

Nachhaltigkeit für Einsteiger

mit einer Beispiel –
Product Carbon Footprint –
Rechnung



Handreichung

Nachhaltigkeit für Einsteiger

mit einer Beispiel – Product Carbon Footprint – Rechnung

AutorInnen:

Kathleen Meisel

Josephine Helka

Inga Katharina Götz

Beike Sumfleth

Besonderen Dank für die wertvollen Hinweise und Anmerkungen im Verlauf des Projektes und bei der Erstellung dieser Handreichung gilt insbesondere folgenden KollegInnen vom DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH:

Nora Lange

Stefan Majer

Uta Schmieder

und den KoordinatorInnen vom PIC Pi Innovation Culture GmbH:

Christina Peters

Lukas Metzger-Lindner

Die Handreichung ist im Rahmen des Vorhabens „WIR! – BioZ – Rahmenprojekt III: Life Cycle Assessment/Nachhaltigkeitsbewertung & Fallstudie Innovationsökosystem“ entstanden.



Inhalt

Ein Einstieg	2
Für wen ist diese Handreichung?	2
Was bedeutet Nachhaltigkeit?	2
Was ist eine Nachhaltigkeitsbewertung und welche Methoden gibt es?	3
Was ist ein Nachhaltigkeitszertifikat/-label?	3
Welchen Mehrwert bringen eine Nachhaltigkeitsbewertung oder ein Nachhaltigkeitszertifikat?	6
Was ist eine Lebenszyklusanalyse und was beinhaltet sie?	7
Was ist ein Product Carbon Footprint (PCF)?	9
Mit welcher Referenz kann ich mein Produkt vergleichen?	10
Berechnung eines Product Carbon Footprints mit Beispielrechnung	10
Generelles Vorgehen	10
Beispielrechnung	13
Zielsetzung und Untersuchungsrahmen	13
THG-Berechnung – Zuckerrübenanbau	13
THG-Berechnung – Transport	14
THG-Berechnung – Zuckerfabrik	15
THG-Berechnung – Biopolymerherstellung	16
Bewertung und Vergleich	18
Verfügbare Daten und Berechnungs-Tools	18
Datenbanken und Sammlung von Emissionsfaktoren	18
Berechnungstools	19
Ökobilanzsoftware	19

Ein Einstieg

Für wen ist diese Handreichung?

Diese Handreichung richtet sich an jene Unternehmer und Produzenten, die ihre Produktion nachhaltiger gestalten wollen oder müssen, aber noch kein Vorwissen besitzen wie die Nachhaltigkeit ihrer Produkte überhaupt gemessen, berechnet oder offiziell nachgewiesen werden kann. Diese Handreichung ist also für Einsteiger gedacht.

Deshalb werden im ersten Teil ein paar grundlegende Begriffe der Nachhaltigkeit geklärt. Im zweiten Teil erfolgt eine Schritt-für-Schritt-Anleitung zur Berechnung eines Product Carbon Footprints und im dritten Teil werden einige Datensammlungen, Berechnungstools und Bilanzierungssoftware aufgeführt, die Sie bei der Darstellung Ihrer ökologischen Nachhaltigkeit als Unterstützungswerkzeuge nutzen können.

Was bedeutet Nachhaltigkeit?

Nachhaltig ist eine „Entwicklung, die den Bedürfnissen der heutigen Generation gerecht wird, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen.“ [1]

Dabei ist es wichtig, die Dimensionen der Nachhaltigkeit gleichberechtigt zu behandeln: wirtschaftlich effizient, sozial gerecht und ökologisch tragfähig. Um die globalen Ressourcen langfristig zu erhalten, sollte Nachhaltigkeit die Grundlage aller politischen Entscheidungen sein.

Die drei Dimensionen in der Abbildung zeigen das Zusammenspiel von Ökonomie, Ökologie und Gesellschaft und in welchem Schnittbereich es sich um Nachhaltigkeit bzw. nachhaltige Entwicklung handelt und zwar, wenn alle drei Dimensionen ineinandergreifen.

Diese international anerkannte Definition stammt aus dem Brundtland-Bericht „Unsere gemeinsame Zukunft“. Dieser Bericht wurde 1987 von der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung der Vereinten Nationen veröffentlicht.

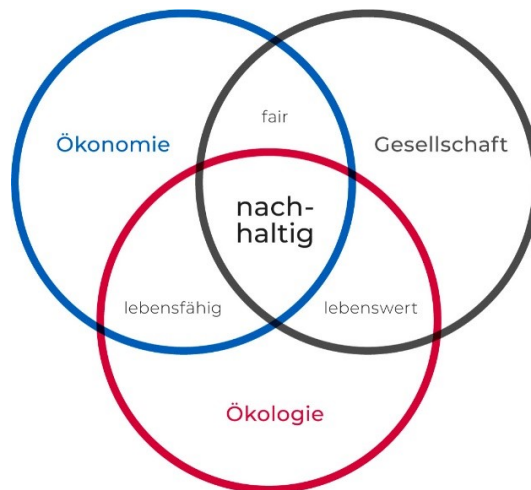


Abbildung 1: Die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit [2].

Was ist eine Nachhaltigkeitsbewertung und welche Methoden gibt es?

Eine Nachhaltigkeitsbewertung ist ein Prozess, bei dem die ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Auswirkungen eines Produkts, Projekts oder Unternehmens analysiert und bewertet werden. Dabei werden verschiedene Kriterien und Indikatoren verwendet, um die Nachhaltigkeitsleistung zu messen. Die Bewertung kann sich auf verschiedene Aspekte beziehen, wie umweltbezogene oder soziale Auswirkungen auf die Gemeinschaft oder die Einhaltung von Menschenrechtsstandards [3,4].

Es gibt verschiedene Methoden der Nachhaltigkeitsbewertung, um die ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Auswirkungen von Produkten, Projekten oder Unternehmen zu bewerten. Typische Methoden sind [3–7]:

- Umweltbezogene Lebenszyklusanalyse (LCA)
- Product Carbon Footprint (PCF)
- Soziale Lebenszyklusanalyse (SLCA)
- Lebenszykluskosten (LCC)
- Integrierte Lebenszyklus-Nachhaltigkeitsbewertung (LCA + SLCA + LCC)
- Bewertung mit gezielten Nachhaltigkeits-Indikatoren-Sets (z.B. GBEP für Bioenergie)
- Nachhaltigkeitsaudits von Unternehmen und Projekten (z.B. nach GHG Protocol)

Das Ergebnis einer Nachhaltigkeitsbewertung kann als sogenannter „Sustainability Claim“ nach außen, zum Beispiel auf Ihrer Homepage, dargestellt werden. Beispielsweise könnten Sie eine „THG-Einsparung von 80% gegenüber der herkömmlichen Produktion“ als Ergebnis einer umweltbezogenen Lebenszyklusanalyse angeben.

Was ist ein Nachhaltigkeitszertifikat/-label?

Ein Nachhaltigkeitszertifikat ist eine offizielle Anerkennung, die einem Produkt, einer Dienstleistung oder einem Unternehmen verliehen wird, wenn es bestimmte Nachhaltigkeitskriterien erfüllt. Es ist ein Nachweis darüber, dass die Anforderungen (Nachhaltigkeitskriterien), die in einem Zertifizierungssystem festgelegt sind, eingehalten wurden. Ein Label wiederum ist das Zeichen, was z.B. auf ein Produkt gedruckt werden kann, wenn es erfolgreich zertifiziert ist (ein Logo, Symbol oder Markenzeichen). Die Vergabe von Nachhaltigkeitszertifikaten kann von verschiedenen Organisationen oder Zertifizierungsstellen durchgeführt werden. Derzeit sind Zertifizierungen in der Bioökonomie (ausgenommen der Bioenergiebereich) für die Unternehmen freiwillig.

Beispielhaft ist eine Auswahl von Zertifikaten/Labels aufgeführt, die die Produktgruppen des BioZ-Projekts adressieren.

Genauere Informationen zur Vielzahl der Zertifikate/Labels, den entsprechenden Anforderungen und welches Zertifikat für Sie zutreffend sein kann, finden Sie in Kürze auf der BioZ-Homepage.

Blauer Engel – Das Umweltzeichen [8]: z.B. Druckfarben



Der Blaue Engel als Umweltsiegel auf Produkten kennzeichnet die Auswirkungen auf die Umwelt (Klima, Wasser, Boden und Luft), die eigene Gesundheit (z.B. ob gefährliche Stoffe im Produkt vermieden wurden) und soziale Aspekte. Dieses Label wird bisher vorwiegend auf dem deutschen Markt genutzt. Eine Kategorie unter vielen, die der Blaue Engel adressiert, sind Druckerzeugnisse und Druckfarben, die im BioZ-Projekt relevant sind.

Eine vollständige Liste der Produktgruppen, die von *Blauer Engel* zertifiziert werden, finden Sie hier: <https://www.blauer-engel.de/de/produktwelt>.

ISCC PLUS – International Sustainability & Carbon Certification [9]: z.B. Kunststoffe/ Biopolymere



ISCC besteht aus verschiedenen Zertifizierungssystemen, variiert in der geographischen Reichweite und Produktgruppen. Das ISCC PLUS System findet Anwendung in der Bioökonomie und der Kreislaufwirtschaft für Lebensmittel, Futtermittel, Chemikalien, Plastik und Verpackungen, Textilien und erneuerbare Rohstoffe, die erneuerbare Energiequellen in der Herstellung verwenden. Beispielsweise Biopolymere, die bei der Herstellung von Kunststoffen (z.B. für Innenauskleidung von Automobilen) genutzt werden, können durch ISCC PLUS zertifiziert werden.

ISCC folgt sechs Grundprinzipien, die Sie hier einsehen können: <https://www.iscc-system.org/about/sustainability/iscc-principles/>.

Cradle-to-Cradle [10]: z.B. Chemikalien



Cradle to Cradle Certified[®] ist ein branchenübergreifender Standard, der weltweit von DesignerInnen, Marken und HerstellerInnen für die Entwicklung und Herstellung von Produkten verwendet wird, die eine gesunde, gerechte und nachhaltige Zukunft ermöglichen. Bis heute wurden mehr als 34.000 Produkte in verschiedenen Kategorien mit dem Cradle to Cradle-Zertifikat[®] ausgezeichnet, darunter Baumaterialien, Innenausstattungen, Möbel und Haushaltsprodukte, Automobilteile, Unterhaltungselektronik, Textilien und Bekleidung, Kosmetika und Körperpflegeprodukte, Reinigungsmittel, Papier, Verpackungen und Polymere.

Der Cradle to Cradle Certified[®] Produkt Standard bietet einen Rahmen für die Bewertung von Materialien und Produkten in fünf Nachhaltigkeitskategorien, die hier abgerufen werden können: <https://c2ccertified.org/the-standard>.

NATRUE – The International Natural and Organic Cosmetics Association [11]:
z.B. Kosmetik



NATRUE ist eine internationale Non-Profit-Organisation, die sich als Ziel die weltweite Förderung und den Schutz von Natur- und Biokosmetik gesetzt hat. Im Vordergrund steht hierbei die Bekämpfung von Greenwashing und irreführender Behauptungen über Natur- und Biokosmetikprodukte. Das NATRUE-Label ist ein internationaler Standard für Natur- und Biokosmetik, der sowohl für Rohstoffe als auch für Endprodukte eingesetzt werden kann.

NATRUE folgt sechs Grundsätzen, die hier eingesehen werden können: <https://natrue.org/de/#keyPrinciples>. Aktuell tragen über 6.600 Produkte auf der ganzen Welt das NATRUE-Label. Sie sind in einer Datenbank erfasst, die hier aufgerufen werden können: [https://natrue.org/de/our-standard/natrue-certified-world/?database\[tab\]=products](https://natrue.org/de/our-standard/natrue-certified-world/?database[tab]=products).

EU Ecolabel [12]: z.B. Reinigungsprodukte



Das EU Ecolabel-Spektrum reicht von Reinigungsprodukten über Elektrogeräte, Textilien, Schmierstoffe, Farben und Lacke bis zu Beherbergungsbetrieben und Campingplätzen. Das Zertifikat wird an Produkte und Dienstleistungen vergeben, die im Vergleich zu ähnlichen Produkten geringere Umweltauswirkungen haben. VerbraucherInnen soll das Label dabei helfen, sowohl umweltfreundlichere als auch gesündere Produkte und Dienstleistungen zu identifizieren.

Auf der Homepage ist eine Liste mit Produktgruppen und Dienstleistungen zu finden, die mit dem EU Ecolabel gekennzeichnet werden können: <https://eu-ecolabel.de/fuer-unternehmen/produktgruppen>.

Naturland [13]: z.B. Lebensmittel



Naturland ist ein internationaler Verband für ökologischen Landbau. Ökologische und soziale Nachhaltigkeit stehen bei dieser Zertifizierung im Fokus. Neben Landwirtschaft, Fischerei und Waldwirtschaft arbeitet Naturland auch mit PartnerInnen aus der Verarbeitung, dem Handel und der Gastronomie zusammen. Die Anforderungen von Naturland gehen über die in der EU-Ökoverordnung festgeschriebenen Kriterien hinaus und sorgen so für mehr Nachhaltigkeit.

Informationen zu den Anforderungen und den Richtlinien des Zertifikats finden sie hier: <https://www.naturland.de/de/naturland/wofuer-wir-stehen/naturland-mehrwert.html>

Welchen Mehrwert bringen eine Nachhaltigkeitsbewertung oder ein Nachhaltigkeitszertifikat?

Eine Nachhaltigkeitsbewertung oder ein Nachhaltigkeitszertifikat bieten Unternehmen verschiedene Vorteile. Folgend sind einige ausgeführt:

- **Image und Reputation:** Eine Nachhaltigkeitsbewertung oder ein Nachhaltigkeitszertifikat zeigen, dass ein Unternehmen sich für umweltbewusstes Handeln und soziale Verantwortung einsetzt. Dies kann das Image des Unternehmens verbessern und es als verantwortungsbewusstes Unternehmen positionieren, was sowohl bei KundInnen als auch bei InvestorInnen gut ankommt [14].
- **Wettbewerbsvorteil:** In einer Zeit, in der immer mehr VerbraucherInnen und GeschäftspartnerInnen nach umweltfreundlichen und sozial verantwortlichen Optionen suchen, kann eine Nachhaltigkeitsbewertung oder ein Nachhaltigkeitszertifikat dazu beitragen, sich von der Konkurrenz abzuheben und neue Marktchancen zu erschließen [14].
- **Regulatorische Konformität:** Für einige Unternehmen (z.B. Unternehmen ab einer bestimmten Anzahl von MitarbeiterInnen) und in einigen Regionen können Nachhaltigkeitsanforderungen bereits gesetzlich vorgeschrieben sein oder in naher Zukunft werden. Beispielsweise verlangt das sogenannte Lieferkettengesetz die Einhaltung von Menschenrechten in den globalen Lieferketten von Unternehmen mit über 3.000 MitarbeiterInnen. Ein Nachhaltigkeitszertifikat kann dabei helfen, die Einhaltung solcher Vorschriften nachzuweisen [15].
- **KundInnengewinnung und -bindung:** VerbraucherInnen achten zunehmend durch bewusste Kaufentscheidungen auf Nachhaltigkeit (und den Schutz von Mensch und Umwelt) und bevorzugen Produkte und Dienstleistungen von Unternehmen, die sich für Nachhaltigkeit engagieren und Nachhaltigkeitspraktiken fördern. Die Bewertung der Nachhaltigkeit kann dazu beitragen das Engagement eines Unternehmens für Nachhaltigkeit transparent zu machen und so das Vertrauen von VerbraucherInnen zu gewinnen. Ein Nachhaltigkeitszertifikat kann dazu beitragen, neue KundInnen anzuziehen und bestehende KundInnen langfristig zu binden [16].
- **Anziehung von InvestorInnen und Fachkräften:** InvestorInnen und Fachkräfte legen zunehmend Wert auf Nachhaltigkeit und soziale Verantwortung. Ein Nachhaltigkeitszertifikat eines Unternehmens kann das Interesse von ethisch orientierten InvestorInnen und Fachkräften wecken und das Vertrauen der Finanzgemeinschaft stärken und Fachkräfte anziehen [14].
- **Kosteneinsparungen:** Nachhaltigkeitsinitiativen wie Energieeffizienz, Abfallreduzierung und ressourcenschonende Produktionsprozesse können langfristig zu Kosteneinsparungen führen, was sich positiv auf die finanzielle Leistung des Unternehmens auswirken kann [14].
- **Motivation von MitarbeiterInnen durch Unternehmenskultur:** Eine nachhaltige Unternehmenskultur kann dazu beitragen, dass ein Unternehmen seine Ziele besser erreicht, souveräner mit Rückschlägen umgehen kann und eine höhere MitarbeiterInnenzufriedenheit erreicht (demnach ergeben sich positive Effekte auf Arbeitsklima, Produktivität, etc.). So können Nachhaltigkeitsbemühungen das Engagement der MitarbeiterInnen steigern [17].
- **Zugang zu Märkten:** Einige Märkte, sowohl national als auch international, könnten strengere Umwelt- und Nachhaltigkeitsstandards haben. Ein Nachhaltigkeitszertifikat kann den Zugang zu solchen Märkten erleichtern [18].

In der Richtlinie (EU) 2022/2464 sind die Anforderungen zur Nachhaltigkeitsberichterstattung formuliert. Es ist am 5.1.2023 in Kraft getreten. Das Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz, kurz Lieferkettengesetz, ist am 1. Januar 2023 in Kraft getreten.

- **Innovation:** Die Notwendigkeit, nachhaltige Praktiken zu implementieren, kann zu innovativen Lösungen und Technologien führen, die das Unternehmen langfristig wettbewerbsfähig halten [19].

Was ist eine Lebenszyklusanalyse und was beinhaltet sie?

Die Methode der Lebenszyklusanalyse ist in den ISO-Normen 14040/14044 [20,21] standardisiert. Dabei werden die Umweltauswirkungen eines Produktes über seinen gesamten Lebenszyklus hinweg – von der Rohstoffgewinnung über die Produktion, die Nutzung, die eventuelle Wiederverwertung bis hin zur endgültigen Beseitigung beurteilt.

(oder deutsch: Ökobilanzierung, englisch: Life Cycle Assessment, kurz: LCA)

Eine Lebenszyklusanalyse kann helfen, die Hauptverursacher von Umweltbelastungen entlang des Lebensweges zu identifizieren, umweltfreundlichere Alternativen zu finden, Ressourceneffizienz zu verbessern und nachhaltigere Produkte zu entwickeln.

Entsprechend der ISO -Normen 14040/14044 umfasst eine Lebenszyklusanalyse folgend dargestellte Schritte:

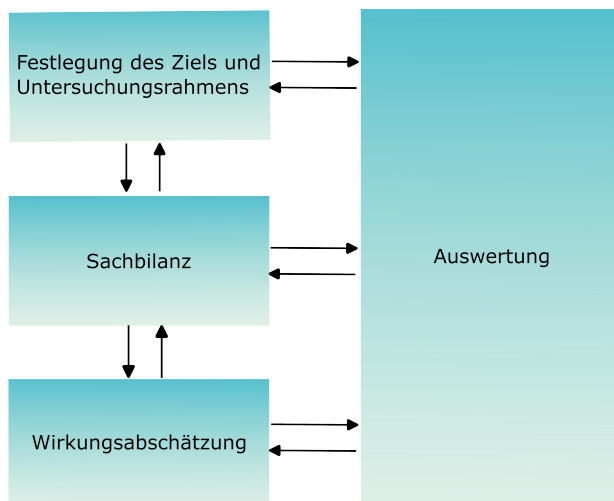


Abbildung 2: Schritte einer Lebenszyklusanalyse nach ISO 14040/14044.

Im ersten Schritt werden das Ziel und der Untersuchungsrahmen der Lebenszyklusanalyse festgelegt. Bei der Zielsetzung sollte überlegt werden, zu welchem Zweck und für welche Zielgruppe die LCA durchgeführt wird. Die Festlegung des Untersuchungsrahmens umfasst im Wesentlichen:

- die Definition der betrachteten Wertschöpfungskette einschließlich des Setzens der Systemgrenzen
- die Festlegung der funktionellen Einheit auf die alle Umweltauswirkungen bezogen werden, z.B. 1 kg des betrachteten Produktes
- die Auswahl an Umweltwirkungskategorien, die betrachtet werden sollen (z.B. Treibhauseffekt, Verbrauch an Ressourcen, Energie und Landfläche, Partikelemissionen, Eutrophierungs- und Versauerungspotenzial, Ökotoxizität, etc.)
- die Aufteilung (=Allokation) der Umweltauswirkungen im Falle, dass mehr als ein Produkt erzeugt wird

Systemgrenzen dienen dazu das betrachtete System von der Umwelt abzugrenzen. Sie definieren, welche Teile der Wertschöpfungskette Untersuchungsinhalt sind und welche Teile außerhalb des Untersuchungsrahmens liegen.

- die Bestimmung der Anforderungen an die Daten und deren Qualität
- die Vorüberlegung zur Form und Struktur der Ergebnispräsentation

Im zweiten Schritt, der Sachbilanzierung, werden alle entlang der definierten Wertschöpfungskette eingesetzten Inputs und Outputs zusammengetragen und bezogen auf die funktionelle Einheit quantifiziert. In diesem Schritt erfolgt im Wesentlichen die Massen- und Energiebilanzierung. Die gelisteten Massen und Energieträger können per Excel, aber auch in Ökobilanzsoftware wie open LCA, GaBi, SimaPro, Umberto, etc. abgebildet werden.

Zu den Inputs zählen die eingesetzten Hilfsstoffe und -energien, aber auch der Biomasserohstoff. Outputs sind neben den erzeugten Produkten, die direkt emittierten Emissionen (z.B. CO₂ aus der Verbrennung), Abwässer und sonstige Abfälle.

Wird entlang der Wertschöpfungskette mehr als ein Produkt erzeugt, so werden die Aufwendungen über ein Allokationsverfahren den einzelnen Produkten zugewiesen. Hierfür gibt es verschiedene Ansätze. Häufig erfolgt die Aufteilung der Emissionen zwischen den Produkten auf Basis deren physikalischen oder ökonomischen Kenngrößen wie Masse, Heizwert, Kohlenstoff (C)-Gehalt oder Marktwert. Der „avoided burden approach“ kann auch zur Aufteilung der Umweltwirkungen angewendet werden [22]. Es muss berücksichtigt werden, dass unterschiedliche Allokationsverfahren auch zu unterschiedlichen Ergebnissen führen können. Aus diesem Grund ist das gewählte Allokationsverfahren in der Präsentation der LCA-Ergebnissen immer mit anzugeben.

Beim avoided burden approach werden die Umweltwirkungen der gebräuchlichsten Produktion der Nebenprodukte von den Umweltwirkungen des gesamten Produktionssystems abgezogen [22].

Im dritten Schritt erfolgt die Wirkungsabschätzung. Dabei werden die in der Sachbilanz aufgelisteten Emissionen über Charakterisierungsfaktoren den betrachteten Umweltwirkungskategorien zugeteilt. So werden z.B. 1 kg CO₂-Emissionen mit einem Treibhauspotenzial von 1 zu 1 kg CO₂-Äquivalenten, 1 kg Methanemissionen mit dem Faktor 28 zu 28 kg CO₂-Äquivalenten und 1 kg Lachgasemissionen mit einem Faktor von 265 zu 265 kg CO₂-Äquivalenten zur Umweltwirkungskategorie Treibhauspotenzial (englisch: global warming potential (GWP)) um- und zusammengerechnet [23]. Die Berechnung kann mit Excel oder automatisiert über Ökobilanzsoftware erfolgen.

Der Atmosphäre entzogenes CO₂ durch Biomasse werden in der Wirkungsabschätzung mit -1 kg CO₂-Äq./kg CO₂, biogene CO₂-Emissionen (z.B. Verbrennung des biobasierten Produktes) mit 1 kg CO₂-Äq./kg CO₂ charakterisiert.

Im vierten Schritt werden die Ergebnisse hinsichtlich der festgelegten Zielstellung ausgewertet. Dazu gehört je Zielstellung zum Beispiel die Ergebnisse vergleichend einzuordnen, die Hauptverursacher der Umweltwirkungen entlang der Wertschöpfungskette aufzuzeigen, Optimierungspotential darzustellen und die Ergebnisse anschaulich aufzubereiten um Empfehlungen oder Schlussfolgerungen abzuleiten. Abschließende Vollständigkeits- und Konsistenzprüfungen gehören ebenfalls zur Auswertungsphase.

Die Ergebnisse einer Ökobilanz können entweder einzeln je gewünschter Umweltwirkungskategorie (z.B. Treibhauseffekt, Verbrauch von Ressourcen, Energie und Land; Partikelemissionen, etc.) oder über Normalisierung und Gewichtung in einem einzigen „Umweltcore“ angegeben werden. Die folgende Abbildung zeigt Beispiel-Ergebnisdarstellungen.

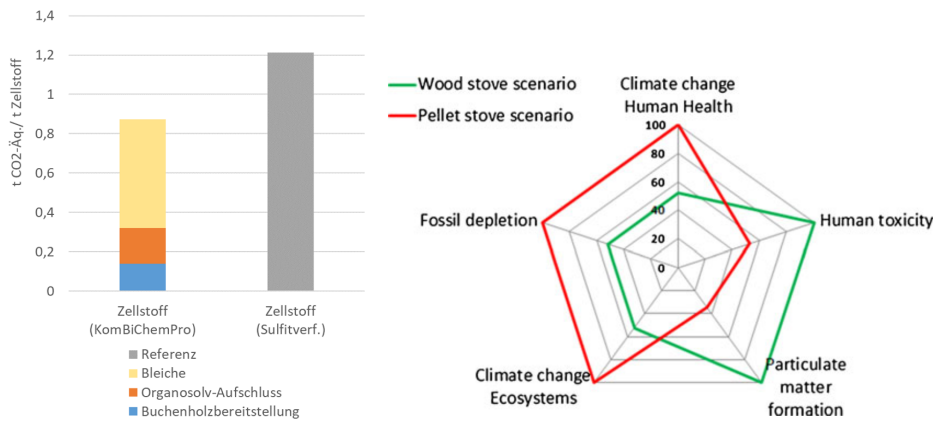


Abbildung 3: Balkendiagramm zum Vergleich von THG-Emissionen der Zellstoffproduktion (li.) und Spinnennetzdarstellung einer LCA zu Holz- oder Pelletöfen mit Betrachtung des Treibhaus-effektes, des Verbrauchs fossiler Ressourcen, der Humantoxizität und der Partikelemissionen (re.) [24].

Was ist ein Product Carbon Footprint (PCF)?

Wenn unter vielen Umweltwirkungskategorien einer Lebenszyklusanalyse nur die Treibhausgasemissionen eines Produkts berechnet werden sollen, dann wird der sogenannte „Product-Carbon Footprint (PCF)“ erstellt. Dafür gibt es in Anlehnung an die Grundlagen und Methoden der ISO-Normen 14040/14044 eine eigene ISO-Norm 14067 [25].

Die bereits beschriebenen vier Schritte einer Lebenszyklusanalyse werden hier genauso durchgeführt. In der ISO-Norm 14067 wird genauer formuliert, welche THG-Mengen zur Berechnung des Product Carbon Footprint berücksichtigt werden müssen. Dabei gibt es Aspekte, die den PCF erhöhen und welche, die ihn reduzieren (dargestellt über die positive und negative y-Achse in Abbildung 4.

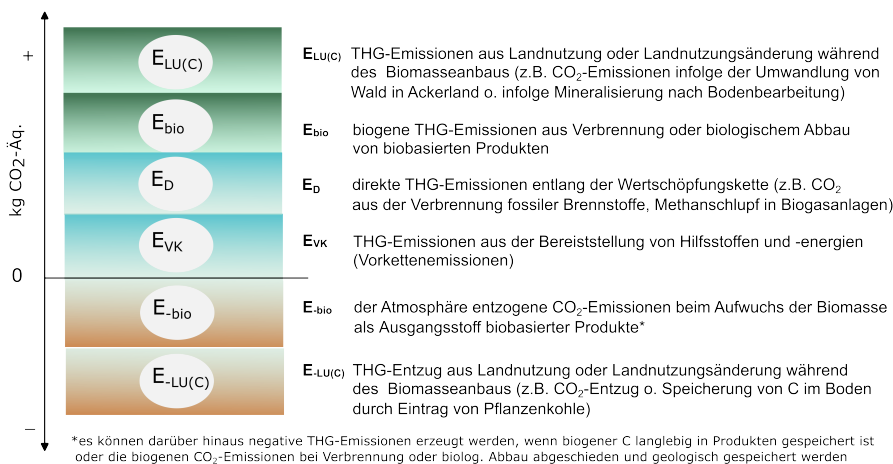


Abbildung 4: THG-Emissionen, die bei der Berechnung des Product Carbon Footprint berücksichtigt werden müssen. Eigene Darstellung in Anlehnung an [25].

THG-Emissionen aus der Bereitstellung der eingesetzten Hilfsstoffe und -energien (E_{VK}), aus der Landnutzung und Landnutzungsänderung ($E_{LU(C)}$) sowie direkte THG-Emissionen (E_D) entlang der Wertschöpfungskette erhöhen den PCF. Führen Landnutzung und Land-

Direkte THG-Emissionen sind THG-Emissionen, die entlang der Wertschöpfungskette direkt

nutzungsänderung dagegen zu einer Anreicherung und Speicherung von CO₂-Emissionen (E_{-LU(C)}), so kann der PCF reduziert werden. Die Menge an CO₂, die von der Biomasse aus der Atmosphäre aufgenommen wird (E_{-bio}), wird als negativer Wert bilanziert. Die CO₂-Emissionen, die bei der Verbrennung oder beim biologischen Abbau eines biobasierten Produktes freigesetzt werden (E_{bio}), werden als positiver Wert berechnet. Über den gesamten Lebensweg betrachtet, gleichen sich E_{-bio} und E_{bio} jedoch aus, da es sich um identische Mengen handelt.

Die Terme E_{LU(C)} und E_{-LU(C)} spielen beim Anbau oder Gewinnung der Biomasserohstoffe eine Rolle. Da der Fokus im BioZ-Vorhaben auf den verschiedenen Weiterverarbeitungen von Biomasse zu biobasierten Produkten liegt, und nicht auf der Erzeugung der Biomasse und davon ausgegangen wird, dass die BiomasserzeugerInnen den THG-Wert mit dem Rohstoff an die WeiterverarbeiterInnen „mitliefern“ sollen die Terme E_{LU(C)} und E_{-LU(C)} im Folgenden nicht weiter betrachtet werden.

Das Ergebnis eines PCF wird als Menge CO₂ Äquivalente je funktioneller Einheit, z.B. 1 kg des untersuchten Produktes, angegeben.

in die Atmosphäre emittiert werden, z.B. CO₂-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe zur Erzeugung der benötigten Prozessenergie oder Methanschlupf aus Biogasanlagen, etc.

In der folgenden Beispielrechnung wird der Vollständigkeit halber und exemplarisch der Anbau von Zuckerrüben mitbeschrieben und bilanziert.

Mit welcher Referenz kann ich mein Produkt vergleichen?

Erst der Vergleich der ermittelten Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse oder des Product Carbon Footprints mit der jeweiligen Referenzproduktion ermöglichen eine Aussage zur ökologischen Vor- und Nachteilhaftigkeit. Als Referenzprodukt eignet sich die Produktion, die mit dem eigenen erzeugten Produkt ersetzt werden soll oder die gebräuchlichste Produktionsweise um denselben Nutzen des eigenen Produktes zu erzeugen, z.B. biobasiertes Polybutylensuccinat (PBS) ersetzt Polyethylen (PE) in Verpackungsnetzen. Wichtig beim Vergleich des eigenen Produktes mit einem Referenzprodukt ist, dass der Vergleich auch gerecht ist, d.h. mit den zu vergleichenden Produkten muss derselbe Nutzen (dargestellt über die funktionelle Einheit) unter äquivalenten methodischen Festlegungen erfüllt werden.

Berechnung eines Product Carbon Footprints mit Beispielrechnung

Generelles Vorgehen

Zur Berechnung des Product Carbon Footprints, der mit der Produktion, der Nutzung und finalen Beseitigung eines bestimmten Produktes verbunden ist, werden die gesamten, entlang des Lebensweges des Produktes verursachten THG-Emissionen aufsummiert. Entsprechend der ISO 14067 sollten alle in der Abbildung 4 aufgeführten THG-Emissionen mitbilanziert werden.

Grundsätzliche Berechnung

1. THG-Emissionen E_{gesamt}

$$E_{\text{gesamt}} = E_{\text{VK}} + E_{\text{D}} + E_{\text{bio}} + E_{\text{LU(C)}} - E_{\text{-bio}} - E_{\text{-LU(C)}}$$

Formel 1

E_{gesamt}	=	Gesamt-THG-Emissionen entlang des Lebensweges des Produktes
E_{VK}	=	Vorketten-THG-Emissionen aus der Bereitstellung von Hilfsstoffen und -energien
E_{D}	=	Direkte THG-Emissionen entlang des Lebensweges
E_{bio}	=	biogene THG-Emissionen aus Verbrennung oder biologischem Abbau von biobasierten Produkten
$E_{\text{LU(C)}}$	=	THG-Emissionen aus Landnutzung oder Landnutzungsänderung während des Biomasseanbaus (z.B. CO ₂ -Emissionen infolge der Umwandlung von Wald in Ackerland o. infolge Mineralisierung von organ. C nach Bodenbearbeitung)
$E_{\text{-bio}}$	=	der Atmosphäre entzogene CO ₂ -Emissionen beim Aufwuchs der Biomasse als Ausgangsstoff biobasierter Produkte
$E_{\text{-LU(C)}}$	=	THG-Entzug aus Landnutzung oder Landnutzungsänderung während des Biomasseanbaus (z.B. CO ₂ -Entzug o. Speicherung von C im Boden durch Eintrag von Pflanzenkohle)

2. Vorkettenemissionen E_{VK}

Um die Vorkettenemissionen zu ermitteln, werden die entlang des Lebensweges eingesetzten Mengen an Hilfsstoffen und -energien mit deren THG-Emissionsfaktoren multipliziert und durch die Menge des (Zwischen-)Produktes geteilt.

THG-Emissionsfaktoren sind „Emissionsrucksäcke“ von Stoffen, Energien oder Produkten. Sie besagen, mit welchen THG-Emissionen die Erzeugung und Nutzung von Stoffen, Energie oder Produkten verbunden sind. Datenbanken wie ecoinvent, Gemis, etc. und wissenschaftliche Veröffentlichungen können als Quellen für Emissionsfaktoren dienen.

Im Kapitel „Verfügbare Daten und Berechnungs-Tools“ unter Datenbanken und Sammlungen von Emissionsfaktoren sind weitere Quellen von Emissionsfaktoren aufgeführt.

$$E_{\text{VK}} = \frac{\sum (M_{\text{Stoff bzw. Energie}} \cdot EF_{\text{Stoff bzw. Energie}})}{M_{\text{(Zwischen-)Produkt}}}$$

Formel 2

E_{VK}	=	Vorketten-THG-Emissionen aus der Bereitstellung von Hilfsstoffen und -energien
M	=	Menge (an eingesetztem Stoff bzw. Energie oder am erzeugten (Zwischen-)Produkt)
EF	=	Emissionsfaktor

3. Allokation (siehe auch: „Was ist eine Lebenszyklusanalyse?“)

Im Fall des Anfallens von Nebenprodukten können die entlang der Wertschöpfungskette bis zum Anfallen dieses Nebenproduktes verursachten THG-Emissionen nach physikalischen oder ökonomischen Größen auf das Haupt- und das Nebenprodukt oder über den avoided burden -Ansatz aufgeteilt werden. Die Berechnung des Allokationsfaktors (AF) ist in der folgenden Formel dargestellt.

Statt des unteren Heizwertes (H) können auch der Kohlenstoff-Gehalt oder der ökonomische Wert der Haupt- und Nebenprodukte eingesetzt werden.

Der avoided burden - Ansatz wird hier nicht weiter verfolgt.

$$AF = \frac{m_{\text{Hauptprodukt}} \cdot H_{\text{unterer,Hauptprodukt}}}{m_{\text{Hauptprodukt}} \cdot H_{\text{unterer,Hauptprodukt}} - m_{\text{Nebenprodukt}} \cdot H_{\text{unterer,Nebenprodukt}}} \quad \text{Formel 3}$$

- AF = Allokationsfaktor, mit dem die THG-Emissionen dem Hauptprodukt zugewiesen werden
 m = Masse
 H = Heizwert

Die mit dem betrachteten Hauptprodukt verbundenen THG-Emissionen ergeben sich aus der Multiplikation der bis zum Nebenprodukt anfallenden THG-Emissionen mit dem Allokationsfaktor.

$$E_{\text{alloziert}} = E_{\text{bis Nebenprodukt}} \cdot AF \quad \text{Formel 4}$$

- $E_{\text{alloziert}}$ = die mit dem Hauptprodukt verbundenen THG-Emissionen
 $E_{\text{bis Nebenprodukt}}$ = THG-Emissionen bis zum Anfallen des Nebenproduktes
 AF = Allokationsfaktor

4. THG-Einsparung

Um die Vorteilhaftigkeit des Produktes für den Treibhauseffekt darzustellen, wird die THG-Einsparung gegenüber einem Referenzprodukt (siehe Frage zur Referenz) ermittelt.

Die Information zur THG-Einsparung gegenüber einer Referenz ist sehr hilfreich, aber nicht zwingender Bestandteil eines PCF.

$$E_{\text{Einsparung}} = \left[\frac{(E_{\text{Ref}} - E_{\text{gesamt}})}{E_{\text{Ref}}} \right] \cdot 100 \quad \text{Formel 5}$$

- $E_{\text{Einsparung}}$ = THG-Emissionseinsparung gegenüber einer definierten Referenz
 E_{Ref} = Gesamt-THG-Emissionen einer definierten Referenz
 E_{gesamt} = Gesamt-THG-Emissionen des betrachteten biobasierten Produktes

Datenarten und Datenquellen

Für die Ermittlung des Product Carbon Footprint werden unterschiedliche Daten aus verschiedenen Datenquellen benötigt. Diese sind folgend tabellarisch zusammengefasst:

Datenarten	Datenquellen
Betriebliche Verbrauchsdaten an Hilfsstoffen und -energien und erzeugten Produkten (M_{Stoff} bzw. Energie, $M_{\text{(Zwischen-)Produkt}}$)	Tatsächliche Daten aus Unternehmen
Emissionsfaktoren (EF)	Entnahme aus Literatur, Datenbanken
Heizwerte (H)	Entnahme aus Literatur, Datenbanken oder tatsächliche Messung
Direkte THG-Emissionen (E_D)	Tatsächliche Messung, stöchiometrische Berechnung, Standardwerte aus der Literatur

Beispielrechnung

Zielsetzung und Untersuchungsrahmen

Ziel ist es, den Product Carbon Footprint des Biopolymers PBS (Polybutylensuccinat) auf Basis von Zuckerrübenschnitzeln zu ermitteln.

Die betrachtete Systemgrenze ist in Abbildung 5 dargestellt. Sie umfasst den Zuckerrübenanbau, den Transport, die Zuckerfabrik sowie die Biopolymerherstellung. Die funktionelle Einheit, auf die die THG-Emissionen und die THG-Einsparung bezogen werden, ist 1 kg PBS. Die THG-Emissionen werden beim Anfallen von Nebenprodukten entsprechend der Marktpreise der Haupt- und Nebenprodukte zwischen ihnen aufgeteilt (= Allokation nach Marktpreis).



Abbildung 5: Teilprozesse zur Herstellung des Biopolymers PBS.

THG-Berechnung – Zuckerrübenanbau

In unserem Beispiel ist der Ertrag an Zuckerrüben 68,86 Tonnen pro Jahr und Hektar. Beim Anbau der Zuckerrüben werden neben dem Saatgut auch Hilfsstoffe und Energie (zum Beispiel Kraftstoff für Maschinen) benötigt. Jeder dieser Inputs wird mit dem entsprechenden Emissionsfaktor in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 1: Einsatz Zuckerrübenanbau

Einsatzstoffe und Energie	Menge	Emissionsfaktor
Saatgut	6,0 kg/(ha*a)	3,54 kg CO ₂ -Äq./kg
Stickstoffdünger	119,7 g/(ha*a)	5,88 kg CO ₂ -Äq./kg
Phosphordünger	59,7 kg/(ha*a)	1,01 kg CO ₂ -Äq./kg
Kaliumdünger	134,9 kg/(ha*a)	0,58 kg CO ₂ -Äq./kg
Kalziumdünger	400,0 kg/(ha*a)	0,13 kg CO ₂ -Äq./kg
Pestizide	1,3 kg/(ha*a)	10,97 kg CO ₂ -Äq./kg
Diesel	175,9 l/(ha*a)	3,14 kg CO ₂ -Äq./l
Lachgasemissionen	Menge	Emissionsfaktor
Stickstoffdünger	119,7 kg/(ha*a)	8,08 kg CO ₂ -Äq./kg N-Dünger

Lachgasemissionen sind direkte THG-Emissionen, die aus dem Eintrag stickstoffhaltiger Düngemittel resultieren. Sie müssen in der Bilanzierung als direkte THG-Emissionen mit berücksichtigt werden. Hier erfolgt dies mit einem separaten Emissionsfaktor zur Stickstoffdüngermenge. Der in Tabelle 1 angegebene Emissionsfaktor vom Diesel beinhaltet sowohl die Bereitstellung als auch die Verbrennung des Kraftstoffs.

Die beim Anbau möglich auftretenden weiteren THG-Emissionen infolge von Landnutzungs- und Landnutzungsänderungen werden hier nicht mitberücksichtigt.

Tabelle 2: Produkte Zuckerrübenanbau

Ertrag	Menge	Berechnete Emissionen
Zuckerrüben	68,86 t/(ha*a)	35,57 kg CO ₂ -Äq./t

Je Prozessschritt (z.B. Zuckerrübenanbau, Transport, etc.) sind die THG-Emissionen des (Zwischen-) Produktes aus der nachfolgenden Berechnung anschließend vorab neben die Produktmenge eingetragen.

Entsprechend der Formel 2 werden aus der benötigten Menge und dem Emissionsfaktor dann THG-Emissionen berechnet, die einer Tonne Zuckerrüben zuzuordnen sind:

$$\begin{aligned}
 & \frac{6 \frac{\text{kg}}{\text{ha}\cdot\text{a}} \cdot 3,54 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{kg}} + 119,7 \frac{\text{kg}}{\text{ha}\cdot\text{a}} \cdot 5,88 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{kg}} + 119,7 \frac{\text{kg}}{\text{ha}\cdot\text{a}} \cdot 8,08 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{kg}}}{68,86 \frac{\text{t}}{\text{h}\cdot\text{a}}} \\
 & + \frac{59,7 \frac{\text{kg}}{\text{ha}\cdot\text{a}} \cdot 1,01 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{kg}} + 134,9 \frac{\text{kg}}{\text{ha}\cdot\text{a}} \cdot 0,58 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{kg}} + 400,0 \frac{\text{kg}}{\text{ha}\cdot\text{a}} \cdot 0,13 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{kg}}}{68,86 \frac{\text{t}}{\text{h}\cdot\text{a}}} \\
 & + \frac{1,3 \frac{\text{kg}}{\text{ha}\cdot\text{a}} \cdot 10,97 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{kg}} + 175,9 \frac{\text{l}}{\text{ha}\cdot\text{a}} \cdot 3,14 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{l}}}{68,86 \frac{\text{t}}{\text{h}\cdot\text{a}}} \\
 & = 35,57 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{t Zuckerrüben}}
 \end{aligned}$$

THG-Berechnung – Transport

Die Zuckerrüben werden anschließend zur Zuckerfabrik transportiert. Der Transport wird mit LKWs mit Dieselmotor durchgeführt. Wir gehen davon aus, dass 24 Tonnen Zuckerrüben transportiert werden und der LKW den kürzeren Rückweg leer zurücklegt.

Tabelle 3: Einsatz Transport

Transport	Strecke	Verbrauch	Emissionsfaktor
Hinweg (beladen)	80 km	0,41 l/km	3,14 kg CO ₂ -Äq./l
Rückweg (unbeladen)	20 km	0,24 l/km	

Tabelle 4: Transport

Transport	Menge	Berechnete Emissionen
Zuckerrüben	24 t/	4,92 kg CO ₂ -Äq./t

Die Transport-THG-Emissionen können berechnet werden als:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\text{Strecke} \cdot \text{Kraftstoffverbrauch} \cdot \text{Emissionsfaktor}}{\text{Transportierte Menge an Zuckerrüben}} \\
 & = \frac{(80 \text{ km} \cdot 0,41 \frac{\text{l}}{\text{km}} + 20 \text{ km} \cdot 0,24 \frac{\text{l}}{\text{km}}) \cdot 3,14 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{l}}}{24 \text{ t}} \\
 & = 4,92 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{t Zuckerrüben}}
 \end{aligned}$$

Bis sie an der Zuckerfabrik angekommen sind, summieren sich die THG-Emissionen der Zuckerrüben aus Anbau und Transport also insgesamt bereits auf (35,57 + 4,92 =) 40,49 kg CO₂-Äq. pro Tonne Zuckerrüben.

THG-Berechnung – Zuckerfabrik

Aus den angelieferten Zuckerrüben (ZR) wird zunächst Zuckersaft (ZS) und Zuckerrübenschnitzel (ZRS) hergestellt. Aus den Zuckerrübenschnitzeln wird im nächsten Schritt der Kunststoff PBS hergestellt. In der folgenden Tabelle sind die Einsatzmengen pro Jahr gelistet:

Tabelle 5: Einsatz Zuckerfabrik

Einsatzstoffe und Energie	Menge	Emissionsfaktor
Erdgas	442.377.866 MJ/a	0,07 [26] kg CO ₂ -Äq./MJ
Strom	17.856.000 kWh/a	0,48 [27] kg CO ₂ -Äq./kWh
Kalkstein	54.985.000 kg/a	0,01 [28] kg CO ₂ -Äq./kg
Prozesswasser	507.018.000 kg/a	0,0004 [28] kg CO ₂ -Äq./kg
Abwasserbehandlung	763.269.000 kg/a	0,0003 [28] kg CO ₂ -Äq./kg

Tabelle 6: Produkte Zuckerfabrik

Produkte	Menge	Ertrag	Berechnete Emissionen
Zuckersaft	752.747 t/a	0,63 t(ZS)/t(ZR)	115,32 kg CO ₂ -Äq./t
Zuckerrübenschnitzel	70.650 t/a	0,06 t(ZRS)/t(ZR)	1,56 kg CO ₂ -Äq./t

Werden die in der Zuckerfabrik benötigten Mengen an Stoffen und Energien in die Formel 2 eingesetzt, können die THG-Emissionen aus der Zuckerfabrik berechnet werden:

$$\begin{aligned}
 & \frac{442,4 \cdot 10^6 \frac{\text{MJ}}{\text{a}} \cdot 0,067 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{MJ}} + 17,9 \cdot 10^6 \frac{\text{kWh}}{\text{a}} \cdot 0,48 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{kWh}}}{70.650 \frac{\text{t}}{\text{a}}} \\
 & + \frac{55,0 \cdot 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{a}} \cdot 0,00972 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{kg}} + 507,0 \cdot 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{a}} \cdot 0,0004 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{kg}}}{70.650 \frac{\text{t}}{\text{a}}} \\
 & + \frac{763,0 \cdot 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{a}} \cdot 0,00027 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{kg}}}{70.650 \frac{\text{t}}{\text{a}}} \\
 & = 555,43 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{t Zuckerrübenschnitzel}}
 \end{aligned}$$

Pro Tonne Zuckerrübenschnitzel werden insgesamt 555,43 kg CO₂-Äquivalente frei.

THG-Emissionen bis einschließlich Zuckerfabrik

Die ersten beiden Prozesse (Anbau und Transport) wurden per Tonne Zuckerrüben berechnet, während im letzten Schritt Emissionen pro Tonne Zuckerrübenschnitzel berechnet wurden. Um die Emissionen zusammenzurechnen, müssen deshalb die vorangegangenen Ergebnisse auf pro Tonne Zuckerrübenschnitzel umgerechnet werden. Aus einer Tonne Rüben werden 0,63 Tonnen Zuckersaft und 0,06 Tonnen Zuckerrübenschnitzel gewonnen.

Aus Anbau und Transport ergeben sich umgerechnet von Zuckerrüben auf Zuckerrübenschnitzel:

$$\frac{(35,57 (\text{Anbau}) + 4,92 (\text{Transport})) \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{t Zuckerrüben}}}{0,06 \frac{\text{t Zuckerrübenschnitzel}}{\text{t Zuckerrüben}}} = 674,83 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{t Zuckerrübenschnitzel}}$$

Zusammen mit den THG-Emissionen aus der Zuckerfabrik (555,43kg CO₂-Äq. pro Tonne Zuckerrübenschnitzel) ergeben sich 1230,26 kg CO₂-Äq. pro Tonne Zuckerrübenschnitzel:

$$674,83 \text{ (Anbau und Transport)} + 555,43 \text{ (Zuckerfabrik)} \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{t Zuckerrübenschnitzel}}$$

$$= 1230,26 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{t Zuckerrübenschnitzel}}$$

Allokation der THG-Emissionen auf die Zuckerrübenschnitzel

Die THG-Emissionen bis zu diesem Punkt (aus Anbau, Transport und Zuckerfabrik) müssen nun anteilig den Produkten Zuckersaft und Zuckerrübenschnitzel (aus dem später PBS hergestellt wird) zugeordnet werden.

Um den zwei Produkten jeweils einen Anteil zuzuweisen, wird ein Allokationsfaktor benötigt, dieser soll hier auf Basis des Marktwertes der beiden Produkte [29] folgend errechnet werden:

$$\text{AF(ZRS)} = \frac{\text{Masse ZRS} \cdot \text{Marktwert ZRS}}{\text{Masse ZRS} \cdot \text{Marktwert ZRS} + \text{Masse ZS} \cdot \text{Marktwert ZS}}$$

$$= \frac{70.650 \text{ t} \cdot \frac{\$5}{\text{t}}}{70.650 \text{ t} \cdot \frac{\$5}{\text{t}} + 752.747 \text{ t} \cdot \frac{\$370}{\text{t}}} = 1,27 \cdot 10^{-3}$$

Da der Zuckerrübensaft den größten Anteil an der Produktion ausmacht und zudem einen viel höheren Marktwert besitzt, entfallen nach dieser Rechnung nur ein kleiner Bruchteil der Gesamtemissionen auf das Nebenprodukt Zuckerrübenschnitzel inklusive der Vorkette bis zu diesem Schritt.

$$1230,26 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{t Zuckerrübenschnitzel}} \cdot 1,27 \cdot 10^{-3} = 1,56 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{t Zuckerrübenschnitzel}}$$

THG-Berechnung – Biopolymerherstellung

Für die Herstellung von 1 kg PBS werden neben den bisher betrachteten Zuckerrübenschnitzeln noch andere Einsatzstoffe und -energien benötigt [29]. Im folgenden sind zur Vereinfachung einige Einzelchemikalien mit sehr geringen Einsatzmengen zu einem Sammeleinsatzstoff „weitere anorganische Chemikalien“ zusammengefasst.

Tabelle 7: Einsatz Biopolymerherstellung

Einsatzstoffe und Energie (kg PBS)	Menge	Emissionsfaktor
Zuckerrübenschnitzel	15,84 kg	0,002 (Rechnung) kg CO ₂ -Äq./kg
Wasser und Kühlwasser	288,23 kg	0,0004 [28] kg CO ₂ -Äq./kg
HCl	0,57 kg	0,85 [30] kg CO ₂ -Äq./kg
NaOH	0,27 kg	1,29 [30] kg CO ₂ -Äq./kg
H ₂ SO ₄	0,06 kg	0,09 [30] kg CO ₂ -Äq./kg
NH ₃	0,04 kg	2,67 [30] kg CO ₂ -Äq./kg
Enzyme	0,02 kg	9,77 [30] kg CO ₂ -Äq./kg
CO ₂	0,18 kg	0,74 [30] kg CO ₂ -Äq./kg
Zitronensäure	0,02 kg	0,42 [30] kg CO ₂ -Äq./kg
Weitere anorganische Chemikalien	0,56 kg	2,00 [30] kg CO ₂ -Äq./kg
Elektrische Energie	3,61 kWh	0,48 [27] kg CO ₂ -Äq./kg
Dampf	53,14 MJ	0,02 [30] kg CO ₂ -Äq./kg

Tabelle 8: Produkte Biopolymerherstellung

Produkte	Menge	Berechnete Emissionen
PBS Kunststoff	1 kg	2,85 kg CO₂-Äq./kg
Pektine	0,87 kg	2,91 kg CO₂-Äq./kg

Wie für die vorigen Prozesse wurden die verschiedenen Einsatzstoffe und -energien in Formel 2 eingesetzt:

$$\begin{aligned}
 & 15,85 \text{ kg} \cdot 0,002 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{kg}} + 288,23 \text{ kg} \cdot 0,0004 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{kg}} + 0,57 \text{ kg} \cdot 0,85 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{kg}} \\
 & + 0,27 \text{ kg} \cdot 1,29 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{kg}} + 0,06 \text{ kg} \cdot 0,09 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{kg}} + 0,04 \text{ kg} \cdot 2,67 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{kg}} \\
 & + 0,02 \text{ kg} \cdot 9,77 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{kg}} + 0,18 \text{ kg} \cdot 0,74 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{kg}} + 0,02 \text{ kg} \cdot 0,42 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{kg}} \\
 & + 0,56 \text{ kg} \cdot 2,00 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{kg}} + 3,61 \text{ kWh} \cdot 0,48 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{kWh}} + 53,14 \text{ MJ} \cdot 0,02 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{MJ}} \\
 & = 5,39 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{kg PBS}}
 \end{aligned}$$

Auch hier entsteht (vereinfacht) ein Nebenprodukt (Pektine), so dass die THG-Emissionen erneut aufgeteilt werden. Beide Produkte sind mit einem Preis von \$4/kg angegeben [29], daher ergibt sich folgender Allokationsfaktor:

$$\text{AF(PBS)} = \frac{1 \text{ kg PBS} \cdot \frac{\$4}{\text{kg}}}{1 \text{ kg PBS} \cdot \frac{\$4}{\text{kg}} + 0,87 \text{ kg Pektine} \cdot \frac{\$4}{\text{kg}}} = 0,53$$

Und dem Biopolymer sind

$$5,39 \text{ kg CO}_2\text{-Äq.} \cdot 0,53 = 2,85 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{kg PBS}}$$

zuzurechnen. Dieses Ergebnis beinhaltet bereits die berechnete Vorkette von Zuckerrübenanbau über Transport und Zuckerfabrik.

Damit ist der Product Carbon Footprint von 1 kg Polybutylensuccinat auf Basis von Zuckerrübenschnitzel berechnet.

Bewertung und Vergleich

Um das Ergebnis des PCF von 2,85 kg CO₂-Äq/kg PBS einordnen zu können und um eine Aussage zur Vor- oder Nachteilhaftigkeit dieses Produkts hinsichtlich der THG-Emissionen zu treffen, bedarf es eines Vergleiches zu einer Referenz. Hier empfiehlt sich der Vergleich zu einem fossil-basierten PBS.

Für die Produktion von PBS aus fossilen Rohstoffen wurde ein Carbon-Footprint von 6,6 CO₂-Äq/kg ermittelt [31]. Im Vergleich zu diesem gleichwertigen fossil erzeugten Produkt ergibt sich für unsere Rechnung ein THG-Einsparpotential entsprechend Formel 5 von

$$\text{THG-Einsparung} = \frac{(6,6 - 2,85)}{6,6} \frac{\frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{kg}}}{\frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{kg}}} = 57\%$$

Auf Grundlage der Berechnung des Product Carbon Footprints von Zuckerrübenschnitzel-basiertem PBS von 2,85 kg CO₂-Äq./kg kann eine THG-Einsparung von 57% gegenüber einem fossil-basierten PBS ermittelt werden.

Der Vergleich zur Referenz ist nicht mehr Bestandteil des Product Carbon Footprint, sondern dient der Einordnung des Ergebnisses.

Verfügbare Daten und Berechnungs-Tools

Zur Durchführung von Nachhaltigkeitsbewertungen und konkret von Lebenszyklusanalysen und Product Carbon Footprints werden zum einen viele Daten entlang der betrachteten Wertschöpfungsketten wie betriebliche Verbrauchsdaten, dazugehörige Emissionsfaktoren, und zum anderen Tools oder Software zur Berechnung benötigt. Im Folgenden sind mögliche Quellen an Datenbanken und sonstigen Sammlungen von Emissionsfaktoren, Berechnungstools und Ökobilanzsoftware aufgelistet.

Datenbanken und Sammlung von Emissionsfaktoren

Für die Berechnung einer Lebenszyklusanalyse oder eines Product Carbon Footprints werden für die eingesetzten Materialien, Rohstoffe oder Energien die entsprechenden spezifischen Emissionsfaktoren benötigt. Diese Emissionsfaktoren können in Datenbanken, Sammlungen oder weiteren wissenschaftlichen Veröffentlichungen enthalten sein. Folgend sind einige aufgeführt:

Datenbank	Verfügbarkeit	EF online abrufbar	Integration Software	LCA
Probas/Gemis	Frei	www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php https://iinas.org/downloads/gemis-downloads/	Ja	
Ecoinvent	Kostenpflichtig	Ja	Ja	
biograce	Frei	www.biograce.net	Nein	
Durchführungsverord. (EU) 2022/996 Anhang IX	Frei (pdf)	https://eur-lex.europa.eu/homepage.html	Nein	
GaBi LCI Datenbank	Kostenpflichtig	Ja	Ja (LCA Software)	
ELCD	Frei	Abrufbar über Download, Stand 2018	Ja	
Agri-footprint/SimaPro	Kostenpflichtig	Ja	Integriert in SimaPro	

Berechnungstools

Berechnungstools bieten eine nutzerfreundliche Oberfläche und Unterstützung bei der Berechnung eines Product Carbon Footprints oder einer Lebenszyklusanalyse. Die Tools verfügen meistens nicht über die vollen Funktionalitäten einer Ökobilanzsoftware und sind daher beschränkt auf bestimmte Sektoren, Regionen, oder Produkte. Folgend eine kurze Auswahl mit Beispielen:

Tool	Verfügbarkeit	Typ	Anwendung
biograce	frei	Excel	Biokraftstoffe
Biomass Carbon Calculator (drax)	frei	Excel	EU Wald und Holzpellets
Ecochain Helix	kostenpflichtig	Programm	Produkte und Industrieanlagen
Capri	frei	Programm	Landwirtschaft
CCaLC	frei	Programm	Industrie
EPA Simplified GHG Emissions Calculator	frei	Excel	Kleinere Unternehmen

Ökobilanzsoftware

Um eine vollständige Lebenszyklusanalyse einschließlich Product Carbon Footprint zu erstellen (siehe oben), gibt es spezielle Bilanzierungs-Softwarelösungen, die mit verschiedenen Datenbanken kombiniert werden können. Einige der häufigsten Programme sind im Folgenden aufgeführt:

Frei verfügbar (kostenlos)	Kommerziell (kostenpflichtig)
openLCA	umberto
Gemis	GaBi
	SimaPro

Literatur

- [1] Weltkommission für Umwelt und Entwicklung. Our common future: Brundtland Bericht, 1987.
- [2] 360excellence. Umfassende Nachhaltigkeit ist Teil der Corporate Social Responsibility: Ausgerichtet auf die Agenda 2030. <https://360excellence.com>. Aufgerufen 2023-08-15.
- [3] L. Andes, T. Lützkendorf, B. Ströbele, J. Kopfmüller, and C. Rösch. Methodensammlung zur Nachhaltigkeitsbewertung: Grundlagen, Indikatoren, Hilfsmittel, 2019.
- [4] W. Zeug, A. Bezama, and D. Thrän. Towards a Holistic and Integrated Life Cycle Sustainability Assessment of the Bioeconomy – Background on Concepts, Visions and Measurements, 2020.
- [5] W. Zeug, K. R. G. Yupanqui, A. Bezama, and D. Thrän. Holistic and integrated life cycle sustainability assessment of prospective biomass to liquid production in Germany. *Journal of Cleaner Production*, 418:138046, 2023.
- [6] *The greenhouse gas protocol: A corporate accounting and reporting standard*. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, revised ed. edition, 2004.
- [7] GBEP Global Bioenergie Partnerschaft. Die Globale Bioenergie Partnerschaft: 12th meeting of the GBEP Task Force on Sustainability, 2011.
- [8] Blauer Engel. Umweltfreundliche Druckerzeugnisse (DE-UZ 195). <https://www.blauer-engel.de>. Aufgerufen 2023-08-29.
- [9] ISCC International Sustainability & Carbon Certification. Leading the transition to a circular economy and sustainable bioeconomy: Certification scheme: ISCC PLUS. <https://www.iscc-system.org/certification>. Aufgerufen 2023-08-29.
- [10] Cradle to Cradle certified. <https://c2ccertified.org/the-standard>. Aufgerufen 2023-08-29.
- [11] Natrue. The international natural and organic cosmetics association. <https://natrue.org/>. Aufgerufen 2023-08-29.
- [12] EU Ecolabel. Über das EU Ecolabel. <https://eu-ecolabel.de>. Aufgerufen 2023-08-29.
- [13] Naturland. Naturland mehrwert. <https://www.naturland.de>. Aufgerufen 2023-08-29.
- [14] T. Loew and J. Clausen. Wettbewerbsvorteile durch CSR: Eine Metastudie zu den Wettbewerbsvorteilen von CSR und Empfehlungen zur Kommunikation an Unternehmen, 2010.
- [15] BGBI I. Gesetz über die unternehmerischen Sorgfaltspflichten in Lieferketten, 2021.
- [16] Rainforest Alliance. Welchen Mehrwert bietet Nachhaltigkeit den Unternehmen?, 2019.
- [17] Plant values - Beratung und Coaching für Nachhaltigkeit. Nachhaltige Unternehmenskultur: Wie man sie zum Vorteil nutzt. <https://plant-values.de>. Aufgerufen 2023-08-29.
- [18] D. Moosmann, S. Majer, S. Ugarte, L. Ladu, S. Wurster, and D. Thrän. Strengths and gaps of the EU frameworks for the sustainability assessment of bio-based products and bioenergy. *Energy, Sustainability and Society*, 10(1):22, 2020.
- [19] D. Weiss, T. Hajduk, and J. Knopf. Schritt für Schritt zum nachhaltigen Lieferkettenmanagement: Praxisleitfaden für Unternehmen, 2010.
- [20] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN ISO 14040 Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006), 2006.
- [21] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN ISO 14044 Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006), 2006.
- [22] W. Klöpffer and B. Grahl. *Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf*. Wiley-VCH, 2009.

- [23] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate change 2013: The physical science basis. Summary for policymakers, part of the Working Group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York, 2013.
- [24] D. Cespi, F. Passarini, L. Ciacci, I. Vassura, V. Castellani, E. Collina, A. Piazzalunga, and L. Morselli. Heating systems LCA: comparison of biomass-based appliances. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(1):89–99, 2014.
- [25] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Treibhausgase – Carbon Footprint von Produkten – Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung (ISO 14067:2018); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14067:2018, 2018.
- [26] Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg. Biograce. harmonized calculations of biofuel greenhouse gas emissions in Europe. www.biograce.net. Aufgerufen 2023-08-29.
- [27] T. Lauf, M. Memmler, and S. Schneider. Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. <https://www.umweltbundesamt.de>. Aufgerufen 2023-08-25.
- [28] IINAS Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien and ÖKO-Institut E. V. Institut für angewandte Ökologie E.V. Gemis, 2014.
- [29] S. M. Ioannidou, D. Ladakis, E. Moutousidi, E. Dheskali, I. K. Kookos, I. Câmara-Salim, M. T. Moreira, and A. Koutinas. Techno-economic risk assessment, life cycle analysis and life cycle costing for poly(butylene succinate) and poly(lactic acid) production using renewable resources. *Science of The Total Environment*, 806:150594, 2022.
- [30] ecoinvent version 3.9.1. <https://ecoinvent.org/>. Aufgerufen 2023-09-01.
- [31] H. Moussa, S.B. Young, and Y. Gerand. Polybutylene succinate life cycle assessment variations and variables: Environmental and sustainability impact measurement. In *American Institute of Chemical Engineers (AIChE), 2012 International Congress on Energy*, 2012.

Impressum

Herausgegeben von:

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
Torgauer Straße 116
04347 Leipzig
Tel.: +49 (0)341 2434-112
Fax: +49 (0)341 2434-13
E-Mail: info@dbfz.de

Institutionelle Förderung:

Das Deutsche Biomasseforschungszentrum wird institutionell gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

Geschäftsführung:

Prof. Dr. mont. Michael Nelles (wiss.)
Dr. Christoph Krukenkamp (admin.)

Für den Inhalt der Broschüre ist der Herausgebende verantwortlich.

Bilder: Titelblatt: ©lovely day 12, ©eclusive-design, ©Sergey Ryzhov, ©Anna Efetova,
©H_Ko, ©Wayhome Studio - stock.adobe.com

ISBN: XXX

DOI: XXX

Druck: XXX

Gestaltung/Desktop Publishing: Inga Katharina Götz

©Copyright: DBFZ 2023

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