

HANDREICHUNG

Technische und methodische Grundlagen
der THG-Bilanzierung von

Bioethanol



HANDREICHUNG

Technische und methodische Grundlagen der THG-Bilanzierung von Bioethanol

Autoren:

Kathleen Meisel
Maria Braune

Arne Gröngröft
Stefan Majer
Franziska Müller-Langer
Karin Naumann
Katja Oehmichen

Das Projektteam bedankt sich für viele hilfreiche Hinweise und Anmerkungen bei zahlreichen weiteren Kollegen aus Wissenschaft und Praxis. Besonders hervorzuheben ist die Unterstützung durch:

Karin Arnold – *Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie*
Peter Behm – *GUT Zertifizierungsgesellschaft für Managementsysteme mbH*
BDBE – *Bundesverband der deutschen Bioethanolwirtschaft e. V., Berlin*
Dieter Bockey – *UFOP – Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e. V., Berlin*
Sarah Bossen – *SGS Germany GmbH, Hamburg*
Gerhard Brankatschk – *OVID – Verband der Ölsaatenverarbeitenden Industrie in Deutschland e. V.*
Wolf-Dietrich Kindt – *Verband der Deutschen Biokraftstoffindustrie e. V.*
Susanne Köppen – *IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH – gemeinnütziges ökologisches Forschungsinstitut, Heidelberg*
Stefan Rauh – *Fachverband Biogas e. V.*
Georg Strüncmann – *IPRO Industrieprojekt GmbH*
Iris Waikinat – *REDcert GmbH*

Gefördert durch:



Projekträger



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

Präambel	06
Grundlagen der Bioethanolproduktion	07
Vorbehandlung der Rohstoffe zu Zuckerlösungen	08
Fermentation	10
Destillation und Rektifikation	11
Aufbereitung der Nebenerzeugnisse	11
Typische Bandbreiten der wesentlichen In- und Outputströme	13
Bioethanol aus Zuckerrüben	14
Bioethanol aus Getreide	16
Berechnung von THG-Emissionen und THG-Minderungspotenzial	18
Berechnungsformel	18
Berechnungsschema	19
Beispielrechnung	21
Darstellung einer beispielhaften Prozesskette	21
Rohstoffgewinnung e'_{ec}	22
Landnutzungsänderungen e'_l	23
Bessere landwirtschaftliche Bewirtschaftungspraktiken e'_{sca}	23
Transport e'_{td1}	24
Verarbeitung e'_{p1} : Zuckerfabrik	25
Allokation zwischen Rübensaft und Rübenschnitzel	26
Verarbeitung e'_{p2} : Bioethanolproduktion	27
Produktion von Überschussstrom e'_{ee}	28
Allokation zwischen Bioethanol und Vinassekonzentrat	28
Abscheidung und Ersetzung von Kohlenstoffdioxid e'_{ccr}	30
Transport e'_{td2}	31
Gesamtemissionen E	32
Berechnung des THG-Minderungspotenzials	32

Häufig gestellte Fragen (FAQ)	33
Nebenerzeugnisse und Allokation	33
Einheiten und Umrechnungsschritte	35
Kombination von Teilstandardwerten und individuell berechneten THG-Emissionen	35
Daten und Kennzahlen	36
Hauptverursacher von THG-Emissionen in der Bioethanol-Prozesskette	38
Besonderheiten und Fragen zur Berechnung (inkl. N ₂ O, LUC, THG-Einsparungen)	38
Saldierung	40
Umrechnungstabellen	42
Umrechnung von Volumen und Masse (Gewicht)	42
Umrechnung von Frischsubstanzgehalt, Trockensubstanzgehalt und Wassergehalt	42
Umrechnung von Massenanteil und Volumenanteil	42
Dichte und Heizwerte	43
Umrechnung von Energieeinheiten	43
Umrechnung von Einheiten	43
Literaturverzeichnis	44

Präambel



© Adam Borchardt GmbH

Seit dem 1. Januar 2015 ist die Bemessungsgrundlage für die Erfüllung der Biokraftstoffquote nach BImSchG (§ 37) vom Energiegehalt der Kraftstoffe auf eine Verpflichtung zur Treibhausgas (THG)-Minderung umgestellt worden. Diese Maßnahme soll einen wirksamen und quantifizierbaren Beitrag zur Verringerung der Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors leisten. Konsequenterweise haben die Biokraftstoffe die besten Marktchancen, die als Ergebnis der Nachhaltigkeitszertifizierung gemäß der Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung (Biokraft-NachV) die beste THG-Bilanz ausweisen. Die Treibhausgaseminderungseffizienz wird damit – in einem globalisierten Biomasserohstoff- und Biokraftstoffmarkt – neben dem Preis für die gesamte Warenkette zum wesentlichen Wettbewerbsfaktor. Ab 2015 ist daher zu erwarten, dass die Verwendung der so genannten Standardwerte aus dem Anhang der Biokraft-NachV stark abnimmt und vorwiegend individuell berechnete THG-Bilanzen im Rahmen der Zertifizierung erstellt werden.

Die Ergebnisse der Zertifizierung bestimmen damit die Wettbewerbsfähigkeit der Biokraftstoffanbieter in Deutschland, aber auch gegenüber Wettbewerbern in der EU bzw. aus Drittstaaten. Eine fachgerechte, unabhängige und sichere Prüfung der von der jeweiligen Schnittstelle in den Nachhaltigkeitsnachweisen ausgewiesenen THG-Angaben ist die notwendige Grundlage für einen fairen Wettbewerb sowie für die Glaubwürdigkeit der Biokraftstoffbranche. Die Prüfung erfordert von den verantwortlichen Auditoren daher nicht nur fundierte Kenntnisse der THG-Bilanzierung, sondern auch der technischen Prozesse zur Biokraftstoffproduktion, um u. a. die als Grundlage der THG-Bilanzierung verwendeten Stoff- und Energiebilanzen zertifizieren und bewerten zu können.

Das übergeordnete Ziel der Handreichungen ist es daher, Informationen über Rohstoffverarbeitungs- und Biokraftstoffherstellungstechnologien zusammenzustellen und aufzubereiten, um somit die Auditoren bei der Prüfung von vorgelegten THG-Bilanzen fachgerecht zu unterstützen. Die drei nun vorliegenden Themenhefte orientieren sich an den derzeit wesentlichen Biokraftstoffoptionen in Deutschland: Biodiesel, Bioethanol und Biomethan. Sie sind alle drei gleich strukturiert und enthalten eine Technologiebeschreibung, Plausibilitätstabellen für typische Input- und Outputmengen von Produktionsanlagen, sowie eine Beispielrechnung zur Treibhausgasbilanzierung, einen Abschnitt zur Beantwortung häufig gestellter Fragen (FAQ) im Kontext der Prüfung von THG-Bilanzen und Umrechnungstabellen. Eine Übersicht der verwendeten und weiterführenden Literatur befindet sich jeweils am Ende der Handreichungen.

Die Handreichungen sind als ergänzende beziehungsweise unterstützende Informationssammlung zu verstehen. Sie ersetzen nicht die vorhandenen Grundsätze der Zertifizierungssysteme bzw. die vorhandenen Rechtsvorschriften. Für die Erstellung der Handreichungen wurde der bis zum Oktober 2015 gültige Stand der entsprechenden Rechtsvorschriften, Mitteilungen und Systemgrundsätze berücksichtigt.

Grundlagen der Bioethanolproduktion

Bioethanol wird vorrangig aus zuckerhaltigen (z. B. Zuckerrüben, Zuckerrohr) oder stärkehaltigen Rohstoffen (z. B. Weizen, Roggen, Triticale, Mais) hergestellt. Dazu ist eine Abfolge unterschiedlicher Verarbeitungsschritte notwendig (Abbildung 1). Aus den Rohstoffen muss zunächst in einer Vorbehandlung eine vergärbare Zuckerlösung gewonnen werden. Dazu werden unterschiedliche mechanische, thermische, chemische und biochemische Verfahren eingesetzt. Die Zuckerlösung wird anschließend in einem Fermentationsprozess durch Hefen zu Ethanol (Alkohol) und Kohlenstoffdioxid umgewandelt, das zu einem Nebenerzeugnis weiterverarbeitet werden kann. In der nachfolgenden Destillation und Rektifikation erfolgt die Abtrennung des Ethanols vom Wasser und den Rückständen des Rohstoffes. In weiteren, zumeist adsorptiven Verfahren wird das Ethanol bis auf eine Konzentration von 99,9 m.-% entwässert und anschließend vermarktet. Als wesentliches Nebenerzeugnis fällt je nach eingesetztem Rohstoff Vinasse (zuckerhaltige Rohstoffe) oder Schlempe (stärkehaltige Rohstoffe) an. Diese Nebenerzeugnisse werden aufbereitet und können als Futtermittel, Düngemittel oder zur Biogaserzeugung eingesetzt werden. Darüber hinaus können bei stärkehaltigen Rohstoffen z. B. Kleie, Gluten und Keimöl und bei zuckerhaltigen Rohstoffen Rübenschnitzel und Carbokalk als weitere Nebenerzeugnisse anfallen.

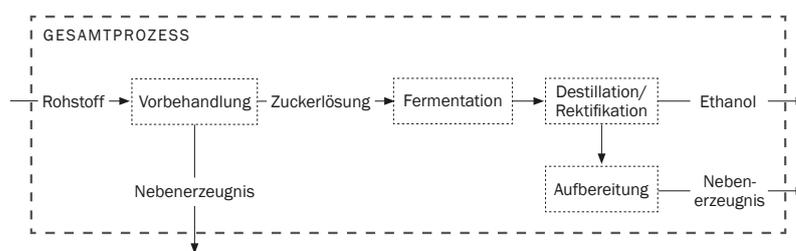


Abbildung 1: Übersicht über den Gesamtprozess der Bioethanolproduktion

Um die Nachhaltigkeitszertifizierung zu unterstützen, sind die Verfahrensschritte, die zur Rohstoffvorbehandlung, Fermentation, Destillation und Aufbereitung der Nebenerzeugnisse eingesetzt werden, im Folgenden näher erläutert. Dabei wird im Vorbehandlungsprozess separat auf die Verarbeitung von stärke- und zuckerhaltigen Rohstoffen eingegangen. Ab dem Fermentationsprozess verläuft die Verarbeitung der Zuckerlösung zu Ethanol in beiden Prozessen ähnlich und wird demnach zusammen betrachtet. Die Aufbereitung der Nebenerzeugnisse am Prozessende wird erneut getrennt beschrieben, da sich diese aufgrund der unvergorenen Bestandteile aus den Rohstoffen unterscheidet.



© Anklam Bioethanol GmbH

Die Generationen der Bioethanolproduktion:

Die Bioethanolproduktion auf Basis von stärke- oder zuckerhaltigen Rohstoffen (z. B. Getreide, Zuckerrüben oder Zuckerrohr) ist ein etabliertes Verfahren und wird auch als die *erste Generation* bezeichnet. Dagegen ist die Verarbeitung von lignocellulosehaltigen Rohstoffen (z. B. Stroh, Holzreste oder Landschaftspflegegut) mit einem höheren technologischen Aufwand verbunden und bislang nicht kommerziell verwirklicht. Beim Einsatz von lignocellulosehaltigen Rohstoffen wird daher auch von Bioethanol der *zweiten Generation* gesprochen. In der Entwicklung geeigneter Technologien wurden in den letzten Jahren große Fortschritte erzielt. Mittel- bis langfristig ist daher auch eine zunehmende Nutzung von land- und forstwirtschaftlichen Reststoffen zur Bioethanolproduktion wahrscheinlich. Die Besonderheiten bei der Produktion von Bioethanol der zweiten Generation werden mit dieser Handreichung nicht explizit abgedeckt.

Vorbehandlung der Rohstoffe zu Zuckerlösungen

Ziel der Vorbehandlung ist es, aus dem angelieferten Rohstoff eine vergärbare Zuckerlösung herzustellen.

Zuckerrübenaufbereitung. Bei der Vorbehandlung zuckerhaltiger Rohstoffe wird der Zucker aus den Rohstoffen extrahiert, gegebenenfalls gereinigt und haltbar gemacht. Diese Verfahrensschritte werden auch zur Produktion von Zucker für die Lebensmittelproduktion benötigt. Daher sind Ethanolanlagen zur Verarbeitung zuckerhaltiger Rohstoffe typischerweise an Zuckerfabriken angeschlossen und nutzen dasselbe Vorbehandlungsequipment. In Deutschland werden ausschließlich Zuckerrüben verarbeitet, in anderen Ländern bei gegebenen klimatischen Bedingungen dienen Zuckerrohr oder vereinzelt Sorghum der Bioethanolgewinnung.

Trockensubstanzgehalte (TS) verschiedener Rübenschnitzel:

- Nassschnitzel (TS: 8 - 10 %)
- Pressschnitzel (TS: ca. 25 %)
- Trockenschnitzel (TS: ca. 90 %)

- Kalkstein (Calciumcarbonat, CaCO_3)
- gebrannter Kalk (Calciumoxid, CaO)
- Kalkmilch (Calciumhydroxid, Ca(OH)_2)

Melasse enthält im Gegensatz zu den anderen Zuckersäften weitaus mehr Nährstoffe und dient somit als Nährstofflieferant. Dicksaft sowie Melasse sind gut lagerfähig und können ganzjährig in der Bioethanolanlage eingesetzt werden. Während der Zuckerkampagne (September bis Januar/Februar) können zusätzlich (ggf. pasteurisierter) Rohsaft oder Dünnsaft zum Einsatz kommen.

Zuckergehalte der Zuckersäfte:

- Rohsaft (13 - 16 %)
- Dünnsaft (ca. 16 %)
- Dicksaft (60 - 70 %)
- Melasse (35 - 53 %)

Zuckerrüben werden nach der Anlieferung gewaschen und zu Zuckerrübenschnitzel zerkleinert (Abbildung 2). Anschließend wird aus den Rübenschnitzel der Zucker mit heißem Wasser ausgewaschen (Extraktion). Die entzuckerten Rübenschnitzel (auch Nassschnitzel bezeichnet) werden abgepresst (Pressschnitzel) und können entweder direkt als Futtermittel oder zur Biogaserzeugung eingesetzt oder – meist unter Zugabe von Melasse – zu Trockenschnitzel getrocknet und pelletiert als Futtermittel vermarktet werden.

Der extrahierte Zuckersaft (Rohsaft) ist schnell verderblich und muss direkt weiter zu Ethanol verarbeitet werden. Zur Verlängerung der Lagerfähigkeit wird er auf TS-Gehalte von 65 bis 68 % eingedickt. Vor der Eindickung muss der Rohsaft zunächst durch eine Carbonatation gereinigt werden. Dazu wird der Rohsaft mit Kalkmilch gemischt. Anschließend wird Kohlenstoffdioxid eingeleitet, wodurch gelöste Calciumionen als Calciumcarbonat ausfallen. In den entstehenden Partikeln werden die Verunreinigungen aus dem Rohsaft weitgehend gebunden und lassen sich als Kalkschlamm abtrennen. Der dabei anfallende Kalkschlamm wird zu Carbokalk abgepresst und als Düngemittel eingesetzt. Die benötigte Kalkmilch wird vor Ort hergestellt. Dazu wird Kalkstein im Kalkofen mit Koks gebrannt und anschließend zu einer Kalkmilch verarbeitet. Ein Teil des dabei entstehenden Kohlenstoffdioxids wird direkt in der Carbonatation eingesetzt, der Rest entweicht in die Umgebung.

Der durch die Carbonatation entstandene klare, hellgraue Dünnsaft wird anschließend in einer mehrstufigen Verdampfstation zu goldgelbem Dicksaft eingedampft. Dieser Dicksaft ist aufgrund des hohen Zuckergehalts haltbar und kann problemlos gelagert werden. Zur Herstellung von Kristallzucker/Haushaltszucker wird der Dicksaft im nächsten Verfahrensschritt gekocht, bis die Bildung von Zuckerkristallen eintritt. Die bei der Extraktion der Rübenschnitzel ebenfalls ausgewaschenen Salze der Zuckerrübe werden bei der Kristallisation in der flüssigen Phase angereichert und als Melasse aus dem Prozess ausgeschleust. Die Melasse enthält zusätzlich noch einen Anteil Zucker, welcher wirtschaftlich nicht mehr von den anderen Bestandteilen abgetrennt werden kann.

In der Ethanolfermentation können nun – je nach Anlagenkonzept und Betriebszustand – Roh-, Dünnsaft, Dicksaft und Melasse zum Einsatz kommen. Die in den Zuckerlösungen vorliegenden Zuckermoleküle sind direkt für die Hefen verwertbar.

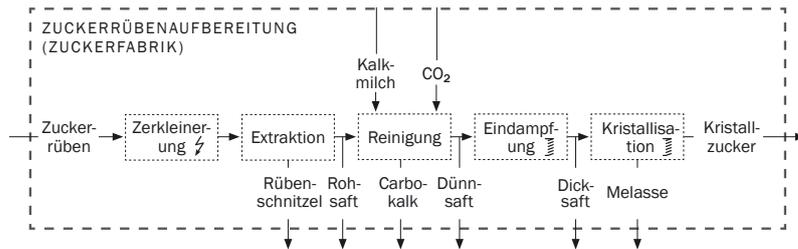


Abbildung 2: Übersicht über die Zuckeraufbereitung von Zuckerrüben in einer Zuckerfabrik

Zuckerrohraufbereitung. Die Verarbeitung von Zuckerrohr erfolgt grundlegend nach den gleichen Prozessschritten wie die Zuckerrüben-aufbereitung. Die Zuckergewinnung kann zum einem über eine Extraktion mit heißem Wasser oder durch Vermahlung und Abpressung der Zuckerbestandteile aus dem Zuckerrohr erfolgen. Nach der Zuckergewinnung bleibt die sogenannte Bagasse, das faserhaltige Material des Zuckerrohrs, zurück (anstelle der Rübenschnitzel im Zuckerrüben-Prozess). Die Bagasse wird typischerweise in Dampferzeugern verbrannt und so zur Strom- und Wärmeerzeugung (KWK-Prozess) für die Anlage genutzt. Bei effizienten Anlagen kann zudem zusätzlich Strom erzeugt werden, der verkauft werden kann. Der gewonnene Rohsaft wird im Anschluss gereinigt. Dabei entsteht neben dem Dünnsaft ein Kalkschlamm, der zum Nebenerzeugnis Filterkuchen abgepresst wird. Der Filterkuchen enthält vorrangig Schweb- und Faserstoffe und kann als Düngemittel eingesetzt werden.

Getreideaufbereitung. Stärkehaltige Rohstoffe (Getreide) werden zunächst mittels Trocken- oder Nassvermahlung zu einem Mehl zerkleinert (Abbildung 3). In manchen Anlagen werden durch eine aufwändigere Vermahlung schon Kornbestandteile wie Kleie, Gluten oder Keimöl abgetrennt und separat zu Nebenerzeugnissen weiterverarbeitet. Anschließend muss die im Mehl enthaltene Stärke in vergärbare Zuckerbestandteile (z. B. Glucose) umgewandelt werden.

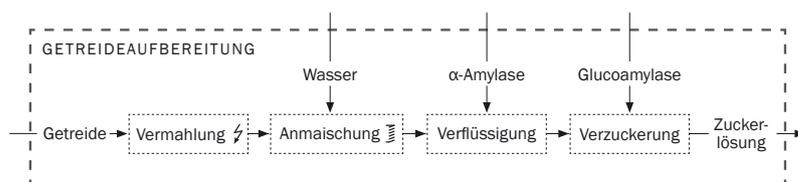


Abbildung 3: Übersicht über die Getreideaufbereitung

Dazu wird das Mehl mit Wasser versetzt (Anmischung) und bis zur sogenannten Verkleisterung der Stärke auf ca. 90 °C aufgewärmt. Die Verkleisterung ruft eine starke Viskositätszunahme hervor, da die Stärkemoleküle Wasser aufnehmen und anquellen. Um die Stärkemoleküle in Zuckermoleküle umwandeln zu können, sind zwei verschiedene, stärkeabbauende Enzyme erforderlich. In der Verflüssigung werden zuerst verflüssigende Enzyme (α -Amylasen) hinzugegeben, die eine Zerlegung der sehr langen Stärkemoleküle in kurzkettige Moleküle bewirken. In der anschließenden Verzuckerung bewirkt der Zusatz von Glucoamylasen eine weitere Zerkleinerung der kürzeren Molekülketten zu Zuckermolekülen. Die entstandene Zuckerlösung ist nun zugänglich für die Hefen und kann in dieser Form im Fermentationsprozess eingesetzt werden.

Energieintensive Prozesse:

- ⚡ Strom
- 🌀 Dampf

Trockensubstanzgehalte (TS) verschiedener Zuckerrohrebenerzeugnisse:

- Bagasse (TS: 52 - 60 %)
- Filterkuchen (TS: 25 - 32 %)
- Vinasse (TS: 1 - 4 %)

Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

beschreibt die gleichzeitige Gewinnung von Strom und Wärme (z. B. Verbrennung der Bagasse in einem Dampfkessel mit nachgeschalteter Dampfturbine zur Elektroenergieerzeugung)

Stärke besteht aus langen Ketten von Glucose-Molekülen. Diese müssen in verschiedenen Schritten in einzelne Moleküle aufgetrennt werden, sodass die Glucose für die Hefen verwertbar ist.

Trockenvermahlung findet vorrangig bei der Verarbeitung von Weizen, Gerste oder Roggen, primär mittels Hammermühlen oder Walzenstühlen statt.

Nassvermahlung wird zumeist im Zusammenhang mit der Verarbeitung von Getreide, vorrangig Weizen und Mais, eingesetzt, bei denen der Keimling, die Kleie und das Gluten abgetrennt werden sollen.

Enzyme sind (zumeist Eiweiß-)Stoffe, die biochemische Reaktionen beschleunigen.

Hefen sind einzellige Pilze. In deutschen Anlagen zur Ethanolproduktion kommt vor allem die Gattung *Saccharomyces cerevisiae* (Bäckerhefe) zum Einsatz.

Trockenhefe ist pulverförmig (TS = 90 - 95 %) und wird zur Aktivierung im Hefeanzuchtbehälter mit Hilfe von Wasser oder Kochsalzlösung aufgeweicht.

Flüssighefe muss nicht aktiviert werden, sie ist direkt im Vorfermenter einsetzbar.

Fermentation

In der Fermentation wird die Zuckerlösung durch Hefen zu Ethanol umgewandelt (Abbildung 4). Hefen können dazu als Trocken- oder Flüssighefen bezogen werden. Vor der Fermentation findet die Hefeanzucht zur Aktivierung der Hefezellen in einem kleineren Hefeanzuchtbehälter statt. Anschließend erfolgt die Adaption der Hefen an das Substrat und die Vermehrung der Hefen unter Luftzufuhr (aerobe Bedingungen) im Vorfermenter. Zur Wachstumsunterstützung werden den Hefen Nähr- und Mineralstoffe, wie Harnstoff, Diammoniumphosphat, Magnesium- oder Zinksulfat, zugesetzt. Zum Teil werden Säuren (z. B. Schwefelsäure, Phosphorsäure, Salpetersäure) oder Basen (z. B. Natriumhydroxid) dem Prozess zur pH-Wert-Anpassung hinzugefügt. Ist im Vorfermenter eine ausreichende Zelldichte erreicht, werden die Hefen zusammen mit der Zuckerlösung in die Hauptfermenter gefüllt.

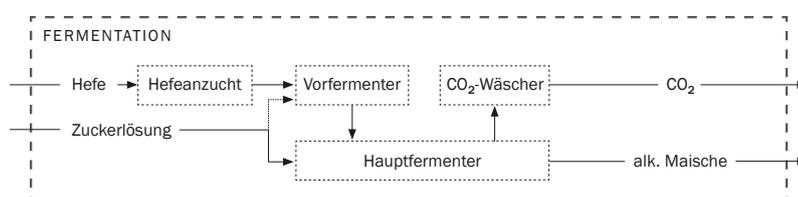
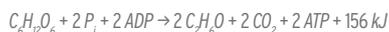


Abbildung 4: Übersicht über den Fermentationsprozess

Reaktionsgleichung für die Umsetzung von Glucose zu Ethanol:



In der Fermentation werden möglichst hohe Ethanolgehalte angestrebt. Ethanolgehalte über 13 m.-% sind allerdings selten erreichbar, da sowohl zu hohe Zuckergehalte zu Fermentationsbeginn als auch zu hohe Ethanolgehalte am Fermentationsende zur Hemmung des Zellwachstums und der Zellviabilität der Hefezellen führen können. Durch fortlaufende Forschungsarbeiten wird die Substrat- und Produkttoleranz der Hefen stetig verbessert.

Im Hauptfermenter entstehen unter Luftabschluss (anaerobe Bedingungen) aus 1 kg Zucker rund 0,51 kg Ethanol und 0,49 kg Kohlenstoffdioxid. Darüber hinaus entstehen in kleinen Mengen weitere Stoffwechselprodukte, die anschließend z. B. als Fuselöle anfallen. Die Hefen setzen durch die Stoffwechsellvorgänge Wärme frei, die zur Einhaltung der idealen Fermentationstemperatur von ca. 32 °C über eine Kühlung abgeführt werden muss. Der Ethanolgehalt in der alkoholhaltigen Maische liegt nach der Fermentation bei 9 - 13 m.-%. Die alkoholhaltige Maische kann direkt in die Destillationskolonne geleitet oder in einem Maischetank zwischengelagert werden. Der Maischetank dient i. d. R. in Größe eines zusätzlichen Hauptfermenters als Lager- bzw. Puffertank für die Maische vor der Destillationseinheit und soll die Fermentation und Destillation hydraulisch entkoppeln.

CO₂-Wäsche. Das in der Fermentation entstandene Kohlenstoffdioxid wird in einem CO₂-Wäscher von mitgeführtem Ethanol und Geruchsstoffen gereinigt und in die Atmosphäre entlassen. Bei starker Belastung der Abluft muss zusätzlich ein Biofilter dazwischen geschaltet werden. Außerdem besteht die Möglichkeit, das Kohlenstoffdioxid aufzufangen und in einem zusätzlichen Prozess zu verdichten, zu verflüssigen und anschließend als lebensmittelreines Nebenerzeugnis (Flüssig-CO₂) zu vermarkten. Eine weitere Option ist, das Kohlenstoffdioxid zur Kultivierung von Pflanzen oder Aquakulturen einzusetzen.

Destillation und Rektifikation

Die nachgeschaltete Destillation dient zur Abtrennung der alkoholhaltigen Maische in eine nahezu alkoholfreie, feststoffhaltige Phase (max. 0,16 m.-% Ethanol) und in ein feststofffreies Alkohol-Wasser-Gemisch (Abbildung 5). Das Alkohol-Wasser-Gemisch hat einen Ethanolgehalt von 44 – 49 m.-%, wird am Kolonnenkopf abgezogen und anschließend der Rektifikationskolonne zugeführt. Die feststoffhaltige Phase wird bei zuckerhaltigen Rohstoffen als Vinasse und bei stärkehaltigen Rohstoffen als Schlempe bezeichnet. Sie wird im Kolonnensumpf abgezogen und anschließend weiter aufbereitet. Im Anschluss an die Destillation erfolgt eine Rektifikation des Alkohol-Wasser-Gemisches. Hier wird das Ethanol auf 88 – 95 m.-% aufkonzentriert. Eine vollständige Abtrennung des Wassers vom Ethanol ist in der Rektifikation nicht möglich, da die Stoffe ein Azeotrop bilden. Weiterhin besteht in der Rektifikationskolonne die Möglichkeit, Fuselalkohole (auch Fuselöle genannt) sowie mittel- und höherwertige Alkohole als Nebenerzeugnisse abzutrennen. Das im Kolonnenboden anfallende Lutterwasser kann zum Teil als Prozesswasser wieder im Prozess (u. a. zur Anmaischung, Fermentation) eingesetzt werden. Zuletzt erfolgt die Absolutierung (Trocknung) des Ethanols. Dabei wird das verbleibende Wasser entfernt, bis die Spezifikation für Ethanol als Kraftstoff (max. 0,5 m.-% H_2O) erreicht ist. Häufig werden dazu Molekularsiebe eingesetzt. Nach der Destillation, Rektifikation und Absolutierung liegen ein reiner Ethanolstrom und ein Nebenerzeugnisstrom (Vinasse oder Schlempe) sowie optional ein Fuselölstrom vor.

Ethanol und Wasser bilden ein azeotropes Gemisch aus, in dem die Zusammensetzung der Gasphase der der flüssigen Phase entspricht (Kondensations- und Siedekurve berühren sich). Somit ist eine verdampfungsbasierte Trennung nicht mehr möglich. Der azeotrope Punkt von Ethanol liegt bei Umgebungsdruck sowie einer Temperatur von 78,15 °C bei 95,63 m.-% (96,5 vol.-%).

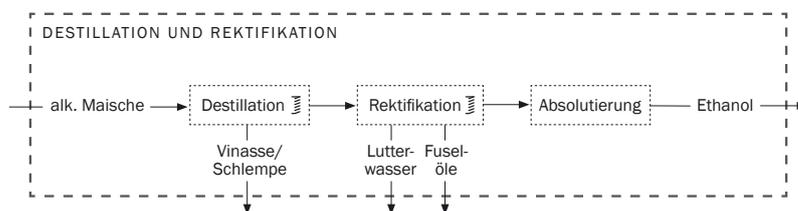


Abbildung 5: Übersicht über den Destillations- und Rektifikationsprozess

Aufbereitung der Nebenerzeugnisse

Vinasseaufbereitung. Vinasse ist ein Nebenerzeugnis bei der Bioethanolproduktion aus Zuckerrüben und hat je nach eingesetztem Zuckersaft (siehe Abbildung 2) einen Feststoffgehalt von ca. 5 – 15 % (Dünnvinasse). Es können bis zu 15 Liter Vinasse pro Liter Ethanol anfallen. Vinasse findet als Futtermittel, organischer Dünger in der Landwirtschaft oder als Substrat für Biogasanlagen Verwendung. Aufgrund des geringen Feststoffgehalts und zur Einsparung von Transportkosten erfolgt oftmals eine mehrstufige Eindickung mittels Separatoren und Verdampfern auf einen Trockensubstanzgehalt von 60 – 80 % (Abbildung 6).



Abbildung 6: Übersicht über den Aufbereitungsprozess der Vinasse

DDGS: engl. Distiller's Dried Grains with Solubles, getrocknete Schlempe der Getreide-Ethanolproduktion einschließlich löslicher Bestandteile.

Weiterführende Literatur zur Bioethanolproduktion: [1] - [4].

Schlempeaufbereitung. Schlempe ist ein stickstoffreiches Nebenzeugnis der Bioethanolproduktion aus Getreide und hat je nach eingesetztem Getreide einen Feststoffgehalt von ca. 10 – 15 % (Dünnschlempe). Es können bis zu 20 Liter Schlempe pro Liter Ethanol anfallen. Sie enthält Feststoffe, wie Protein- oder Cellulosebestandteile, aus dem Gluten und der Kleie des Getreidekorns, die von den Hefen nicht vergoren wurden. Die Dünnschlempe kann unbehandelt als Dünger auf landwirtschaftliche Flächen ausgebracht oder als flüssiges Frischfuttermittel eingesetzt werden. Außerdem kann die Schlempe nach einer Eindampfung, Trocknung und Pelletierung als proteinreiches Trockenfutter (DDGS) vermarktet werden (Abbildung 7). Wird die Schlempe eingedampft und getrocknet, ist vor der Eindampfung meist noch eine Dekantierung erforderlich, um die unlöslichen Bestandteile (Dekanterkuchen) aus der Schlempe abzutrennen. Der Dekanterkuchen wird der Dickschlempe dann vor der Trocknung und Pelletierung wieder zugeführt. Eine weitere Möglichkeit ist, die anfallende Dünnschlempe zu Biogas zu vergären (nähere Informationen dazu werden in der Biomethan-Handreichung gegeben).

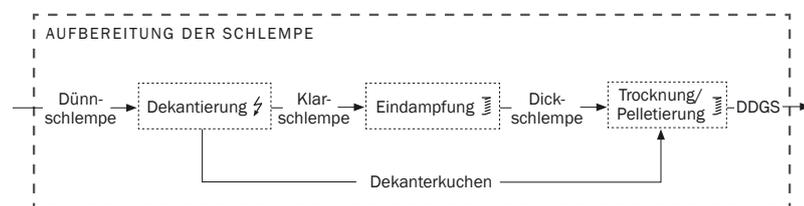


Abbildung 7: Übersicht über den Aufbereitungsprozess der Schlempe

Typische Bandbreiten der wesentlichen In- und Outputströme

Hinweis: In diesem Kapitel sind typische Bandbreiten und Richtwerte von wesentlichen Einsatzrohstoffen und Erzeugnissen sowie Neben-erzeugnissen in Bioethanolanlagen zusammengestellt. Diese sind als Unterstützung bei der Prüfung von THG-Bilanzen auf Plausibilität zu verstehen. Dabei ist zu beachten, dass es vielfältige Möglichkeiten der Verfahrensauslegung gibt. Diese können hier nicht umfassend berücksichtigt werden. Es kann daher je nach Anlage teilweise auch zu Abweichungen zu den hier aufgeführten Werten kommen.



In der Darstellung wird zwischen zucker- und stärkebasierten Bioethanolanlagen unterschieden. Die zugrunde liegenden Datenquellen und Annahmen sind im Literaturverzeichnis zusammengestellt.

Die Menge an Ethanol, die aus den eingesetzten Rohstoffen gewonnen werden kann, hängt von dem Anteil fermentierbarer Bestandteile ab. Aus dem Zucker- und Stärkegehalt lassen sich demnach die resultierenden maximalen Ethanolausbeuten ableiten (Tabelle 1). Bei wenig effizienten Verfahren oder bei gleichzeitiger Produktion weiterer Produkte kann die Ethanolausbeute zudem sinken. Zum Beispiel kann aus Getreide neben der Ethanolproduktion auch Kleie, Gluten oder Keimöl als Nebenerzeugnis abgetrennt werden, was zu Verlusten an Stärke führen kann.

Tabelle 1: Stärke- und Zuckergehalte (bezogen auf die Trockensubstanz des Rohstoffs) mit dazugehörigen Ethanolausbeuten (bezogen auf die Frischsubstanz des Rohstoffs)

Einsatzrohstoffe	Stärke-/Zuckergehalt		Ethanolausbeute	
	kg (Stärke/Zucker)/kg TS (Rohstoff)		kg (Ethanol)/kg FS (Rohstoff)	
	von	bis	von	bis
Stärkehaltige Rohstoffe				
Mais	0,70	0,75	0,35	0,37
Weizen	0,67	0,71	0,32	0,35
Roggen	0,61	0,63	0,31	0,32
Gerste	0,58	0,59	0,29	0,30
Triticale	0,67	0,71	0,32	0,35
Zuckerhaltige Rohstoffe				
Zuckerrüben	0,56	0,72	0,06	0,09
Zuckerrohr	0,05	0,20	0,05	0,07

Die hier dargestellten Zahlen sind beispielhafte Werte und beruhen auf wissenschaftlichen Veröffentlichungen [5] - [12].

- TS: Trockensubstanzgehalt
- FS: Frischsubstanzgehalt

Bei der THG-Bilanzierung muss beachtet werden, ob von dreckbehafteten oder bereits gewaschenen Zuckerrüben ausgegangen wird. Die anhaftende Erde macht je nach Bodenverhältnissen bis zu 140 Kilogramm pro Tonne Zuckerrüben aus [4], [13].

Die hier dargestellten Zahlen sind beispielhafte Werte und beruhen auf wissenschaftlichen Veröffentlichungen [4], [14].

Bioethanol aus Zuckerrüben

Beim Einsatz von Zuckerrüben ist darauf zu achten, dass die Ermittlung von Konversionsfaktoren konsistent erfolgt, da den Zuckerrüben bei der Anlieferung Ackerbodenreste anhaften, die bei der Rübenwäsche abgewaschen werden. In Tabelle 2 sind Richtwerte für Mengen an Erzeugnissen und Zwischenerzeugnissen der Zuckerrübenverarbeitung zusammengestellt. Die unterschiedlichen Rübensäfte können weiter zu Ethanol verarbeitet werden.

Tabelle 2: Erzeugnisse und Zwischenerzeugnisse bei der Verarbeitung von Zuckerrüben zu Zuckersaft und Kristallzucker: Richtwerte für die Ausbeute Total und Ausbeute an Zucker sowie beispielhafte Zuckerkonzentrationen bezogen auf gereinigte Zuckerrüben mit 16,5 % Zuckergehalt

Erzeugnisse und Zwischenerzeugnisse	Ausbeute Total (t/t Zuckerrüben sauber)	Ausbeute Zucker (kg/100 kg Zuckerrüben sauber)	Zuckerkonzentration (m.-%)
Rübensäfte			
Rohsaft	1,05	16,2	15,4
Dünnsaft	1,048	16,15	15,4
Dicksaft	0,23	16,15	70,2
Melasse	0,035	1,68	48,0
Kristallzucker	0,145	14,47	99,8
Rübenschnitzel (frisch)	0,132	0,25	1,9
Rübenschnitzel (Pellets)	0,048	0,25	5,2

Prozessdampf wird vor allem in der Zuckerfabrik bei der Dünnsafteindickung zu Dicksaft und bei der Rübenschnitzeltrocknung und -konditionierung während der Zuckerkampagne eingesetzt. In der Ethanolanlage findet Prozessdampf vor allem bei der Destillation und Rektifikation der alkoholhaltigen Maische zu Ethanol und bei der Vinasse-Eindampfung Verwendung. Unterschiede bei der benötigten Menge an Prozessdampf können je nach Anlage und Betriebsbedingungen variieren und ergeben sich beispielsweise aus dem Grad der Eindampfung der anfallenden Dünnavinasse (ca. 10 % TS) auf ein Vinassekonzentrat (ca. 65 % TS). Zudem wird weniger Dampf in der Zuckerfabrik benötigt, wenn während der Kampagne Rohsaft zu Ethanol verarbeitet wird, da somit die mehrstufige Eindampfung zu Dicksaft entfällt. Dabei erhöht sich allerdings der Dampfbedarf in der Ethanolanlage, da die Vinasse einen geringeren Trockensubstanzgehalt aufweist und die Eindampfung dementsprechend aufwändiger ist.

Wasser kommt vor allem zum Waschen der Rüben und zur Konzentrations-einstellung der Zuckersäfte zum Einsatz. Im Waschprozess werden sowohl Prozesswasser als auch geringe Mengen Frischwasser eingesetzt. Das Rüben-Waschwasser wird nach dem Waschprozess aufgereinigt und dem Reinigungskreislauf erneut zugeführt.

Nährstoffe für die Fermentation von Zuckersäften werden nur selten zugekauft und kommen oftmals in geringen Mengen zum Einsatz, da die Melasse als Nährstofflieferant dient.

Nicht alle Bioethanolanlagen verwenden Säuren oder Basen zur pH-Wert-Einstellung. Häufig regelt sich der pH-Wert aufgrund der mikrobiologischen Milieubedingungen von selbst. Die verwendete Menge an Säuren und Basen hängt zum einen von deren Konzentration (verdünnt/unverdünnt) und zum anderen von der Säuren- bzw. Basenstärke ab. So sind beim Einsatz von schwachen Säuren (z. B. Salpetersäure) größere Inputmenge an Säuren als beim Einsatz von starken Säuren (z. B. Schwefel- oder Phosphorsäure) zu erwarten. Oftmals finden Säuren auch in Verbindung mit heißem Wasser zu Reinigungszwecken (CIP – Cleaning in Place) der Fermenter Verwendung.

Die Mengenangaben zur anfallenden Vinasse am Produktionsende hängen stark von dem Trockensubstanzgehalt der Vinasse ab. Vinasse kann außerdem zum Teil erneut in der Fermentation zur Verdünnung der Zuckersäfte eingesetzt werden.

Tabelle 3: Bandbreiten der In- und Outputströme in einem zuckerrübenbasierten Bioethanolprozess (einschließlich vorgeschalteter Zuckerfabrik)

Input/Output	Einheit	Menge je t Ethanol (99,9 m.-%)	
		von	bis
Input			
Einsatzrohstoff			
Zuckerrüben	t	12,5	15,5
Hilfsstoffe und Prozessenergie			
Prozessdampf	MJ	11.500	15.000
Strom	kWh	300	500
Wasser	t	3,3	5,9
Koks	t	0,017	0,023
Kalkstein	t	0,29	0,62
Hefe	kg	1,8	8,6
Nährstoffe (optional)	kg	0,18	6,8
Säuren (optional)	kg	2,7	
Output			
Erzeugnisse und Nebenerzeugnisse			
Ethanol	t	1	
Dünnvinasse (TS: 10 %)	t	10	
Vinasse (TS: 65 %)	t	0,8	1,2
Rübenschnitzel (frisch)	t	26	
Rübenschnitzel (Pellets)	t	0,7	1,8
Kohlenstoffdioxid	t	0,95	1,1
Carbokalk	t	0,29	0,57
Fuselöle (optional)	kg	45	
Rest- und Abfallstoffe			
Abwasser	t	8,7	13,4

Die hier dargestellten Zahlen sind beispielhafte Werte und beruhen auf wissenschaftlichen Veröffentlichungen [2], [6], [13] - [18].

Bei der mechanischen Brüdenverdichtung wird ein Dampfstrom durch einen mechanisch wirkenden Verdichter komprimiert (Wärmepumpenprinzip). Dadurch wird ein höheres Druck-/Temperaturniveau erreicht. Der verdichtete Dampf kann anschließend wieder zur Beheizung genutzt werden. Damit kann der Einsatz von Frischdampf erheblich minimiert werden.

Bioethanol aus Getreide

Circa 30 % des Prozessdampfes werden in der Destillation, Rektifikation und Absolutierung zur Aufbereitung der alkoholhaltigen Maische zu Ethanol und 27 % bei der Schlempe-Eindampfung sowie 37 % bei der Schlempe-Trocknung eingesetzt. In der Anmischung ist der Prozessdampfbedarf mit ca. 6 % vergleichbar gering [19]. Die benötigte Menge an Prozessdampf kann jedoch in jeder Anlage je nach Verfahrensprozess und eingesetztem Rohstoff stark variieren. Wird z. B. die anfallende Schlempe nicht zu DDGS verarbeitet, sondern wird als Frischfuttermittel vermarktet, sinkt der Bedarf an Prozessdampf erheblich.

Die größten einzelnen Stromverbraucher sind in der Regel die Mühlen zur Vermahlung des Getreides. Außerdem findet Strom beim Rühren der Maische in den Fermentern und bei der Pelletierung von z. B. Kleie oder DDGS Verwendung. Teilweise wird eine elektrisch betriebene, mechanische Brüdenverdichtung anstelle einer Dampfheizung, z. B. in der Destillation, Rektifikation oder Eindampfung der Schlempe, eingesetzt. Dadurch kann am Einsatzort der Prozessdampf ersetzt werden, allerdings steigt der Verbrauch an Strom. Neben den großen Stromverbrauchern existieren zudem viele kleinere Stromverbraucher am Produktionsstandort, die in Summe relevante Mengen an Strom verbrauchen können.

Wasser wird vor allem zum Anmischen des Getreidemehls benötigt. Die Anzucht der Hefe und gegebenenfalls die Glutenauswaschung sind weitere Prozessschritte, in denen Wasser benötigt wird. Zudem findet Wasser zur Reinigung der Anlage Verwendung. Das Konzept zum Recycling von Wasser kann sich zwischen unterschiedlichen Anlagen stark unterscheiden. So hängt der Bedarf an Wasser davon ab, ob Prozesswasserströme (z. B. das Lutterwasser aus der Rektifikation) zur Anmischung zurückgeführt werden oder diese die Anlage als Abwasser verlassen. Neben dem Wasser, welches im Prozess (Prozesswasser) selbst eingesetzt wird, wird Wasser an unterschiedlichen Stellen im Prozess zur Kühlung (Kühlwasser) benötigt.

Die eingesetzte Hefemenge hängt davon ab, ob die Anlagenbetreiber die Hefe selber heranziehen und vermehren oder ob sie extern von Hefeherstellern als Trocken- oder Flüssighefe bezogen wird. Außerdem besteht die Möglichkeit, die Hefe nach der Fermentation aus der alkoholhaltigen Maische abzutrennen und zurückzuführen, sodass sich der Einsatz von Frischhefe deutlich minimiert.

Der Einsatz von Nährstoffen kann je nach verwendeten Rohstoff und Anlage variieren. Dabei ist grundsätzlich zu beachten, dass Hefen eine Stickstoffquelle zum Wachstum benötigen, welche z. B. in Form von Harnstoff, Diammoniumphosphat oder Ammoniakwasser zugesetzt werden kann. Außerdem sind verschiedene Mineralien sowie Spurenelemente, wie Phosphor, Magnesium, Kalium oder Calcium, essenziell für die Hefevermehrung.

Die Angaben zum Enzymeinsatz im Verzuckerungs- und Verflüssigungsprozess bei der Getreideverarbeitung sind aus Angaben von Enzymherstellern ermittelt (DELTAZYM® GA L-E5, OPTIMALT BBA und Fuelzyme®). Es wird jedoch von den Herstellern empfohlen, die Dosierung an die Betriebsbedingungen der Anlagen anzupassen, sodass auch größere Bandbreiten möglich sind.

Tabelle 4: Bandbreiten der In- und Outputströme in einem getreidebasierten Bioethanolprozess

Input/Output	Einheit	Menge je t Ethanol (99,9 m.-%)	
		von	bis
Input			
Einsatzrohstoff			
Getreide	t	3,3	3,6
Hilfsstoffe und Prozessenergie			
Prozessdampf	MJ	6.200	11.000
Strom	kWh	350	700
Wasser	t	1,5	5,0
Hefe	kg	2	10
Nährstoffe (optional)			
Harnstoff	kg	6,5	
Diammoniumphosphat	kg	29	
Ammoniakwasser	kg	2,5	
Ammoniak	kg	3,9	
Enzyme			
Alpha Amylase	kg	0,2	0,9
Glucoamylase	kg	1,2	4,2
Säuren (optional)	kg	7	42
Basen (optional)	kg	5	45
Output			
Erzeugnisse und Nebenerzeugnisse			
Ethanol	t	1	
Dünnschlempe (TS: 10 %)	t	7,5	10
DDGS (TS: 91 %)	t	0,55	1,2
Kohlenstoffdioxid	t	0,95	0,96
Gluten (optional)	t	0,14	0,22
Kleie (optional)	t	0,12	0,87
Keimöl (optional)	t	0,04	0,09
Rest- und Abfallstoffe			
Abwasser	t	1	7,7

Die hier dargestellten Zahlen sind beispielhafte Werte und beruhen auf wissenschaftlichen Veröffentlichungen [2], [6], [13], [18], [20], [21].

Berechnung von THG-Emissionen und THG-Minderungspotenzial

Schnittstellen sind zertifizierungsbedürftige Betriebe entlang der Biokraftstoffproduktionskette. Unterschieden wird dabei zwischen Ersterfassern (z. B. Händlern und Genossenschaften, die die Biomasse aufnehmen), Zucker- und Stärkefabriken und sonstigen Betrieben, die flüssige oder gasförmige Biomasse für die Endverwendung auf die erforderliche Qualitätsstufe aufbereiten (z. B. Bioethanolproduktionsanlage). Die Schnittstelle, die den Biokraftstoff für die Endverwendung auf die erforderliche Qualitätsstufe aufbereitet (z. B. Bioethanolanlage), wird als letzte Schnittstelle bezeichnet.

Grundsätzlich gibt es drei verschiedene Möglichkeiten, THG-Emissionswerte bereitzustellen: Verwendung von

- Gesamtstandardwerten (Anlage 2 Biokraft-NachV),
- individuell berechneten Werten und
- einer Kombination aus Teilstandardwerten und individuell berechneten Werten.

Zur Berechnung der THG-Emissionen, die mit der Produktion und der Nutzung von Bioethanol verbunden sind, werden die THG-Emissionen und die THG-Einsparungen entlang der gesamten Bioethanol-Prozesskette aufsummiert. Dabei berechnet jede Schnittstelle dieser Kette die bei ihr anfallenden THG-Emissionen und addiert sie zu den THG-Emissionen aus den vorgelagerten Schnittstellen. Daneben besteht für die Schnittstellen die Möglichkeit, statt der individuellen Berechnung der THG-Emissionen Teilstandardwerte gemäß RL 2009/28/EG (RED) und Biokraft-NachV¹ zu verwenden [22], [23]. Die letzte Schnittstelle trägt die THG-Emissionen aus der individuellen Rechnung oder den Teilstandardwerten zusammen und gibt den THG-Wert bezogen auf einen Megajoule Bioethanol aus. Darüber hinaus wird von der letzten Schnittstelle das THG-Minderungspotenzial im Vergleich zu einem definierten fossilen Vergleichswert berechnet.

Im folgenden Abschnitt wird zunächst das prinzipielle Verfahren der THG-Berechnung erläutert und anschließend anhand einer beispielhaften Prozesskette demonstriert.

Berechnungsformel

Entscheidet sich eine Schnittstelle in der Prozesskette zur Biokraftstoffproduktion für die Berechnung individueller THG-Einsparungen auf Basis tatsächlicher Werte, so erfolgt diese Berechnung nach den in der Biokraft-NachV definierten methodischen Grundlagen [23]. Das Regelwerk enthält konkrete Berechnungsformeln. Das THG-Minderungspotenzial eines Biokraftstoffes ergibt sich zum einen aus den THG-Emissionen der Biokraftstoffproduktion und -nutzung und zum anderen aus dem Vergleich dieser THG-Emissionen zum fossilen Referenzwert. Die folgenden Abschnitte erläutern die methodischen Grundlagen beider Berechnungsschritte.

Berechnung der THG-Emissionen

Die Gesamtemissionen berechnen sich anhand folgender, allgemein verbindlicher Formel (gemäß Biokraft-NachV). Diese setzt sich aus den THG-Emissionen und THG-Emissionseinsparungen entlang der Biokraftstoff-Produktionskette zusammen.

$$E = e_{ec} + e_l + e_p + e_{td} + e_u - e_{sca} - e_{ccs} - e_{ccr} - e_{ee}$$

E = Gesamtemissionen bei der Produktion und Nutzung des Biokraftstoffes

THG-Emissionen aus:

e_{ec} = der Rohstoffgewinnung
 e_l = Landnutzungsänderung
 e_p = der Verarbeitung
 e_{td} = dem Transport und Distribution
 e_u = der Nutzung

THG-Einsparungen durch:

e_{sca} = bessere landw. Bewirtschaftungspraktiken
 e_{ccs} = Abscheidung und geologische Speicherung von CO₂
 e_{ccr} = Abscheidung und Ersetzung von CO₂
 e_{ee} = überschüssigen Strom aus KWK

Formel (1)

¹ Die Biokraft-NachV entspricht der nationalen Umsetzung der auf europäischer Ebene in Kraft getretenen RL 2009/28/EG. Da die Umsetzung in das deutsche Recht 1:1 erfolgt ist, wird im folgenden Text nur noch die Biokraft-NachV zitiert.

Berechnung des THG-Minderungspotenzials

Nach Berechnung der Gesamtemissionen wird das THG-Minderungspotenzial nach folgender Formel von der letzten Schnittstelle ermittelt:

$$\text{THG - Minderung} = \left[\frac{E_{\text{Fossilbrennstoff}} - E_{\text{Biokraftstoff}}}{E_{\text{Fossilbrennstoff}}} \right] * 100$$

Formel (2)

$E_{\text{Fossilbrennstoff}}$ = Gesamtemissionen des fossilen Referenzbrennstoffs
 $E_{\text{Biokraftstoff}}$ = Gesamtemissionen bei der Verwendung des Biokraftstoffs (z. B. Bioethanol)

Gemäß der Biokraft-NachV ist der Wert des fossilen Referenzbrennstoffs auf 83,8 g CO₂-Äq./MJ festgesetzt.

Berechnungsschema

Nachfolgend ist das Berechnungsschema für die individuelle Ermittlung der THG-Emissionen sowie des THG-Minderungspotenzials schrittweise dargestellt.

Berechnung der THG-Emissionen je Term der Berechnungsformel

Jede Schnittstelle der Prozesskette berechnet die bis zu ihrem Betrieb anfallenden THG-Emissionen bezogen auf die Menge des bearbeiteten (Zwischen)-erzeugnisses² und gibt sie an die nachgelagerte Schnittstelle weiter. Für die Terme e_{ec} , e_p , e_{td} gilt dabei das gleiche Rechenprinzip. Um die THG-Emissionen dieser Terme zu ermitteln, werden die in der Prozesskette eingesetzten Hilfsstoffe und Energieträger mit deren Emissionsfaktoren (EF) multipliziert und durch die Menge des Zwischenerzeugnisses oder Erzeugnisses geteilt.

$$e'_{ec,p,td} = \frac{\sum (\text{Einsatzmenge des Stoffes} * \text{Emissionsfaktor des Stoffes})}{\text{Ertrag oder Menge des (Zwischen)-erzeugnisses}}$$

Was bei einer Kombination aus Teilstandardwerten und individueller Berechnung der THG-Emissionen zu beachten ist, wird im Kapitel FAQ erläutert.

Emissionsfaktoren sind „Emissionsrucksäcke“ von Stoffen, Energien oder Erzeugnissen. Sie besagen, mit welchen Umweltwirkungen (z. B. THG-Emissionen) die Erzeugung und Nutzung von Stoffen, Energien oder Erzeugnissen verbunden ist. Wissenschaftliche Veröffentlichungen und anerkannte Datenbanken dienen als Quellen für Emissionsfaktoren.

Formel (3)

Gemäß der Biokraft-NachV werden die THG-Emissionen bei der Nutzung des Kraftstoffs e_u für Biokraftstoffe auf null gesetzt. Für die Berechnung der Terme e_p , e_{sca} , e_{ccs} , e_{ccr} , e_{ee} gelten gesonderte Regelungen, die in der Beispielrechnung und bei der Beantwortung der häufig gestellten Fragen erläutert werden.

Allokation der THG-Emissionen zwischen dem Biokraftstoff und den Nebenerzeugnissen

Treten im Biokraftstoffproduktionsprozess Nebenerzeugnisse auf, so werden die aus dem Produktionsprozess resultierenden THG-Emissionen (bis zum Auftreten des Nebenerzeugnisses) zwischen dem Biokraftstoff und dem Nebenerzeugnis alloziert. Grundlage für die Allokation sind die Energiegehalte der Originalsubstanz (nicht nur der Trockensubstanz) des Biokraftstoffs und der Nebenerzeugnisse. Der wie folgt ermittelte allozierte Wert wird an die nachgelagerte Schnittstelle weitergegeben.

e' stellt die THG-Emissionen bezogen auf das (Zwischen)-erzeugnis der jeweiligen Prozessstufe dar (z. B. g CO₂-Äq./kg Dicksaft aus Zuckerrüben). e steht für die THG-Emissionen bezogen auf den Energiegehalt des Erzeugnisses (z. B. g CO₂-Äq./MJ Bioethanol).

Genauere Informationen zur Deklaration von Nebenerzeugnissen und zur Allokation finden sich im Kapitel FAQ. Werden an mehreren Stellen der Bioethanolproduktionskette Nebenerzeugnisse produziert, müssen mehrere AF berücksichtigt werden (vgl. Kapitel Beispielrechnung). Nach Umsetzung der Mitteilung der Kommission „Note on the conducting and verifying actual calculations of GHG emission savings“ am 31.12.2016 müssen sich allerdings die Energiegehalte des Biokraftstoffes/der Zwischenerzeugnisse/der Nebenerzeugnisse auf deren Trockensubstanz beziehen [24].

² Das Wort Erzeugnis wird im Dokument synonym für das Wort Produkt verwendet. Da die Biokraft-NachV überwiegend das Wort Erzeugnis verwendet, wird das für dieses Dokument übernommen.

Formel (4)

$$e_{\text{alloziert}} = \text{THG - Emissionen bis zum Auftreten des Nebenerzeugnisses} * \text{Allokationsfaktor (AF)}$$

Formel (5)

$$AF = \frac{m_{\text{Haupterzeugnis}} * H_{\text{unterer, Haupterzeugnis}}}{m_{\text{Haupterzeugnis}} * H_{\text{unterer, Haupterzeugnis}} + m_{\text{Nebenerzeugnis}} * H_{\text{unterer, Nebenerzeugnis}}}$$

 m = Masse H = Heizwert

Berechnung der Gesamtemissionen und des THG-Minderungspotenzials

Die letzte Schnittstelle berechnet die Summe der THG-Emissionen. Sind die THG-Emissionen aus den Transportprozessen nicht mit angegeben bzw. wurde nicht bereits der Teilstandardwert für den Transport verwendet, ermittelt die letzte Schnittstelle, in welche Regionen der Kraftstoff transportiert werden kann, ohne das entsprechende THG-Minderungspotenzial zu unterschreiten. Unter Berücksichtigung des unteren Heizwertes von Bioethanol, rechnet die letzte Schnittstelle die Gesamtemissionen der Herstellungs- und Lieferkette auf einen Megajoule Bioethanol um. Zudem berechnet sie nach Formel (2) das THG-Minderungspotenzial.

Datenarten und Datenquellen

Innerhalb der THG-Bilanzierung werden verschiedene Datenarten aus verschiedenen Datenquellen benötigt. Im Folgenden sind diese tabellarisch zusammengefasst. Weitere Ausführungen zu Datenquellen finden sich im Kapitel FAQ.

Tabelle 5: Für die THG-Bilanzierung benötigte Datenarten und -quellen

Datenarten	Datenquellen
Betriebliche Verbrauchsdaten (Rohstoffgewinnung, Verarbeitung, Transport)	Tatsächliche Messung erforderlich
Emissionsfaktoren, Stoffdichten	Entnahme aus Literatur, Datenbanken
Heizwerte	Entnahme aus Literatur, Datenbanken, tatsächliche Messung
Lachgasemissionen aus der Rohstoffgewinnung	Modellansätze nach IPCC oder GNOC

Für Werte aus Literaturquellen oder Datenbanken müssen die entsprechenden Quellen angegeben werden (Autor, Titel, (Zeitschrift, Band) Jahr).

Beispielrechnung

Anhand einer beispielhaften zuckerrübenbasierten Bioethanolproduktion (vgl. Abbildung 8) wird die Berechnung der THG-Emissionen bezogen auf einen Megajoule Bioethanol und die Ermittlung des THG-Minderungspotenzials schrittweise dargestellt. Die Beispielrechnung folgt dem zuvor beschriebenen Berechnungsschema. Dabei werden zuerst je Berechnungsterm die gegebenen betrieblichen Daten und die entsprechenden Emissionsfaktoren aufgeführt, anschließend erfolgen der Einsatz dieser Daten in die Berechnungsformeln und der Hinweis auf typische Fehler bei der Berechnung.

Für diese Beispielrechnung werden betriebliche Daten herangezogen. Was bei der Verwendung von Teilstandwerten berücksichtigt werden muss, ist im Kapitel FAQ erläutert.

Darstellung einer beispielhaften Prozesskette

Die in Abbildung 8 dargestellte Prozesskette besteht aus dem Zuckerrübenanbau, dem Transport der Zuckerrüben zur Zuckerfabrik, der Zuckerfabrik, der Bioethanolanlage und der Distribution des Bioethanols zu den Verbrauchsstellen. Neben den THG-Emissionen, die innerhalb dieser Prozesskette freigesetzt werden, müssen entsprechend der Berechnungsformel (1) auch die THG-Einsparungen infolge besserer landwirtschaftlicher Bewirtschaftungspraktiken, Abscheidung und geologische Speicherung/Ersetzung von CO_2 sowie infolge überschüssigen Stroms aus KWK berücksichtigt werden.

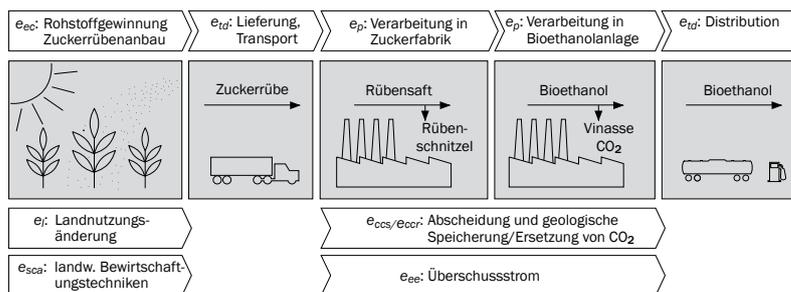


Abbildung 8: Beispielhafte zuckerrübenbasierte Bioethanolproduktionskette

Nach Anbau und Ernte werden die Zuckerrüben zur Zuckerfabrik transportiert. In der Zuckerfabrik werden über mehrere Aufbereitungsschritte aus den Zuckerrüben Zuckersäfte als Grundlage für die Bioethanolproduktion erzeugt. Die dabei anfallenden Rübenschnitzel können getrocknet, pelletiert und so zu Rübentrockenschnitzel verarbeitet werden. Sie gelten für dieses Beispiel als Nebenerzeugnis, d. h. die bis zu diesem Punkt anfallenden THG-Emissionen werden zwischen dem Zuckersaft und den Rübenschnitzel aufgeteilt. Die Zuckersäfte gehen in die Bioethanolanlage, in der sie zu Bioethanol fermentiert werden. Neben Bioethanol fällt aus dem Fermentationsprozess Vinasse an, die eingedampft wird und als Vinassekonzentrat ein Nebenerzeugnis darstellt. Zusätzlich wird bei der Fermentation CO_2 frei. In diesem Berechnungsbeispiel wird angenommen, dass ein Teilstrom davon druckverflüssigt wird und in der Getränkeindustrie fossiles

CO₂ ersetzt. Dieses CO₂ wird allerdings nicht als Nebenerzeugnis in der THG-Bilanz berücksichtigt, sondern wird über die THG-Einsparung e_{ccf} der Bioethanolproduktion gutgeschrieben. Der in der Zuckerfabrik und der Bioethanolanlage benötigte Prozessdampf wird über Erdgasfeuerung zur Verfügung gestellt. Das Ethanol wird dann zu den verschiedenen Verbrauchsstellen transportiert.

Rohstoffgewinnung e'_{ec}

In der Praxis wird für diese Prozessstufe in der Regel ein Teilstandardwert oder ein NUTS-2-Wert verwendet. In der Handreichung werden für die Beispielrechnung an dieser Stelle aber auch die tatsächlichen THG-Emissionen aus dem Prozess der Rohstoffgewinnung berücksichtigt. Der Ersterfasser nimmt z. B. eine Lieferung von Zuckerrüben, die aus folgendem Anbau stammt, auf. Dabei müssen die Daten zu den Einsatzstoffen und -mengen aus betrieblichen Daten entnommen werden.

Tabelle 6: Einsatzstoffe und -mengen des Zuckerrübenanbaus

Einsatzstoffe und -energie	Einheit	Wert
Saatgut	kg/(ha*a)	6,0
N-Dünger	kg N/(ha*a)	119,7
P ₂ O ₅ -Dünger	kg/(ha*a)	59,7
K ₂ O-Dünger	kg/(ha*a)	134,9
CaO-Dünger	kg/(ha*a)	400,0
Pestizide	kg/(ha*a)	1,3
Diesel (landwirt. Maschinen)	l/(ha*a)	175,9

Die Werte des Zuckerrübenanbaus stammen aus [25].

Ertrag	Einheit	Wert
Zuckerrübenenertrag	t/(ha *a)	68,86

N₂O ist ein Treibhausgas, das u. a. bei dem Einsatz von stickstoffhaltigen Düngemitteln in der Landwirtschaft freigesetzt wird. Dabei wird zwischen direkten und indirekten Lachgasemissionen unterschieden. Direkte Lachgasemissionen entstehen z. B. durch Stickstoff-Einträge aus organischen und mineralischen Düngemitteln und atmosphärischer N-Deposition. Indirekte Lachgasemissionen werden verursacht, wenn Stickstoffverbindungen wie Nitrat und Ammoniak z. B. infolge eines N-Düngemiteinsatzes in die umliegenden Naturräume gelangen. Wie Lachgasemissionen berechnet werden können, ist im Kapitel FAQ beschrieben.

Gängige Werte von Emissionsfaktoren dieser Einsatzstoffe und -energie sind folgend aufgeführt. Diese stammen aus der Literatur und anerkannten Datenbanken.

Tabelle 7: Emissionsfaktoren der bei der Rohstoffgewinnung eingesetzten Stoffe und Energie

Einsatzstoffe und -energie	Einheit	EF	Quellen
Saatgut	kg CO ₂ -Äq./kg	3,54	[25]
N-Dünger	kg CO ₂ -Äq./kg	5,88 / 6,41 / 7,59	[25] - [27]
P ₂ O ₅ -Dünger	kg CO ₂ -Äq./kg	1,01 / 1,18	[25], [26]
K ₂ O-Dünger	kg CO ₂ -Äq./kg	0,58 / 0,66	[25], [26]
CaO-Dünger	kg CO ₂ -Äq./kg	0,13 / 0,30	[25], [26]
N ₂ O-Feldemission	kg CO ₂ -Äq./kg N-Dünger	8,08 ³	[25]
Pestizide	kg CO ₂ -Äq./kg	10,97	[25]
Diesel	kg CO ₂ -Äq./l	3,14 / 2,1	[25], [26]

³ Der hier angegebene Emissionsfaktor für die Lachgasemissionen ist kein Emissionsfaktor im klassischen Sinn. Er muss für jede Kultur und die entsprechende Düngemittelmenge und -art (z. B. synthetische Düngemittel, organische Düngemittel) individuell bestimmt werden.

Nach Einsetzen der Einsatzmengen und Emissionsfaktoren in die Formel (3) ergibt sich für den Zuckerrübenanbau folgender Wert für e'_{ec} :

$$e'_{ec} = \frac{6 \frac{kg}{ha * a} * 3,54 \frac{kg CO_2 \ddot{A}q.}{kg} + 119,7 \frac{kg}{ha * a} * 5,88 \frac{kg CO_2 \ddot{A}q.}{kg} + 59,7 \frac{kg}{ha * a} * 1,01 \frac{kg CO_2 \ddot{A}q.}{kg}}{68,86 \frac{t}{ha * a}} + \frac{134,9 \frac{kg}{ha * a} * 0,58 \frac{kg CO_2 \ddot{A}q.}{kg} + 400 \frac{kg}{ha * a} * 0,13 \frac{kg CO_2 \ddot{A}q.}{kg} + 119,7 \frac{kg}{ha * a} * 8,08 \frac{kg CO_2 \ddot{A}q.}{kg}}{68,86 \frac{t}{ha * a}} + \frac{1,3 \frac{kg}{ha * a} * 10,97 \frac{kg CO_2 \ddot{A}q.}{kg} + 175,9 \frac{l}{ha * a} * 3,14 \frac{kg CO_2 \ddot{A}q.}{l}}{68,86 \frac{t}{ha * a}}$$

$$e'_{ec} = 35,57 \frac{kg CO_2 \ddot{A}q.}{t \text{ Zuckerrübe}}; \text{ ohne Allokation}$$

Grundformel:

$$e'_{ec} = \frac{\sum EM * EF}{\text{Ertrag oder Menge}}$$

Der Ersterfasser gibt somit einen Wert von 35,57 kg CO₂-Äq. je t Zuckerrübe an die Zuckerfabrik weiter.

Mögliche Berechnungsfehler

- Lachgasemissionen gemäß der IPCC- oder GNOC-Methode dürfen nicht vergessen werden.
- Unter dem Handelsnamen von Düngern (z. B. Kalkammonsalpeter) können z. T. keine EF ermittelt werden. Hier wird die chemische Bezeichnung des Düngers (z. B. Calciumammoniumnitrat) benötigt.
- Es muss darauf geachtet werden, ob sich die Einsatzmenge und der EF des Düngemittels/Pestizids nur auf den Wirkstoff (z. B. kg N) oder auf die Menge des Düngers (z. B. Calciumammoniumnitrat besteht aus 76 % NH₄NO₃ und 24 % CaCO₃) beziehen. Wieviel N im Düngemittel ist, kann über die Stöchiometrie ermittelt werden.
- Einheiten-Umrechnungsfehler, z. B.:
 - beziehen sich die Menge des Einsatzstoffes und der EF des Einsatzstoffes auf unterschiedliche Mengeneinheiten, z. B. 6 kg Saatgut/(ha*a) und EF von 3,54 kg CO₂-Äq./t Saatgut;
 - sind die Einsatzmengen evtl. in Jahreseinsatzmengen, z. B. kg/a, angegeben, während der Ertrag auf Hektar bezogen, z. B. kg/(ha*a), angegeben wird. In diesem Fall ist ein Flächenbezug, d. h. eine Umrechnung der Jahreseinsatzmengen auf einen Hektar, notwendig.

Landnutzungsänderungen e'_{l}

Wurden die Zuckerrübenanbauflächen bereits vor dem 1.1.2008 landwirtschaftlich genutzt?

In diesem Beispiel: Ja. Damit ist der Wert für e'_{l} gleich null.

$$e'_{l} = 0$$

Bessere landwirtschaftliche Bewirtschaftungspraktiken e'_{sca}

Wurden verbesserte landwirtschaftliche Bewirtschaftungspraktiken angewendet?

In diesem Beispiel: Es sind keine kohlenstoffanreichernden Maßnahmen erfolgt.

$$e'_{sca} = 0$$

Eine genauere Definition der besseren landwirtschaftlichen Bewirtschaftungspraktiken erfolgt im Kapitel FAQ.

Die Werte des Transportes stammen aus [26].

Transport e'_{td1}

Die Zuckerrüben werden vom Ersterfasser zur Zuckerfabrik transportiert. Zu diesem Transport sind beispielhaft folgende Daten hinterlegt:

Tabelle 8: Einsatzstoffe und -mengen des Transportes e'_{td1}

Einsatzstoffe und -energie	Einheit	Wert
Masse der transportierten Rüben (m)	t	24
Transportmittel		LKW (Diesel)
Transportdistanz beladen (d_{beladen})	km	80
Transportdistanz leer (d_{leer})	km	20
Kraftstoffverbrauch beladen (K_{beladen})	l/km	0,41
Kraftstoffverbrauch leer (K_{leer})	l/km	0,24

Ein gängiger Emissionsfaktor für den eingesetzten Kraftstoff Diesel ist in Tabelle 9 aufgeführt:

Tabelle 9: Emissionsfaktor der für den Transport eingesetzten Stoffe und Energie

Einsatzstoffe und -energie	Einheit	EF	Quelle
Diesel	kg CO ₂ -Äq./l	3,14 / 3,01	[25], [28]

Die THG-Emissionen aus dem Transport werden wie folgt berechnet:

Formel (6)

$$e'_{td1} = \frac{(d_{\text{beladen}} * K_{\text{beladen}} + d_{\text{leer}} * K_{\text{leer}}) * \text{Emissionsfaktor Kraftstoff}}{\text{transportierte Menge}}$$

Nach Einsetzen der Einsatzmengen und Emissionsfaktoren in die Formel (6) ergibt sich für den Transport e'_{td1} folgender Wert:

$$e'_{td1} = \frac{\left(80 \text{ km} * 0,41 \frac{\text{l}}{\text{km}} + 20 \text{ km} * 0,24 \frac{\text{l}}{\text{km}}\right) * 3,14 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{l}}}{24 \text{ t}}$$

$$e'_{td1} = 4,92 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{t Zuckerrübe}}; \text{ ohne Allokation}$$

Mögliche Berechnungsfehler

- Einheiten- und Umrechnungsfehler, z. B. Dieserverbrauch und Emissionsfaktor von Diesel müssen sich einheitlich auf l oder kg beziehen.

Verarbeitung e'_{p1} : Zuckerfabrik

Eine Zuckerfabrik bekommt Zuckerrüben geliefert. Die Berechnung der THG-Emissionen für diese Schnittstelle erfolgt auf Basis der folgenden, beispielhaften Betriebsdaten.

Tabelle 10: Einsatzstoffe und-mengen in der Zuckerfabrik

Einsatzstoffe und -energie	Einheit	Wert
Erdgas	MJ/a	442.377.866
Strom	kWh/a	17.856.000
Kalkstein	kg/a	54.985.000
Prozesswasser	kg/a	507.018.000
Abwasserbehandlung	kg/a	763.269.000

Erzeugnisse	Einheit	Wert
Zuckersaft	t/a	752.747
Rübenschnitzel getrocknet	t/a	70.650

Gängige Werte von Emissionsfaktoren dieser Einsatzstoffe und -energie sind nachfolgend aufgeführt. Diese stammen aus der Literatur und anerkannten Datenbanken.

Tabelle 11: Emissionsfaktoren der in der Zuckerfabrik eingesetzten Stoffe und Energie

Einsatzstoffe und -energie	Einheit	EF	Quellen
Erdgas	kg CO ₂ -Äq./MJ	0,067 / 0,072 / 0,070	[25] - [27]
Strom	kg CO ₂ -Äq./kWh	0,61 / 0,60 / 0,58	[25] - [27]
Kalkstein	kg CO ₂ -Äq./kg	9,72*10 ⁻³	[27]
Prozesswasser	kg CO ₂ -Äq./kg	4,0*10 ⁻⁴	[27]
Abwasserbehandlung	kg CO ₂ -Äq./kg	2,7 *10 ⁻⁴	[27]

Nach Einsetzen dieser Einsatzmengen und Emissionsfaktoren in Formel (3) ergibt sich folgender Wert für e'_{p1} :

$$e'_{p1} = \frac{442.377.866 \frac{MJ}{a} * 0,067 \frac{kg \text{ CO}_2\text{-Äq.}}{MJ} + 17.856.000 \frac{kWh}{a} * 0,61 \frac{kg \text{ CO}_2\text{-Äq.}}{kWh} + 54.985.000 \frac{kg}{a} * 0,00972 \frac{kg \text{ CO}_2\text{-Äq.}}{kg}}{752.747 \frac{t}{a}}$$

$$+ \frac{507.018.000 \frac{kg}{a} * 0,0004 \frac{kg \text{ CO}_2\text{-Äq.}}{kg} + 763.269.000 \frac{kg}{a} * 0,00027 \frac{kg \text{ CO}_2\text{-Äq.}}{kg}}{752.747 \frac{t}{a}}$$

$$e'_{p1, \text{ unalloziert}} = 55,10 \frac{kg \text{ CO}_2\text{-Äq.}}{(t \text{ Zuckersaft und } 0,09 t \text{ Ruebenschnitzel})}; \text{ ohne Allokation}$$

Es wird angenommen, dass ein Teilstrom der Zuckersäfte aus der Zuckerfabrik als Basis für den Bioethanolproduktionsprozess eingesetzt wird. Der Hauptstrom wird zur Erzeugung von Haushaltszucker genutzt. Die hier angegebenen Massen- und Energieströme der Zuckerfabrik beziehen sich nur auf die Erzeugung der Zuckersäfte, die anschließend in der Bioethanolanlage eingesetzt werden.

Grundformel:

$$e'_{ec} = \frac{\sum EM * EF}{\text{Ertrag oder Menge}}$$

e'_i und e'_{sca} sind von der Allokation ausgenommen. Sie werden nur dem Biokraftstoff zugerechnet, siehe Kapitel FAQ.

Allokation zwischen Rübensaft und Rübenschnitzel

Das Ergebnis $e'_{p1, unalloziert}$ bezieht sich auf die THG-Emissionen, die insgesamt aus der Zuckerfabrik resultieren. Da in der Zuckerfabrik neben dem Zuckersaft auch Rübenschnitzel als Nebenerzeugnis anfallen, werden die THG-Emissionen, die bis zum Auftreten der Rübenschnitzel anfallen, zwischen den beiden Erzeugnissen alloziert. Die bis zu diesem Punkt freigesetzten THG-Emissionen setzen sich aus den THG-Emissionen der Rohstoffgewinnung, des Transports und denen der Zuckerfabrik zusammen (vgl. Abbildung 9).

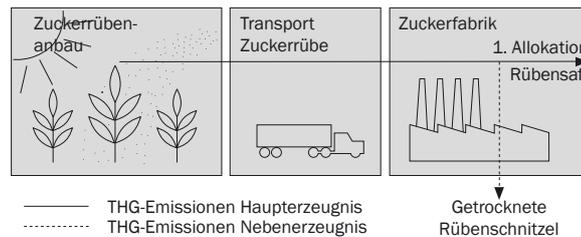


Abbildung 9: Allokation der THG-Emissionen zwischen Rübensaft und getrockneten Rübenschnitzeln

Da sich die THG-Werte der Rohstoffgewinnung und des Transports auf Tonne Zuckerrübe und der THG-Wert aus der Zuckerfabrik auf Tonne Zuckersaft beziehen, wird der Zuckersaftertrag je Tonne Zuckerrübe benötigt. Dieser Ertrag und die für die Allokation benötigten Massen des Zuckersaftes und der getrockneten Rübenschnitzel werden den betrieblichen Daten entnommen. Die Heizwerte können einer tatsächlichen Messung, der Literatur oder Datenbanken entstammen.

Tabelle 12: Zuckersaftertrag und Heizwerte der Haupt- und Nebenerzeugnisse

Ertrag	Einheit	Wert	Quelle
Zuckersaftertrag je kg Zuckerrübe	t/t	0,63	Betriebliche Daten einer beispielhaften Anlage

Haupt- und Nebenerzeugnisse	Einheit	Unterer Heizwert	Quelle
Zuckersaft	MJ/kg	18,0	Betriebliche Daten einer beispielhaften Anlage
Getrocknete Rübenschnitzel	MJ/kg	12,7	Betriebliche Daten einer beispielhaften Anlage

Die allozierten THG-Emissionen berechnen sich folgendermaßen:

$$e'_{alloziert\ 1} = \text{THG – Emissionen bis zum Auftreten des Nebenerzeugnisses} \cdot \text{Allokationsfaktor (AF)}$$

Die THG-Emissionen bis zum Auftreten der Rübenschnitzel werden wie folgt ermittelt:

$$\begin{aligned} \text{THG – Emissionen}_{\text{aufsummiert}} &= e'_{ec} + e'_{td1} + e'_{p1} \\ &= 35,57 \frac{\text{kg CO}_2\ddot{\text{A}}\text{q.}}{\text{t Zuckerrübe}} + 4,92 \frac{\text{kg CO}_2\ddot{\text{A}}\text{q.}}{\text{t Zuckerrübe}} + 55,10 \frac{\text{kg CO}_2\ddot{\text{A}}\text{q.}}{\text{t Zuckersaft}} \end{aligned}$$

Um die Werte addieren zu können, bedarf es eines einheitlichen Nenners, nämlich dem Bezug auf Tonne Zuckersaft. Über den Zuckersaftertrag von 0,63 t Zuckersaft je Tonne Zuckerrübe wird ein einheitlicher Nenner gewährleistet:

$$35,57 \frac{\text{kg CO}_2\text{Äq.}}{\text{t Zuckerrübe}} + 4,92 \frac{\text{kg CO}_2\text{Äq.}}{\text{t Zuckerrübe}} = \frac{40,94 \text{ kg CO}_2\text{Äq.}}{0,63 \text{ t Zuckersaft}} = 104,37 \frac{\text{kg CO}_2\text{Äq.}}{\text{t Zuckersaft}}$$

$$\text{THG - Emissionen}_{\text{aufsummiert}} = 104,37 \frac{\text{kg CO}_2\text{Äq.}}{\text{t Zuckersaft}} + 55,10 \frac{\text{kg CO}_2\text{Äq.}}{\text{t Zuckersaft}} = 159,47 \frac{\text{kg CO}_2\text{Äq.}}{\text{t Zuckersaft}}$$

Bis zum Auftreten der Rübenschnitzel werden 159,47 kg CO₂-Äq. je Tonne Zuckersaft freigesetzt. Diese THG-Emissionen sind noch nicht zwischen den getrockneten Rübenschnitzel und dem Zuckersaft alloziert. Der Allokationsfaktor wird nach Formel (5) berechnet:

$$AF_{\text{Zuckersaft}} = \frac{752.747 \frac{\text{t}}{\text{a}} * 18.000 \frac{\text{MJ}}{\text{t}}}{752.747 \frac{\text{t}}{\text{a}} * 18.000 \frac{\text{MJ}}{\text{t}} + 70.650 \frac{\text{t}}{\text{a}} * 12.700 \frac{\text{MJ}}{\text{t}}}$$

$$AF_{\text{Zuckersaft}} = 0,94$$

$$e'_{\text{alloziert 1}} = 159,47 \frac{\text{kg CO}_2\text{Äq.}}{\text{t}} * 0,94$$

$$e'_{\text{alloziert 1}} = 149,56 \frac{\text{kg CO}_2\text{Äq.}}{\text{t Zuckersaft}} \text{ (und } 105,53 \frac{\text{kg CO}_2\text{Äq.}}{\text{t getr. Ruebenschnitzel)})$$

Grundformel:

$$AF = \frac{m_{\text{HE}} * H_{\text{HE}}}{m_{\text{HE}} * H_{\text{HE}} + m_{\text{NE}} * H_{\text{NE}}}$$

HE = Haupterzeugnis

NE = Nebenerzeugnis

Die Zuckerfabrik gibt somit einen Wert von 149,56 kg CO₂-Äq. je Tonne Zuckersaft an die Bioethanolanlage weiter.

Verarbeitung e'_{p2}: Bioethanolproduktion

Die Bioethanolanlage bekommt den Zuckersaft von der Zuckerfabrik geliefert und hat folgende Betriebsdaten als Grundlage für die Berechnung des eigenen THG-Emissionswertes.

Tabelle 13: Einsatzstoffe und -mengen der Bioethanolproduktion

Einsatzstoffe und -energie	Einheit	Wert
Erdgas	MJ/a	902.927.200
Strom	kWh/a	10.092.120
Salpetersäure (65 %)	kg/a	238.000
Natriumhydroxid (50 %)	kg/a	246.000
Trockenhefe	kg/a	156.000
Harnstoff	kg/a	604.000
Prozesswasser	kg/a	226.770.000
Abwasserbehandlung	kg/a	350.000.000

Erzeugnisse	Einheit	Wert
Bioethanol	t/a	88.830
Vinassekonzentrat	t/a	69.568
Flüssig-CO ₂	t/a	36.346

Die Werte der Bioethanolanlage stammen aus [2].

Gängige Werte von Emissionsfaktoren dieser Einsatzstoffe und -energie sind nachfolgend aufgeführt. Diese stammen aus der Literatur und anerkannten Datenbanken.

Tabelle 14: Emissionsfaktoren der in der Bioethanolanlage eingesetzten Stoffe und Energie

Einsatzstoffe und -energie	Einheit	EF	Quellen
Erdgas	kg CO ₂ -Äq./MJ	0,067 / 0,072 / 0,072	[25] - [27]
Strom	kg CO ₂ -Äq./kWh	0,61 / 0,60 / 0,58	[25] - [27]
Salpetersäure (65 %)	kg CO ₂ -Äq./kg	1,89	[27]
Natriumhydroxid (50 %)	kg CO ₂ -Äq./kg	0,47 / 1,12	[25], [26]
Trockenhefe	kg CO ₂ -Äq./kg	3,2	[29]
Harnstoff	kg CO ₂ -Äq./kg	0,81	[27]
Prozesswasser	kg CO ₂ -Äq./kg	4,0*10 ⁻⁴	[27]
Abwasserbehandlung	kg CO ₂ -Äq./kg	2,7 *10 ⁻⁴	[27]

Nach dem Einsetzen dieser Einsatzmengen und Emissionsfaktoren in Formel (3) ergibt sich folgender Wert für e'_{p2} :

Grundformel:

$$e'_{ec} = \frac{\sum EM * EF}{\text{Ertrag oder Menge}}$$

$$e'_{p2} = \frac{902.927.200 \frac{MJ}{a} * 0,067 \frac{kg \text{ CO}_2 \text{ Äq.}}{MJ} + 10.092.120 \frac{kWh}{a} * 0,61 \frac{kg \text{ CO}_2 \text{ Äq.}}{kWh} + 238.000 \frac{kg}{a} * 1,89 \frac{kg \text{ CO}_2 \text{ Äq.}}{kg}}{88.830 \frac{t}{a}} + \frac{246.000 \frac{kg}{a} * 0,47 \frac{kg \text{ CO}_2 \text{ Äq.}}{kg} + 156.000 \frac{kg}{a} * 3,2 \frac{kg \text{ CO}_2 \text{ Äq.}}{kg} + 604.000 \frac{kg}{a} * 0,81 \frac{kg \text{ CO}_2 \text{ Äq.}}{kg}}{88.830 \frac{t}{a}} + \frac{226.770.000 \frac{kg}{a} * 0,0004 \frac{kg \text{ CO}_2 \text{ Äq.}}{t} + 350.000.000 \frac{kg}{a} * 0,00027 \frac{kg \text{ CO}_2 \text{ Äq.}}{t}}{88.830 \frac{t}{a}}$$

$$e'_{p2 \text{ unalloziert}} = 769,91 \frac{kg \text{ CO}_2 \text{ Äq.}}{(t \text{ Bioethanol u. } 0,78 t \text{ Vinassekonzentrat u. } 0,41 t \text{ verflüssigtes CO}_2)}; \text{ ohne Allokation}$$

Produktion von Überschussstrom e'_{ee}

Erfolgt in der Zuckerfabrik und/oder der Bioethanolanlage die Produktion von überschüssigem Strom?

In diesem Beispiel: Nein.

$$e'_{ee} = 0$$

Allokation zwischen Bioethanol und Vinassekonzentrat

Das Ergebnis $e'_{p2, \text{ unalloziert}}$ bezieht sich auf die THG-Emissionen, die insgesamt in der Bioethanolanlage freigesetzt werden. Da in der Bioethanolanlage neben Bioethanol Vinassekonzentrat als Nebenerzeugnis anfällt, werden die THG-Emissionen, die bis zum Auftreten des Vinassekonzentrates anfallen, zwischen den beiden Erzeugnissen alloziert. Wie in Abbildung 10 dargestellt, setzen sich die bis zu diesem Punkt freigesetzten THG-Emissionen aus den bereits aufsummierten und allozierten THG-Emissionen der vorgelagerten Schnittstellen und den THG-Emissionen der Bioethanolanlage zusammen.

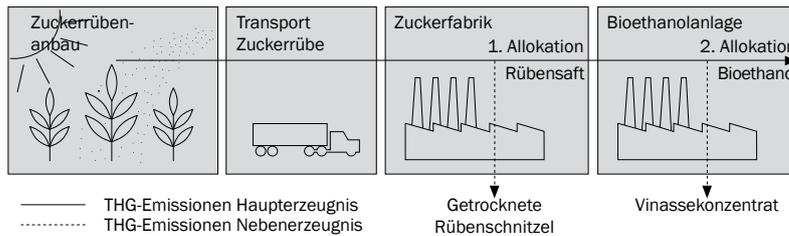


Abbildung 10: Allokation der THG-Emissionen zwischen Bioethanol und Vinassekonzentrat

Da sich die THG-Werte aus den vorgelagerten Schnittstellen auf Tonne Zuckersaft und die THG-Werte der Bioethanolanlage auf Tonne Bioethanol beziehen, wird die Bioethanolausbeute je Tonne Zuckersaft benötigt. Diese Ausbeute und die für die Allokation benötigten Massen des Bioethanols und des Vinassekonzentrats werden den betrieblichen Daten entnommen. Die Heizwerte können einer tatsächlichen Messung, der Literatur oder Datenbanken entstammen.

Tabelle 15: Bioethanolausbeute und Heizwerte der Haupt- und Nebenerzeugnisse

Ertrag	Einheit	Wert	Quelle
Bioethanolausbeute je t Zuckersaft	t/t	0,12	Betriebliche Daten einer beispielhaften Anlage

Haupt- und Nebenerzeugnisse	Einheit	Unterer Heizwert	Quelle
Bioethanol	MJ/kg	27	[22]
Vinassekonzentrat	MJ/kg	15	Betriebliche Daten einer beispielhaften Anlage

Die allozierten THG-Emissionen berechnen sich folgendermaßen:

$$e'_{\text{alloziert } 2} = \text{THG - Emissionen bis zum Auftreten des Nebenerzeugnisses} * \text{Allokationsfaktor (AF)}$$

Die THG-Emissionen bis zum Auftreten des Vinassekonzentrates werden wie folgt ermittelt:

$$\begin{aligned} \text{THG - Emissionen}_{\text{aufsummiert}} &= e'_{\text{alloziert } 1} + e'_{\text{unalloziert}} \\ &= 149,56 \frac{\text{kg CO}_2\text{Äq.}}{\text{t Zuckersaft}} + 769,91 \frac{\text{kg CO}_2\text{Äq.}}{\text{t Bioethanol}} \end{aligned}$$

Um die Werte addieren zu können, bedarf es eines einheitlichen Nenners, nämlich dem Bezug auf eine Tonne Bioethanol. Über die Bioethanolausbeute von 0,12 t Bioethanol je Tonne Zuckersaft wird ein einheitlicher Nenner gewährleistet:

$$\begin{aligned} 149,56 \frac{\text{kg CO}_2\text{Äq.}}{\text{t Zuckersaft}} &= \frac{149,56 \text{ kg CO}_2\text{Äq.}}{0,12 \text{ t Bioethanol}} = 1.246,37 \frac{\text{kg CO}_2\text{Äq.}}{\text{t Bioethanol}} \\ \text{THG - Emissionen}_{\text{aufsummiert}} &= 1.246,37 \frac{\text{kg CO}_2\text{Äq.}}{\text{t Bioethanol}} + 769,91 \frac{\text{kg CO}_2\text{Äq.}}{\text{t Bioethanol}} = 2.016,28 \frac{\text{kg CO}_2\text{Äq.}}{\text{t Bioethanol}} \end{aligned}$$

Grundformel:

$$AF = \frac{m_{HE} * H_{HE}}{m_{HE} * H_{HE} + m_{NE} * H_{NE}}$$

HE = Haupterzeugnis
NE = Nebenerzeugnis

Was darüber hinaus bei der Anrechnung von e'_{ccr} zu beachten ist, wird im Kapitel FAQ erläutert.

Bis zum Auftreten des Vinassekonzentrats werden 2.016,28 kg CO₂-Äq. je Tonne Bioethanol freigesetzt. Diese THG-Emissionen sind noch nicht zwischen dem Bioethanol und dem Vinassekonzentrat alloziert. Der Allokationsfaktor wird nach Formel (5) berechnet:

$$AF_{\text{Bioethanol}} = \frac{88.830 \frac{t}{a} * 27.000 \frac{MJ}{t}}{88.830 \frac{t}{a} * 27.000 \frac{MJ}{t} + 69.568 \frac{t}{a} * 15.000 \frac{MJ}{t}}$$

$$AF_{\text{Bioethanol}} = 0,7$$

$$e'_{\text{alloziert}} = 2.016,28 \frac{kg \text{ CO}_2 \text{Äq.}}{t \text{ Bioethanol}} * 0,7$$

$$e'_{\text{alloziert } z} = 1.404,99 \frac{kg \text{ CO}_2 \text{Äq.}}{t \text{ Bioethanol}} \text{ (und } 780,55 \frac{kg \text{ CO}_2 \text{Äq.}}{t \text{ Vinassekonzentrat}})$$

Abscheidung und Ersetzung von Kohlenstoffdioxid e'_{ccr}

Für die Beispielrechnung wird angenommen, dass das druckverflüssigte CO₂ aus der Bioethanolanlage in der Getränkeindustrie eingesetzt wird und dort fossiles CO₂ ersetzt. Das druckverflüssigte CO₂ wird allerdings nicht als Nebenerzeugnis berücksichtigt, sondern die durch Ersatz des fossilen CO₂ vermiedenen THG-Emissionen werden dem Bioethanol gutgeschrieben. Innerhalb dieser Gutschrift müssen allerdings die energetischen und materiellen Aufwendungen für die Abscheidung und Druckverflüssigung des CO₂ berücksichtigt werden. Als Voraussetzung für eine Anerkennung der THG-Einsparung muss belegt werden, dass die Nutzung des CO₂ für gewerbliche Erzeugnisse bzw. Dienstleistungen erfolgt und dort das sonst eingesetzte fossile CO₂ ersetzt. Die für die Berechnung von e'_{ccr} benötigten Daten sind in Tabelle 16 zusammengefasst.

Tabelle 16: Betriebliche Daten für die Berechnung von e'_{ccr}

Einsatzstoffe und -energie	Einheit	Wert
Strom	kWh/a	7.649.284

Erzeugnisse	Einheit	Wert
Bioethanol	t/a	88.830
Flüssig-CO ₂	kg/a	36.346.000

Der Emissionsfaktor des Stromes kann der Tabelle 11 entnommen werden.

Der Wert für e'_{ccr} wird wie folgt berechnet:

Formel (7)

$$e'_{ccr} = \frac{\text{Menge an abgeschiedenem CO}_2 - \sum(\text{Einsatzmenge des Stoffes} * \text{Emissionsfaktor des Stoffes})}{\text{Menge Biokraftstoff}}$$

Nach Einsetzen der Werte in die Formel ergibt sich folgender Wert für e'_{ccr} :

$$e'_{ccr} = \frac{36.346.000 \text{ kg CO}_2 - (7.649.284 \text{ kWh} * 0,61 \frac{kg \text{ CO}_2 \text{Äq.}}{kWh})}{88.830 \text{ t Bioethanol}} = 356,64 \frac{kg \text{ CO}_2 \text{Äq.}}{t \text{ Bioethanol}}$$

Mögliche Berechnungsfehler

- Trockensubstanz-Gehalte (TS) und Zuckerkonzentrationen der Rohstoffe bzw. (Zwischen-)erzeugnisse müssen bei der Übergabe zwischen den Schnittstellen übereinstimmen. Energetische oder stoffliche Aufwendungen, die dazu führen, dass TS-Gehalte oder Zuckerkonzentrationen erhöht werden, müssen in der Energie- und Massenbilanz aufgeführt werden.
- Es ist darauf zu achten, dass die Konzentrationen der im Betrieb tatsächlich eingesetzten Chemikalien mit den Konzentrationen der verwendeten Emissionsfaktoren übereinstimmen. Beispiel: Eine Bioethanolanlage setzt 50 %ige Natronlauge ein. Der in der THG-Bilanz verwendete EF bezieht sich aber auf 45 %ige Natronlauge. Über Dreisatzrechnung kann dann die entsprechende Einsatzmenge der Chemikalie ermittelt werden.
- Es ist darauf zu achten, dass bei der Allokation alle Heizwerte einheitlich auf die Originalsubstanz bezogen werden und nicht nur auf deren Trockenanteil.
- Für die Allokation müssen die THG-Emissionen bis zum Erscheinen des Nebenerzeugnisses aufsummiert werden. Stammen dabei die THG-Emissionen aus verschiedenen Schnittstellen (z. B. Ersterfasser und Zuckerfabrik) und beziehen sie sich auf abweichende Zwischenerzeugnisse (z. B. kg Zuckerrübe und kg Zuckersaft), so dürfen die THG-Emissionen nicht einfach addiert werden. Sie müssen dann über Erträge bzw. Ausbeuten (z. B. Zuckersaftertrag und Bioethanolausbeute) umgerechnet werden.
- Einheiten- und Umrechnungsfehler, z. B. Einsatzmenge des Einsatzstoffes und EF des Einsatzstoffes beziehen sich auf unterschiedliche Mengeneinheiten, z. B. 6,7 GJ Prozesswärme/a und EF von 0,07 kg CO₂-Äq./MJ Prozesswärme.

Transport e'_{td2}

Das Bioethanol wird von der Bioethanolanlage zu einer Verbrauchsstelle transportiert. Für den Transport sind folgende Daten hinterlegt:

Tabelle 17: Einsatzstoffe und -mengen des Transportes e'_{td2}

Einsatzstoffe und -energie	Einheit	Wert
Masse des transportierten Bioethanols (m)	t	50
Transportmittel		Tanklastwagen Diesel
Distributionsdistanz beladen (d_{beladen})	km	150
Distributionsdistanz leer (d_{leer})	km	50
Kraftstoffverbrauch beladen (K_{beladen})	l/km	0,41
Kraftstoffverbrauch leer (K_{leer})	l/km	0,24

Die Werte des Transports entstammen eigenen Annahmen. Die Kraftstoffverbräuche stammen aus [26].

Ein gängiger Emissionsfaktor kann der Tabelle 9 entnommen werden.

Die THG-Emissionen aus dem Transport werden nach Formel (6) berechnet:

$$e'_{td2} = \frac{(150 \text{ km} * 0,41 \frac{\text{l}}{\text{km}} + 50 \text{ km} * 0,24 \frac{\text{l}}{\text{km}}) * 3,14 \frac{\text{kg CO}_2\text{Äq.}}{\text{l}}}{50 \text{ t}}$$

$$e'_{td2} = 4,62 \frac{\text{kg CO}_2\text{Äq.}}{\text{t Bioethanol}}$$

Grundformel:

$$e'_{td1} = \frac{(d_b * K_b + d_l * K_l) * \text{EF Kraftstoff}}{\text{transportierte Menge}}$$

Mögliche Berechnungsfehler

- Einheiten- und Umrechnungsfehler, z. B. Dieserverbrauch und Emissionsfaktor von Diesel müssen sich einheitlich auf l oder kg beziehen.

Gesamtemissionen E

Die Bioethanolanlage ist die letzte Schnittstelle. Sie muss die Gesamtemissionen berechnen und diese auf einen Megajoule Bioethanol beziehen. Die Gesamt-THG-Emissionen berechnen sich aus den bereits aufsummierten und allozierten THG-Emissionen, die dem Bioethanol zugeschrieben werden können, der THG-Einsparung e_{ccr} und den THG-Emissionen aus dem Transport des Bioethanols zu den Verbrauchsstellen.

$$\begin{aligned} \text{Gesamtemissionen } E \text{ je t Bioethanol} &= e'_{\text{alloziert 2}} - e'_{ccr} + e'_{td2} \\ &= 1.404,99 \frac{\text{kg CO}_2\ddot{\text{A}}\text{q.}}{\text{t Bioethanol}} - 356,64 \frac{\text{kg CO}_2\ddot{\text{A}}\text{q.}}{\text{t Bioethanol}} + 4,62 \frac{\text{kg CO}_2\ddot{\text{A}}\text{q.}}{\text{t Bioethanol}} \\ &= 1.052,97 \frac{\text{kg CO}_2\ddot{\text{A}}\text{q.}}{\text{t Bioethanol}} \end{aligned}$$

Unter Berücksichtigung des Heizwertes werden die THG-Emissionen auf einen Megajoule Bioethanol umgerechnet:

$$\begin{aligned} \text{Gesamtemissionen } E \text{ je MJ Bioethanol} &= \frac{1.052,97 \frac{\text{kg CO}_2\ddot{\text{A}}\text{q.}}{\text{t Bioethanol}}}{27.000 \frac{\text{MJ}}{\text{t Bioethanol}}} = 0,039 \frac{\text{kg CO}_2\ddot{\text{A}}\text{q.}}{\text{MJ Bioethanol}} \\ E &= 39 \frac{\text{g CO}_2\ddot{\text{A}}\text{q.}}{\text{MJ Bioethanol}} \end{aligned}$$

In den Gesamtemissionen sind die THG-Emissionen der Energieaufwendungen im Depot und an der Tankstelle nicht mit enthalten. Diese können z. B. dem Biograce-Tool entnommen werden [25].

Berechnung des THG-Minderungspotenzials

Die Bioethanolanlage berechnet als letzte Schnittstelle zudem nach Formel (2) die THG-Minderung:

Grundformel:

$$\text{THG - Minderung} = \left[\frac{E_{\text{Fossil}} - E_{\text{Bio}}}{E_{\text{Fossil}}} \right] * 100$$

$$\begin{aligned} \text{THG - Minderung} &= \frac{83,8 \frac{\text{g CO}_2\ddot{\text{A}}\text{q.}}{\text{MJ}} - 39,0 \frac{\text{g CO}_2\ddot{\text{A}}\text{q.}}{\text{MJ}}}{83,8 \frac{\text{g CO}_2\ddot{\text{A}}\text{q.}}{\text{MJ}}} \\ &= 53,5\% \end{aligned}$$

Somit können mit der zuckerrübenbasierten Bioethanolproduktion unter Berücksichtigung der Nebenerzeugnisse Rübenschnitzel und Vinassekonzentrat und der THG-Einsparung durch Abscheidung und Ersetzung von CO_2 rund 54 % der THG-Emissionen verglichen mit der fossilen Referenz eingespart werden.

Häufig gestellte Fragen (FAQ)

Der folgende Abschnitt sammelt verschiedene, häufig gestellte Fragen. Einige dieser Fragen berühren dabei Bereiche, zu denen bislang kaum Erfahrungswerte vorliegen. Besteht zu diesen Fragen keine offizielle Auslegung durch die Zertifizierungssysteme, so spiegeln die Antworten auf diese Fragen die Sichtweise der Autoren wider. Grundsätzlich sind bei der Zertifizierung innerhalb eines bestimmten Zertifizierungssystems die dort festgelegten Vorschriften zu beachten.

Nebenerzeugnisse und Allokation

Gibt es offizielle Definitionen von Nebenerzeugnis, Verarbeitungsrückstand, Reststoff und Abfall?

Die Biokraft-NachV enthält dazu keine Begriffserklärungen. In der Mitteilung der Europäischen Kommission 2010/C 160/02 und der EU RL 2015/1513 werden diese Begriffe jedoch teilweise ausgelegt [30], [31].

Demnach sind Abfälle alle Stoffe oder Gegenstände, deren sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss.

Reststoffe/Rückstände umfassen laut 2010/C 160/02 Reststoffe der Landwirtschaft, der Aquakultur, der Fischerei und der Forstwirtschaft und Verarbeitungsrückstände. Ein Verarbeitungsrückstand ist entsprechend der 2010/C 160/02 und RL 2015/1513 kein Endprodukt, das in einem Produktionsprozess unmittelbar erzeugt werden soll. Er ist nicht das primäre Produktionsziel und der Prozess wurde nicht absichtlich geändert, um ihn zu erzeugen [30], [31].

Gibt es eine Grundregel oder Entscheidungshilfe, woran man erkennen kann, dass es sich um ein Nebenerzeugnis handelt und somit eine Allokation von THG-Emissionen erfolgen darf?

Gemäß der Mitteilung der Kommission 2010/C 160/02 und der EU RL 2015/1513 muss die Produktion von Nebenerzeugnissen das primäre Ziel des Produktionsprozesses sein, d. h. ihre Produktion ist unmittelbar gewünscht und der Produktionsprozess wurde absichtlich geändert, um sie zu erzeugen [30], [31]. Des Weiteren werden Charakteristika wie Lagerbarkeit und Handelbarkeit des Erzeugnisses vorausgesetzt [30].

Für die Einordnung eines Prozessoutputs in die Kategorien Nebenerzeugnis, Rückstand oder Abfall ist auch die Frage der tatsächlichen Verwendung bzw. des weiteren Lebensweges relevant. Werden diese Stoffe beispielsweise weiterverkauft und kann dies über entsprechende Dokumente belegt werden, so ist eine Einordnung als Nebenerzeugnis möglich. Bestimmte Stoffe sind in den aktuellen Regelwerken jedoch explizit ausgenommen und können nicht als Nebenerzeugnis definiert werden. Hierzu zählen zum Beispiel Stroh und Bagasse.

Die THG-Emissionen dürfen nur zwischen Biokraftstoff bzw. dessen Vorprodukt und dem Nebenerzeugnis aufgeteilt werden. Entsprechend der Biokraft-NachV Anlage 1 Nr. 18 können keine THG-Emissionen auf Abfälle, Ernterückstände sowie Produktionsrückstände alloziert werden. Deren Lebenszyklus-THG-Emissionen sind bis zum Anfallort auf null gesetzt [23].

Was sind typische Nebenerzeugnisse der Bioethanolerzeugung?

Im Fall, dass Bioethanol auf stärkehaltigen Pflanzen basiert, können je nach eingesetztem Getreide Gluten, Kleie, Keimöl und DDGS als typische Nebenerzeugnisse anfallen. Im Fall von zuckerhaltigen Rohstoffen fallen je nach Rohstoff (z. B. Zuckerrübe, Zuckerrohr) typischerweise Rübenschnitzel, Carbokalk/Filterkuchen und Vinasse an.

Gelten Roh-, Dünn- oder Dicksäfte sowie Melasse als Produktionsrückstände oder Abfälle der Zuckerfabrik?

Es gibt keine klare Vorgabe dazu. Entsprechend den Vorgaben zu Nebenerzeugnissen aus 2010/C 160/02 sind Roh-, Dünn- oder Dicksäfte Zwischenerzeugnisse bei der Erzeugung von Zucker. Ihre Erzeugung ist damit Produktionszweck [30]. Es handelt sich demnach nicht um Produktionsrückstände der Zuckerfabrik, die mit null THG-Emissionen in den Bioethanolproduktionsprozess gehen. Für Melasse müssen die Anforderungen an Nebenerzeugnisse (vgl. Frage 2) im individuellen Fall geklärt werden. Inwieweit die Zuckersäfte für die Herstellung von Haushaltszucker und/oder Bioethanol verwendet werden, spielt bei der Frage der Aufteilung der THG-Emissionen der Zuckerfabrik eine Rolle.

Was passiert, wenn ein Nebenerzeugnis durch einen hohen Wasseranteil einen negativen Heizwert besitzt?

Gemäß der Biokraft-NachV Anlage 1 Nr. 18 wird für die Zwecke der Berechnung der Energiegehalt von Nebenerzeugnissen mit negativem Energiegehalt mit null angesetzt [23]. Damit kann keine Allokation zwischen Haupterzeugnis und diesem Nebenerzeugnis erfolgen.

Nach Umsetzung der Mitteilung der Kommission „Note on the conducting and verifying actual calculations of GHG emission savings“ am 31.12.2016 müssen sich allerdings bei der Allokation die Energiegehalte des Biokraftstoffs/der Zwischenerzeugnisse/der Nebenerzeugnisse auf deren Trockensubstanz beziehen [24]. Damit ist dann das Problem eines negativen Heizwertes bei Erzeugnissen ausgeschlossen.

An welcher Stelle der Prozesskette erfolgt die Allokation?

Gemäß der Empfehlung der Kommission 2010/C 160/02 sollte die Allokation nach dem Verfahrensschritt erfolgen, bei dem das Nebenerzeugnis produziert wird bzw. dort, wo die Erzeugnisse keine weitere nachgelagerte Verarbeitung erfahren, die durch stoffliche oder energetische Rückkopplungsschleifen mit dem vorgelagerten Teil der Verarbeitung verbunden ist [30].

Einheiten und Umrechnungsschritte

Wo finden sich Hilfen für die Umrechnung zwischen verschiedenen Einheiten?

Die Verwendung der verschiedenen Begleitinformationen im Biograce-Tool (www.biograce.net) oder der ENZO2-Software wird empfohlen. Eine zusätzliche Hilfe bietet das Kapitel Umrechnungstabellen.

Kombination von Teilstandardwerten und individuell berechneten THG-Emissionen

Was muss beachtet werden, wenn eine oder mehrere Schnittstellen Teilstandardwerte aus der Biokraft-NachV verwenden und andere Schnittstellen eigene THG-Berechnungen vornehmen?

Es muss beachtet werden, dass individuell ermittelte Werte und Teilstandardwerte nicht einfach zum Gesamtemissionswert addiert werden können,

- 1) da sich individuell ermittelte THG-Werte e' auf kg (Zwischen)-erzeugnis und Teilstandardwerte e auf das Enderzeugnis (z. B. 1 MJ Bioethanol) beziehen. Das heißt, die Teilstandardwerte von Prozessstufen (Rohstoffgewinnung e_{ec} , Verarbeitung $e_p - e_{ee}$, Transport und Vertrieb e_{td}) müssen auf Kilogramm ihres entsprechenden (Zwischen)-erzeugnisses umgerechnet werden. Dafür werden Konversionsfaktoren (KF) benötigt. Konversionsfaktoren geben an, welche Menge des Zwischenerzeugnisses für einen Megajoule Enderzeugnis benötigt wird. Diese Konversionsfaktoren sind in Erträgen oder Ausbeuten dargestellt.
- 2) da dem Teilstandardwert andere AF als dem individuell ermittelten THG-Wert zugrunde liegen können.

Nach folgender Formel (unter Berücksichtigung von KF und AF) erfolgt die Umrechnung von e zu e' :

$$e' \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{Äq.}}{\text{kg Zwischenerzeugnis}} \right] = \frac{e \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{Äq.}}{\text{MJ}} \right]}{AF \left[\frac{\text{MJ}}{\text{MJ}} \right] * KF \left[\frac{\text{kg Zwischenerzeugnis}}{\text{MJ}} \right]}$$

Die AF und KF, die den Teilstandardwerten zugrunde liegen, stammen aus [32].

Finden so die tatsächlichen KF und AF, die auch den individuell ermittelten THG-Werten zugrunde liegen, in den Teilstandardwerten Anwendung, können die Gesamt-THG-Emissionen, wie in der Beispielrechnung dargestellt, ermittelt werden.

Nach der 2015 veröffentlichten Mitteilung "Note on the conducting and verifying actual calculations of GHG emissions savings" ist eine Anpassung der Teilstandardwerte durch z. B. bessere Effizienzen der Konversionsanlagen zukünftig nicht mehr möglich [24]. Teilstandardwerte (z. B. für den Anbau) werden dann nach Umsetzung der Mitteilung am 31.12.2016 einfach von der letzten Schnittstelle zu den tatsächlichen Werten (z. B. für die Konversion) addiert.

Müssen im Fall getrennter Betriebe sowohl Zuckerfabrik als auch Bioethanolanlage entweder einzeln ihren THG-Wert individuell ermitteln oder gemeinsam den Teilstandardwert verwenden?

Dem Teilstandardwert für die Verarbeitung ist eine Bioethanolanlage hinterlegt, die direkt die Zuckerrüben aufnimmt und zu Bioethanol verarbeitet. Eine separate Zuckerfabrik wurde dabei nicht berücksichtigt. Es ist daher nicht möglich, dass nur einer der beiden Schnittstellen seinen THG-Emissionswert individuell ermittelt. Entweder berechnen beide, Zuckerfabrik und Bioethanolanlage, ihren THG-Wert individuell oder sie nutzen gemeinsam den Teilstandardwert für die Verarbeitung.

Dasselbe gilt für die THG-Werte aus mehreren Transporten. Entweder werden für alle Transporte individuell THG-Emissionen berechnet oder für alle Transporte gemeinsam der Teilstandardwert genutzt. Im Fall, dass der letzten Schnittstelle keine THG-Emissionen aus dem Transport vorliegen, ermittelt sie, in welche Regionen der Kraftstoff transportiert werden kann, ohne das entsprechende THG-Minderungspotenzial zu unterschreiten.

Können Teilstandardwerte aus Technologiepfaden übernommen und für Pfade genutzt werden, für die keine Standardwerte existieren?

Beispiel: Für Bioethanol aus Triticale wird bis zur Bioethanolherzeugung individuell ein THG-Wert ermittelt. Darf der Teilstandardwert für Transport und Distribution aus den existierenden Standardwerten für Bioethanol, z. B. auf Basis von Zuckerrüben, entnommen und mit dem individuell ermittelten Wert verrechnet werden?

Für Teilschritte, bei denen ein Erzeugnis identische Eigenschaften zu einem anderen Erzeugnis aufweist, für das Teilstandardwerte existieren, können diese Teilstandardwerte übernommen werden. Für das konkrete Beispiel bedeutet dies, da keine eigenen Teilstandardwerte nur für die Distribution vorliegen, dass kein Teilstandardwert übernommen werden kann.

Daten und Kennzahlen

Welche Emissionsfaktoren und Stoffdichten dürfen genutzt werden?

Emissionsfaktoren und Stoffdichten, die für die individuelle Berechnung der THG-Emissionen verwendet werden, müssen aus wissenschaftlichen Veröffentlichungen stammen. Wissenschaftliche Veröffentlichungen können Literaturquellen oder anerkannte Datenbanken (z. B. ecoinvent, ELCD, NREL) sein. Üblicherweise werden solche Literaturquellen als wissenschaftliche Literatur bezeichnet, die vor ihrer Publikation durch einen externen Gutachterprozess evaluiert wurden. Hier ist die Quelle mit Autor, Titel (Zeitschrift, Band) und Jahr zu zitieren. Ermittelt ein Unternehmen für das eigene Erzeugnis einen Emissionsfaktor oder lässt ihn ermitteln, so muss dieser Emissionsfaktor in der Literatur oder anerkannten Datenbanken veröffentlicht werden. Zudem sind, soweit vorhanden, vorgeschriebene Werte aus den Systemgrundsätzen der Zertifizierungssysteme zu beachten.

Wann dürfen pauschale Emissionsfaktoren angesetzt werden und wann müssen tatsächliche, individuelle Rechnungen für Hilfsstoffe und Energieträger erfolgen?

Emissionsfaktoren können verwendet werden, wenn sie Prozesse und Rohstoffe repräsentieren, die denen der abzubildenden Prozesse gleichen.

Das heißt z. B. für ein Unternehmen, das zur Prozessenergieversorgung Holzpellets einsetzt, dass es einen anerkannten Emissionsfaktor von Holzpellets verwenden darf, wenn sich die Prozesse zur Bereitstellung der Holzpellets gleichen.

Welcher Emissionsfaktor ist beim Bezug von externem Prozessstrom zu verwenden? Was sind die Voraussetzungen für die Verwendung eines geringeren Emissionsfaktors?

Gemäß der Biokraft-NachV Anlage 1 Nr. 11 muss bei der Nutzung von Netzstrom der Emissionsfaktor des Stroms in der jeweiligen Region verwendet werden [23]. In der Praxis wird je nach System der nationale oder der europäische Strommix angesetzt. In der 2015 veröffentlichten Mitteilung "Note on the conducting and verifying actual calculations of GHG emissions savings" wird für Bilanzierungen ab dem 31.12.2016 die Verwendung des EU-Strommixes verlangt [24].

Wird Ökostrom im Inselbetrieb erzeugt, d. h. die Stromerzeugungsanlage ist nicht an das Netz angeschlossen, so kann für diesen Ökostrom der Emissionsfaktor für den durchschnittlich erzeugten Ökostrom eingesetzt werden.

Welche Heizwerte dürfen genutzt werden?

Heizwerte, die für eine individuelle Berechnung genutzt werden, müssen aus wissenschaftlichen Veröffentlichungen oder tatsächlichen Messungen stammen. Tatsächliche Messungen müssen dokumentiert werden, um die Berechnung nachvollziehen zu können. Zudem sind, soweit vorhanden, vorgeschriebene Werte aus den Systemgrundsätzen der Zertifizierungssysteme zu beachten.

Müssen infrastrukturelle Aufwendungen, wie z. B. der Bau der Bioethanolanlage, mit berücksichtigt werden?

Nein. Gemäß der Biokraft-NachV werden die mit dem Bau der Anlage und Ausrüstung verbundenen Emissionen nicht berücksichtigt [23].

Müssen auch geringe Mengen an Hilfsstoffen in der THG-Bilanz angegeben werden? Gibt es eine „Marginalitätsgrenze“?

Gemäß der Mitteilung der europäischen Kommission 2010/C 160/02 scheint es nicht notwendig zu sein, Inputs, die geringe oder keine Auswirkungen auf das Ergebnis haben (wie in geringen Mengen bei der Verarbeitung verwendete Chemikalien), in die Berechnung einzubeziehen [30]. Im Biograce-Tool (<http://www.biograce.net>) sind cut-off-Kriterien für kleine Mengen definiert [25]. Verschiedene Systeme haben zudem jeweils konkrete cut-off-Kriterien in ihren Systemgrundlagen beschrieben. Diese sind jeweils zu verwenden.

Müssen Leerfahrten mitangerechnet werden?

Ja, Leerfahrten sind in der Emissionsbilanzierung entsprechend zu berücksichtigen.

Hauptverursacher von THG-Emissionen in der Bioethanolprozesskette

Welche Prozesse im Bioethanolproduktionsprozess verursachen die meisten THG-Emissionen?

Im getreide- und zuckerrübenbasierten Bioethanolproduktionsprozess werden i. d. R. in der Verarbeitungsstufe (vom Rohstoff zum Bioethanol) die meisten THG-Emissionen freigesetzt. Hierbei machen die mit der Bereitstellung der benötigten Prozesswärme verbundenen THG-Emissionen den größten Anteil aus. Dabei hängt die Höhe der THG-Emissionen im Wesentlichen davon ab, welcher Energieträger (z. B. Erdgas, Öl, intern biogen erzeugte Nebenerzeugnisse, wie Biogas) zur Wärmebereitstellung genutzt wird und ob über die Produktion von Nebenerzeugnissen die THG-Emissionen aufgeteilt werden können.

Daneben wird bei der Rohstoffgewinnung ein Großteil der THG-Emissionen freigesetzt. Hier sind der Dieseleinsatz für landwirtschaftliche Maschinen und der Düngemiteleinsetz die wesentlichen Treiber der THG-Emissionen.

Besonderheiten und Fragen zur THG-Berechnung (inkl. N₂O, LUC, THG-Einsparungen)

Wie können die Feldemissionen für die individuelle Berechnungen der THG-Emissionen aus der Rohstoffgewinnung ermittelt werden?

Es gibt zwei von der Europäischen Kommission anerkannte Methoden, die Feldemissionen zu ermitteln: zum einen über das GNOC-Modell (Global Nitrous Oxide Calculator) und zum anderen über die IPCC-Methode (Tier 1). Unter <http://gnoc.jrc.ec.europa.eu> können die Feldemissionen nach dem GNOC-Modell berechnet werden. Das Biograce-Tool bietet unter www.biograce.net nach der IPCC-Methode einen Lachgasrechner.

Dürfen alternativ zu den Teilstandardwerten für den Anbau auch NUTS2-Werte verwendet werden?

Ja. Ab dem 30.07.2013 dürfen neben den Teilstandardwerten für den Anbau und den bisher veröffentlichten Schätzwerten für den Anbau, auch die NUTS2-Werte für THG-Emissionen verwendet werden. Unter <http://nuts.redcert.org> können die NUTS2-Werte ermittelt werden.

Wie werden die THG-Emissionen infolge von Landnutzungsänderungen (LUC) berechnet, wenn die Anbaufläche vor dem 1.1.2008 nicht als Ackerland genutzt wurde?

Die THG-Emissionen infolge von Landnutzungsänderungen werden wie folgt berechnet:

$$e'_i \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{Äq.}}{\text{kg Ernteertrag}} \right] = \frac{CS_R \left[\frac{\text{kg C}}{\text{ha}} \right] - CS_A \left[\frac{\text{kg C}}{\text{ha}} \right]}{\text{Ernteertrag}_{\text{Haupterzeugnis}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{ha} * \text{a}} \right] * 20[\text{a}]} * 3,664 - \frac{e_B}{AF * KF}$$

e'_i Auf das Jahr umgerechnete Treibhausgasemissionen aus Kohlenstoffbestandsänderungen infolge von Landnutzungsänderungen.

CS_R Mit der Bezugsfläche verbundener Kohlenstoffbestand je Flächeneinheit zum Referenzzeitpunkt oder 20 Jahre vor der Gewinnung des Rohstoffs, je nachdem, welcher Zeitpunkt der spätere ist.

- CS_A Mit der tatsächlichen Landnutzung verbundener Kohlenstoffbestand je Flächeneinheit. Wenn sich der Kohlenstoffbestand über mehr als ein Jahr anreichert, gilt als CS_A -Wert der geschätzte Kohlenstoffbestand nach 20 Jahren oder zum Zeitpunkt der Reife der Pflanzen, je nachdem, welcher Zeitpunkt der frühere ist.
- e_B Bonus von 29 g CO₂-Äq./MJ Biokraftstoff bei Anbau auf wiederhergestellten, degradierten Flächen
- AF Allokationsfaktor
- KF Konversionsfaktor

Die Werte für CS_R und CS_A können wissenschaftlichen Literaturquellen (z. B. IPCC) entnommen werden [33]. Die Werte für KF stammen aus den betrieblichen Daten, die für AF aus einer Rechnung unter Nutzung der betrieblichen Daten und der unteren Heizwerte. THG-Emissionen infolge Landnutzungsänderungen werden allein dem Biokraftstoff zugeschrieben. Im Fall des Auftretens eines Nebenerzeugnisses werden diese THG-Emissionen nicht zwischen Biokraftstoff und Nebenerzeugnis alloziert.

Wann kann der Bonus e_B in Anspruch genommen werden?

Gemäß der Biokraft-NachV wird der Bonus von 29 g CO₂-Äq./MJ gewährt, wenn der Nachweis erbracht wird, dass die betreffende Fläche zum Referenzzeitpunkt nicht landwirtschaftlich oder zu einem anderen Zweck genutzt wurde und unter eine der folgenden zwei Kategorien fällt: i) stark degradierte Flächen einschließlich früherer landwirtschaftlicher Flächen oder ii) stark verschmutzte Flächen [23]. Der Bonus von 29 g CO₂-Äq./MJ gilt für einen Zeitraum von bis zu zehn Jahren ab dem Zeitpunkt der Umwandlung der Fläche in eine landwirtschaftliche Nutzfläche, sofern ein kontinuierlicher Anstieg des Kohlenstoffbestands und ein nennenswerter Rückgang der Erosion auf Flächen nach Satz 1 Buchstabe b Doppelbuchstabe aa Biokraft-NachV gewährleistet werden kann und die Bodenverschmutzung auf Flächen nach Doppelbuchstabe bb Biokraft-NachV gesenkt wird. Der Bonus wird allein dem Biokraftstoff zugeschrieben. Im Fall des Auftretens eines Nebenerzeugnisses werden diese THG-Emissionen nicht zwischen Biokraftstoff und Nebenerzeugnis alloziert.

Welche Voraussetzungen müssen erfüllt werden, um die THG-Einsparung e_{sca} anrechnen zu können?

Gemäß der Mitteilung 2010/C 160/02 könnten „verbesserte landwirtschaftliche Bewirtschaftungspraktiken“ z. B. folgende Praktiken beinhalten [30]:

- Umstellung auf eine reduzierte Bodenbearbeitung oder eine Nullbodenbearbeitung,
- verbesserte Fruchtfolgen und/oder Deckpflanzen, einschließlich Bewirtschaftung der Ernterückstände,
- verbesserte Düngemittel- oder Naturdüngerwirtschaft,
- Einsatz von Bodenverbesserern (z. B. Kompost).

Aus solchen Verbesserungen resultierende Emissionseinsparungen können berücksichtigt werden, wenn für den Zeitraum, in dem die betroffenen Rohstoffe angebaut wurden, nachgewiesen wird, dass der Kohlenstoffbestand im Boden zugenommen hat, oder wenn zuverlässige und überprüfbare Nachweise dafür vorgelegt werden, dass nach vernünftigem Ermessen davon ausgegangen werden kann, dass er zugenommen hat. Die über den Zeitraum gemessene THG-Einsparung ist noch durch den Zeitraum (in Jahren) zu teilen, um den jährlichen Bezug der THG-Einsparung zu erhalten.

Messungen des Kohlenstoffbestands im Boden können einen solchen Nachweis darstellen, z. B. in Form einer ersten Messung vor dem Anbau und späteren Messungen in regelmäßigen Abständen von einigen Jahren. In einem solchen Fall würde der Anstieg des Kohlenstoffbestands im Boden vor dem Vorliegen der zweiten Messung ausgehend von einer relevanten wissenschaftlichen Grundlage geschätzt werden. Ab der zweiten Messung wären die Messungen die Basis für die Feststellung eines Anstiegs des Kohlenstoffbestands im Boden und seiner Größenordnung.

Welche Voraussetzungen sind für die Anrechnung von e_{ccr} zu berücksichtigen? Gibt es Positiv- und Negativlisten von anrechnungsfähigen Beispielen?

Gemäß der Biokraft-NachV Anlage 1 Nr. 15 muss nachgewiesen werden, dass das abgeschiedene biogene CO_2 gewerblich genutzt wird und dort fossiles CO_2 ersetzt. Dabei wird die THG-Einsparung e_{ccr} auf die durch Abscheidung von biogenem CO_2 vermiedenen THG-Emissionen begrenzt [23]. Es gibt keine offiziellen Positiv- und Negativlisten.

Die ab dem 31.12.2016 rechtskräftige Mitteilung "Note on the conducting and verifying actual calculations of GHG emissions savings" gibt konkretere Nachweispflichten für die Anrechnung von e_{ccr} vor. In einigen Zertifizierungssystemen gelten diese bereits.

Welche Voraussetzungen sind für die Anrechnung von e_{ccs} zu berücksichtigen?

Gemäß der Biokraft-NachV Anlage 1 Nr. 14 gilt: „Die Emissionseinsparung durch Abscheidung und geologische Speicherung von Kohlenstoffdioxid (e_{ccs}), die nicht bereits in e_p berücksichtigt wurde, wird auf die durch Abscheidung und Sequestrierung von emittiertem CO_2 -vermiedenen Emissionen begrenzt, die unmittelbar mit der Gewinnung, dem Transport, der Verarbeitung und dem Vertrieb von Kraftstoff verbunden sind.“ Es muss nachgewiesen werden, dass das biogene CO_2 tatsächlich aufgefangen und sicher gespeichert wird.

Wie errechnet sich der Term e_{ee} und was ist bei der Anrechnung von e_{ee} zu beachten?

Die THG-Einsparung durch überschüssigen Strom aus der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) errechnet sich wie folgt:

$$e_{ee}' = \left[\frac{\text{kg CO}_2 \ddot{\text{A}}\text{q.}}{\text{kg Haupterzeugnis}} \right] = \frac{\text{Stromüberschuss} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{a}} \right] * EF_{\text{Brennstoff}} \left[\frac{\text{kg CO}_2 \ddot{\text{A}}\text{q.}}{\text{kWh}} \right]}{\text{Menge}_{\text{Haupterzeugnis}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{a}} \right]}$$

Nach der Biokraft-NachV Anlage 1 Nr. 16 ist die THG-Einsparung, die aus dem Stromüberschuss entsteht, die Menge an THG-Emissionen, die bei der Erzeugung einer entsprechenden Strommenge in einem Kraftwerk emittiert würde, das den gleichen Brennstoff einsetzt [23]. Zudem wird davon ausgegangen, dass die Größe der überschussproduzierenden KWK-Anlage der Mindestgröße entspricht, die erforderlich ist, um die für den Biokraftstoff benötigte Wärme zu erzeugen.

Saldierung

In welchen Fällen darf eine Saldierung der THG-Emissionen bei Vermischung von Biomassen und Biokraftstoffen erfolgen?

Bei den Vorschriften zur Saldierung ist zwischen DE und EU Systemvorgaben zu unterscheiden. Innerhalb der DE Systeme kann gemäß § 16 Abs. 2 Satz 2 a) Biokraft-NachV eine Saldierung der THG-Minderungspotenziale von unterschiedlichen Mengen an Biokraftstoffen mit unterschiedlichen THG-Minderungspotenzialen nur vorgenommen werden, wenn alle Mengen, die dem Gemisch beigefügt wurden, vor der Vermischung das erforderliche THG-Minderungspotenzial aufgewiesen haben [23].

Gemäß § 16 Abs. 2 Satz 2 b) Biokraft-NachV dürfen die THG-Emissionen von Biomassen, die für die Biokraftstoffproduktion verwendet werden und für die noch keine Nachhaltigkeitsnachweise ausgestellt worden sind, nur saldiert werden, wenn alle Mengen, die dem Gemisch beigefügt werden, vor der Vermischung den Wert aufgewiesen haben, der für den Arbeitsschritt der Herstellung festgelegt worden ist. Entsprechende THG-Höchstwerte sind im Bundesanzeiger veröffentlicht.

In EU Systemen ist keine Saldierung möglich.

Wie werden die THG-Einsparungen e_{sca} , e_{ee} , e_{ccr} , e_{ccs} verrechnet, wenn im Produktionsprozess ein Nebenerzeugnis entsteht und die THG-Emissionen zwischen dem Biokraftstoff und diesem Nebenerzeugnissen alloziert werden?

Die THG-Einsparungen e_{sca} , e_{ccr} und e_{ccs} werden nicht zwischen dem Biokraftstoff und dem Nebenerzeugnis aufgeteilt, sondern nach der Allokation nur dem Biokraftstoff zugeschrieben. Dafür werden die Aufwendungen, die durch die Anrechnung der THG-Einsparungen entstanden sind, ebenfalls nur dem Biokraftstoff zugeteilt. Die THG-Einsparung e_{ee} wird dagegen dem Gesamtproduktionsprozess zugeschrieben und somit auch zwischen Biokraftstoff und Nebenerzeugnis alloziert.

Umrechnungstabellen

Umrechnung von Volumen und Masse (Gewicht)

$$\rho = \frac{m}{V}$$

ρ	Dichte
m	Masse
V	Volumen

Beispiel

1.000 l Ethanol \cong 794 kg = 0,79 t

1 t Ethanol \cong 1.259,4 l = 1,26 m³

Umrechnung von Frischsubstantzgehalt, Trockensubstantzgehalt und Wassergehalt

$$TS = \frac{m_T}{m_T + m_W} \times 100\% = \frac{m_T}{m_{ges}} \times 100\%$$

$$W = \frac{m_W}{m_W + m_T} \times 100\% = \frac{m_W}{m_{ges}} \times 100\%$$

$$FS = TS + W = 1 = 100\% \cong m_{ges}$$

TS	Trockensubstantzgehalt	Indizes:	
FS	Frischsubstantzgehalt	T	trocken
W	Wassergehalt	W	Wasser
m	Masse	ges	gesamt

Umrechnung von Massenanteil und Volumenanteil

$$w_i = \frac{m_1}{m_1 + m_2} = \frac{m_1}{m_{ges}} = \frac{\varphi_1 \times \rho_2}{(\varphi_1 \times \rho_2 + \varphi_2 \times \rho_1)}$$

$$\varphi_i = \frac{V_1}{V_1 + V_2} = \frac{V_1}{V_{ges}} = \frac{w_1 \times \rho_2}{(w_1 \times \rho_2 + w_2 \times \rho_1)}$$

w	Massenanteil	Indizes:	
φ	Volumenanteil	1	gelöste Komponente (z. B. Ethanol)
m	Masse	2	Lösungsmittel (z. B. Wasser)
V	Volumen		
ρ	Dichte	ges	gesamt

Dichte und Heizwerte

	Dichte kg/l	Heizwert MJ/kg	Heizwert MJ/l	Heizwert kWh/kg	Kraftstoff- Äquivalenz l
Bioethanol	0,79	26,7	21,06	7,416	0,65

Umrechnung von Energieeinheiten

	MJ	kcal	kWh
1 MJ	1	238,80	0,28
1 kcal	0,00419	1	0,001163
1 kWh	3,60	860	1

Umrechnung von Einheiten

	m ³	l	barrel	US-gal
1 m ³	1	1.000	6,3	264,172
1 l	0,001	1	0,0063	0,264172
1 barrel	0,159	159	1	42
1 US-gal	0,00378541	3,78541	0,0238	1

Literaturverzeichnis

- [1] KALTSCHMITT, MARTIN; HARTMANN, HANS; HOFBAUER, H.: *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2., neu bearbeitete und erw. Aufl. Heidelberg; New York : Springer, 2009 — ISBN 978-3-540-85094-6
- [2] BRAUNE, MARIA; GRASEMANN, ELIAS; GRÖNGRÖFT, ARNE; KLEMM, MARCEL; OEHMICHEN, KATJA; ZECH, KONSTANTIN: *Die Biokraftstoffproduktion in Deutschland – Stand der Technik und Optimierungsansätze* (DBFZ-Report Nr. 22). Leipzig, 2015
- [3] SCHMITZ, NORBERT: *Bioethanol in Deutschland*. 1. Aufl.; Landwirtschaftsverlag, 2003 — ISBN 3-7843-3217-X
- [4] SCHIWECK, HUBERT; CLARKE, MARGARET; POLLACH, GÜNTER: *Sugar*. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Weinheim, Germany : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012 — ISBN 3-527-30673-0
- [5] OBERFORSTER, MICHAEL; FELDER, HANS; KINASTBERGER, ALEXANDRA: *Einfluss variierender Protein- und Stärkegehalte auf die Ethanolausbeute bei Getreide und Mais*. In: 64. ALVA Tagung. St. Virgil, 2009, S. 180–182
- [6] IGELSPACHER, ROMAN: *Methode zur integrierten Bewertung von Prozessketten am Beispiel der Ethanolherzeugung aus Biomasse*. 1. Auflage. München : Energie & Management, 2006 — ISBN 978-3-933283-43-6
- [7] KHATIWADA, DILIP; LEDUC, SYLVAIN; SILVEIRA, SEMIDA; MCCALLUM, IAN: *Optimizing ethanol and bioelectricity production in sugarcane biorefineries in Brazil*. In: Renewable Energy; Bd. 85 (2016), S. 371–386
- [8] MORAES, BRUNA S.; JUNQUEIRA, TASSIA L.; PAVANELLO, LUCAS G.; CAVALETT, OTÁVIO; MANTELATTO, PAULO E.; BONOMI, ANTONIO; ZAIAT, MARCELO: *Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane biorefineries in Brazil from energy, environmental, and economic perspectives: Profit or expense?* In: Applied Energy; Bd. 113 (2014), S. 825–835
- [9] LINO, K. N. V.; DHAVALA, PRABHA; GOSWAMI, ANANDAJIT; MAITHEL, SAMEER; RAJU, K. V.: *Liquid biofuels in South Asia: resources and technologies*. In: Asian Biotechnology and Development Review Bd. 8 (2006), Nr. 2, S. 31–49
- [10] LORA, E. E. S.; ZAMPIERI, M.; NOGUEIRA, L. A. H.; LEAL, M. R. L. V.; COBAS, V. M.: *Thermodynamic limits for the production of ethanol and electricity from sugarcane*. In: Sugar Industry; Bd. 131 (2006), Nr. 11, S. 759–765
- [11] QUINTERO, J. A.; MONTOYA, M. I.; SÁNCHEZ, O. J.; GIRALDO, O. H.; CARDONA, C. A.: *Fuel ethanol production from sugarcane and corn: Comparative analysis for a Colombian case*. In: Energy; Bd. 33 (2008), S. 385–399
- [12] MACEDO, I. C.; SEABRA, J. E. A.; SILVA, J. E. A. R.: *Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020*. In: Biomass and Bioenergy; Bd. 32 (2008), S. 582–595
- [13] MORTIMER, N. D.; ELSAYED, M. A.; HORNE, R. E.: *Energy and Greenhouse Gas Emissions for Bioethanol Production from Wheat Grain and Sugar Beet* (Nr. 23/1). Sheffield Hallam University : School of Environment and Development, 2004
- [14] HEMPELMANN, REINHOLD: *Innovative flexible sugar/bioethanol production: the point of view of an equipment supplier*. In: Sugar Industry; Bd. 132 (2007), Nr. 9, S. 698–703
- [15] AHRING, GÜNTHER: *Combined Sugar and Ethanol Production from Beet - Technical Issues*. Vortrag auf: International Conference on World Perspectives for Sugar Crops as Food and Energy Suppliers, Luxor, 2009
- [16] SEEMANN, FRANK; BOELCKE, CHRISTIAN: *Design and construction of the bioethanol plant at Klein Wanzleben*. In: Sugar Industry; Bd. 133 (2008), Nr. 2, S. 69–77
- [17] SCHULZ, M.; HEBECKER, D.: *Thermodynamische Analyse und Bewertung der Bioethanolherstellung*. In: Chemie Ingenieur Technik; Bd. 77 (2005), Nr. 6, S. 792–798

- [18] KEIL, MARTEN; KUNZ, MARKWART; VESELKA, MARCO: *Europäisches Bioethanol aus Getreide und Zuckerrüben – eine ökologische und ökonomische Analyse (3. Teil)*. In: Sugar Industry; Bd. 134 (2009), Nr. 2, S. 114–130
- [19] LEHR, MARKUS: *Special Downstream Processing Solutions - the basis for successful production of first and second generation bioethanol*. Vortrag auf: XIX. International Symposium on Alcohol Fuels, Verona, 2011
- [20] MURPHY, JERRY D.; POWER, NIAMH M.: *How can we improve the energy balance of ethanol production from wheat?* In: Fuel; Bd. 87 (2008), Nr. 10–11, S. 1799–1806
- [21] ARIFEEN, N.; KOOKOS, I.K.; WANG, R.; KOUTINAS, A.A.; WEBB, C.: *Development of novel wheat biorefining: Effect of gluten extraction from wheat on bioethanol production*. In: Biochemical Engineering Journal; Bd. 43 (2009), Nr. 2, S. 113–121
- [22] EUROPÄISCHES PARLAMENT & EUROPÄISCHER RAT: *Richtlinie 2009/28/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG*, 2009
- [23] BIOKRAFT-NACHV: *Verordnung über Anforderungen an eine nachhaltige Herstellung von Biokraftstoffen* (Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung - Biokraft-NachV), 2009
- [24] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *Note on the conducting and verifying actual calculations of the GHG emission savings*, 2015
- [25] INSTITUT FÜR ENERGIE- UND UMWELTFORSCHUNG HEIDELBERG (IFEU): *Biograce. Harmonized calculations of biofuel greenhouse gas emissions in Europe*. – www.biograce.net
- [26] BUNDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT UND ERNÄHRUNG (BLE): *Leitfaden Nachhaltige Biomasseherstellung*. 1. Aufl.; Bonn, 2010
- [27] IINAS INTERNATIONALES INSTITUT FÜR NACHHALTIGKEITSANALYSEN UND -STRATEGIEN ; ÖKO-INSTITUT E. V. INSTITUT FÜR ANGEWANDTE ÖKOLOGIE E.V.; Gemis, 2014
- [28] KNÖRR, W.: *Aktualisierung „Daten-und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030“ (TREMOM)*. Heidelberg : ifeu-Institut für Energie-und Umweltforschung GmbH, 2012
- [29] PRICEWATERHOUSECOOPER: *Carbon footprint of yeast produced in the European Union*. Paris, France : COFALEC, 2012
- [30] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *Mitteilung der Kommission zur praktischen Umsetzung des EU-Nachhaltigkeitskonzepts für Biokraftstoffe und flüssige Biobrennstoffe sowie zu den Berechnungsregeln für Biokraftstoffe (2010/C 160/02)* vom 19.6.2010, 2010
- [31] EUROPÄISCHES PARLAMENT & EUROPÄISCHER RAT: *Richtlinie (EU) 2015/1513 des europäischen Parlaments und des Rates vom 9. September 2015 zur Änderung der Richtlinie 98/70/EG über die Qualität von Otto- und Dieselmotoren und zur Änderung der Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen*, 2015
- [32] JOINT RESEARCH CENTER (JRC): *„Update on Data on pathways for RES Directive.XLS“* von der EU Kommission im November 2008 an verschiedene beteiligte Kreise versandte Arbeitsdatei, (2008)
- [33] EGGLESTON, H.S; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K.: *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Vol. 4 agriculture, forestry and other land use, prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. IGES, Japan, 2006

Impressum

Diese Handreichung entstand im Rahmen des Projektes
„Entwicklung von Handreichungen zur Überprüfung von THG-Bilanzen
von Biokraftstoffen“

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Herausgeber:

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
Torgauer Straße 116
04347 Leipzig
Tel.: +49 (0)341 2434-112
Fax: +49 (0)341 2434-133
info@dbfz.de
www.dbfz.de

Geschäftsführung:

Prof. Dr. mont. Michael Nelles (wissenschaftlicher Geschäftsführer)
Daniel Mayer (administrativer Geschäftsführer)

Bilder: Urheberrechtsnachweis am Bild verzeichnet

Gestaltung/Satz: Steffen Kronberg

Druck: Osiris Druck, Leipzig

ISBN: 978-3-9817707-1-1

© DBFZ, Leipzig 2015

Copyright: Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieser Broschüre darf ohne die schriftliche Genehmigung des Herausgebers vervielfältigt oder verbreitet werden. Unter dieses Verbot fällt auch die gewerbliche Vervielfältigung per Kopie, die Aufnahme in elektronische Datenbanken und die Vervielfältigung auf CD-ROM.





