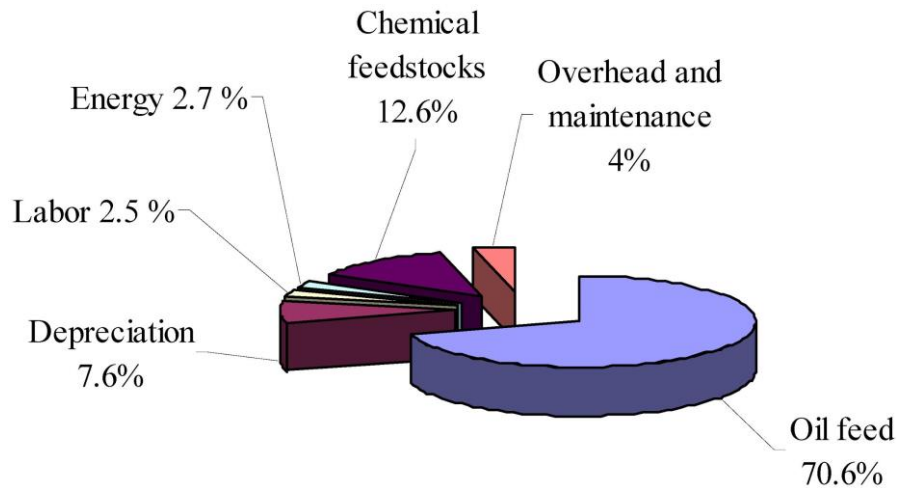


Abbildung 50: Verteilung der Produktionskosten für Biodiesel aus Pflanzenölen (Chhetri et al. 2008)

Die in Abbildung 50 dargestellten Kosten betreffen nur Betriebskosten (Betriebskosten beinhalten die Ausgaben für Rohstoffe, Betriebsmittel, Arbeit, Reparaturen, Wartung und Abschreibung). Die Rohstoffkosten der Biodieselproduktion umfassen Öl-Ausgangsmaterial, Katalysator, Alkohol, Waschwasser und ähnliches. Für eine Betrachtung der gesamten Investitionskosten müssen auch die Kosten für die Errichtung der Anlage berücksichtigt werden (Gebremariam und Marchetti 2018). Die Erzeugungskosten pro Einheit für die Biodieselherstellung sinken, je größer eine Anlage ist, wobei sich die Erzeugungskosten bei größeren Anlagen weniger unterscheiden als bei kleineren Anlagen (Apostolakou et al. 2009).

Das am weitesten verbreitete Verfahren für die Biodieselherstellung ist die base-katalysierte Umesterung. Für dieses Verfahren sind die hauptsächlichen Marktvariablen, die bestimmen, ob die Biodieselproduktion profitabel ist, der Verkaufspreis des Biodiesels, Einkaufskosten für Rohstoffe, Kosten der Ölextraktion und Verkaufspreis von Glycerin (Gebremariam und Marchetti 2018). Für Öle geringer Qualität mit hohen Gehalten freier Fettsäuren und Wasser ist eine alkalische Umesterung jedoch ungeeignet (vgl. Kapitel 3.4.1).

Für solche Ausgangsstoffe kann eine säurekatalysierte Biodieselherstellung angewendet werden. Säurekatalyse ist langsamer als Basekatalyse, weshalb größere Reaktoren benötigt werden. Außerdem braucht sie größere Mengen an Alkohol. Allerdings kann sie sowohl Umesterung wie Veresterung katalysieren ohne Vorbehandlungsschritte der Ausgangsstoffe. Sie scheint die ökonomisch interessanteste Option für die Biodieselherstellung aus billigen Rohstoffen zu sein aufgrund der geringeren gesamten Herstellungskosten und geringerem Break-Even-Punktes für Biodiesel (Gebremariam und Marchetti 2018). Marchetti et al. (2008) verglichen homogene alkalische Katalyse mit säurekatalysierter Vor-Veresterung, homogene

Säure-Katalyse und Katalyse mit heterogenem festem Katalysator. In ihrer Studie mit Öl mit 5% FFS war homogene alkalische Katalyse mit säurekatalysierter Vor-Veresterung die billigste Lösung.

Biodieselherstellung aus Ausgangsstoffen geringer Qualität benötigt spezielle Verfahren, wodurch meist erhöhte Kosten für die Errichtung der Anlage verbunden sind (z.B. durch zusätzliche Reaktoren). Solche Anlagen könnten dann jedoch auch Ausgangsstoffe bis zu 100% FFS verarbeiten. Daher könnte die Biodieselherstellung aus Fettabscheiderinhalten auch ökonomisch eine interessante Option sein. Es bräuchte jedoch ausreichende Mengen an Rohstoff, also Fette aus Fettabscheidern. Die Bereitstellung des Rohstoffs in ausreichenden Mengen ist jedoch schwierig, da zum einen Fettabscheider unzureichend gewartet bzw. gar nicht erst errichtet werden (vgl. Kapitel 3.2), zum anderen eine Konkurrenz zu der Co-Vergärung auf Kläranlagen entstehen würde. Auf Basis der heute bestehenden Unsicherheiten bezüglich des Rohstoffbezugs wäre die Planung einer solchen Biodieselanlage sehr unsicher.

4 Ausblick und Empfehlungen

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass eine kombinierte Nutzung von Fettabscheiderinhalten zur Biodiesel- und Biogaserzeugung aus ökologischer Sicht ähnlich gut bzw. unter gewissen Annahmen besser ist als eine Nutzung ausschließlich zur Biogaserzeugung. Die Technologien zur Biodieselherstellung aus Rohstoffen derartiger minderer Qualität existieren auch bereits im industriellen Maßstab. Ob eine derartige Anlage wirtschaftlich profitabel wäre, hängt sehr stark von den Randbedingungen ab. Eine sehr wichtige Randbedingung ist dabei die Bereitstellung einer ausreichenden Menge an Rohstoff, da die Größe der Anlage sich maßgeblich auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt.

Die Bereitstellung des Rohstoffs scheint die größte Herausforderung zu sein. Die Situation im Bereich Fettabscheiderinstallation und -wartung war in den untersuchten Gebieten unbefriedigend, mit ganz wenigen Ausnahmen. Eine verstärkte Nutzung von Fettabscheiderinhalten zur Erzeugung erneuerbarer Energie erfordert Untersuchungen, mit welchen Mitteln man den Stand der Technik für Fettabscheider im Bereich der Abwasserverbände etablieren könnte. Dies umfasst gesellschaftliche (Bewusstseinsbildung bei den (Gastronomie-)Betrieben), wissenschaftliche (Quantifizierung des Einflusses von Fettabscheidern auf das Abwasser eines Abwasserverbands) und politische Aspekte (geeignete Werkzeuge zur Umsetzung wie Strafgebühren).

5 Literaturverzeichnis

- Apostolakou AA, Kookos IK, Marazioti C, Angelopoulos KC (2009) Techno-economic analysis of a biodiesel production process from vegetable oils. *Fuel Process Technol* 90 (7):1023-1031. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.04.017>
- ASTM E1899-16 (2016) Standard Test Method for Hydroxyl Groups Using Reaction with p-Toluenesulfonyl Isocyanate (TSI) and Potentiometric Titration with Tetrabutylammonium Hydroxide. In: ASTM International,
- Bachon UB, P.; Weiler, W.; (1987) Allgemeine Analyse der Küchenabwässer. Korrespondenz Abwasser:6
- Balat M (2011) Potential alternatives to edible oils for biodiesel production – A review of current work. *Energy Conversion and Management* 52 (2):1479-1492. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.10.011>
- Bamgboye AI, Hansen AC (2008) Prediction of cetane number of biodiesel fuel from the fatty acid methyl ester (FAME) composition. *International Agrophysics* 22 (1):21-29
- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (2017) Biogasausbeuten verschiedener Substrate. <http://www.lfl.bayern.de/iba/energie/049711/>. <http://www.lfl.bayern.de/iba/energie/049711/>. Zugegriffen: 27.09.2017
- C&D INGENIERIA (2012) Tricanter. <http://www.centrifugesdecanter.com.ar/images/esquematricanter.JPG>. Zugegriffen: 28.05.2018
- Callegari C Direkte energetische Verwertung von Altspeisefett. In: ÖWAV Seminar Altspeisefettsammlung und Verwertung, Wels, 2002.
- Canakci M (2007) The potential of restaurant waste lipids as biodiesel feedstocks. *Bioresource Technology* 98 (1):183-190. doi:10.1016/j.biortech.2005.11.022
- Canakci M, Van Gerpen J (2001) Biodiesel production from oils and fats with high free fatty acids. *Trans ASAE* 44 (6):1429-1436
- Chai M, Tu QS, Lu MM, Yang YJ (2014) Esterification pretreatment of free fatty acid in biodiesel production, from laboratory to industry. *Fuel Process Technol* 125:106-113. doi:10.1016/j.fuproc.2014.03.025
- Chakrabarti AR, Hake JM, Zarchi I, Gray DMD (2008) 4Waste Grease Biodiesel Production at a Wastewater Treatment Plant. *Proceedings of the Water Environment Federation* 2008 (14):2770-2789. doi:10.2175/193864708788734412
- Chhetri AB, Watts KC, Islam MR (2008) Waste Cooking Oil as an Alternate Feedstock for Biodiesel Production. *Energies* 1 (1):3-18. doi:10.3390/en1010003
- Davidsson A, Löfstedt C, la Cour Jansen J, Gruvberger C, Aspegren H (2008) Co-digestion of grease trap sludge and sewage sludge. *Waste Management* 28:986–992
- Dengg J Auswirkungen fetthaltiger Abwässer auf Kanalisation und ARA. In: ÖWAV-Seminar - RB 39, Innsbruck, 06.10.2009 2009.
- Dengg J, Rostek R (2004) Fett im Abwasser - Broschüre zur Reduzierung des Fetteintrags in das Abwasser. In: Abwasserverband Achenal-Inntal-Zillertal, Österreich,
- DIN EN ISO 660:2009-10 (2009) Tierische und pflanzliche Fette und Öle - Bestimmung der Säurezahl und der Azidität (ISO 660:2009). In.
- DIN EN ISO 8534:2008-10 (2008) Tierische und pflanzliche Fette und Öle - Bestimmung des Wassergehalts - Karl-Fischer-Verfahren (pyridinfrei) In.
- DIN EN ISO 14040 (2009) Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen. In: Beuth Verlag,
- DIN EN ISO 20884:2011-07 (2011) Mineralölerzeugnisse - Bestimmung des Schwefelgehaltes in Kraftstoffen für Kraftfahrzeuge - Wellenlängendispersive Röntgenfluoreszenz-Spektrometrie (ISO 20884:2011); Deutsche Fassung EN ISO 20884:2011. In.
- DIN EN ISO 27107:2010-08 (2010) Tierische und pflanzliche Fette und Öle - Bestimmung der Peroxidzahl - Potentiometrische Endpunktbestimmung In.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

- Dominguez-Faus R, Powers SE, Burken JG, Alvarez PJ (2009) The Water Footprint of Biofuels: A Drink or Drive Issue? *Environmental Science & Technology* 43 (9):3005-3010. doi:10.1021/es802162x
- Energie-Control Austria (2017) Statistikbroschüre 2017.
- European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability (2011) International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook-Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. EUR 24571 EN. First edition Aufl. Publications Office of the European Union, Luxemburg
- European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability (2012) The International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook. EUR 24982 EN. Publications Office of the European Union, Luxembourg
- Farobie O, Matsumura Y (2017) State of the art of biodiesel production under supercritical conditions. *Progress in Energy and Combustion Science* 63:173-203. doi:https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.08.001
- Fimml C Fettbelastete Abwässer - Fettabscheidung auf der Kläranlage. In: 16. Sprechertagung der ÖWAV-Kanal-und Kläranlagen-Nachbarschaften (KAN), 12.-13. September 2007 2007.
- Gebremariam SN, Marchetti JM (2018) Economics of biodiesel production: Review. *Energy Conversion and Management* 168:74-84. doi:https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.002
- Gopinath A, Puhan S, Nagarajan G (2009) Relating the cetane number of biodiesel fuels to their fatty acid composition: A critical study. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 223 (4):565-583. doi:10.1243/09544070JAUTO950
- Guldhe A, Singh B, Mutanda T, Permaul K, Bux F (2015) Advances in synthesis of biodiesel via enzyme catalysis: Novel and sustainable approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41:1447-1464. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.035
- Haider S (2009) MODellEntwicklung für die CO-Fermentation von städtischen Bioabfällen und Klärschlamm - Evaluierung der Kläranlage Strass AWV Achental-Inntal-Zillertal (Bericht zum Arbeitspaket 2). In: Forschungsprojekt „MODECO“. H2Office Abwassertechnik,
- Haider S, Praxmarer F Energieoptimierung mittels Cofermentation in der Faulung. In: ÖWAV-Seminar - Energiemanagement in der Abwasserwirtschaft, Linz, 13. Oktober 2010 2010.
- Henkelmann G, Meyer zu Köcker K, Koch K, Lebuhn M, Effenberger M, Bayer K (2018) Marktübersicht Zusatz- und Hilfsstoffe in Biogasanlagen. In: *Biogas Forum Bayern*,
- Hums ME, Cairncross RA, Spatari S (2016) Life-Cycle Assessment of Biodiesel Produced from Grease Trap Waste. *Environmental Science & Technology* 50 (5):2718-2726. doi:10.1021/acs.est.5b02667
- Huynh L-H, Kasim NS, Ju Y-H (2011) Chapter 16 - Biodiesel Production from Waste Oils A2 - Pandey, Ashok. In: Larroche C, Ricke SC, Dussap C-G, Gnansounou E (Hrsg) *Biofuels*. Academic Press, Amsterdam, S 375-396. doi:http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-385099-7.00017-6
- Issariyakul T, Kulkarni MG, Dalai AK, Bakhshi NN (2007) Production of biodiesel from waste fryer grease using mixed methanol/ethanol system. *Fuel Process Technol* 88 (5):429-436. doi:https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2006.04.007
- Jolis D, Martis M, San Francisco Public Utilities Commission and URS Corporation (2013) Brown Grease Recovery and Biofuel Demonstration: Oceanside Water Pollution Control Plant Baseline Summary. In: California Energy Commission. Publication number: CEC-500-2013-038,
- Kaltschmitt M, Hartmann H, Hofbauer H (2009) *Energie aus Biomasse*. 2. Auflage Aufl. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-540-85095-3
- Kobayashi T, Kuramochi H, Maeda K, Tsuji T, Xu K (2014) Dual-fuel production from restaurant grease trap waste: Bio-fuel oil extraction and anaerobic methane

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

- production from the post-extracted residue. *Bioresource Technology* 169:134-142. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.06.071>
- Kulkarni MG, Dalai AK (2006) Waste cooking oil - An economical source for biodiesel: A review *Industrial and Engineering Chemistry Research* 45 (9):2901-2913. doi:10.1021/ie0510526
- Lichtmanegger T, Kinzel C, Müller W, Bockreis A (2018) Energetische Nutzung von Fettsäureabscheiderinhalten – Potenzial zur Erzeugung von Biodiesel und Biogas. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*. doi:10.1007/s00506-018-0465-9
- Long JH, Aziz TN, Reyes FLdl, Ducoste JJ (2012) Anaerobic co-digestion of fat, oil, and grease (FOG): A review of gas production and process limitations. *Process Safety and Environmental Protection* 90 (3):231-245. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2011.10.001>
- Lopez RJ, Higgins SR, Pagaling E, Yan T, Cooney MJ (2014) High rate anaerobic digestion of wastewater separated from grease trap waste. *Renewable Energy* 62:234-242. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.06.047>
- Marchetti JM, Miguel VU, Errazu AF (2008) Techno-economic study of different alternatives for biodiesel production. *Fuel Process Technol* 89 (8):740-748. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.01.007>
- Miao X, Li R, Yao H (2009) Effective acid-catalyzed transesterification for biodiesel production. *Energy Conversion and Management* 50 (10):2680-2684. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.06.021>
- Mondala A, Liang K, Toghiani H, Hernandez R, French T (2009) Biodiesel production by in situ transesterification of municipal primary and secondary sludges. *Bioresource Technology* 100 (3):1203-1210. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2008.08.020>
- Montefrio MJ, Xinwen T, Obbard JP (2010) Recovery and pre-treatment of fats, oil and grease from grease interceptors for biodiesel production. *Applied Energy* 87 (10):3155-3161. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.04.011>
- Morais S, Mata TM, Martins AA, Pinto GA, Costa CAV (2010) Simulation and life cycle assessment of process design alternatives for biodiesel production from waste vegetable oils. *Journal of Cleaner Production* 18 (13):1251-1259. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.04.014>
- Ngo HL, Xie Z, Kasprzyk S, Haas M, Lin W (2011) Catalytic Synthesis of Fatty Acid Methyl Esters from Extremely Low Quality Greases. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 88 (9):1417-1424. doi:10.1007/s11746-011-1804-1
- Nitzsche J Energetische Verwertung von Nebenprodukten der Biodieselproduktion. In: 17. Internationale Fachtagung „Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe“, Freiberg, 16. September 2011 2011.
- Noshadi I, Kanjilal B, Du S, Bollas GM, Suib SL, Provatas A, Liu F, Parnas RS (2014) Catalyzed production of biodiesel and bio-chemicals from brown grease using Ionic Liquid functionalized ordered mesoporous polymer. *Applied Energy* 129:112-122. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.090>
- OECD (2010) Test No. 209: Activated Sludge, Respiration Inhibition Test (Carbon and Ammonium Oxidation). In: OECD Publishing,
- ÖNORM EN 1825-1: 2005 01 01 (2005) Abscheideranlagen für Fette - Teil 1: Bau-, Funktions- und Prüfgrundsätze, Kennzeichnung und Güteüberwachung. In.
- Ortner ME, Müller W, Schneider I, Bockreis A (2016) Environmental assessment of three different utilization paths of waste cooking oil from households. *Resources, Conservation and Recycling* 106:59-67. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.11.007>
- Parravicini V, Valkova T, Haslinger J, Saracevic E, Winkelbauer A, Tauber J, Svartal K, Hohenblum P, Clara M, Windhofer G, Pazdernik K, Lampert C (2015) Reduktionspotential bei den Lachgasemissionen aus Kläranlagen durch Optimierung des Betriebes (ReLaKO). In: S 250
- Piloto-Rodríguez R, Sánchez-Borroto Y, Lapuerta M, Goyos-Pérez L, Verhelst S (2013) Prediction of the cetane number of biodiesel using artificial neural networks and

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

- multiple linear regression. *Energy Conversion and Management* 65:255-261. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.07.023>
- Pladerer CH, P.; (2015) Lebensmittelabfälle in der Wiener Gastronomie. In: Österreichisches Ökologie-Institut,
- Pokoo-Aikins G, Heath A, Mentzer RA, Sam Mannan M, Rogers WJ, El-Halwagi MM (2010) A multi-criteria approach to screening alternatives for converting sewage sludge to biodiesel. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 23 (3):412-420. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2010.01.005>
- Ragauskas AME, Pu Y, Ragauskas AJ (2013) Biodiesel from grease interceptor to gas tank. *Energy Science & Engineering* 1 (1):42-52. doi:10.1002/ese3.4
- Rak A (2011) Energy Efficiency in Mechanical Separation. Vortrag, Water Arabia, Bahrain,
- Razaviarani V, Buchanan ID, Malik S, Katalambula H (2013) Pilot-scale anaerobic co-digestion of municipal wastewater sludge with restaurant grease trap waste. *J Environ Manage* 123:26-33. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.03.021>
- Reşitoğlu İA, Keskin A, Gürü M (2012) The Optimization of the Esterification Reaction in Biodiesel Production from Trap Grease. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 34 (13):1238-1248. doi:10.1080/15567031003792395
- Sajjadi B, Raman AAA, Arandiyani H (2016) A comprehensive review on properties of edible and non-edible vegetable oil-based biodiesel: Composition, specifications and prediction models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 63:62-92. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.035>
- Saka S, Kusdiana D (2001) Biodiesel fuel from rapeseed oil as prepared in supercritical methanol. *Fuel* 80 (2):225-231. doi:[https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(00\)00083-1](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00083-1)
- Schneider I (2015) Optimierte Behandlung und Verwertung von biogenen Reststoffen - Dissertation. Universität Innsbruck, Innsbruck
- Shon HK, Tian D, Kwon DY, Jin CS, Lee TJ, Chung WJ (2002) Degradation of fat, oil, and grease (FOGs) by lipase-producing bacterium *Pseudomonas* sp strain D2D3. *J Microbiol Biotechnol* 12 (4):583-591
- Siddiquee MN, Rohani S (2011) Lipid extraction and biodiesel production from municipal sewage sludges: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2):1067-1072. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.029>
- Stacy CJ, Melick CA, Cairncross RA (2014) Esterification of free fatty acids to fatty acid alkyl esters in a bubble column reactor for use as biodiesel. *Fuel Process Technol* 124 (Supplement C):70-77. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.02.003>
- TECE Basika (2007a) Fettabscheider "Komplettersorger" System Tece Basika. <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/dd/Fettabscheider1.jpg>. Zugegriffen: 28.05.2018
- TECE Basika (2007b) Fettabscheider zur Teilentsorgung, System Praktika. <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/57/Fettabscheider2.jpg>. Zugegriffen: 28.05.2018
- Tu Q, McDonnell BE (2016) Monte Carlo analysis of life cycle energy consumption and greenhouse gas (GHG) emission for biodiesel production from trap grease. *Journal of Cleaner Production* 112, Part 4:2674-2683. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.028>
- Tu Q, Wang J, Lu M, Chai M, Lu T (2012) Feasibility and practices of making biodiesel out of low-quality greases. *EM: Air and Waste Management Association's Magazine for Environmental Managers (Issue JANUARY, January 2012)*:26-29
- Tu QS, Wang JJ, Lu MM, Brougham A, Lu T (2016) A solvent-free approach to extract the lipid fraction from sewer grease for biodiesel production. *Waste Management* 54:126-130. doi:10.1016/j.wasman.2016.05.017
- VDI 4630:2016-11 (2016) Vergärung organischer Stoffe - Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche In.
- Vyas AP, Verma JL, Subrahmanyam N (2010) A review on FAME production processes. *Fuel* 89 (1):1-9. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.08.014>

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische
Forschungsförderungsgesellschaft FFG

- Wallace T, Gibbons D, O'Dwyer M, Curran TP (2017) International evolution of fat, oil and grease (FOG) waste management - A review. J Environ Manage 187:424-435. doi:10.1016/j.jenvman.2016.11.003
- Wu LJ, Kobayashi T, Kuramochi H, Li YY, Xu KQ (2016) Improved biogas production from food waste by co-digestion with de-oiled grease trap waste. Bioresource Technology 201:237-244. doi:10.1016/j.biortech.2015.11.061

6 Anhang

Tabelle 7: Ergebnisse der Fettabscheiderbeprobung

Nr	Alter [t]	Ablaufparameter			Fettparameter		Zustand			Anmerkungen
		pH Wert	CSB [g/L]	lipos [mg/L]	FFA %	SZ [mg KOH/g]	leer	mittel	voll	
FA1	125	9.59	4.09	462	59.0	117.4			1	Fettabscheider voll, Überlaufen, starker Reinigungsmittelgeruch, viel Fett enthalten
FA2	100	4.81	2.59	409	87.7	174.5			1	Fettabscheider in Normalbetrieb
FA3	43	4.5	1.23	124	80.3	159.8	1			Fettabscheider kaum mit Fett, Speisereste im Überstand
FA4	189	4.38	2.01	185	87.5	174.0	1			leichte Schwimmschicht von Fett, keine geschlossene Fettdecke, gute Fettausbeute
FA5	38	5.13	1.95	92.50	88.1	175.3			1	Schwimmschicht mit viel Speiseresteanteil, kaum Fett enthalten, Zulauf beprobt
FA6	159	6.08	2.36	266	57.5	114.3		1		Direktfettabscheider, mit Abscheidung von Speiseresten im Zulauf, Abzug des Fetts, Fettalter 35 Tage und Fett direkt aus dem Abscheider
FA8	20	5.07	1.74	234	81.7	162.5	1			Zulauf genommen, Fettabscheider leer, kaum Fett im Abscheider
FA9	123	5.5	1.45	123	52.1	103.6	1			Fettabscheider kaum mit Fett, Betrieb wurde eingestellt und Fettabscheider wird nicht mehr benötigt
FA10	76	5.1	3.01	453	62.0	123.4			1	Fettabscheider mit Fehlplanung - ohne Funktion, Zulauf = Ablauf, quasi kein Fett enthalten
FA11	103	-	-	-	-	-			1	Fettabscheider voll, Schwimmschicht vor allem Speisereste, kein Fett extrahierbar
FA12	355	6.07	2.19	109	-	-			1	Fettabscheider voll, Speisereste + Müll in der Schwimmschicht, Fett nicht extrahierbar

7 Kontaktdaten

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Anke Bockreis

Arbeitsbereich Umwelttechnik, Institut für Infrastruktur, Universität Innsbruck

Technikerstraße 13

A-6020 Innsbruck

Telefon +43 512 507 62101

Fax +43 512 507 62199

E-mail umwelttechnik@uibk.ac.at

Website www.uibk.ac.at/umwelttechnik/

www.uibk.ac.at/umwelttechnik/research/projects_waste/biopot.html.de