

Vergleichende Ökobilanzen: Valorisierung von Nebenströmen in der Lebensmittelindustrie



17.04.2025

Abschlussbericht

Impressum

Auftraggeber:in Bundesamt für Umwelt BAFU
Abteilung Ökonomie und Innovation
Monbijoustrasse 40
3003 Bern

Auftragnehmer:in Intep
Integrale Planung GmbH
Pfungstweidstrasse 16
8005 Zürich
T +41 (0) 44 578 11 33
www.intep.com

Verfasser:in

Stefanie Maeder Emilija Vukasinovic	M.Sc. ETH Umweltnaturwissenschaften M.Sc. Sustainable Management and Technology
Stéphanie Jamet Martina Alig	M.Sc. ETH Umweltingenieurwissenschaften M.Sc. ETH Umweltnaturwissenschaften

**Begleitgrupp
Auftraggeber**

Danielle Tendall	BAFU
Jonathan Brünggel	BAFU
Pierryyves Padey	BAFU
Josef Känzig	BAFU

Versionierung	Datum	Version	Kommentar	Verantw.	Freigabe
	25. März 2025	1.0	Dokument erstellt	sm	am
	17. April 2025	1.1	Korrektur Fleischproteinisolat	sm	am

Bildquelle www.pexels.com (cottonbro studio)

Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Inhaltsübersicht

Zusammenfassung	4
Résumé	9
1 Einleitung	14
1.1 Ausgangslage	14
1.2 Zielsetzung	15
2 Vorgehen und Methodik	16
2.1 Begriffsdefinition	16
2.2 Untersuchte Nebenströme	16
2.3 Ökobilanzierung: Methode	19
2.4 Verwertungs-/Valorisierungswege und Szenarien	32
2.5 Sensitivitätsanalysen Nutzungsszenario	53
3 Resultate	55
3.1 Ökobilanzen	55
3.2 Resultate Sensitivitätsanalyse Wirkungsabschätzung	87
4 Diskussion	90
4.1 Einordnung der Resultate	90
4.2 Limitationen und Hinweise zur Interpretation	92
5 Schlussfolgerung	96
6 Referenzen	98
A Dokumentation Ökobilanzen	103
A.1 Dokumentation Systemgrenzen	103
A.2 Dokumentation Herstellung Haupt- und Nebenprodukte	110
A.3 Dokumentation Sachbilanzen	112
B Übersicht weitere Resultate	129
B.1 Resultate THG-Emissionen	129
B.2 Einordnung Verwertungs-/Valorisierungswege	140
B.3 Resultate-Tabellen	150
C Prüfbericht externes Review	160

Zusammenfassung

In der Schweiz werden über ein Drittel der produzierten Lebensmittel verschwendet, was mit signifikanten Umweltbelastungen einhergeht. Um dem entgegenzuwirken, hat die Schweizer Regierung 2022 den «Aktionsplan gegen Lebensmittelverschwendung» ins Leben gerufen, der das Ziel hat, diese bis 2030 zu halbieren. Die Lebensmittelindustrie kann einen Beitrag zur Erreichung dieser Ziele leisten, indem anfallende Nebenströme ökologisch sinnvoll genutzt werden. Viele der anfallenden Nebenprodukte sind essbar, werden aber bislang oft als Tierfutter oder zur Erzeugung von Biogas genutzt. Der ökologische Nutzen anderer Valorisierungs- und Verwertungswege ist oft nicht bekannt. Die Valorisierung wird in dieser Studie als Verarbeitung eines Nebenstromes zu einem für den menschlichen Verzehr geeigneten Produkten definiert, die Verwertung als Verarbeitung zu einem nicht für den menschlichen Verzehr geeigneten Produkt.

Dieser Bericht untersucht zehn für die Schweiz relevante Nebenströme (Molke, Weizenkleie, Melasse, Rapspresskuchen, Biertrester, Mosttrester, Rind-Innereien, Poulet-Innereien, Poulet-Hals und Schweins-Innereien) und quantifiziert den ökologischen Nutzen verschiedener Valorisierungs- und Verwertungswege mit dem Ziel, eine Priorisierung dieser Wege aus ökologischer Sicht zu ermöglichen. Die Bewertung des ökologischen Nutzens erfolgt mittels der Methode der Ökobilanzierung (LCA) und gewährleistet durch ein konsistentes methodisches Vorgehen die Vergleichbarkeit der ökologischen Bewertung der untersuchten Valorisierungs- und Verwertungswegen.

Für die Erstellung der Ökobilanzen wurde sowohl die zusätzliche Umweltbelastung durch den Valorisierungs-/Verwertungsprozess als auch den Nutzen durch die Substitution eines anderen Lebensmittels oder Produktes berücksichtigt. Für die Erstellung der Ökobilanzen der Verwertung/Valorisierung wurden entweder Primärdaten aus der Schweizer Industrie, Daten aus vergleichbaren Studien oder bestehende Sachbilanzdaten aus Ökobilanzdatenbanken verwendet. Für jeden betrachteten Valorisierungs-/Verwertungsweg wurde anhand von Industrieangaben oder Literaturrecherchen ein Produkt definiert, das durch die Valorisierung/Verwertung des Nebenstroms ersetzt werden kann. Die Umweltbelastung dieses ersetzbaren Produktes wird der Ökobilanz als Umweltnutzen angerechnet. Durch die Gegenüberstellung der zusätzlichen Umweltbelastung durch die Valorisierung/Verwertung und dem Umweltnutzen durch den Ersatz eines Produktes kann die ökologische Sinnhaftigkeit bewertet werden. Je stärker der Umweltnutzen durch das substituierte Produkt die Mehrbelastung durch die Valorisierung/Verwertung überwiegt, desto sinnvoller ist der jeweilige Valorisierungs-/Verwertungsweg aus Umweltsicht. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden alle Analysen pro Kilogramm verwerteten/valorisierten Nebenstrom durchgeführt. Bei der Substitution wurde eine vergleichbare Funktion des Produktes aus der Verwertung/Valorisierung und dem ersetzbaren Produkt beachtet.

Die Umweltbelastung wurde in Umweltbelastungspunkten (UBPs) gemäss der Methode der ökologischen Knappheit und in Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) bewertet. Eine Sensitivitätsanalyse zu den relevantesten Annahmen bezüglich der ersetzbaren Produkte und auch der Wahl der Wirkungsabschätzungsmethode wurde durchgeführt. Dies erlaubt die Robustheit der Resultate zu beurteilen.

Die wichtigsten Resultate und Erkenntnisse für jeden Nebenstrom sind im Folgenden zusammengefasst:

Molke

- Alle untersuchten Valorisierungen und Verwertungen führen zu einem Umweltnutzen. Die Valorisierung von Molke schneidet aus Umweltsicht tendenziell besser ab als die Verwertung, jedoch nicht in jedem Fall.
- Den höchsten Umweltnutzen kann mit der Valorisierung zu Molkenpulver, Molkenflüssigkonzentrat oder der Verwertung zu tiefkonzentriertem Molkenproteinkonzentrat zur Verfütterung erreicht werden.
- Aufgrund der tiefen Ausbeute ist hochkonzentriertes Molkenproteinkonzentrat mit weniger Umweltnutzen verbunden als tiefkonzentriertes Konzentrat.
- Die Nassverfütterung hat insbesondere einen Umweltnutzen, wenn die Gesamtumweltbelastung (UBPs) betrachtet wird, jedoch weniger, wenn nur die Einsparung an THG-Emissionen betrachtet wird.
- Die Valorisierung zu Molkenkäse sowie die Vergärung von Molke sind mit der tiefsten Einsparung an Umweltbelastung verbunden.
- Verglichen mit der Vergärung von Molke kann mit einer Valorisierung/Verwertung bis zu 19% der Umweltbelastung und THG-Emissionen eingespart werden.

Weizenkleie

- Alle untersuchten Valorisierungen und Verwertungen führen zu einem Umweltnutzen. Bei der Weizenkleie schneidet aus Umweltsicht die Valorisierung besser ab als die Verwertung.
- Den höchsten Umweltnutzen kann mit dem direkten Verzehr von Weizenkleie, der Herstellung von Vollkornmehl sowie der Verfütterung erreicht werden.
- Andere Verwertungen wie die Vergärung, Insektenzucht, Kompostierung oder Verbrennung von Weizenkleie führen zu einer tieferen Einsparung an Umweltbelastung.
- Die Insektenzucht mit Weizenkleie hat tendenziell einen grösseren Umweltnutzen, wenn direkt Proteine für die menschliche Ernährung ersetzt werden, als wenn die Insekten an Nutztiere verfüttert werden. Der Ersatz des sonst in der Fütterung verwendeten Fischmehls hat insbesondere einen Umweltnutzen, wenn die Gesamtumweltbelastung (UBPs) betrachtet wird, jedoch weniger, wenn nur die Einsparung an THG-Emissionen betrachtet wird.
- Verglichen mit der Verbrennung von Weizenkleie kann mit einer Valorisierung/Verwertung bis zu 16% der Umweltbelastung und 10% der THG-Emissionen eingespart werden.

Melasse

- Alle untersuchten Valorisierungen und Verwertungen führen zu einem Umweltnutzen. Die Valorisierung von Melasse schneidet nicht zwingend besser ab als die Verwertung.
- Mit Abstand den höchsten Umweltnutzen kann mit der Verfütterung von Melasse erreicht werden.
- Valorisierungen wie die Nutzung als Zuckerersatz oder die Trinkethanolherstellung, aber auch die Verwertung von Melasse in der Insektenzucht, Kompostierung oder Verbrennung führen zu einem vergleichsweise tiefen Umweltnutzen.
- Die Insektenzucht mit Melasse und der dadurch erreichte Ersatz von Fischmehl hat insbesondere einen Umweltnutzen, wenn die Gesamtumweltbelastung (UBPs) betrachtet wird, jedoch weniger, wenn nur die Einsparung an THG-Emissionen betrachtet wird.
- Verglichen mit der Vergärung von Melasse kann mit einer Valorisierung/Verwertung bis zu 55% der Umweltbelastung und 25% der THG-Emissionen eingespart werden.

Rapspresskuchen

- Die untersuchten Valorisierungen und Verwertungen führen zu einem Umweltnutzen. Eine Ausnahme bildet die Valorisierung zu Rapsmehl, wenn die THG-Emissionen betrachtet werden. Die Valorisierung von Rapspresskuchen schneidet tendenziell besser ab als die Verwertung, jedoch nicht in jedem Fall.
- Den höchsten Umweltnutzen kann mit der Verfütterung von Rapspresskuchen und der Valorisierung zu Rapsproteinisolat erreicht werden.
- Die Verfütterung von Rapspresskuchen hat insbesondere einen Umweltnutzen, wenn die Gesamtumweltbelastung (UBPs) berücksichtigt wird, jedoch weniger, wenn nur die Einsparung an THG-Emissionen betrachtet wird.
- Der Umweltnutzen der Rapsmehlherstellung ist bei einer Betrachtung der UBPs zwar relativ hoch, jedoch sind diese Resultate nicht eindeutig und mit grösserer Unsicherheit verbunden.
- Die Verwertungswege Vergärung, Verbrennung und Kompostierung von Rapspresskuchen führen zu einer tieferen Einsparung an Umweltbelastung.
- Verglichen mit der Verbrennung von Rapspresskuchen kann mit einer Valorisierung/Verwertung bis zu 12% der Umweltbelastung und 18% der THG-Emissionen eingespart werden.

Biertrester

- Alle untersuchten Valorisierungen und Verwertungen führen zu einem Umweltnutzen, abgesehen von der Verbrennung. Die Valorisierung von Biertrester schneidet tendenziell besser als die Verwertung ab.
- Den höchsten Umweltnutzen kann mit der Nassverfütterung von Biertrester, der Valorisierung zu Biertrestermehl, getrocknetem Biertrester und Biertresterfleischersatz erreicht werden.
- Die Valorisierung zu Biertrestermehl und getrocknetem Biertrester hat insbesondere einen Umweltnutzen, wenn die Gesamtumweltbelastung (UBPs) berücksichtigt wird, jedoch weniger, wenn nur die Einsparung an THG-Emissionen betrachtet wird.
- Die Verwertungswege Vergärung, Verbrennung und Kompostierung von Biertrester führen zu einer tieferen Einsparung an Umweltbelastung.
- Verglichen mit der Verbrennung von Biertrester kann mit einer Valorisierung/Verwertung bis zu 28% der Umweltbelastung und 15% der THG-Emissionen eingespart werden.

Mosttrester

- Die untersuchten Valorisierungen und Verwertungen führen zu einem Umweltnutzen, abgesehen von der Verbrennung und der Trockenverfütterung. Die Valorisierung von Mosttrester schneidet besser als die Verwertung ab.
- Mit Abstand den höchsten Umweltnutzen kann mit Herstellung von Apfelmehl erreicht werden.
- Die Verwertungswege Vergärung, Verbrennung, Kompostierung und Trockenverfütterung von Mosttrester führen zu einer tieferen resp. bei der Verbrennung und der Trockenverfütterung zu keiner Einsparung an Umweltbelastung.
- Resultate von anderen Nebenströmen legen nahe, dass die Nassverfütterung von Mosttrester wesentlich besser als die Trockenverfütterung abschneiden würde und zu einem eher höheren Umweltnutzen führen könnte.
- Verglichen mit der Verbrennung von Mosttrester kann mit einer Valorisierung/Verwertung bis zu 15% der Umweltbelastung und 13% der THG-Emissionen eingespart werden.

Rind-Innereien

- Alle untersuchten Valorisierungen und Verwertungen führen zu einem Umweltnutzen. Die Valorisierung von Rind-Innereien schneidet besser als die Verwertung ab.
- Den höchsten Umweltnutzen kann mit dem direkten Verzehr, der Extrusion von Innereien und der Herstellung von Fleischproteinisolat erreicht werden.
- Die Verwertungswege Vergärung, Verbrennung, Kompostierung und die Herstellung von Pet-Food führen zu einer vergleichsweise tieferen Einsparung an Umweltbelastung.
- Unter den betrachteten Verwertungswegen schneidet die Verfütterung an Heimtiere am besten ab.
- Verglichen mit der Verbrennung von Rind-Innereien kann mit einer Valorisierung/Verwertung bis zu 5% der Umweltbelastung und THG-Emissionen eingespart werden.

Poulet-Innereien & Schweins-Innereien

- Die untersuchten Valorisierungen und Verwertungen führen zu einem Umweltnutzen. Eine Ausnahme bildet die Verwertung zu Tiermehl, wenn THG-Emissionen betrachtet werden. Die Valorisierung von Innereien schneidet besser als die Verwertung ab.
- Den höchsten Umweltnutzen kann mit dem direkten Verzehr, der Extrusion von Innereien und der Herstellung von Fleischproteinisolat erreicht werden.
- Die Verwertungswege Vergärung, Verbrennung, Kompostierung und die Herstellung von Pet-Food und Tiermehl führen zu einer vergleichsweise tieferen Einsparung an Umweltbelastung.
- Die Herstellung von Tiermehl aus Innereien trägt durch den erreichten Ersatz von Fischmehl vor allem zur Minderung der Überfischung bei, jedoch kaum zur Minderung anderer Umweltauswirkung.
- Verglichen mit der Verbrennung von Poulet-Innereien kann mit einer Valorisierung/Verwertung bis zu 7% der Umweltbelastung und THG-Emissionen eingespart werden. Bei den Schweins-Innereien sind es bis zu 6% der Umweltbelastung und THG-Emissionen.

Poulet-Hals

- Die untersuchten Valorisierungen und Verwertungen führen zu einem Umweltnutzen. Eine Ausnahme bildet die Verwertung zu Tiermehl, wenn THG-Emissionen betrachtet werden. Die Valorisierung von Poulet-Hals schneidet besser als die Verwertung ab.
- Den höchsten Umweltnutzen kann mit dem direkten Verzehr des Poulet-Halses erreicht werden.
- Die Verwertungswege Vergärung, Verbrennung, Kompostierung und die Herstellung von Pet-Food und Tiermehl führen zu einer vergleichsweise tieferen Einsparung an Umweltbelastung.
- Die Herstellung von Tiermehl aus Poulet-Hals trägt durch den erreichten Ersatz von Fischmehl vor allem zur Minderung der Überfischung bei, jedoch kaum zur Minderung anderer Umweltauswirkung.
- Verglichen mit der Verbrennung von Poulet-Hals kann mit einer Valorisierung/Verwertung bis zu 6% der Umweltbelastung und der THG-Emissionen eingespart werden.

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die Verwertung und Valorisierung von Nebenströmen in den allermeisten Fällen ökologisch sinnvoll ist und eine Einsparung von Umweltbelastung verglichen mit der Verbrennung resp. Vergärung von Nebenströmen bietet. Dabei schneidet die Valorisierung von Nebenströme aus ökologischer Sicht meistens besser ab als die

herkömmliche Verwertung in der Verbrennung, Vergärung oder Kompostierung. Weitere Verwertungswege wie zum Beispiel die Verfütterung können je nach Nebenstrom aber ebenfalls einen ähnlich hohen Umweltnutzen wie die Valorisierung bieten.

Der ökologische Nutzen einer Valorisierung/Verwertung hängt massgeblich davon ab, welche herkömmlichen Produkte durch die Nebenstromverwertung/-valorisierung ersetzt werden. Die durchgeführten Sensitivitätsanalysen zeigen, dass die Resultate gegenüber den Annahmen zu den substituierten Produkten und auch der Wahl der Wirkungsabschätzungsmethode relativ robust sind und die allgemeinen Schlussfolgerungen generell bestätigen. Insbesondere bei der Vergärung und Verbrennung liefern die Analysen jedoch zusätzliche Erkenntnisse. Die Vergärung führt vor allem zu einer Reduktion von THG-Emissionen, wenn fossile Energiequellen ersetzt werden. Andere Umweltauswirkungen können mit der Vergärung wie auch bei der Verbrennung nur in geringerem Umfang gemindert werden.

Insgesamt liefern die Ergebnisse eine fundierte Abschätzung des ökologischen Nutzens durch die Valorisierung und Verwertung von Nebenströmen. Bei der Interpretation der Resultate ist zu berücksichtigen, dass je nach betrachtetem Weg grössere Unsicherheiten aufgrund der verwendeten Datengrundlage bestehen. Ausserdem sind die Ergebnisse nur für die betrachteten Wege und unter den getroffenen Annahmen zu den Nutzungsszenarien gültig. Spezifische Fälle sind jeweils individuell zu analysieren. Weiter ist der Bericht weder abschliessend in den betrachteten Nebenströmen noch in den betrachteten Valorisierungs- und Verwertungswegen. Andere oder neue Wege können weitere Potenziale bieten. Nicht zuletzt ist zu berücksichtigen, dass diese Studie eine Aussage über den Umweltnutzen eines Valorisierungs-/Verwertungsweges pro Kilogramm valorisiertem/verwertetem Nebenstrom macht. Die effektive Menge, die auf die jeweilige Art und Weise valorisiert/verwertet wird, hängt jedoch von Faktoren wie der Marktnachfrage oder technischen Faktoren ab. In Realität wird wohl eine Mischung aus verschiedenen Wegen nötig sein. Daher zeigen die Resultate eine Priorisierung der Valorisierungs-/Verwertungswege aus Umweltsicht. Es bedarf jedoch darauf aufbauender Massnahmen (z.B. aktive Vermarktung innovativer Produkte), um diese Prioritäten und deren potenziellen Umweltnutzen zu realisieren.

Résumé

En Suisse, plus d'un tiers des denrées alimentaires produites sont gaspillées, ce qui entraîne des impacts environnementaux significatifs. Afin d'y remédier, le gouvernement suisse a lancé en 2022 le « Plan d'action contre le gaspillage alimentaire », qui vise à réduire de moitié ce gaspillage d'ici 2030. L'industrie agro-alimentaire peut contribuer à l'atteinte de cet objectif notamment en valorisant écologiquement les flux secondaires générés. De nombreux flux secondaire sont comestibles, mais ils sont actuellement principalement utilisés pour l'alimentation animale ou la production de biogaz. L'impact environnemental d'autres voies de valorisation et de traitement est souvent méconnu. Dans cette étude la valorisation est définie comme la transformation d'un flux secondaire en un produit destiné à la consommation humaine, tandis que le terme traitement désigne la transformation en un produit non destiné à la consommation humaine.

Ce rapport examine dix flux secondaires pertinents pour la Suisse (lactosérum, son de blé, mélasse, tourteau de colza, drêches de brasserie, marc de pomme, abats de bœuf, abats de volaille, cou de poulet et abats de porc) et quantifie le bénéfice écologique de différentes voies de valorisation et de traitement, dans le but d'établir une hiérarchisation écologique de ces alternatives. L'évaluation de l'impact environnemental repose sur la méthode de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), garantissant ainsi une approche méthodologique cohérente et une comparaison objective des voies étudiées.

Pour établir ces ACV, l'impact environnemental supplémentaire généré par le processus de valorisation ou de traitement ainsi que le bénéfice obtenu grâce à la substitution d'un autre produit ont été pris en compte. Ces analyses ont été menées à partir de données primaires issues de l'industrie suisse, d'études comparables ou de bases de données existantes en ACV. Pour chaque voie de valorisation ou de traitement, un produit substitué a été défini sur la base de données industrielles ou d'une revue de la littérature. L'impact environnemental de ce produit substitué est ensuite comptabilisé comme un bénéfice environnemental. En comparant l'impact environnemental additionnel de la valorisation ou du traitement avec les gains environnementaux résultant de la substitution, il est possible d'évaluer leur pertinence écologique. Plus la différence entre l'impact du produit substitué et celui de la voie de valorisation (respectivement traitement) est élevée, plus celle-ci est avantageuse d'un point de vue environnemental. Afin d'assurer la comparabilité des résultats, toutes les analyses ont été réalisées par kilogramme de flux secondaire valorisé ou traité. La substitution a été évaluée en tenant compte de la fonctionnalité équivalente du produit issu de la valorisation ou du traitement et du produit de substitution.

L'impact environnemental a été évalué en unités de charge écologique (UCE) selon la méthode de la saturation écologique ainsi qu'en émissions de gaz à effet de serre (GES). Une analyse de sensibilité a été réalisée sur les hypothèses clés, notamment celles relatives aux choix des produits substitués ou encore au choix de la méthode d'évaluation des impacts. Ces analyses de sensibilité ont ainsi permis d'évaluer la robustesse des résultats.

Les principaux résultats et conclusions pour chaque flux secondaire sont résumés ci-dessous :

Lactosérum (Petit-lait)

- Toutes les voies de valorisation et de traitement étudiées entraînent un bénéfice environnemental. La valorisation du lactosérum tend à être plus avantageuse que le traitement, bien que cela ne soit pas systématique.
- Le bénéfice environnemental le plus élevé est obtenu par la valorisation sous forme de poudre de lactosérum, de concentré liquide de lactosérum ou de concentré protéique de lactosérum faiblement concentré destiné à l'alimentation animale.
- En raison de son faible rendement, le concentré de protéines de lactosérum hautement concentré est moins respectueux de l'environnement qu'un produit moins concentré.
- L'alimentation animale sous forme humide présente un avantage environnemental particulièrement notable en termes de UCE, mais celui-ci est moindre lorsqu'on considère uniquement les émissions de GES.
- La production de fromage de lactosérum et la fermentation du lactosérum offrent le plus faible bénéfice environnemental.
- Comparé à la production de biogaz par fermentation du lactosérum, une valorisation ou un traitement permet d'économiser jusqu'à 19% des impacts environnementaux et des émissions de GES.

Son de blé

- Toutes les voies de valorisation et de traitement étudiées génèrent un bénéfice environnemental. La valorisation est généralement plus avantageuse que le traitement.
- Le bénéfice le plus important est obtenu avec la consommation directe du son de blé, la production de farine complète et l'alimentation animale.
- Les autres traitements, tels que la fermentation, l'élevage d'insectes, le compostage ou l'incinération, offrent un bénéfice environnemental moindre.
- L'élevage d'insectes avec du son de blé est plus avantageux lorsque les protéines sont destinées à l'alimentation humaine plutôt qu'à l'alimentation animale.
- Comparé à l'incinération du son de blé, une valorisation ou un traitement permet d'économiser jusqu'à 16% des impacts environnementaux et 10% des émissions de GES.

Mélasse

- Toutes les voies de valorisations et de traitement étudiées génèrent un bénéfice environnemental. La valorisation de la mélasse n'est pas nécessairement meilleure que son traitement.
- L'utilisation de mélasse dans l'alimentation animale est de loin la plus bénéfique pour l'environnement.
- Les valorisations telles que son traitement comme substitut du sucre ou pour la production d'éthanol-alcool, ainsi que son traitement dans l'élevage d'insectes, le compostage ou l'incinération, entraînent un bénéfice environnemental relativement faible.
- L'élevage d'insectes avec de la mélasse, qui remplace ainsi la farine de poisson, présente un avantage environnemental, en particulier lorsqu'on considère l'impact environnemental global (UCE), mais moins lorsqu'on ne prend en compte que la réduction des émissions de GES.
- Comparée à la production de biogaz à partir de la mélasse, une valorisation ou un traitement permet de réduire jusqu'à 55% de l'impact environnemental global et 25% des émissions de GES.

Tourteau de colza

- Les voies de valorisations et de traitement étudiées génèrent un bénéfice environnemental, à l'exception de la valorisation en farine de colza pour les émissions de GES. La valorisation des tourteaux de colza est généralement plus avantageuse que le traitement.
- Le plus grand bénéfice environnemental peut être obtenu par l'utilisation (traitement) du tourteau de colza comme aliment pour animaux et par sa valorisation en isolat de protéines de colza.
- Le traitement du tourteau de colza comme aliment pour animaux présente un bénéfice environnemental, lorsque l'impact environnemental global (UCE) est considéré, mais moins si l'on considère uniquement la réduction des émissions de GES.
- Le bénéfice environnemental de la production de farine de colza est relativement élevé en considérant les UCE, mais l'incertitude des résultats est significative.
- Les voies de traitement comme la production de biogaz par fermentation, l'incinération et le compostage entraînent un bénéfice environnemental moindre de l'impact environnemental.
- Comparée à l'incinération, une valorisation ou un traitement permet de réduire jusqu'à 12% de l'impact environnemental global et 18% des émissions de GES.

Drêches de brasserie

- Les voies de valorisations et de traitement étudiées génèrent un bénéfice environnemental, sauf l'incinération. La valorisation des drêches de brasserie est généralement plus avantageuse que leur traitement.
- Le plus grand bénéfice environnemental peut être obtenu avec l'alimentation animale humide, la valorisation en farine de drêches, en drêches séchées et en substitut de viande.
- La valorisation en farine de drêches et en drêches séchées présente un bénéfice environnemental, en considérant l'impact environnemental global (UCE), mais moins si l'on prend en compte uniquement la réduction des émissions de GES.
- Les voies de traitement comme la production de biogaz par fermentation, l'incinération et le compostage entraînent une réduction moindre de l'impact environnemental.
- Comparée à l'incinération, une valorisation ou un traitement permet de réduire jusqu'à 28% de l'impact environnemental global et 15% des émissions de GES.

Marc de pommes

- Les voies de valorisations et de traitement étudiées génèrent un bénéfice environnemental, sauf l'incinération et l'alimentation animale sous forme sèche. La valorisation des marcs de pommes est plus avantageuse que leur traitement.
- Le plus grand bénéfice environnemental peut être obtenu par la production de farine de pomme.
- Les voies de traitement comme la production de biogaz par fermentation, l'incinération, le compostage et l'alimentation animale sous forme sèche entraînent une réduction moindre, voire nulle pour l'incinération et l'alimentation animale sèche.
- Les résultats pour d'autres flux secondaires suggèrent que l'alimentation animale humide serait nettement meilleure que l'alimentation sèche et entraînerait un bénéfice environnemental plus élevé.
- Comparée à l'incinération, une valorisation ou un traitement permet de réduire jusqu'à 15% de l'impact environnemental global et 13% des émissions de GES.

Abats de bœuf

- Toutes les voies de valorisations et de traitements étudiées génèrent un bénéfice environnemental. La valorisation des abats de bœuf est plus avantageuse que leur traitement.
- Le plus grand bénéfice environnemental peut être obtenu avec la consommation directe, l'extrusion des abats et la production d'isolat de protéines de viande.
- Les voies de traitement comme la production de biogaz par fermentation, l'incinération, le compostage et la production d'aliments pour animaux de compagnie entraînent une réduction moindre de l'impact environnemental.
- Parmi les voies étudiées, l'traitement en alimentation animale pour animaux de compagnie est la plus bénéfique.
- Comparée à l'incinération, une valorisation ou un traitement permet de réduire jusqu'à 5% de l'impact environnemental global et des émissions de GES.

Abats de poulet et abats de porc

- Les voies de valorisations et de traitements étudiées génèrent un bénéfice environnemental, à l'exception de la production de farine animale si seules les émissions de GES sont prises en compte. La valorisation des abats est plus avantageuse que leur traitement.
- Le plus grand bénéfice environnemental est obtenu avec la consommation directe, l'extrusion des abats et la production d'isolat de protéines de viande.
- Les voies de traitement comme la production de biogaz par fermentation, l'incinération, le compostage, ainsi que la production d'aliments pour animaux de compagnie et de farine animale entraînent une réduction moindre de l'impact environnemental.
- La production de farine animale contribue principalement à la réduction de la surpêche, mais a peu d'influence sur les autres impacts environnementaux.
- Comparée à l'incinération, une valorisation ou un traitement permet de réduire jusqu'à 7% de l'impact environnemental global et des émissions de GES pour les abats de poulet. Pour les abats de porc, ces réductions atteignent 6%.

Cou de poulet

- Toutes les voies de valorisations et de traitements étudiées génèrent un bénéfice environnemental, à l'exception de la production de farine animale si seules les émissions de GES sont prises en compte. La valorisation du cou de poulet est plus avantageuse que son traitement.
- Le plus grand bénéfice environnemental peut être obtenu par la consommation directe du cou de poulet.
- Les voies de traitement comme la production de biogaz par fermentation, l'incinération, le compostage, ainsi que la production d'aliments pour animaux de compagnie et de farine animale entraînent une réduction moindre de l'impact environnemental.
- La production de farine animale à partir de cou de poulet contribue principalement à la réduction de la surpêche, mais a peu d'influence sur les autres impacts environnementaux.
- Comparée à l'incinération, une valorisation ou un traitement permet de réduire jusqu'à 6% de l'impact environnemental global et des émissions de GES.

Les résultats de cette étude montrent que le traitement et la valorisation des flux secondaires sont, dans la grande majorité des cas, écologiquement avantageux, permettant de réduire les impacts environnementaux par rapport à l'incinération ou la fermentation. La valorisation s'avère généralement plus bénéfique que les méthodes de traitement traditionnelles comme

l'incinération, la fermentation ou le compostage. Toutefois, d'autres traitements, tels que l'alimentation animale, peuvent dans certains cas offrir un bénéfice environnemental similaire à celui de la valorisation.

Le bénéfice environnemental d'une valorisation ou d'un traitement dépend principalement du produit de substitution concerné. Les analyses de sensibilité montrent que les résultats sont relativement robustes aux hypothèses formulées, bien que des incertitudes subsistent, notamment pour l'incinération et la fermentation. En effet, la fermentation réduit significativement les émissions de GES lorsque des sources d'énergie fossile sont remplacées. La fermentation et l'incinération ne permettent cependant de réduire que dans une moindre mesure les autres impacts sur l'environnement.

Ainsi, cette étude fournit une estimation robuste des bénéfices environnementaux associés à la valorisation et au traitement des flux secondaires. Les résultats doivent être cependant interprétés en tenant compte des incertitudes liées aux données utilisées et aux hypothèses formulées. Cette étude n'est en outre pas exhaustive, d'autres flux secondaires ou méthodes de valorisation et de traitement pourraient offrir un potentiel supplémentaire. Enfin, il est important de souligner que cette étude évalue l'impact environnemental par kilogramme de flux secondaire valorisé ou traité. Toutefois, en pratique, la quantité réellement valorisée dépendra de divers facteurs (demande du marché, faisabilité technique, etc.), nécessitant ainsi une combinaison de différentes voies. Des mesures complémentaires (par exemple, commercialisation active de produits innovants) sont donc nécessaires pour mettre en œuvre ces priorités et concrétiser leur potentiel environnemental.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Im Jahr 2017 wurden in der Schweiz mehr als ein Drittel der jährlich produzierten Lebensmittel verschwendet (Beretta & Hellweg, 2019). Dabei sind 25 Prozent der Umweltauswirkungen unseres Ernährungssystems auf vermeidbare Lebensmittelverluste zurückzuführen (Beretta & Hellweg, 2019). In diesem Zusammenhang hat die Schweizer Regierung 2022 den «Aktionsplan gegen die Lebensmittelverschwendung» ins Leben gerufen (Der Bundesrat, 2022). Die vorrangigen Ziele dieses Plans sind es, die Lebensmittelverschwendung bis 2030 entlang der gesamten Wertschöpfungskette im Vergleich zu 2017 zu halbieren, branchenspezifische Reduktionsziele zu definieren und eine Reduktion der Umweltbelastung durch vermeidbare Lebensmittelverluste zu erreichen.

Die Lebensmittelverarbeitung verursacht rund 27 % der Umweltauswirkungen von vermeidbaren Lebensmittelverlusten in der Schweiz (Beretta & Hellweg, 2019) und kann somit einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der nationalen Ziele leisten. Ein Teil der anfallenden Lebensmittelverluste in der Verarbeitung fällt in Form von Nebenströmen (Koppelprodukte/Nebenprodukte) aus Verarbeitungsprozessen an. Ein grosser Teil der Nebenströme wird heute verfüttert oder zum Beispiel in einer Biogasanlage verwertet (Beretta & Hellweg, 2019). Viele Nebenströme sind jedoch essbar und könnten grundsätzlich direkt der menschlichen Ernährung zugeführt werden.

Nebst der technischen Machbarkeit und der nötigen Nachfrage stellt sich ebenfalls die Frage nach dem ökologischen Nutzen von verschiedenen Verfahren für die Transformation von Nebenströmen zu Zutaten für den menschlichen Verzehr. Durch die Nutzung von Nebenströmen können andere Rohstoffe eingespart werden. Jedoch ist je nach Nebenstrom und Verwertungsweg ein mehr oder weniger aufwändiges Verfahren für die Herstellung einer aus einem Nebenstrom gewonnenen Zutat nötig. Die Methode der Ökobilanzierung bietet die Möglichkeit, das Potenzial zur Minderung der Umweltbelastung des Ernährungssystems durch verschiedene Verwertungsverfahren oder Anwendungen von Nebenströmen quantitativ zu bestimmen.

Eine Literaturrecherche hat gezeigt, dass bereits einzelne Ökobilanzstudien zu verschiedenen Verwertungswegen durchgeführt wurden (Alig, Maeder, & Gehr, 2023). Die Studien kamen je nach Nebenstrom und Verwertungswegen zum Schluss, dass ein bestimmter Verwertungsweg nicht in jedem Fall zu einer Verringerung der Umweltbelastung führt. Dadurch, dass einzelne Ökobilanzstudien unterschiedliche Annahmen, unter anderem bezüglich Systemgrenzen oder Referenzsystem, treffen, ist ein Vergleich zwischen den Studien jedoch nicht möglich. Um eine Aussage über den ökologischen Nutzen von Verwertungsmöglichkeiten von Nebenströmen machen zu können, ist es nötig, dass ein Vergleich von Verwertungswegen mit konsistentem methodischem Vorgehen gemacht wird.

1.2 Zielsetzung

Der vorliegende Bericht hat zum Ziel, den potenziellen ökologischen Nutzen von verschiedenen Verwertungs- und Valorisierungsmöglichkeiten von Nebenströmen zu quantifizieren und zu vergleichen. Dies bildet die Grundlage für eine Priorisierung der Valorisierungs- und Verwertungswege aus ökologischer Sicht. Dazu werden pro untersuchtem Nebenstrom Ökobilanzen für verschiedene Verwertungs- und Valorisierungswege erstellt. Dabei wird die ökologische Belastung durch die verschiedenen Verwertungsverfahren sowie der ökologische Nutzen durch den Ersatz von herkömmlichen Produkten berücksichtigt.

Der Bericht beschränkt sich auf 10 für die Schweiz relevante Nebenströme der Lebensmittelindustrie. Die 10 Nebenströme wurden auf Grundlage von Expert:inneneinschätzungen und Informationen aus wissenschaftlicher Literatur identifiziert (siehe Kapitel 2.2). Im Folgenden wird eine Übersicht über die relevanten Nebenströme gegeben. In Kapitel 2 werden ebenfalls die methodischen Grundlagen für die Erstellung der Ökobilanzen dargelegt. Das Kapitel 3 zeigt das Potenzial zur Reduktion von Umweltbelastung der verschiedenen Verwertungswege pro Nebenstrom auf. Im Kapitel 4 werden die Resultate diskutiert und eingeordnet.

2 Vorgehen und Methodik

2.1 Begriffsdefinition

Die Begriffsdefinitionen für das Projekt folgen generell den Definitionen von Beretta & Hellweg (2019). Im Folgenden werden die wichtigsten Begriffe erläutert.

Nebenstrom (NS)

Als Nebenstrom (NS) werden Nebenprodukte (Koppelprodukte) aus der Lebensmittelindustrie bezeichnet, welche grundsätzlich für den menschlichen Verzehr geeignet/essbar sind. Zum Beispiel fällt bei der Herstellung von Käse auch das essbare Nebenprodukt Molke an.

Valorisierung (Val)

Als Valorisierung wird die Verarbeitung von Nebenströmen zu Lebensmitteln für den menschlichen Verzehr bezeichnet. Beispielsweise kann Molke zu einem Pulver getrocknet werden und als Zutat in Lebensmittel, anstelle von zum Beispiel Magermilchpulver, eingesetzt werden.

Verwertung (Verw)

Als Verwertung wird die Verarbeitung von Nebenströmen zu nicht für den menschlichen Verzehr geeigneten Produkten bezeichnet. Das wäre zum Beispiel die Herstellung von Biogas durch die Vergärung des Nebenstroms.

2.2 Untersuchte Nebenströme

Die Studie untersucht die Umweltbelastung/-nutzen durch die Valorisierung und Verwertung von 10 Nebenströmen. Die Auswahl der 10 betrachteten Nebenströme beruht auf einer rein qualitativen Abschätzung der Relevanz des Nebenstromes in der Schweiz. Die Relevanz wurde anhand von drei Kriterien grob beurteilt: Mengenrelevanz, Umweltrelevanz, technische/wirtschaftliche Relevanz. Die Beurteilung der Mengenrelevanz basiert auf vertraulichen Angaben der Schweizer Lebensmittelbranche zu den ungefähr anfallenden Mengen (in Trockensubstanz). Das Kriterium der Umweltrelevanz bewertet den erwarteten Nutzen für die Umwelt. Die Beurteilung dieses Kriteriums basiert auf Erkenntnissen aus wissenschaftlichen Publikationen zur Verwertung und Valorisierung von Nebenströmen. Die technische resp. wirtschaftliche Relevanz bewertet den technologischen resp. Markt-Reifegrad von möglichen valorisierten Produkten. Die Beurteilung dieses Kriteriums basiert auf Expert:inneneinschätzungen aus der Schweizer Lebensmittelbranche. Aufgrund unvollständiger Datengrundlage ist diese Relevanzanalyse rein qualitativ und auf drei Kriterien beschränkt, genügt aber dem Ziel, die weiteren Analysen auf 10 relevante Nebenströme zu begrenzen.

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über die in der Schweiz am häufigsten anfallenden Nebenströme gemäss der «Arbeitsgruppe Verarbeitung», einer Gruppe von Unternehmen und Verbänden der Schweizer Lebensmittelverarbeiter, welche die branchenübergreifende Vereinbarung gegen Lebensmittelverluste unterzeichnet haben, und eine qualitative Beurteilung der Relevanzkriterien ersichtlich. Basierend auf dieser Bewertung werden in diesem Bericht folgende

Nebenströme im Detail analysiert: Molke, Weizenkleie, Rinds-Innereien, Schweins-Innereien, Poulet-Innereien, Poulet-Hals, Melasse, Rapspresskuchen, Biertrester und Mosttrester. Die Hintergründe der Auswahl wird im Folgenden für die einzelnen Lebensmittelindustrien dargelegt.

Tabelle 1: Übersicht über die am häufigsten in der Schweiz anfallenden Nebenströme und qualitative Beurteilung deren Relevanz. Nebenströme in grüner Schrift werden in diesem Bericht berücksichtigt. **Mengenrelevanz:** Je mehr «+», desto grösser ist die anfallende Menge. **Umweltrelevanz:** ++: Studien zeigen positive Umweltwirkung; +/-: Studien zeigen positive und negative Umweltauswirkungen je nach untersuchtem Verwertungsweg.

Technische / wirtschaftliche Relevanz: ++: Produkte aus Nebenstrom sind bereits auf Markt erhältlich; +: Es gibt Ideen/Versuche zu neuen Produkten aus Nebenströmen, -: Noch keine Technologien/Markt vorhanden, ?: Keine Informationen zur Beurteilung des Kriteriums vorhanden

Branche	Nebenstrom	Mengenrelevanz	Umweltrelevanz	Tech. / Wirt. Relevanz
Milchindustrie	Molke	+++	+/-	++
	Buttermilch	++	?	++
Eier	Brucheier	+	?	-
	Legehennen ganz	+	?	+
Getreide	Weizenkleie	++	?	+
	Weizennachmehle	++	?	?
Fleisch	Mastpoulets Schlachtnebenprodukte	+	++	+
	Schwein Schlachtnebenprodukte	++	++	+
	Rind Schlachtnebenprodukte	++	++	+
Kartoffeln	Kartoffelschälbrei	+	+/-	?
	Kartoffelstärke, nass	+	+/-	-
Zucker	Melasse	+++	?	+
	Rübenschnitzel nass	+++	?	+
	Rübenschnitzel Pellet trocken	+++	?	+
Ölsaaten	Sojapresskuchen	+	?	-
	Rapspresskuchen	+++	?	+
	Sonnenblumen-Presskuchen	+	?	+
	Leinkuchen/Expeller	?	?	?
Schokoladen	Kakaoschale ¹	++	?	-
	Kakaopulpe ¹	+	?	-
	Weitere Kakaonebenprodukte	?	?	?
Kaffee	Kaffeetrester	+++	?	?

¹ Nebenstrom fällt nicht in der Schweiz an, wurde aber von der Schweizer Lebensmittelindustrie dennoch als wichtiger Nebenstrom identifiziert.

Branche	Nebenstrom	Mengen-relevanz	Umwelt-relevanz	Tech. / Wirt. Relevanz
	Kaffee-Nebenprodukte (Silverskin)	++	?	-
Alkohol. Getränke	Biertrester	++	++	++
	Weintrester	++	++	?
Fruchtsäfte	Mosttrester	+	++	?
Gemüsesäfte	Mosttrester	?	++	?
Milchalternativen	Trester	?	?	+

Milchindustrie

In der Milchindustrie fallen hauptsächlich Molke und Buttermilch als Nebenströme an. Buttermilch wird als weniger relevant eingeschätzt, da verglichen mit Molke weniger anfällt und diese bereits heute zu einem grossen Teil in Lebensmitteln weiterverarbeitet wird.

Eierindustrie

In der Eierindustrie sind die bedeutendsten Nebenströme Brucheier und ganze Legehennen. Beide werden jedoch in der Studie aus unterschiedlichen Gründen nicht berücksichtigt. Bei Brucheiern ist im Gegensatz zu Knickeiern ein grösserer Bruch in der Schale vorhanden und deren Einsatz im Lebensmittelbereich aus Sicht der Lebensmittelsicherheit eine Herausforderung. Ganze Legehennen fallen heute mengenmässig vergleichsweise wenig an. Deren Relevanz wird aber aufgrund der Verschärfung der Bio-Richtlinie bzgl. der Aufzucht von Bruderhähnen steigen.

Getreideindustrie

In der Getreideindustrie stammen die grössten Nebenströme aus der Weizenverarbeitung. Nebenströme aus der Dinkel-, Gerste- oder Haferverarbeitung fallen vergleichsweise wenig an. In dieser Studie wird stellvertretend der Nebenstrom Weizenkleie betrachtet.

Fleischindustrie

In der Fleischindustrie fällt eine Vielzahl an verschiedenen Schlachtnebenprodukten bei unterschiedlichen Tiergattungen an. Insbesondere Innereien wie auch der Poulet-Hals werden aus Ernährungssicht aufgrund ihrer Nährstoffzusammensetzung als wertvolle Nebenströme eingestuft.

Kartoffelindustrie

Nebenströme aus der Kartoffelindustrie werden im Vergleich als weniger relevant eingestuft und in der Studie nicht berücksichtigt. Vor allem sind die anfallenden Mengen verglichen mit anderen Nebenströmen kleiner. Die Nutzung von Kartoffelschälbrei ist aus technischer Sicht noch wenig fortgeschritten. Aus Umweltsicht kann eine Nutzung je nach betrachtetem Fall jedoch sinnvoll sein (Moretti, Vera, Junginger, López-Contreras, & Shen, 2022; Chen, Oldfield, Cinelli, Righetti, & Holden, 2020).

Zuckerindustrie

In der Zuckerindustrie fallen hauptsächlich zwei Nebenströme an, die Melasse und Rübenschnitzel. Verglichen mit den Rübenschnitzel enthält die Melasse für die Ernährung wertvollere Nährstoffe.

Ölindustrie

In der Schweizer Ölindustrie fällt mit Abstand am meisten Presskuchen in der Rapsölherstellung an, weshalb dieser Nebenstrom stellvertretend für die anderen Ölherstellungen betrachtet wird.

Kaffee- & Schokoladenindustrie

Nebenströme aus der Kaffee- und Schokoladenindustrie werden in der Studie nicht betrachtet. Einige fallen nicht in der Schweiz an (z.B. Kakaopulpe), andere sind aktuell als nicht essbar und somit nicht als Nebenstrom einzustufen (z.B. Kakao- oder Kaffeeschale). Aufgrund der grossen anfallenden Menge ist Kaffeetrestler dennoch ein relevanter Nebenstrom.

Getränkeindustrie

Trester fällt in verschiedenen Branchen an (Gemüse-/Fruchtsaft, Bier, Wein und Milchalternativen). In der Studie werden Biertrester stellvertretend für Getreidetrester und Apfelmosttrester stellvertretend für Frucht-/Gemüsetrester betrachtet. Insbesondere der Trester aus Milchalternativen wird künftig durch den steigenden Konsum an Bedeutung gewinnen, so zum Beispiel Okara als Nebenstrom aus der Sojaverarbeitung.

2.3 Ökobilanzierung: Methode

Allgemeine Einführung zur Ökobilanz-Methode

Eine Ökobilanz ist eine wissenschaftliche Methode zur Bewertung der Umweltbelastung von Produkten und Prozessen. Die Methodik ist in den ISO-Normen 14040 (2006) und 14044 (2006) definiert und umfasst vier Phasen: Definition Ziel und Untersuchungsrahmen, Erstellung Sachbilanz, Wirkungsabschätzung, Interpretation (vgl. Abbildung 1).

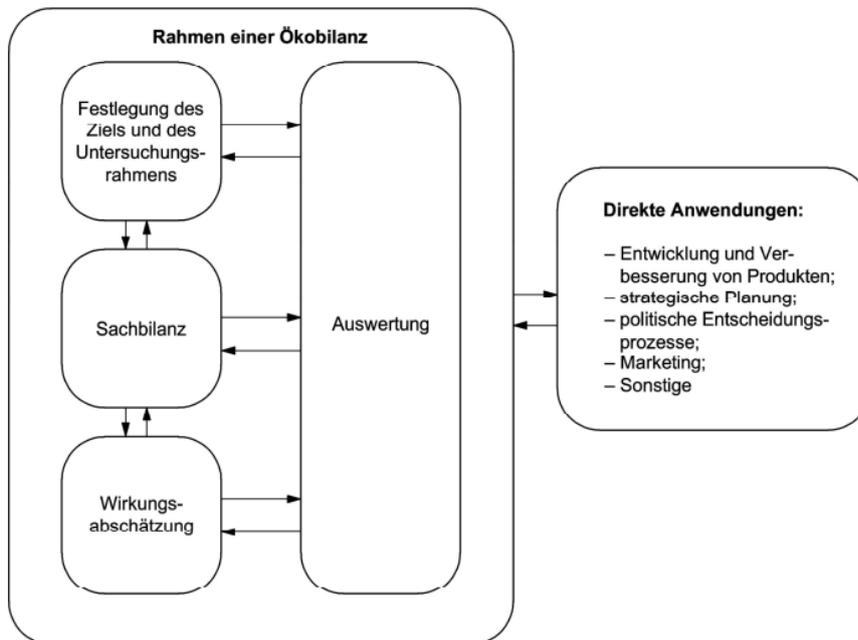


Abbildung 1: Die vier Phasen einer Ökobilanz (ISO, 2006)

Die Definition des Ziels und des Umfangs der Studie ist entscheidend für das Ergebnis einer Studie. Der Nutzen und die Funktion des zu untersuchenden Produktes/Systems und dessen Lebenszyklus müssen definiert werden. Die Systemgrenzen der Untersuchung werden festgelegt. Ausserdem wird die sogenannte funktionelle Einheit definiert, das heisst die produktspezifische Grösse, auf welche die Umweltauswirkungen bezogen werden.

Die Sachbilanz macht quantitative Aussagen über die Stoff- und Energieflüsse und die Emission von Schadstoffen in die Umwelt entlang des Lebensweges des Produktes.

Durch die Wirkungsabschätzung werden die Auswirkungen auf die Umwelt mit ausgewählten Umweltindikatoren bestimmt. Die Höhe der einzelnen Emissionen für die jeweilige Wirkungskategorie wird mit Hilfe von wissenschaftlich definierten Wirkungsfaktoren bestimmt. Diese Faktoren konvertieren alle klassifizierte Ströme für eine Wirkung in eine gemeinsame Einheit zum Vergleich (z.B. kg CO₂-Äquivalente).

Bei der Interpretation werden alle vorangegangenen Schritte kritisch überprüft, und die für das Ergebnis wesentlichen Parameter werden identifiziert. Die Konsistenz und Vollständigkeit der Analyse wird überprüft, und eine Sensitivitätsanalyse gibt Aufschluss über die Unsicherheit der Ergebnisse. Entsprechend der gesetzten Ziele werden Empfehlungen abgeleitet oder ein ökologischer Nutzen nachgewiesen (z.B. Reduktion der Treibhausgasemissionen).

Der vorliegende Bericht orientiert sich in den wesentlichen Punkten am definierten Vorgehen gemäss ISO-Norm 14040/44. Da in der Studie gesamttaggregierende Methoden (Umweltbelastungspunkte) verwendet werden (vgl. Kapitel 2.3 Wirkungsabschätzung), weicht die Studie in gewissen Punkten von der Norm ab. Zusätzlich erfolgt die Erstellung der Ökobilanzen nach der Datenqualitätsrichtlinie der BAFU-Datenbank (BAFU, 2024). Die Ökobilanzierung wurde gemäss Vorgaben der ISO-Norm durch eine unabhängige Drittpartei kritisch geprüft.

Fragestellung und Ziel der Studie

Das Ziel dieser Studie ist, den potenziellen ökologischen Nutzen von verschiedenen Verwertungs- und Valorisierungsmöglichkeiten von Nebenströmen zu quantifizieren und zu vergleichen. Dies bildet die Grundlage für eine Priorisierung der Verwertungswege aus ökologischer Sicht. Dazu werden folgende Fragestellungen beantwortet:

- Welches ist der aus Umweltsicht beste Valorisierungs- oder Verwertungsweg der ausgewählten Nebenströme?
- Welches sind die Einsparungen in Umweltbelastungspunkten (UBP) und CO₂-Äquivalenten (siehe Wirkungsabschätzung, Seite 30) der verschiedenen Szenarien (höherwertige Verwertung) verglichen mit der Entsorgung der ausgewählten Nebenströme?
- Erstellung einer Einordnung der Valorisierungs- und Verwertungswege für jeden Nebenstrom auf einer Skala 0-1, wobei 0 den ökologisch wenig sinnvollsten und 1 den ökologisch sinnvollsten Verwertungsweg darstellt und die anderen Verwertungswege proportional zu ihrer Umweltbelastung eingeordnet werden (UBP und CO₂-Äquivalente).
- Welche Schlüsselparameter beeinflussen die Einordnung (Priorität) der verschiedenen Valorisierungs- und Verwertungswege aus Umweltsicht und wie wirken sich Veränderungen dieser Parameter auf die Belastbarkeit der Schlussfolgerungen aus (Sensitivitätsanalyse, insbesondere für substituierte Produkte)?
- Welchen Einfluss hat die Allokation von Umweltwirkungen zwischen Koppelprodukten auf die Resultate der Studie?

Diese Fragestellungen werden für die 10 im Kapitel 2.2 definierten Nebenströme beantwortet. Pro Nebenstrom werden 3-6 verschiedene Verwertungen und 1-4 verschiedene Valorisierungen betrachtet. Diese werden im Kapitel 2.4 im Detail beschrieben. Für jeden Valorisierungs-/Verwertungsweg eines Nebenstromes wird eine Ökobilanz erstellt.

Anwendung und Zielgruppe

Die Studie richtet sich in erster Linie an den Auftraggebenden. Zusätzlich sollen die Erkenntnisse für Diskussionen der «Arbeitsgruppe Verarbeitung» im Rahmen des Aktionsplanes gegen die Lebensmittelverschwendung (Der Bundesrat, 2023) genutzt werden können.

Darüber hinaus liefert die Studie eine Grundlage zur ökologischen Bewertung von Verwertungsmöglichkeiten von Nebenströmen. Dieser Bericht richtet sich daher auch an weitere Interessierte. Die Studie kann als Grundlage für zur Veröffentlichung vorgesehene vergleichenden Aussagen genutzt werden.

Die im Rahmen der Studie erstellten Lebenszyklus-Inventare zur Valorisierung/Verwertung von Nebenströmen werden zudem in die Datenbank des BAFUs eingepflegt (BAFU, 2024).

Funktionelle Einheit

Die Funktionelle Einheit beschreibt, auf welche Bezugsgrösse sich die Resultate der Studie beziehen. Die Bezugsgrösse bezieht sich dabei auf die Hauptfunktion des zu untersuchenden Produktes oder Prozesses. In der vorliegenden Studie wird die Verwertung/Valorisierung von 1 kg Feuchtsubstanz (FS) eines Nebenstromes als funktionelle Einheit definiert.

Systemgrenzen & Allokation

Die Systemgrenzen einer Ökobilanz sollen alle Prozesse umfassen, die für das Ziel der Studie relevant sind. Ausserdem sind gemäss ISO-Norm, wenn möglich, die Systemgrenzen so zu ziehen, dass eine Allokation von Umweltwirkungen bei Koppelprozessen vermieden werden kann. Da Nebenströme definitionsgemäss Outputs von Koppelprozessen sind, wird der Ansatz der Systemerweiterung gewählt, um eine Allokation vermeiden zu können.

Für die Definition der Systemgrenzen muss zusätzlich berücksichtigt werden, dass unterschiedliche Verwertungs- & Valorisierungswege eines Nebenstromes auch unterschiedliche Produkte hervorbringen. Um einen fairen Vergleich zwischen den Verwertungs-/Valorisierungswegen machen zu können, müssen die untersuchten Systeme eine äquivalente Funktion aufweisen. Daher wird pro Nebenstrom ein System (Warenkorb) definiert, welches alle Funktionen jedes einzelnen Valorisierungs- und Verwertungswegs des Nebenstroms umfasst.

Durch die Systemerweiterung zur Vermeidung einer Allokation und die Sicherstellung der Vergleichbarkeit umfassen die Systemgrenzen der Ökobilanz vier Prozesse, welche in Abbildung 2 schematisch dargestellt sind und im Folgenden erläutert werden. Zusätzlich wird das beschriebene Vorgehen zur Definition der Systemgrenzen am Beispiel des Nebenstroms Molke im nächsten Unterkapitel illustriert. Das Vorgehen ist für alle Nebenströme dasselbe und die Systemgrenzen der weiteren Nebenströme sind im Anhang A.1 dokumentiert.

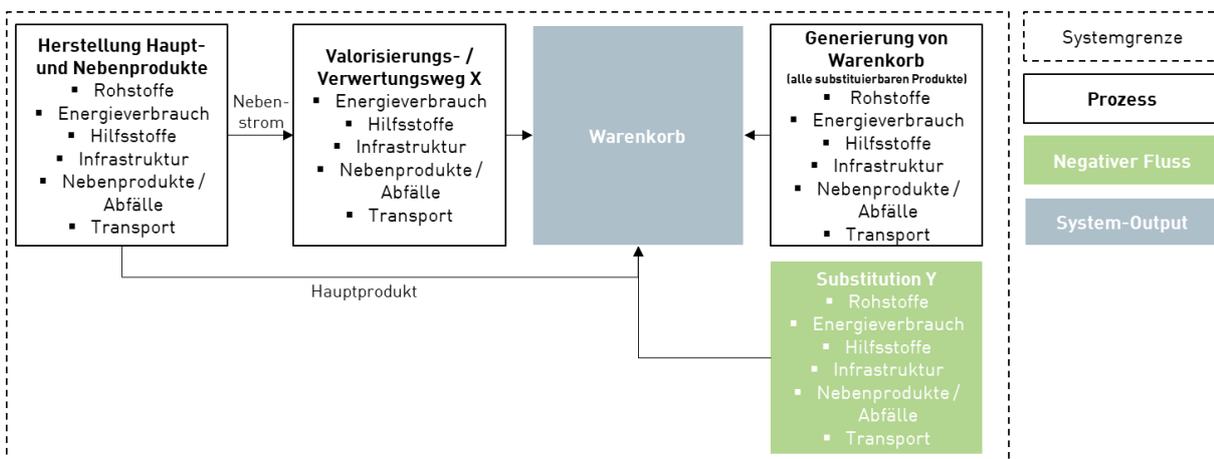


Abbildung 2. Schematische Darstellung der Systemgrenzen für Verwertungsweg X. Y = substituiertes Produkt.

Herstellung Haupt- und Nebenprodukte

Dieser Teil der Ökobilanz umfasst die Produktion der Rohstoffe (z.B. Milch im Falle von Molke) sowie die Aufwände (Energie, Hilfsstoffe etc.) für die Herstellung des Haupt- und Nebenproduktes (z.B. Käse- und Molkenproduktion). Die Rohstoffe sowie Herstellung von Haupt- und Nebenstrom sind innerhalb der Systemgrenzen, um eine Allokation der Produkte aus dem Koppelprozess vermeiden zu können. Das hergestellte Hauptprodukt (z.B. Käse) und allfällige weitere Nebenprodukte sind Teil des Warenkorbes. Die Menge an anfallendem Hauptprodukt ergibt sich aus dem Produktionsprozess, so dass 1 kg Nebenstrom (funktionelle Einheit) anfällt (vgl. Tabelle 24 im Anhang A.2). Der Nebenstrom (z.B. Molke) dient als Input für die Valorisierung/Verwertung.

Valorisierungs-/Verwertungsweg

Dieser Teil der Ökobilanz umfasst den Aufwand (Energie, Hilfsstoffe etc.) für die Valorisierung/Verwertung des Nebenstromes. Der Output dieses Prozesses (z.B. Molkenproteinkonzentrat im Fall von Molke) ist Teil des Warenkorbes.

Substitution

Dieser Teil der Ökobilanz umfasst den Aufwand (Energie, Hilfsstoffe etc.) für die Herstellung des Produktes, welches durch die Valorisierung/Verwertung des Nebenstroms ersetzt werden kann (z.B. Sojaproteinkonzentrat, das durch Molkenproteinkonzentrat ersetzt werden kann). Für jeden Verwertungs-/Valorisierungsweg wird dazu ein Nutzungsszenario definiert. Das Nutzungsszenario beschreibt, welches Produkt durch die Verwertung/Valorisierung eines Nebenstromes substituiert werden kann. Für das jeweilige Szenario wird die Umweltbelastung des substituierbaren Produktes dem Warenkorb als negativen Wert angerechnet. Die Begründung für die definierten Nutzungsszenarien ist im Kapitel 2.4 zu finden. Die Definition des substituierbaren Produktes hat einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse der Studie, weshalb diesbezüglich eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt wurde (vgl. Kapitel 2.5). Aufgrund der definierten funktionellen Einheit und der methodischen Wahl der Systemerweiterung berücksichtigt die Substitution die in Realität verfügbare Menge nicht.

Die Menge an substituierbarem Produkt wird durch die Multiplikation der spezifischen Ausbeute und dem Substitutionsfaktor bestimmt. Die Ausbeute bezieht sich abhängig vom Nutzungsszenario auf die Prozessausbeute unter Berücksichtigung des für die Substitution relevanten Parameters (z.B. Menge, Protein, Kalorien etc.) (z.B. aus einem kg Molke entsteht 8g Molkenproteinkonzentrat mit 80% Proteingehalt). Der Substitutionsfaktor beschreibt, in welchem Ausmass das Produkt aus der Verwertung/Valorisierung das substituierbare Produkt ersetzen kann (z.B. ein kg Molkenproteinkonzentrat mit 80% Proteingehalt ersetzt 1.2 kg Sojaproteinkonzentrat mit 67% Proteingehalt). Bei Produkten mit einer spezifischen Hauptfunktion (z.B. Proteinkonzentrate für Proteinzufuhr, Futtermittel für spezifische Nährstoffzusammensetzung im Tierfutter) wurden Unterschiede in der Nährstoffzusammensetzung bei der Berechnung des Substitutionsfaktors berücksichtigt. Es gibt jedoch auch Produkte mit vielfältigen Funktionen, bei welchen nicht eindeutig ist, welcher Nährstoff oder welche Eigenschaft als Grundlage zur Bestimmung des Substitutionsfaktors genutzt werden sollte (z.B. Funktion von Mehl kann Lieferung von Energie, Protein, Ballaststoffen, Gluten usw. sein). In diesen Fällen wurde grundsätzlich von einer massenbasierten Substitution ausgegangen.

Generierung von Warenkorb

Um die Vergleichbarkeit der Valorisierungs-/Verwertungswege eines Nebenstromes zu gewährleisten, werden weitere Produktionsprozesse, die für die Bereitstellung aller Funktionen des Systems nötig sind, berücksichtigt und dem Warenkorb angerechnet. Zum Beispiel, wenn Molke zu Molkenproteinkonzentrat valorisiert wird, kann die Molke nicht mehr als Futtermittel genutzt werden. Die Produktion eines alternativen Futtermittels wird dem Warenkorb angerechnet.

Ausgeschlossene Prozesse

Nicht Teil der Ökobilanz sind Prozesse, welche unabhängig vom Verwertungs-/Valorisierungsprozess in sehr ähnlicher Form und Ausmass ausgeführt werden und wo somit keine wesentlichen Unterschiede in den Umweltwirkungen erwartet werden. Zum Beispiel wenn ein Nebenstrom als Komponente in der Mischfutterherstellung genutzt wird, so wird der

Mischfutterherstellungsprozess nicht bilanziert. Ebenfalls wird die Verpackung der Produkte nicht berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass dieselben Verpackungen wie das substituierbare Produkte eingesetzt würden. Aus dem gleichen Grund wird auch der Transport der hergestellten Produkte vom Produzierenden zum Detailhändler und/oder Kund:in, sowie allfällige Lebensmittelverluste beim Kund:in nicht berücksichtigt.

Bei den substituierbaren Produkten wurde keine Systemerweiterung vorgenommen. Wird ein Produkt aus einem Koppelprozess ersetzt, wurde eine Allokation entsprechend der vorhandenen Inventare in der Hintergrunddatenbank vorgenommen (World Food Life Cycle Database (WFLDB) V3.1 (Nemecek, et al., 2019) oder BAFU:2024-Datenbank (BAFU, 2024), vgl. Anhang A.3).

Systemgrenzen: Beispiel Molke

Für den Nebenstrom Molke werden sieben Ökobilanzen für sieben unterschiedliche Verwertungs-/Valorisierungswege erstellt. In der Tabelle 2 sind die untersuchten Verwertungs- und Valorisierungswege sowie deren generierte Produkte und das substituierbare Produkt definiert.

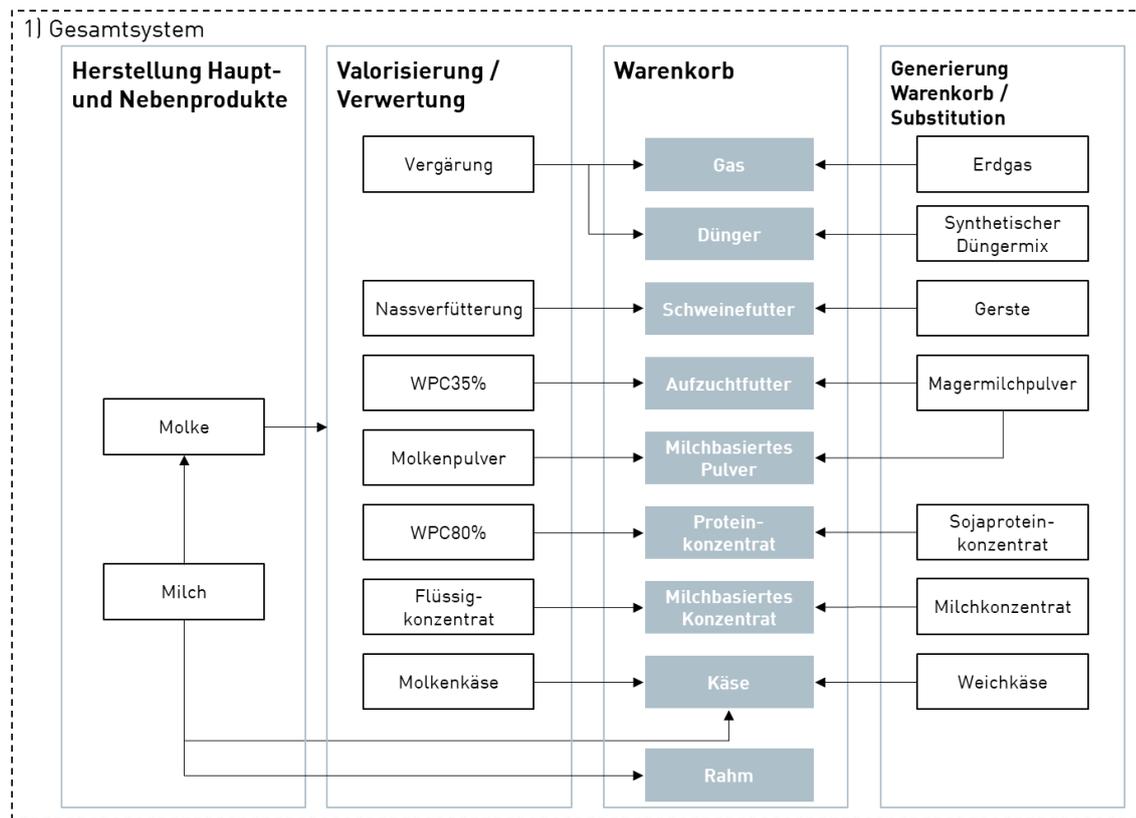
Tabelle 2. Kurzbeschreibung der untersuchten Szenarien für Molke. Die detaillierte Beschreibung der Szenarien von Molke erfolgt im Kapitel 2.4.

Szenario	Valorisierungs-/Verwertungsweg	Generiertes Produkt	Substituierbares Produkt
1.1	Vergärung	Biogas, Dünger aus Gärgut	Erdgas, synthetischer Düngermix
1.2	Nassverfütterung	Schweinefutter	Gerste
1.3	Herstellung Molkenproteinkonzentrat (WPC) 35% als Aufzuchtfutter	WPC35%	Magermilchpulver
1.4	Herstellung Molkenproteinkonzentrat (WPC) 80% als Proteinkonzentrat	WPC80%	Sojaproteinkonzentrat
1.5	Herstellung Molkenpulver	Molkenpulver	Magermilchpulver
1.6	Herstellung Flüssigkonzentrat	Molkenkonzentrat	Milchkonzentrat
1.7	Herstellung Molkenkäse	Molkenkäse	Weichkäse

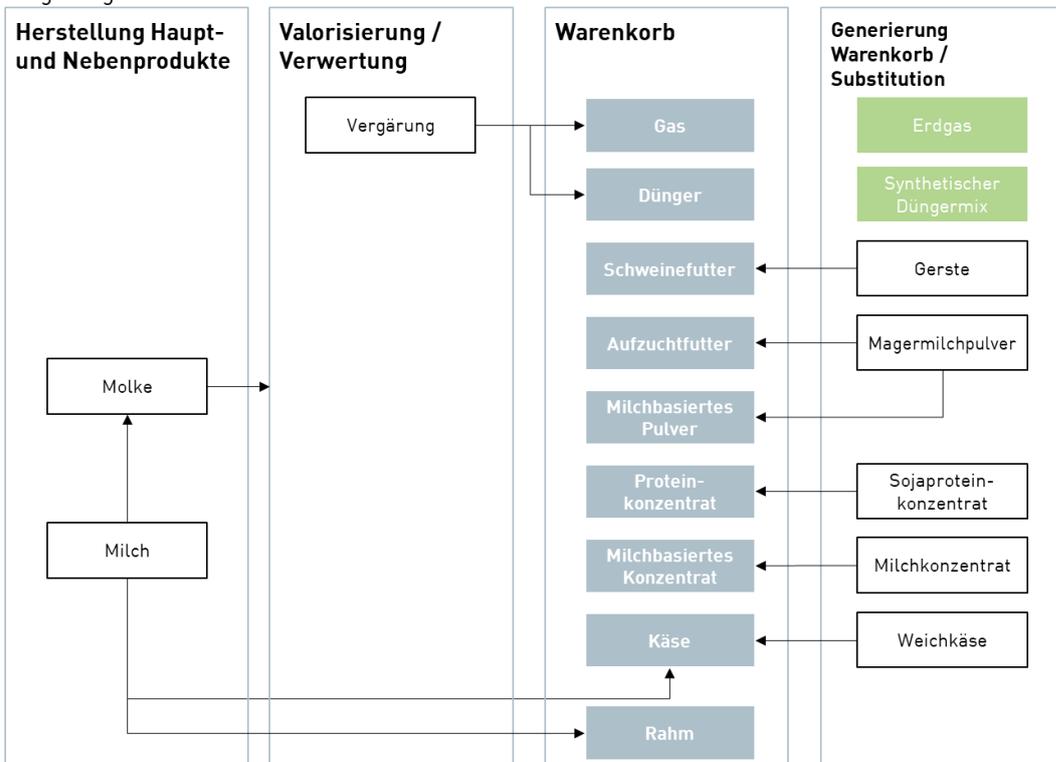
Die Systemgrenzen für jede der sieben Ökobilanzen der Valorisierungs-/Verwertungswege von Molke können der Abbildung 3 entnommen werden. Die Systemgrenzen umfassen eine definierte Menge an Herstellung von Käse und Rahm, welche zusammen mit dem Nebenstrom produziert werden, sowie Gas, Dünger, Schweinefutter, Aufzuchtfutter, Proteinkonzentrat, milchbasiertes Pulver, milchbasiertes Konzentrat und Käse (Warenkorb) hergestellt aus der Verwertung/Valorisierung von Molke oder aus konventioneller Quelle. Je nach betrachtetem Valorisierungs-/Verwertungsweg kann Erdgas, synthetischer Dünger, Gerste,

Magermilchpulver, Sojaproteinkonzentrat, Milchkonzentrat oder Weichkäse aus konventioneller Quelle ersetzt werden. Daraus ergibt sich eine Nettobilanz über das gesamte System der Verwertung des Nebenstromes Molke.

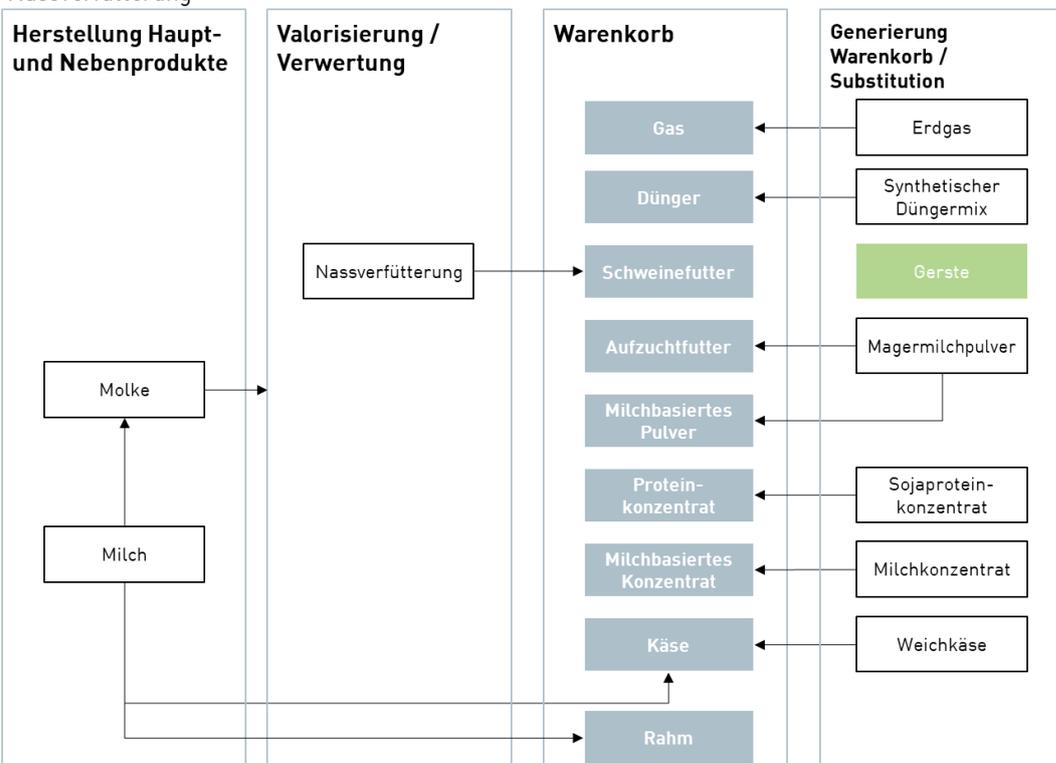
Die Systemgrenzen der anderen Nebenströme können dem Anhang A.1 entnommen werden.



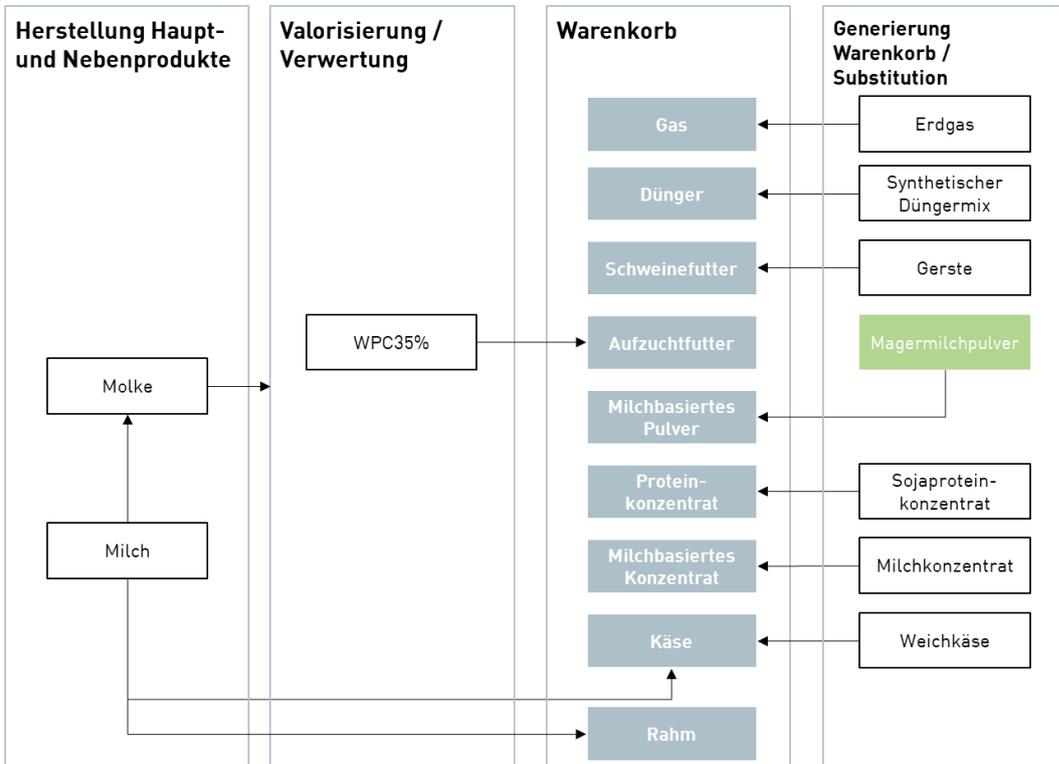
1.1) Vergärung



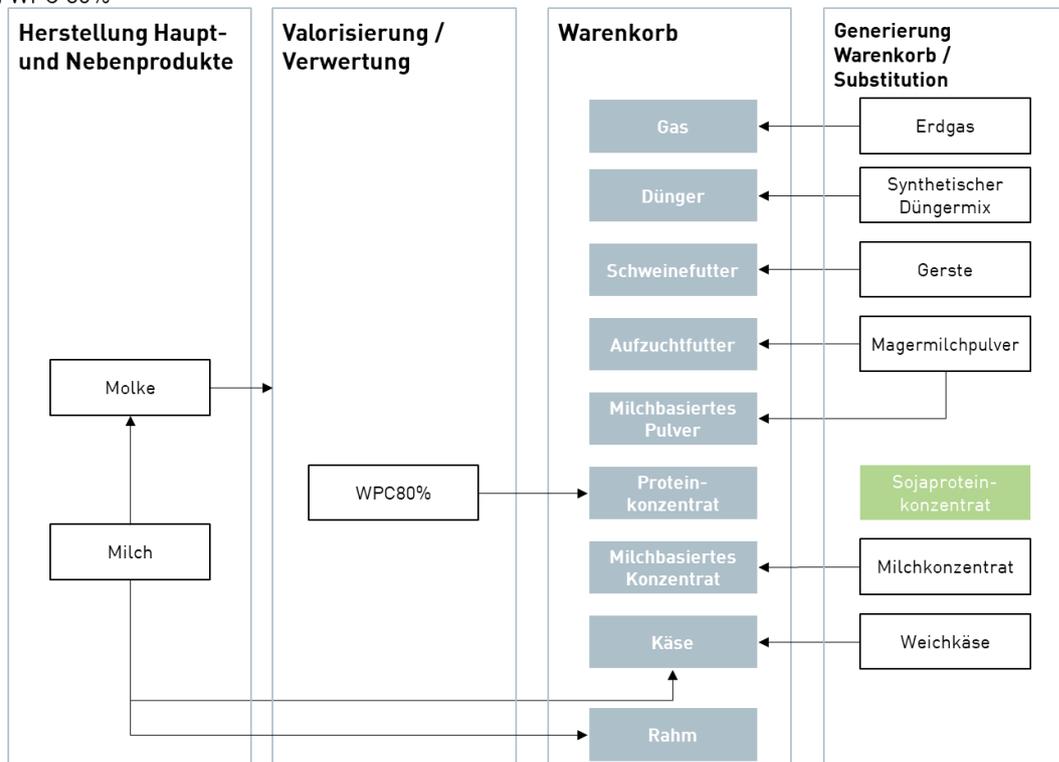
1.2) Nassverfütterung



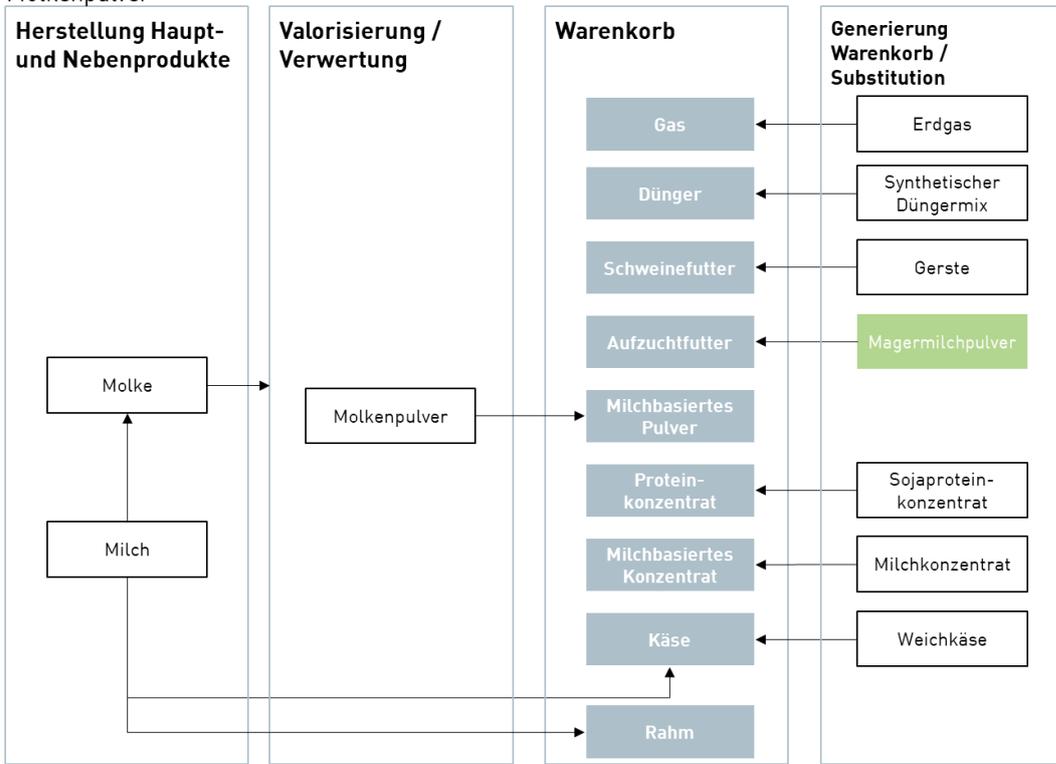
1.3) WPC 35%



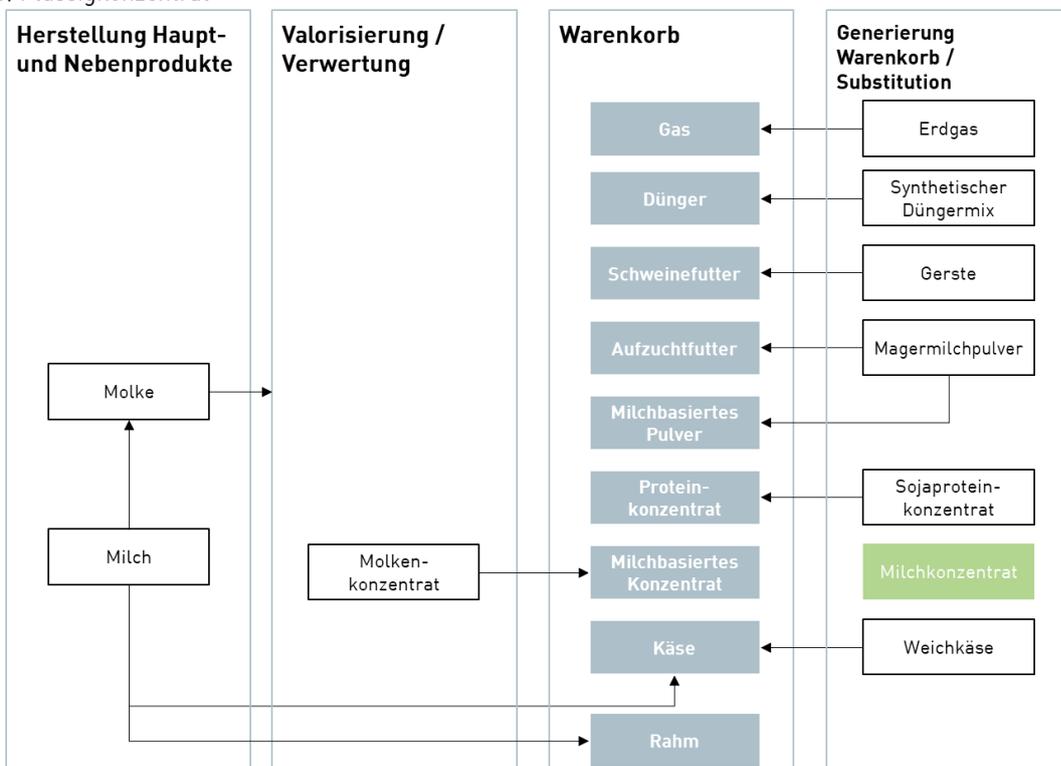
1.4) WPC 80%



1.5) Molkenpulver



1.6) Flüssigkonzentrat



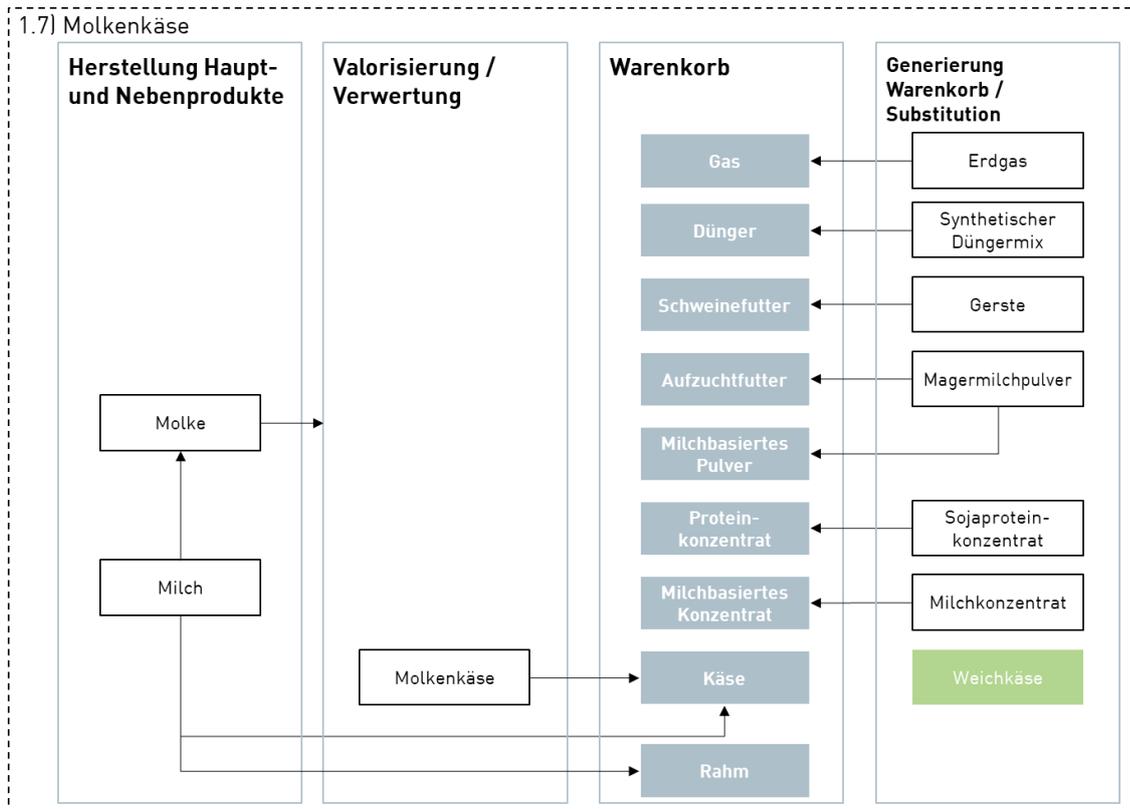


Abbildung 3: Systemgrenzen der Ökobilanzen von Molke. 1) zeigt das Gesamtsystem. 1.x) zeigt das Szenario gemäss Tabelle 2. Graue Felder = System-Output; Grüne Felder = negativer Fluss, gestrichelte Linie = Systemgrenze.

Sachbilanz

Ziel ist, für die Schweiz repräsentative Sachbilanzen für die untersuchten Valorisierungs- und Verwertungswege der Nebenströme zu erstellen. Die Sachbilanzdaten beruhen sowohl auf Primärdaten der Schweizer Industrie als auch Sekundärdaten aus Studien und Ökobilanz-Datenbanken. Im Folgenden wird das grundlegende Vorgehen zur Erstellung der Sachbilanzen erläutert. Die spezifische Datengrundlage und Sachbilanzen der einzelnen Ökobilanzen können dem Kapitel 2.4 und dem Anhang A.3 entnommen werden.

Für die Ökobilanz der Herstellung der Haupt- und Nebenprodukte wurde grundsätzlich auf bestehende Sachbilanzen der BAFU:2024-Datenbank und der World Food Life Cycle Database (WFLDB) V3.1 zurückgegriffen (Nemecek, et al., 2019) wobei die BAFU:2024-Datenbank als Hintergrunddatenbank verwendet wird (BAFU, 2024). Für die Valorisierungs- und Verwertungswege wurden neue Sachbilanzen basierend auf Primär- und/oder Literaturdaten zusammengestellt. Falls bereits Sachbilanzen in der BAFU:2024-Datenbank zu einem spezifischen Verwertungs-/Valorisierungsweg vorhanden sind, wurden diese Daten verwendet. Für die Ökobilanz der Produkte im Warenkorb und der substituierbaren Produkte werden grundsätzlich Sachbilanzdaten der WFLDB (Nemecek, et al., 2019) und der BAFU:2024-Datenbank (BAFU, 2024) verwendet.

Zur Erhebung von Primärdaten wurden verschiedenen Produzierenden der jeweiligen Industrie zwischen dem 01.02.2024 und 30.04.2024 Datenerhebungsvorlagen zugestellt. Die erhobenen

Daten sind zwischen verschiedenen Produzierenden oder mit Literaturwerten verglichen und plausibilisiert worden. Zusätzlich wurden einzelne Zahlen zur Validierung mit Expert:innen geteilt. Lückenhafte oder fehlende Datengrundlagen wurden mittels Literaturwerten ergänzt (siehe Kapitel 2.4 und Anhang A.3). Insbesondere die Energieverbräuche konnten oft nicht genau ermittelt werden, da viele Produzierende verschiedene Produkte herstellen und eine detaillierte Analyse zur Allokation des Energieverbrauches im Rahmen dieses Projektes nicht möglich war. Die Daten von verschiedenen Produzierenden wurden pro Verwertungs-/Valorisierungsweg zusammengefasst und anonymisiert.

Wirkungsabschätzung

Als Wirkungsabschätzung wird die Gesamtumweltbelastung gemäss der Methode der ökologischen Knappheit (Friskhnecht, et al., 2021) berechnet. Die Methode der ökologischen Knappheit berechnet die Gesamtumweltbelastung ausgedrückt in Umweltbelastungspunkten (UBP) und beinhaltet eine Normierung und Gewichtung von 20 Umweltthemen. Diese Methode wurde gewählt, weil im Aktionsplan gegen die Lebensmittelverschwendung unter anderem die Reduktion der Umweltbelastung (UBPs) durch Lebensmittelverschwendung angestrebt wird. Um den Beitrag der Verwertung-/Valorisierung von Nebenströmen zu diesem Ziel bewerten zu können, wird die gleiche Methodik verwendet. Gemäss ISO 14044 ist die Verwendung von gesamttaggregierenden Methoden bei einer Veröffentlichung vergleichender Ökobilanzen nicht zugelassen. Aus diesem Grund weicht der vorliegende Bericht in diesem Punkt von der Norm ab.

Zusätzlich wird das Treibhauspotenzial über 100 Jahre gemäss der Methode des IPCC (2021), ausgedrückt in kg CO₂-Äquivalente (kg CO₂-eq), berechnet. Diese Methode zeigt die Wirkung auf das Klima. Andere Umweltauswirkungen werden bei dieser Wirkungsabschätzung nicht berücksichtigt.

Zur Beantwortung der Fragestellungen (vgl. Kapitel 2.3 Fragestellung und Ziel) werden die Ergebnisse der einzelnen Valorisierungs-/Verwertungswege mit dem Entsorgungsszenario jedes Nebenstromes verglichen (jeweils Szenario x.1). So kann eine Aussage darüber gemacht werden, wie die Valorisierungs- und Verwertungswege verglichen mit dem Entsorgungsszenario aus ökologischer Sicht abschneiden. Ausserdem werden die Valorisierungs-/Verwertungswege in einer Skala von 0-1 proportional zu ihrer Klima- resp. Umweltwirkung eingeordnet, wobei der am ökologisch wenigsten sinnvollste aller betrachteten Valorisierungs- und Verwertungswege eines Nebenstromes mit 0 und der am ökologisch sinnvollste mit 1 bewertet wird.

Sensitivitätsanalyse

Aufgrund der Unsicherheit rund um getroffene Annahmen, Modellparameter und gewählten Wirkungsabschätzungsmethoden wird eine Sensitivitätsanalyse zur Beurteilung der Robustheit der Ergebnisse durchgeführt.

Sensitivitätsanalyse Schlüsselparameter

Die grösste Unsicherheit besteht rund um die Annahmen zum Nutzungsszenario (d.h. substituierbares Produkt). Für die Nutzungsszenarien mit der grössten Unsicherheit wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Eine detaillierte Beschreibung der betroffenen Szenarien und in der Sensitivitätsanalyse berücksichtigten Alternativszenarien kann dem Kapitel 2.5 entnommen werden. Die Nutzungsszenarien der Sensitivitätsanalyse wurden so gewählt, dass die mögliche Spannweite an Resultaten aufgezeigt werden kann.

Verglichen damit, sind die Unsicherheiten der Sachbilanzdaten als tief zu bewerten und deren Sensitivität wird nicht separat untersucht. Die Resultate der Sensitivitätsanalyse können dem Kapitel 3.1 entnommen werden.

Sensitivitätsanalyse Wirkungsabschätzung

Um die Robustheit der Resultate bezüglich der Wahl der Methode zur Bewertung der Gesamtumweltbelastung zu bestimmen, wurde eine Sensitivitätsanalyse mit der Methode Environmental Footprint 3.1 (EF3.1) durchgeführt (Andreas Bassi, et al., 2023). Die EF3.1 Methode ist die durch die EU entwickelte und empfohlene Methode zur Berechnung der Umweltwirkung, die analog zur Methode der ökologischen Knappheit (UBPs) verschiedene Umweltwirkungen in einem gesamt aggregierenden Indikator zusammenfasst. Zur Analyse der Sensitivität wurde die prozentuale Abweichung der Umweltwirkung der berücksichtigten Wirkungsabschätzungsmethoden vom Mittelwert aller Szenarien eines Nebenstroms berechnet. Die Resultate der Sensitivitätsanalyse können dem Kapitel 0 entnommen werden.

Sensitivität Allokation

Um eine Allokation zu vermeiden, wurde für die vorliegende Ökobilanz eine Systemerweiterung durchgeführt (siehe Kapitel 2.3 Systemgrenzen & Allokation). Eine Allokation der Umweltauswirkung zwischen Haupt- und Nebenprodukt (z.B. Käse und Molke) basierend auf z.B. ökonomischen Gegebenheiten hätte keinen Einfluss auf die relativen Unterschiede zwischen den Resultaten der Valorisierungs- und Verwertungswege innerhalb eines Nebenstromes, da die Verwertung von 1 kg eines Nebenstromes als funktionelle Einheit gewählt wurde. Somit würde jedem Szenario die Umweltbelastung von 1 kg Nebenstrom angerechnet und die relativen Unterschiede zwischen den Szenarien blieben unverändert. Aus diesem Grund wurde keine Sensitivitätsanalyse bezüglich der Allokation durchgeführt.

Falls sich die ökonomischen Gegebenheiten durch neue Verwertungs- oder Valorisierungsmöglichkeiten verändern würden, könnte dies zu Änderungen in den Resultaten bei einer ökonomischen Allokation führen. Aufgrund fehlender Datengrundlage konnte dies jedoch nicht analysiert werden.

Für die Integration der Inventare in die BAFU:2024-Datenbank wurde in Einklang mit den Datenqualitätsrichtlinien der Datenbank eine ökonomische Allokation vorgenommen. Die Berechnungsgrundlagen können dem Anhang A.3 entnommen werden.

Externes Review

Die Ökobilanzen wurden einem externen Review unterzogen. Die Prüfung wurde von Matthias Stucki und Franziska Stössel von der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) durchgeführt. Das Review bestätigt die Konformität mit den Anforderungen des Datenbankprotokolls der BAFU Ökoinventardaten DQRv2.2 (Frischknecht, et al., 2023) sowie die weitgehende Konformität mit den Anforderungen gemäss ISO14040 (ISO, 2006) und ISO14044 (ISO, 2006). Der unabhängige Prüfbericht kann dem Anhang C entnommen werden.

2.4 Verwertungs-/Valorisierungswege und Szenarien

Definition Valorisierungs-/Verwertungswege und Nutzungsszenarien

Die Bestimmung der Valorisierungs-/Verwertungswege und der damit verbundenen Nutzungsszenarien ist für jeden der zehn Nebenströme in diesem Kapitel beschrieben. Ebenfalls werden die Grundannahmen der Sachbilanzen der Verwertungs-/Valorisierungswege dokumentiert. Die ausführliche Dokumentation der erstellten Sachbilanzen jedes Szenarios kann dem Anhang A.3 entnommen werden. Zusätzlich wird die Qualität der Datengrundlage qualitativ bewertet, wobei zwischen den folgenden drei Qualitätsstufen unterschieden wird:

- **Hoch (+++)** = Es wurden vorwiegend aktuelle Primärdaten aus der Schweiz verwendet
- **Mittel (++)** = Es wurden vorwiegend Daten aus Literatur oder bestehenden Sachbilanzen, welche denselben Produktionsprozess abbilden und für die industrielle Schweizer Produktion repräsentativ sind, oder Primärdaten für einen ähnlichen Produktionsprozess verwendet
- **Tief (+)** = Es wurden vorwiegend Daten aus Literatur verwendet, welche lediglich einen ähnlichen Produktionsprozess abbilden und/oder nicht zwingend repräsentativ für die industrielle Schweizer Produktion sind

Pro Nebenstrom wurden rund 4-5 Verwertungswege und 1-3 Valorisierungswege definiert. Die Identifikation möglicher Verwertungs-/Valorisierungswege erfolgte mittels Interviews mit Vertreter:innen und Expert:innen der verschiedenen Branchen sowie in Abstimmung mit dem BAFU. Für alle Nebenströme wurden wo relevant die herkömmlichen Verwertungswege Entsorgung, Vergärung, Kompostierung und Verfütterung betrachtet. Zusätzlich wurden spezifische Verwertungen und Valorisierungen für jeden Nebenstrom definiert. Die Definition des Nutzungsszenarios/des substituierbaren Produkts basiert ebenfalls auf Expert:inneninterviews und Recherchen.

Falls nicht anderweitig vermerkt, basieren die Informationen in diesem Unterkapitel auf Expert:inneninterviews mit Industrievertreter:innen, welche aufgrund von Vertraulichkeiten nicht namentlich genannt werden. Ebenfalls werden aufgrund von Vertraulichkeiten und unvollständiger Datengrundlage grundsätzlich nur qualitative Aussagen zum anfallenden Volumen einzelner Verwertungen/Valorisierungen gemacht.

Molke

In der Schweiz wird Molke zu einem grossen Teil bereits heute entweder valorisiert oder als Futtermittel verwertet. In der Studie werden drei Verwertungswege (1.1-1.3) und vier Valorisierungswege (1.4-1.7) von Molke betrachtet. Die Szenarien und Hauptannahmen sind in Tabelle 3 beschrieben.

Tabelle 3. Übersicht über die untersuchten Verwertungs-/Valorisierungswege des Nebenstroms Molke inkl. Übersicht über die Datengrundlage und deren Qualität gemäss Definition in der Kapiteleinleitung. (+) = tiefe Qualität, (++) = mittlere Qualität, (+++) = hohe Qualität. Verw=Verwertung, Val=Valorisierung

Szenario	Verwertungs-/Valorisierungsweg	Generierte Produkte und Ausbeute in Menge pro kg NS	Substituierbare Produkte und Substitutionsfaktor	Datengrundlage Ökobilanz Verwertung / Valorisierung
1.1 Verw	Vergärung	<ul style="list-style-type: none"> Biogas = 0.66 MJ Dünger aus Gärgut = 0.006 kg NPK-Mix 	<ul style="list-style-type: none"> Erdgas = 1 MJ / MJ Biogas synthetischer Düngermix = 1 kg / kg NPK-Mix 	BAFU:2024 (++)
1.2 Verw	Nassverfütterung	<ul style="list-style-type: none"> Molke als Schweinefutter = 1 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Gerste = 0.06 kg / kg Molke 	{keine Verwertung nötig}
1.3 Verw	Herstellung Molkenproteinkonzentrat (WPC) 35% als Aufzuchtfutter	<ul style="list-style-type: none"> WPC35% = 0.02 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Magermilchpulver = 1 kg / kg WPC35% 	Literatur + WFLDB (++)
1.4 Val	Herstellung Molkenproteinkonzentrat (WPC) 80% als Proteinkonzentrat	<ul style="list-style-type: none"> WPC80% = 0.008 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Sojaproteinkonzentrat = 1.2 kg / kg WPC80% 	Literatur + WFLDB (++)
1.5 Val	Herstellung Molkenpulver	<ul style="list-style-type: none"> Molkenpulver = 0.062 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Magermilchpulver = 1 kg / kg Molkenpulver 	WFLDB (++)
1.6 Val	Herstellung Flüssigkonzentrat	<ul style="list-style-type: none"> Molkenkonzentrat = 0.22 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Milchkonzentrat = 1.08 kg / kg Molkenkonzentrat 	WFLDB (++)
1.7 Val	Herstellung Molkenkäse	<ul style="list-style-type: none"> Molkenkäse = 0.05 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Weichkäse = 1 kg / kg Molkenkäse 	Primärdaten Schweiz (+++)

Die Vergärung wird als erster möglicher Verwertungsweg berücksichtigt (1.1). Bei der Vergärung von einem Kilogramm Molke entsteht rund 0.66 MJ Biogas und flüssiges Gärgut mit total 0.006 kg N, P und K Gehalt (detaillierte Berechnungen siehe Anhang A.3). Es wurde davon ausgegangen, das Biogas Erdgas 1:1 ersetzt, da gemäss den Energieperspektiven 2050+ des Bundes der Erdgasverbrauch sinken und der Biogasverbrauch steigen wird (BFE, 2020). Um die Robustheit dieser Annahme zu prüfen, wurde eine Sensitivitätsanalyse mit der Substitution von grünem Wasserstoff durchgeführt (vgl. Kapitel 2.5). Beim Gärgut wurde davon ausgegangen, dass ein synthetischer Düngermix mit analogem Nährstoffgehalt 1:1 substituiert werden kann. Die entstandene Umweltbelastung durch die Vergärung wurde basierend auf existierenden Inventaren aus der BAFU:2024 Datenbank berechnet.

Ebenfalls als Verwertung kommt Molke in unterschiedlicher Form als Futtermittel zum Einsatz. Molke kann ohne Weiterverarbeitung als Futtermittel für die Schweinemast eingesetzt werden (1.2), wobei unter Berücksichtigung der Unterschiede im Energiegehalt 1 kg Molke rund 0.06 kg Gerste ersetzen kann (Kopf-Bolanz, Bisig, Jungbluth, & Denkel, 2015).

Als Aufzuchtfuttermittel kann Molkenproteinkonzentrat (WPC) in tiefen Proteinkonzentrationen eingesetzt werden. Stellvertretend wird ein WPC mit 35 % Proteingehalt in der Trockensubstanz analysiert (1.3). WPC wird durch Ultrafiltration produziert. Zur Trocknung des Konzentrates werden Teile des Wassers verdunstet und das Produkt im Anschluss sprühgetrocknet. WPC wird in der Schweiz hergestellt, es standen jedoch keine Primärdaten zur Verfügung. Daher wurde die Herstellung des WPCs basierend auf Literaturwerten (Bacenetti, Bava, Schievano, & Zucali, 2018; Pires, Marnotes, Rubio, Garcia, & Pereira, 2021) und die anschliessende Verdunstung und Sprühtrocknung basierend auf WFLDB-Inventaren modelliert. WPC35% kann anstelle von Magermilchpulver eingesetzt werden, wobei aus einem kg Molke 0.02 kg WPC35% hergestellt werden kann, welches Magermilchpulver 1:1 ersetzen kann (Kopf-Bolanz, Bisig, Jungbluth, & Denkel, 2015).

WPCs in höherer Konzentration werden unter anderem für die menschliche Ernährung z.B. zur Proteinanreicherung eingesetzt. Stellvertretend wird das 80 % konzentrierte WPC (WPC80%) analysiert (80% Proteingehalt in der Trockensubstanz) (1.4). Der Produktionsprozess ist grundsätzlich der gleiche wie bei tiefer konzentrierten WPCs. Jedoch wird das Produkt stärker konzentriert, was in einer tieferen Ausbeute von 0.008 kg WPC80% pro kg Molke resultiert. Die Herstellung des WPCs wurde basierend auf Literaturwerten (Bacenetti, Bava, Schievano, & Zucali, 2018; Pires, Marnotes, Rubio, Garcia, & Pereira, 2021) und die anschliessende Verdunstung und Sprühtrocknung basierend auf WFLDB-Inventaren modelliert. Eine Alternative zur Proteinanreicherung bilden pflanzliche Proteine. Im Szenario 1.4 wurde davon ausgegangen, dass WPC80% anstelle von Sojaproteinkonzentrat eingesetzt wird. Sojaproteine sind die global am weitesten verbreiteten pflanzlichen Proteine (Heine, et al., 2018). Das betrachtete Sojaproteinkonzentrat hat einen Proteingehalt von ca. 67%. Unter Berücksichtigung der Unterschiede im Proteingehalt der beiden Produkte kann 1.2 kg Sojaproteinkonzentrat pro kg WPC80% ersetzt werden.

Eine weitere Möglichkeit ist die Trocknung (Verdunstung und Sprühtrocknung) der Molke und der Einsatz als Molkenpulver (1.5). Molkenpulver wird in der Schweiz hergestellt, es standen jedoch keine spezifischen Daten zur Verfügung. Daher wird auf Daten aus der WFLDB zurückgegriffen. Molkenpulver kann verschiedenen Lebensmitteln beigemischt werden z.B. als 1:1 Ersatz von Magermilchpulver (Kopf-Bolanz, Bisig, Jungbluth, & Denkel, 2015; Agroscope, 2024).

Eine weitere mögliche Valorisierung ist die Herstellung von Flüssigkonzentrat (1.6), welches z.B. in Getränken anstelle von Milchkonzentrat eingesetzt werden kann. Das Molkenkonzentrat wird durch die Verdunstung von Wasser bis auf einen Trockensubstanz Gehalt (TS-Gehalt) von 27% hergestellt. Analog zum Molkenpulver standen keine Daten aus der Schweizer Produktion zur Verfügung und die Modellierung basiert auf bestehenden Daten aus der WFLDB. Das betrachtete Molkenkonzentrat hat einen TS-Gehalt von 27%, während das spezifisch substituierte Milchkonzentrat einen TS-Gehalt von 25% aufweist. Daher kann 1kg Molkenkonzentrat rund 1.08 kg Milchkonzentrat ersetzen.

Aus Molke kann auch wieder Käse hergestellt werden (1.7). In der Schweiz am weitesten verbreitet sind Ricotta und Ziger/Sérac. Das Produktionsverfahren ist ähnlich zur normalen Käseproduktion. Durch die Erwärmung und Ansäuerung wird der Molkenkäse aus der Molke gefällt und im Anschluss ausgeschwemmt und abgetropft. Als Datengrundlage wurden Primärdaten der industriellen Schweizer Molkenkäseproduktion berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass Molkenkäse anstelle von Weichkäse aus Milch konsumiert wird, wobei von einem 1:1 Ersatz ausgegangen wird.

Datenqualität

Abgesehen vom Szenario 1.7 (Molkenkäseproduktion) basieren die Sachbilanzen der Verwertung/Valorisierung entweder auf bestehenden repräsentativen Sachbilanzen aus der BAFU oder WFLDB Datenbank oder Literaturdaten. Die Szenarien 1.3-1.6 basieren alle auf in der Industrie weit verbreiteten Verfahren (Filtration, Trocknung) und die Prozesse unterliegen vor allem physikalischen Gegebenheiten, weshalb die Datengrundlage generell als gut bezeichnet werden kann.

Für den Valorisierungsweg Molkenkäseproduktion (1.7) lagen Primärdaten von der industriellen Schweizer Molkenkäseproduktion vor, welche im Vergleich mit Literaturdaten (Bintsis & Papademas, 2023) als für die industrielle Produktion repräsentativ erachtet werden.

Weizenkleie

In der Schweiz wird heute fast 100% der anfallenden Weizenkleie verfüttert. Andere Verwertungen und Valorisierungen sind aktuell noch wenig verbreitet, finden in kleinem Umfang aber bereits in der Schweiz statt (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4. Übersicht über die untersuchten Verwertungs-/Valorisierungswege des Nebenstroms Weizenkleie inkl. Übersicht über die Datengrundlage und deren Qualität gemäss Definition in der Kapiteleinleitung. (+) = tiefe Qualität, (++) = mittlere Qualität, (+++) = hohe Qualität. Verw=Verwertung, Val=Valorisierung

Szenario	Valorisierungs-/ Verwertungsweg	Generierte Produkte und Ausbeute in Menge pro kg NS	Substituierbare Produkte und Substitutionsfaktor	Datengrundlage Ökobilanz Verwertung / Valorisierung
2.1	Verbrennung Verw	<ul style="list-style-type: none"> ■ Wärme = 3.3 MJ ■ Strom = 0.47 kWh 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Wärme aus Erdgas = 1 MJ / MJ Wärme ■ Strommix = 1 kWh / kWh Strom 	BAFU:2024 (++)
2.2	Vergärung Verw	<ul style="list-style-type: none"> ■ Biogas = 8.6 MJ ■ Dünger aus Gärgut = 0.008 kg NPK-Mix 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Erdgas 1 MJ / MJ Biogas ■ Synthetischer Düngermix = 1 kg / kg NPK-Mix 	BAFU:2024 (++)
2.3	Kompostierung Verw	<ul style="list-style-type: none"> ■ Kompost als Dünger = 0.018 kg NPK-Mix ■ Kompost als Bodenverbesserung = 1.12 kg Kompost 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Synthetischer Düngermix = 1 kg / kg NPK-Mix ■ Stroh = 0.8 kg/kg Kompost 	Ecoinvent 3.9 (++)
2.4	Verfütterung Verw	<ul style="list-style-type: none"> ■ Weizenkleiepellet = 1 kg 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Futtermittelmix = 1 kg / kg Kleiepellet 	BAFU:2024 (++)
2.5	Herstellung Val Vollkornmehl	<ul style="list-style-type: none"> ■ Weizenkleie = 1 kg 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Weizen = 1.35 kg Weizen / kg Kleie 	{keine zusätzliche Valorisierung nötig}
2.6	Direkter Verzehr Val	<ul style="list-style-type: none"> ■ Weizenkleie = 1 kg 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Weissmehl = 1 kg /kg Kleie 	BAFU:2024 (++)
2.7	Insektenzucht als Verw Futtermittel	<ul style="list-style-type: none"> ■ Insektenmehl = 0.05 kg ■ Insektenöl = 0.02 kg ■ Insekten-Dünger = 0.23 kg 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Fischmehl = 0.77 kg / kg Insektenmehl ■ Fischöl = 1 kg / kg Insektenöl ■ Synthetischer Düngermix = 0.04 kg NPK-Mix / kg Insekten-Dünger 	Primärdaten Schweiz (+++)
2.8	Insektenzucht für Verw menschliche Ernährung	<ul style="list-style-type: none"> ■ Insektenmehl = 0.05 kg ■ Insektenöl = 0.02 kg ■ Insekten-Dünger = 0.23 kg 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Sojaproteinkonzentrat = 0.74 kg / kg Insektenmehl ■ Fischöl = 1 kg / kg Insektenöl ■ Synthetischer Düngermix = 0.04 kg NPK-Mix / kg Insekten-Dünger 	Primärdaten Schweiz (+++)

Im Falle eines Überschusses oder bei Kontaminationen wird Weizenkleie in der Biogasanlage verwertet (2.2) oder in der Verbrennungsanlage entsorgt (2.1). Im Falle einer Verbrennung wird Strom und Wärme produziert. Es wurde davon ausgegangen, dass der Schweizer Verbrauchermix ersetzt wird. Aufgrund der Komplexität des Strommarktes ist das effektiv ersetzte Stromprodukt schwierig zu bestimmen, weshalb für diese Annahme eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt wurde (vgl. Kapitel 2.5). Bei der produzierten Wärme wurde von der Substitution von Wärme aus Erdgas ausgegangen, da gemäss den Energieperspektiven 2050+ des Bundes der Erdgasverbrauch sinken und ersetzt werden muss (BFE, 2020). Die Sachbilanzdaten der Verbrennung basiert auf existierenden Inventaren aus der BAFU:2024 Datenbank. Die Hintergründe der Berechnungen können dem Anhang A.3 entnommen werden.

Bei der Vergärung (2.2) wurden die gleichen Annahmen wie bei der Molke (siehe oben) getroffen.

Als weitere Verwertungsmöglichkeit wird die Kompostierung (2.3) analysiert. Bei der Kompostierung entsteht Kompost, der als Dünge- und Bodenverbesserungsmittel eingesetzt wird. Die Menge an anfallendem Kompost berücksichtigt Unterschiede im TS-Gehalt von durchschnittlichem Kompost, weshalb im Fall von Kleie, welche einen hohen TS-Gehalt aufweist, mehr als 1 kg durchschnittlicher Kompost produziert werden kann (siehe weiterführende Erklärungen im Anhang A.3). Die produzierten Düngemittel können jeweils einen synthetischen Düngermix mit analogem Nährstoffgehalt 1:1 substituieren. Als Bodenverbesserungsmittel werden in der Schweiz viele verschiedene Substrate eingesetzt (Stucki, Wettstein, Mathis, & Amrein, 2019). Im Szenario wurde von Stroh als Bodenverbesserungsmittel ausgegangen, wobei ein Kilogramm Kompost 0.8 kg Stroh ersetzt (Dinkel, Zschokke, & Schleiss, 2012). Die Sachbilanzdaten der Kompostierung basieren auf einem Inventar aus ecoinvent 3.9. Die Hintergründe der Berechnungen können dem Anhang A.3 entnommen werden.

Bei der Verfütterung von Weizenkleie (2.4) wird diese zusammen mit anderen Mühlenachprodukten (Bollmehl, Spelzen) pelletiert und in der Herstellung von Mischfutter eingesetzt. Da keine Primärdaten aus der Industrie zur Verfügung standen, wurden die Sachbilanzdaten mit einem vergleichbaren Pelletierprozess auf Grundlage der BAFU-Datenbank angenähert. In der Futtermittelindustrie kann es alternativ für verschiedene Futtermittel gebraucht werden. In diesem Szenario wurde davon ausgegangen, dass Kleiepellets eine Mischung von Gerste, Weizen, Lucerne, Rapskuchen, Sojaschrot und Sonnenblumenkuchen ersetzen, wobei vergleichbare Nährwertzusammensetzungen berücksichtigt wurden.

Weizenkleie kann direkt im Mehl valorisiert werden, wenn Vollkornmehl anstelle von Weissmehl hergestellt wird (2.5). Eines der am weitesten verbreiteten Verfahren zu Herstellung von Vollkornmehl beinhaltet nicht die direkte Vermahlung des gesamten Kornes, sondern es wird durch die reguläre Vermahlung und Trennung der Komponenten eines Weizenkornes (insbesondere Keimling und Kleie) und anschliessende Mischung der Komponenten in der ähnlichen Zusammensetzung wie die des Weizenkornes hergestellt (Gomez, Gutkoski, & Bravo-Nunez, 2020). Daher wurde in dem Szenario davon ausgegangen, dass die gleichen Produktionsprozesse wie bei der Weissmehlproduktion durchgeführt werden und somit kein umwelt-relevanter Zusatzaufwand für die Vollkornmehlherstellung/Valorisierung anfällt. Für das Nutzungsszenario wurde entsprechend davon ausgegangen, dass Weizenkleie Weissmehl 1:1 ersetzen kann, bis es dem Anteil von

Kleie im Korn entspricht. Pro kg Weizenkleie entspricht dies 1.35 kg Weizen (gemäss Ausbeute Weizen für Mehlproduktion).

Weizenkleie kann ohne Weiterverarbeitung direkt verzehrt oder Lebensmitteln beigemischt werden (z.B. in Müsli oder Backzutaten) (2.6). Für die Valorisierung wurde daher nur der Transport von der Mühle bis zum Lebensmittelverarbeiter berücksichtigt. Es wurde angenommen, dass Weizenkleie als direkte Alternative für Weissmehl eingesetzt werden kann, wobei die maximal beimischbare Menge je nach Produkt limitiert ist.

In der Schweiz gibt es Pilotprojekte in denen Weizenkleie als Futtermittel für die Insektenzucht eingesetzt wird. Die Szenarien 2.7 und 2.8 umfassen die Verwertung von Weizenkleie durch Insekten. Stellvertretend wurde die in der Schweiz eingesetzte energetisch optimierte Zucht von Soldatenfliegenlarven betrachtet. Bei diesem Verwertungsweg werden Soldatenfliegenlarven über mehrere Tage mit einer Substratmischung gefüttert. Das Substrat kann neben feuchteren Komponenten wie z.B. faulem Obst bis zu 10% Weizenkleie enthalten. Durch die Abwärme der Larven wird Feuchtigkeit im Substrat verdunstet. Dank dieser Passivkühlung ist keine energieintensive Kühlung nötig. Die ausgewachsenen Larven werden im Anschluss getrocknet und gepresst. Aus einem kg verfütterter Weizenkleie (ohne Beimischung von weiteren Komponenten) entsteht rund 50g Insektenmehl und 20g Insektenöl. Ausserdem entsteht während der Aufzucht 230g Insektendünger. Für die Sachbilanz der Insektenzucht wurden Primärdaten aus der Schweizer Industrie verwendet. Im Szenario 2.7 wird davon ausgegangen, dass Insekten als Futtermittel für Wassertiere eingesetzt werden. Gemäss der Verordnung über tierische Nebenprodukte (VTNP) ist die Verfütterung von Insektenprotein nur für Wassertiere zugelassen. Dabei kann 1 kg Insektenmehl (ca. 50% Protein-Gehalt) rund 0.77 kg Fischmehl (ca. 66% Proteingehalt) substituieren. Beim Insektenöl wurde von einem 1:1 Ersatz von Fischöl ausgegangen und der Insektendünger ersetzt synthetischen Dünger mit entsprechender Nährstoffzusammensetzung. In Szenario 2.8 wird vom menschlichen Konsum des Insektenmehls ausgegangen. Gemäss der Verordnung des EDI über neuartige Lebensmittel ist Insektenprotein von Soldatenfliegenlarven allerdings als neuartiges Lebensmittel einzustufen und unterliegt einer Bewilligungspflicht. Sofern eine Bewilligung vorliegt, kann das Insektenmehl als Proteinquelle für die menschliche Ernährung genutzt werden und rund 0.74 kg Sojaproteinkonzentrat (ca. 67% Proteingehalt) ersetzen, welches das global am weitesten verbreitete pflanzliche Protein ist (Heine, et al., 2018).

Datenqualität

Die Sachbilanzen der Verwertungs-/Valorisierungswege der Szenarien 2.1-2.6 basieren auf bestehenden und repräsentativen Sachbilanzen aus der BAFU-Datenbank, resp. für Szenario 2.5 ist keine zusätzliche Verwertung nötig.

Für den Verwertungsweg Insektenzucht (2.7 & 2.8) lagen Primärdaten aus der Schweizer Industrie vor, welche als repräsentativ für die Schweizer Insektenzucht betrachtet werden kann. Durch das energetisch optimierte Verfahren in der Schweiz sind grössere Unterschiede zur ausländischen Insektenzucht zu erwarten.

Melasse

Melasse wird in der Schweiz grösstenteils als Komponente von Mischfutter eingesetzt. Es gibt aber einige alternative Verwertungs- und Valorisierungswege, die immer mehr an Bedeutung gewinnen. Die untersuchten Wege sind in der Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5. Übersicht über die untersuchten Verwertungs-/Valorisierungswege des Nebenstroms Melasse inkl. Übersicht über die Datengrundlage und deren Qualität gemäss Definition in der Kapiteleinleitung. (+) = tiefe Qualität, (++) = mittlere Qualität, (+++) = hohe Qualität. Verw=Verwertung, Val=Valorisierung

Szenario	Valorisierungs-/Verwertungsweg	Generierte Produkte und Ausbeute in Menge pro kg NS	Substituierbare Produkte und Substitutionsfaktor	Datengrundlage Ökobilanz Verwertung / Valorisierung
3.1 Verw	Vergärung	<ul style="list-style-type: none"> ■ Biogas = 9.2 MJ ■ Dünger aus Gärgut = 0.008 kg NPK-Mix 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Erdgas 1 MJ / MJ ■ Biogas ■ Synthetischer Düngermix = 1 kg / kg NPK-Mix 	BAFU:2024 (++)
3.2 Verw	Kompostierung	<ul style="list-style-type: none"> ■ Kompost als Dünger = 0.016 kg NPK-Mix ■ Kompost als Bodenverbesserung = 0.99 kg Kompost 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Synthetischer Düngermix = 1 kg / kg NPK-Mix ■ Stroh = 0.8 kg / kg Kompost 	Ecoinvent 3.9 (++)
3.3 Verw	Verfütterung	<ul style="list-style-type: none"> ■ Futtermelasse = <i>vertraulich</i> 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Pflanzenöl = 1 kg / kg Futtermelasse 	Primärdaten Schweiz (+++)
3.4 Verw	Insektenzucht als Futtermittel	<ul style="list-style-type: none"> ■ Insektenmehl = 0.05 kg ■ Insektenöl = 0.02 kg ■ Insekten-Dünger = 0.23 kg 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Fischmehl = 0.77 kg / kg Insektenmehl ■ Fischöl = 1 kg / kg Insektenöl ■ Synthetischer Düngermix = 0.04 kg NPK-Mix / kg Insekten-Dünger 	Primärdaten Schweiz (+++)
3.5 Val	Herstellung Trinkethanol	<ul style="list-style-type: none"> ■ Trinkethanol = <i>vertraulich</i> 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Ethanol = 1 kg / kg Trinkethanol 	Primärdaten Schweiz (+++)
3.6 Val	Direkter Verzehr als Zuckerersatz	<ul style="list-style-type: none"> ■ Melasse = 1 kg 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Zucker = 0.4 kg / kg Melasse 	BAFU:2024 (++)

Als Verwertungsmöglichkeiten wurden die Vergärung (3.1) und Kompostierung (3.2) analysiert, wobei insbesondere die Kompostierung in der Schweiz nur wenig verbreitet ist. Die Entsorgung in einer Verbrennungsanlage ist aufgrund der flüssigen Konsistenz nicht möglich. Die Vergärung und Kompostierung werden analog zur Weizenkleie (siehe Kapitel 2.4 Weizenkleie) und wie im Anhang A.3 im Detail beschrieben modelliert.

Als weiteren Verwertungsweg gibt es die Möglichkeit, Melasse als Futtermittel (3.3) einzusetzen. Die Melasse kann mit minimalen Weiterverarbeitungsschritten als Staubbinder und Energielieferant in der Mischfutterherstellung genutzt werden. Jedoch ist die beimischbare Menge aus technischen Gründen auf maximal 6% limitiert (Agroscope, 2016). Für die Sachbilanz dieses Verwertungsweges wurden vertrauliche Daten eines Schweizer Herstellers genutzt. In der Futtermittelindustrie kann Melasse als Alternative zu Pflanzenöl eingesetzt werden, wobei aufgrund der Hauptfunktion der Staubbinderung von einem 1:1 Ersatz

ausgegangen wurde. Für dieses Szenario wurde zusätzlich eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, (vgl. Kapitel 2.5).

Weiter kann Melasse als Substrat in der Insektenzucht eingesetzt werden (3.4). Dazu wurde vom gleichen Produktionsverfahren und den gleichen Primärdaten wie im Kapitel 2.4 Weizenkleie beschrieben ausgegangen. Der einzige Unterschied liegt darin, dass dem Substrat maximal 5% Melasse beigemischt werden kann. Als Nutzungsszenario wurde die aktuell zugelassene Verfütterung des Insektenmehls an Wassertiere berücksichtigt (analog Szenario 2.7). Der Einsatz für den menschlichen Verzehr wäre auch bei Insektenmehl aus Melasse-Substrat unter Bewilligung möglich (vgl. Szenario 2.8). Dieses Szenario wurde bei der Melasse aber nicht untersucht, da sich die Ergebnisse aus dem Vergleich der beiden Nutzungsszenarien bei der Weizenkleie (Szenarien 2.7 und 2.8) auf die Melasse übertragen lassen.

Eine in der Schweiz angewendete Möglichkeit der Valorisierung ist die Herstellung von Trinkethanol aus Melasse (3.5). Für die Ethanolherstellung wurde das Produktionsverfahren und vertrauliche Produktionsdaten eines Schweizer Herstellers berücksichtigt. Für das Nutzungsszenario wurde davon ausgegangen, dass Trinkethanol aus Melasse Ethanol, der direkt aus der Zuckerrübe gewonnen wird, 1:1 substituieren kann.

Nicht zuletzt kann Melasse als Süßungsmittel oder Zuckerersatz in der Lebensmittelindustrie genutzt werden (3.6). Dabei sind keine zusätzlichen Produktionsschritte erforderlich und die Melasse wird lediglich von der Zuckerfabrik zum Lebensmittelverarbeiter transportiert. Als Zuckerersatz kann Melasse verarbeiteten Produkten beigemischt werden, womit Zucker substituiert werden kann. Unter Berücksichtigung der Unterschied im Zuckergehalt kann 0.4 kg Zucker pro kg Melasse ersetzt werden, wobei je nach Anwendung und aufgrund Unterschiede in den Eigenschaften von Melasse und Zucker nur eine bedingte Menge an Melasse beigemischt werden kann.

Datenqualität

Die Sachbilanzen der Verwertungs-/Valorisierungswege der Szenarien 3.1, 3.2 und 3.6 basieren auf bestehenden und repräsentativen Sachbilanzen aus der BAFU-Datenbank.

Für die anderen Verwertungs- und Valorisierungswege lagen Primärdaten von Schweizer Produzierenden vor, welche als repräsentativ für die Schweiz betrachtet werden können. Bei der Insektenzucht sind durch das energetisch optimierte Verfahren grössere Unterschiede zur ausländischen Insektenzucht zu erwarten.

Rapspresskuchen

In der Schweiz wird der Rapspresskuchen aktuell grundsätzlich verfüttert. Verwertungen in der Verbrennung, Vergärung oder Kompostierung sind ebenfalls möglich. Produkte aus Rapspresskuchen werden gemäss der Lebensmittel- und Gebrauchsgegenständeverordnung (LGV) als neuartiges Lebensmittel klassifiziert, da sie bis 1997 in der Schweiz und der EU nicht als Lebensmittel eingesetzt wurden (LGV, 2016). Somit bedarf jedes Produkt auf Basis von Rapspresskuchen einer Zulassung. Aktuell sind nur zwei Produkte aus Rapspresskuchen zugelassen – Rapsproteinisolat und Rapspulver (Rapsmehl) (BLV, 2024). Beide Produkte werden in der Schweiz zur Zeit von keinem Hersteller produziert. Eine Zusammenfassung der untersuchten Valorisierungs- und Verwertungswege kann der Tabelle 6 entnommen werden.

Tabelle 6. Übersicht über die untersuchten Verwertungs-/Valorisierungswege des Nebenstroms Rapspresskuchen inkl. Übersicht über die Datengrundlage und deren Qualität gemäss Definition in der Kapiteleinleitung. (+) = tiefe Qualität, (++) = mittlere Qualität, (+++) = hohe Qualität. Verw=Verwertung, Val=Valorisierung

Szenario	Valorisierungs-/Verwertungsweg	Generierte Produkte und Ausbeute in Menge pro kg NS	Substituierbare Produkte und Substitutionsfaktor	Datengrundlage Ökobilanz Verwertung / Valorisierung
4.1 Verw	Verbrennung	<ul style="list-style-type: none"> Wärme = 5.2 MJ Strom = 0.7 kWh 	<ul style="list-style-type: none"> Wärme aus Erdgas = 1 MJ / MJ Wärme Strommix = 1 kWh / kWh Strom 	BAFU:2024 (++)
4.2 Verw	Vergärung	<ul style="list-style-type: none"> Biogas = 11.7 MJ Dünger aus Gärgut = 0.008 kg NPK-Mix 	<ul style="list-style-type: none"> Erdgas 1 MJ / MJ Biogas Synthetischer Düngermix = 1 kg / kg NPK-Mix 	BAFU:2024 (++)
4.3 Verw	Kompostierung	<ul style="list-style-type: none"> Kompost als Dünger = 0.019 kg NPK-Mix Kompost als Bodenverbesserung = 1.17 kg Kompost 	<ul style="list-style-type: none"> Synthetischer Düngermix = 1 kg / kg NPK-Mix Stroh = 0.8 kg / kg Kompost 	Ecoinvent 3.9 (++)
4.4 Verw	Verfütterung	<ul style="list-style-type: none"> Rapspresskuchen = 1 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Futtermittelmix = 1 kg / kg Rapspresskuchen 	BAFU:2024 (++)
4.5 Val	Herstellung Rapsproteinisolat	<ul style="list-style-type: none"> Rapsproteinisolat = 0.23 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Sojaproteinisolat = 1 kg / kg Rapsproteinisolat 	Literatur (+)
4.6 Val	Herstellung Rapsmehl	<ul style="list-style-type: none"> Rapsmehl = 0.89 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Weizenmehl = 1 kg / kg Rapsmehl 	Literatur + WFLDB (+)

In dieser Studie werden die drei Standard-Verwertungswege Verbrennung (4.1), Vergärung (4.2) und Kompostierung (4.3) analysiert. Diese drei Verwertungswege wurden analog zur Weizenkleie (siehe Kapitel 2.4 Weizenkleie) und wie im Anhang A.3 im Detail beschrieben modelliert.

Als weiteren Verwertungsweg wird die Verwertung als Futtermittel betrachtet (4.4). In der Schweiz wird Rapspresskuchen als Komponente in der Mischfutterherstellung genutzt. Rapspresskuchen ist bereits relativ trocken und bedarf keiner weiteren Verarbeitung vor dem Einsatz in der Mischfutterindustrie. Somit wurde lediglich der Transport vom Ölhersteller zum Mischfutterwerk anhand von BAFU:2024 Daten berücksichtigt. In der Futtermittelindustrie kann Rapspresskuchen alternativ für verschiedene Futtermittel gebraucht werden. In diesem Szenario wurde davon ausgegangen, dass eine Mischung von Rapsschrot, Sojaschrot, Sonnenblumenkuchen, Maiskleber, Pflanzenöl und Weizenkleie ersetzt werden kann, wobei vergleichbare Nährwertzusammensetzungen berücksichtigt wurden.

Das Szenario 4.5 bildet die Herstellung von Rapsproteinisolat und damit einen Valorisierungsweg ab. Die Herstellung von pflanzlichem Proteinisolat umfasst grundsätzlich drei Schritte: Entfettung, Extraktion und Fällung, wobei für jeden Schritt unterschiedliche

Verfahren angewendet werden können (Kumar, 2021; Heine, et al., 2018). Da in der Schweiz keine Primärdaten zu Verfügung stehen, wird auf Literaturdaten zurückgegriffen. Die spezifischen Produktionsschritte für die Herstellung von Rapsproteinisolat wurden aus der EU-Zulassungsstudie (EFSA, 2013) und der Herstellung von Sojaproteinisolat (Blonk, et al., 2023) abgeleitet und umfassen die Entfettung der Rapspresskuchens mit dem Lösemittel Hexan, die alkalische Extraktion und isoelektrische Fällung. Ein für den Rapspresskuchen spezifischer Produktionsschritt ist die enzymatische Behandlung, um den natürlich im Raps vorkommenden Antinährstoff Phytat zu zersetzen. Zum Schluss wird das Isolat neutralisiert und sprühgetrocknet. Aus einem kg Rapspresskuchen kann rund 0.23 kg Rapsproteinisolat gewonnen werden. Das Rapsproteinisolat kann unter anderem für die Herstellung von Fleisch-Ersatzprodukten eingesetzt werden (EFSA, 2013). Somit kann Rapsproteinisolat anderes pflanzliches Proteinisolat ersetzen. Im Szenario 4.5 wird davon ausgegangen, dass Rapsproteinisolat Sojaproteinisolat 1:1 ersetzt, welches das global am weitesten verbreitete Proteinisolat ist (Heine, et al., 2018). Für den Fall, dass Rapsproteinisolat einem Fleischersatzprodukt beigemischt werden würde und ein Fleischprodukt ersetzen könnte, wurde eine Sensitivitätsanalyse gemacht (vgl. Kapitel 2.5).

Weiter wird die Herstellung des zugelassenen Rapsmehles analysiert (4.6). Um Rapsmehl herzustellen, wird der Rapspresskuchen zuerst entfettet, dann vorbereitet und angesäuert um anschliessend das natürlich in der Pflanze vorkommende Phytat enzymatisch zu zersetzen. Im Anschluss wird das Produkt im Ofen getrocknet und gemahlen (EFSA, 2020). Da in der Schweiz keine Primärdaten für dieses Produktionsverfahren zur Verfügung stehen, wird für die chemische Verarbeitung auf Literaturdaten von vergleichbaren Prozessen zurückgegriffen (EFSA, 2020; Blonk, et al., 2023). Für den Vermahlungsprozess wurde auf Daten aus der WFLDB zurückgegriffen. Rapsmehl ist vor allem für den Einsatz in Gebäcken und Cerealien zugelassen (EFSA, 2020). Daher wird davon ausgegangen, dass herkömmliches Weizenmehl 1:1 ersetzt werden kann.

Datenqualität

Die Sachbilanzen der Verwertungswege der Szenarien 4.1-4.4 basieren auf bestehenden und repräsentativen Sachbilanzen aus der BAFU-Datenbank.

Die Datenqualität der Szenarien 4.5-4.6 ist als tief zu bewerten, da lediglich Literaturwerte von vergleichbaren Verarbeitungsprozessen von anderen Produkten zu Verfügung standen. Da die beiden Produkte in der Schweiz nicht hergestellt werden, konnten keine Primärdaten erhoben werden und ausländische Produzierende stellen keine öffentlich zugänglichen Informationen zur Verfügung. Für das Rapsproteinisolat sind nur Laborstudien verfügbar, deren Datengrundlage und Repräsentativität für die Erstellung der Sachbilanzdaten als ungenügend eingestuft wurden.

Biertrester

Der Einsatz von Biertrester ist in der Schweiz sehr vielfältig. In dieser Studie werden vier Verwertungswege und drei Valorisierungswege analysiert (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7. Übersicht über die untersuchten Verwertungs-/Valorisierungswege des Nebenstroms Biertrester inkl. Übersicht über die Datengrundlage und deren Qualität gemäss Definition in der Kapiteleinleitung. (+) = tiefe Qualität, (++) = mittlere Qualität, (+++) = hohe Qualität. Verw=Verwertung, Val=Valorisierung

Szenario	Valorisierungs-/Verwertungsweg	Generierte Produkte und Ausbeute in Menge pro kg NS	Substituierbare Produkte und Substitutionsfaktor	Datengrundlage Ökobilanz Verwertung / Valorisierung
5.1 Verw	Verbrennung	<ul style="list-style-type: none"> Wärme = 0.4 MJ Strom = 0.05 kWh 	<ul style="list-style-type: none"> Wärme aus Erdgas = 1 MJ / MJ Wärme Strommix = 1 kWh / kWh Strom 	BAFU:2024 (++)
5.2 Verw	Vergärung	<ul style="list-style-type: none"> Biogas = 2.6 MJ Dünger aus Gärgut = 0.007 kg NPK-Mix 	<ul style="list-style-type: none"> Erdgas 1 MJ / MJ Biogas Synthetischer Düngermix = 1 kg / kg NPK-Mix 	BAFU:2024 (++)
5.3 Verw	Kompostierung	<ul style="list-style-type: none"> Kompost als Dünger = 0.005 kg NPK-Mix Kompost als Bodenverbesserung = 0.28 kg Kompost 	<ul style="list-style-type: none"> Synthetischer Düngermix = 1 kg / kg NPK-Mix Stroh = 0.8 kg / kg Kompost 	Ecoinvent 3.9 (++)
5.4 Verw	Nassverfütterung	<ul style="list-style-type: none"> Biertrester = 1 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Futtermittelmix = 1 kg / kg Biertrester 	{keine Verwertung nötig}
5.5 Val	Herstellung Fleischersatz	<ul style="list-style-type: none"> Fleischersatzprodukt = 0.71 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Tofu = 1.2 kg / kg Fleischersatzprodukt 	Literatur (+)
5.6 Val	Herstellung getrockneter Biertrester	<ul style="list-style-type: none"> Biertrester trocken = 0.23 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Mais (Cornflakes) = 1 kg / kg Biertrester trocken 	Primärdaten Schweiz (+++)
5.7 Val	Herstellung Biertrestermehl	<ul style="list-style-type: none"> Biertrestermehl = 0.21 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Weizenmehl = 1 kg / kg Biertrestermehl 	Primärdaten Schweiz (+++)

Als Verwertungsmöglichkeiten kommen die Verbrennung (5.1), die Vergärung (5.2) und die Kompostierung (5.3) in Frage. Diese drei Verwertungswege wurden analog zur Weizenkleie (siehe Kapitel 2.4 Weizenkleie) und wie im Anhang A.3 im Detail beschrieben modelliert.

Als weitere Verwertungsmöglichkeit wird der Biertrester oft verfüttert (5.4). In der Schweiz wird der grösste Teil des Biertresters direkt verfüttert (Nassverfütterung) und nur ein kleiner Teil wird erst getrocknet und anschliessend in der Mischfutterherstellung eingesetzt. Daher wird in diesem Szenario von der Nassverfütterung ausgegangen, bei welcher keine weitere Verarbeitungsschritte nötig sind. In diesem Szenario wurde davon ausgegangen, dass Biertrester eine Mischung von Gerste, Weizenkleie, Sonnenblumenkuchen und Sojaschrot ersetzen, wobei vergleichbare Nährwertzusammensetzungen berücksichtigt wurden.

Es gibt bereits verschiedene Lebensmittel auf dem Markt, welche basierend auf Biertrester hergestellt werden. Ein Beispiel ist die Herstellung eines Fleischersatzproduktes (5.5). Es gibt

verschiedene Biertrester-basierte Fleischersatzprodukte mit unterschiedlichen Rezepturen, das Produktionsverfahren ist jedoch vergleichbar. In diesem Szenario wurde das folgende Produktionsverfahren mit folgender Rezeptur berücksichtigt: In einem ersten Schritt wird der Biertrester getrocknet und vermahlen. Im Anschluss wird es zusammen mit Sojaproteinkonzentrat gemischt und mit einem Nassextrusionsverfahren das Fleischersatzprodukt hergestellt. Für die Sachbilanz der Vermahlung des Biertresters wurde die gleiche Datengrundlage wie im Szenario 5.7 verwendet (siehe unten). Die Sachbilanzdaten der Nassextrusion wurden mit Literaturdaten für Soja-Extrusion angenähert (Saerens, Smetana, Van Campenhout, Lammers, & Heinz, 2021). In diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass 1 kg des untersuchten Fleischersatzproduktes (Proteingehalt = 17.5%) unter Berücksichtigung der Unterschiede im Proteingehalt rund 1.2 kg Tofu (Proteingehalt \approx 15% (BLV, 2024)) ersetzen kann. In einer Sensitivitätsanalyse wurde geprüft, wie sich die Resultate ändern würden, wenn ein Fleischprodukt ersetzt werden würde (vgl. Kapitel 2.5).

Biertrester ist auch zum direkten Verzehr geeignet und kann zum Beispiel Müsli beigemischt werden (5.6). Dazu muss der Biertrester getrocknet werden. Für diesen Valorisierungsweg wurde die Trocknung vor Ort bei der Brauerei berücksichtigt, wobei der Trester erst mechanisch und im Anschluss elektrisch mit einem energieeffizienten Verfahren getrocknet wird. Für die Sachbilanz dieses Valorisierungsweges standen Primärdaten von Schweizer Produzierenden zur Verfügung. Basierend auf einem in der Schweiz hergestellten Müsli-Produkt² wurde in diesem Szenario davon ausgegangen, dass der Biertrester Mais/Cornflakes im Müsli 1:1 ersetzt.

Ebenfalls wird in der Schweiz bereits Mehl aus Biertrester hergestellt (5.7). Dazu wird der Biertrester in einem Mahltrocknungsprozess zu Biertrestermehl verarbeitet. Als Datengrundlage für die Sachbilanz dieses Valorisierungsweges wurden Primärdaten von Schweizer Verarbeitern verwendet. Das Biertrestermehl wird anstelle von Weizenmehl zum Beispiel in Pasta oder Gebäck eingesetzt.

Datenqualität

Die Sachbilanzen der Verwertungswege der Szenarien 5.1-5.3 basieren auf bestehenden und repräsentativen Sachbilanzen aus der BAFU-Datenbank, resp. für Szenario 5.4 ist keine zusätzliche Verwertung nötig.

Die Datenqualität der Szenarien 5.5 (Fleischersatz) ist als tief zu bewerten, da lediglich Literaturwerte von gleichen Verarbeitungsprozessen jedoch von anderen Produkten zur Verfügung standen. Ausserdem gibt es verschiedene Biertrester-Fleischersatzprodukte auf dem Schweizer Markt. Szenario 5.5 bildet ein verbreitetes Produkt ab, ist jedoch nicht repräsentativ für alle in der Schweiz hergestellten Biertrester-Fleischersatzprodukte.

Für die Verwertungs- und Valorisierungswege 5.6 und 5.7 lagen Primärdaten von Schweizer Produzierenden vor, welche als repräsentativ für die Schweiz betrachtet werden können. Bei dem getrockneten Biertrester (5.6) wurde ein elektrifiziertes Verfahren berücksichtigt, welches sich von konventionelleren Verfahren (z.B. Trocknung mit fossilen Brennstoffen) unterscheiden kann.

² <https://shop.brauereilocher.ch/de/brewbee/brewbee-appenzeller-m%C3%BCesli-mix-classic-500g>

Mosttrester

Mosttrester wird heute in der Schweiz grösstenteils verfüttert. Während es bereits einige nicht ernährungsbezogene Anwendungen, wie zum Beispiel die Herstellung von Apfelleder oder Plastik-Alternativen gibt, sind Valorisationen von Mosttrester für die menschliche Ernährung in der Schweiz kaum vorhanden. Daher werden in diesem Bericht vier Verwertungswege und ein Valorisierungsweg betrachtet (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8. Übersicht über die untersuchten Verwertungs-/Valorisierungswege des Nebenstroms Mosttrester inkl. Übersicht über die Datengrundlage und deren Qualität gemäss Definition in der Kapiteleinleitung. (+) = tiefe Qualität, (++) = mittlere Qualität, (+++) = hohe Qualität. Verw=Verwertung, Val=Valorisierung

Szenario	Valorisierungs-/ Verwertungsweg	Generierte Produkte und Ausbeute in Menge pro kg NS	Substituierbare Produkte und Substitutionsfaktor	Datengrundlage Ökobilanz Verwertung / Valorisierung
6.1	Verbrennung Verw	<ul style="list-style-type: none"> Wärme = 0.2 MJ Strom = 0.02 kWh 	<ul style="list-style-type: none"> Wärme aus Erdgas = 1 MJ / MJ Wärme Strommix = 1 kWh / kWh Strom 	BAFU:2024 (++)
6.2	Vergärung Verw	<ul style="list-style-type: none"> Biogas = 2.1 MJ Dünger aus Gärgut = 0.007 kg NPK-Mix 	<ul style="list-style-type: none"> Erdgas 1 MJ / MJ Biogas Synthetischer Düngermix = 1 kg / kg NPK-Mix 	BAFU:2024 (++)
6.3	Kompostierung Verw	<ul style="list-style-type: none"> Kompost als Dünger = 0.005 kg NPK-Mix Kompost als Bodenverbesserung = 0.33 kg Kompost 	<ul style="list-style-type: none"> Synthetischer Düngermix = 1 kg / kg NPK-Mix Stroh = 0.8 kg / kg Kompost 	Ecoinvent 3.9 (++)
6.4	Trockenverfütterung Verw	<ul style="list-style-type: none"> Apfeltrester trocken = 0.27 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Futtermittelmix = 1 kg / kg Apfeltrester trocken 	BAFU:2024 (++)
6.5	Herstellung Val	<ul style="list-style-type: none"> Apfelmehl = 0.27 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Weizenmehl = 1 kg / kg Apfelmehl 	Primärdaten Schweiz (++)

Als Verwertungsmöglichkeiten kommen die Verbrennung (6.1), die Vergärung (6.2) und die Kompostierung (6.3) in Frage. Diese drei Verwertungswege wurden analog zur Weizenkleie (siehe Kapitel 2.4 Weizenkleie) und wie im Anhang A.3 im Detail beschrieben modelliert.

Als weitere Verwertungsmöglichkeit wird der Mosttrester verfüttert (6.4). In der Schweiz wird der Mosttrester entweder ohne Weiterverarbeitung direkt verfüttert oder er wird getrocknet und als Komponente in der Mischfutterherstellung eingesetzt. Um den minimalen Umweltnutzen bestimmen zu können, wurde in diesem Szenario von der Trockenverfütterung ausgegangen. Da keine Primärdaten aus der Industrie zur Verfügung standen, wurden die Sachbilanzdaten mit einem Trocknungsprozess auf Grundlage der BAFU-Datenbank angenähert. In diesem Szenario wurde davon ausgegangen, dass Biertrester eine Mischung von Dextrose, Lucerne und Haferspels ersetzen, wobei vergleichbare Nährwertzusammensetzungen berücksichtigt wurden.

Eine Möglichkeit zur Valorisierung von Mosttrester ist die Herstellung von Mehl (6.5) (AlpBioEco, 2020). Dazu wird der Apfeltrester getrocknet und vermahlen. Da kein industrieller Hersteller von Apfelmehl in der Schweiz identifiziert werden konnte, wurde die gleiche Datengrundlage wie für das Mahltrocknungsverfahren für die Herstellung von Biertrestermehl verwendet (vgl. Szenario 5.7). Das Apfelmehl kann in Gebäcken als Ersatz von Weizenmehl eingesetzt werden, wobei von einem 1:1 Ersatz ausgegangen wurde.

Datenqualität

Die Sachbilanzen der Verwertungswege der Szenarien 6.1-6.4 basieren auf bestehenden und repräsentativen Sachbilanzen aus der BAFU-Datenbank.

Für den Valorisierungsweg Apfelmehl (6.5) standen nur Primärdaten von einem gleichen Verarbeitungsprozess jedoch von einem anderen Produkt zur Verfügung. Da der Verarbeitungsprozess (Trocknung & Vermahlung) aber vor allem physikalischen Gegebenheiten unterliegt, wird die Datengrundlage auch für den Mosttrester als repräsentativ bewertet.

Rind-Innereien

Innereien wie Herz, Leber, Lunge, Milz, Niere oder Magen sind grundsätzlich direkt für den menschlichen Verzehr geeignet. Jedoch ist der Verzehr von Innereien in der Schweiz nur wenig verbreitet. Viele der Produkte werden heute entweder exportiert oder als K3 Schlachtabfälle deklassiert. Daher wurden zum einen herkömmliche Verwertungswege, aber auch weniger verbreitete, neue Verfahren analysiert. In der Tabelle 9 sind die für Rind-Innereien untersuchten Verwertungs- und Valorisierungswege zusammengefasst.

Tabelle 9. Übersicht über die untersuchten Verwertungs-/Valorisierungswege des Nebenstroms Rind-Innereien inkl. Übersicht über die Datengrundlage und deren Qualität gemäss Definition in der Kapiteleinleitung. (+) = tiefe Qualität, (++) = mittlere Qualität, (+++) = hohe Qualität. Verw=Verwertung, Val=Valorisierung

Szenario	Valorisierungs-/Verwertungsweg	Generierte Produkte und Ausbeute in Menge pro kg NS	Substituierbare Produkte und Substitutionsfaktor	Datengrundlage Ökobilanz Verwertung / Valorisierung
7.1 Verw	Verbrennung	<ul style="list-style-type: none"> ■ Wärme = 1.8 MJ ■ Strom = 0.26 kWh 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Wärme aus Erdgas = 1 MJ / MJ Wärme ■ Strommix = 1 kWh / kWh Strom 	BAFU:2024 (++)
7.2 Verw	Vergärung	<ul style="list-style-type: none"> ■ Biogas = 8.0 MJ ■ Dünger aus Gärgut = 0.007 kg NPK-Mix 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Erdgas 1 MJ / MJ Biogas ■ Synthetischer Düngermix = 1 kg / kg NPK-Mix 	BAFU:2024 (++)
7.3 Verw	Kompostierung	<ul style="list-style-type: none"> ■ Kompost als Dünger = 0.006 kg NPK-Mix ■ Kompost als Bodenverbesserung = 0.4 kg Kompost 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Synthetischer Düngermix = 1 kg / kg NPK-Mix ■ Stroh = 0.8 kg / kg Kompost 	Ecoinvent 3.9 (++)

7.4 Verw	Herstellung Pet-Food	■ Pet-Food = 1 kg	■ Sojaproteinkonzentrat = 0.3 kg / kg Pet-Food	Primärdaten Schweiz (+++)
7.5 Val	Direkter Verzehr	■ Innerei = 1 kg	■ Rindfleisch = 0.96 kg / kg Innerei	Primärdaten Schweiz (++)
7.6 Val	Herstellung Fleischproteinkonzentrat	■ Fleischproteinisolat = 0.15 kg	■ Rindfleisch = 4.25 kg / kg Fleischproteinisolat	Literatur (+)
7.7 Val	Herstellung Fleischextrudat	■ Fleischextrudat = 0.97 kg	■ Rindfleisch = 0.96 kg / kg Fleischextrudat	Literatur (+)

Als Verwertungsmöglichkeiten kommen die Verbrennung (7.1), die Vergärung (7.2) und die Kompostierung (7.3) in Frage. Diese drei Verwertungswege wurden analog zur Weizenkleie (siehe Kapitel 2.4 Weizenkleie) und wie im Anhang A.3 im Detail beschrieben modelliert.

Weiter werden Innereien hauptsächlich für die Herstellung von Haustierfutter eingesetzt (7.4). Als Datengrundlage für die Pet-Food Herstellung wurde die Gefrierverarbeitung der Innereien bei einem Schweizer Verarbeiter berücksichtigt (Sefeedpari, Pishgar-Komleh, & Asbeck, 2023). Die weiterverarbeiteten Innereien werden in der Haustierfutterherstellung als Proteinquelle eingesetzt. Da in herkömmlichen Haustierfutter ebenfalls pflanzliche Eiweissextrakte eingesetzt werden, wurde analog zur Studie von Sefeedpari et al. davon ausgegangen, dass Innereien anstelle von pflanzlichen Proteinen eingesetzt werden können. Dabei wurde von Sojaproteinkonzentrat ausgegangen, da dieses das global am weitesten verbreitete pflanzliche Protein ist (Heine, et al., 2018). Unter Berücksichtigung der Unterschiede im Proteingehalt kann 1 kg Pet-Food aus Rind-Innereien rund 0.3 kg Sojaproteinkonzentrat substituieren.

Als Valorisierungsmöglichkeit kommt der direkte Verzehr der Innereien als Lebensmittel in Frage (7.5). Um die Lebensmittelqualität der Innereien beizubehalten, müssen die Innereien nach den gleichen Prozessen wie das reguläre Fleisch weiterverarbeitet werden. Da dieser Mehraufwand für die Weiterverarbeitung und Einhaltung der Kühlkette nicht genau beziffert werden konnte, wurde näherungsweise analog zur Pet-Food Herstellung (Szenario 7.4) die Aufwände für die Gefrierverarbeitung der Innereien berücksichtigt. In diesem Szenario wurde davon ausgegangen, dass Rind-Innereien anstelle von regulärem Rindfleisch konsumiert werden, wobei unter Berücksichtigung des unterschiedlichen Proteingehalts 0.96 kg Fleisch pro kg Rind-Innereien ersetzt werden kann.

Andere Valorisierungswege von Rind-Innereien sind in der Schweiz nicht verbreitet. Es gibt jedoch Verfahren, in welchen Innereien als Grundlage für die Herstellung von Fleischproteinisolaten genutzt werden (7.6) (Chuck-Hernandez & Ozuna, 2019; Zhao, et al., 2016; Tsermoula, et al., 2019). Da in der Schweiz keine Primärdaten zu Verfügung stehen, wurde auf Literaturdaten zurückgegriffen. Die spezifischen Produktionsschritte für die Herstellung von Fleischproteinisolat wurden mittels Review- und Laborstudien identifiziert (Chuck-Hernandez & Ozuna, 2019; Zhao, et al., 2016; Tsermoula, et al., 2019). Die Datengrundlage aus diesen Studien sind jedoch für die Sachbilanzierung des Valorisierungsprozesses ungenügend, weshalb für die Sachbilanz auf Daten aus der Herstellung von Sojaproteinisolat zurückgegriffen wurde (Blonk, et al., 2023). Das Verfahren zur Herstellung von Fleischproteinisolat ist ähnlich wie das Verfahren zur Herstellung eines

pflanzlichen Proteinisolates (vgl. Szenario 4.6) und umfasst die Schritte Homogenisierung, Extraktion, Fällung und Trocknung. Bei der Homogenisierung werden die Innereien zerkleinert und zu einer homogenen Masse gemischt. Im Anschluss wird das Protein mittels alkalischer Extraktion und isoelektrischer Fällung isoliert und zum Schluss neutralisiert und sprühgetrocknet. Dabei können basierend auf dem durchschnittlichen Proteingehalt von Rind-Innereien aus einem kg Rind-Innereien 0.15 kg Fleischproteinisolat gewonnen werden. Gemäss der Publikation von Mullen et al. (2017) kann Fleischproteinisolat als Streckmittel in verarbeiteten Fleischprodukten eingesetzt werden oder auch als Proteinpulver zum Beispiel zur Anreicherung in Sportlernahrung. In diesem Szenario wurde davon ausgegangen, dass Fleischproteinisolat herkömmliches Rindfleisch in verarbeiteten Fleischprodukten substituiert, wobei aufgrund der Unterschiede im Proteingehalt 4.25 kg Rindfleisch (Proteingehalt \varnothing = 21% (BLV, 2024)) pro kg Fleischproteinkonzentrat (Proteingehalt = 91%) ersetzt werden kann. Jedoch ist der maximale Beimischanteil aus technischen Gründen limitiert. In einer Sensitivitätsanalyse wurde die Substitution von Molkenproteinkonzentrat analysiert (vgl. Kapitel 2.5).

Eine anderer Valorisierungsweg, welcher in Studien bereits untersucht wurde, ist die Extrusion von Rinds-Innereien (7.7) (Offiah, Kontogiorgos, & Falade, 2019). Die extrudierten Innereien können direkt konsumiert oder Fertigprodukten (z.B. Nudel-Suppen) beigemischt werden (Offiah, Kontogiorgos, & Falade, 2019). Dabei werden die Innereien zerkleinert und gemischt und mit dem herkömmlichen Verfahren der Nassextrusion zu einem Extrudat weiterverarbeitet. Für das Zerkleinern und Mischen der Innereien wurden dieselben Daten wie für die Gefrierverarbeitung bei Szenario 7.4 verwendet. Die Sachbilanzdaten der Nassextrusion wurden mit Literaturdaten für Soja-Extrusion angenähert (Saerens, Smetana, Van Campenhout, Lammers, & Heinz, 2021). In diesem Szenario wurde davon ausgegangen, dass das Extrudat reguläres Rindfleisch ersetzen kann, wobei aufgrund der Unterschiede im Proteingehalt 0.96 kg Rindfleisch (Proteingehalt \varnothing = 21% (BLV, 2024) pro kg Extrudat (Proteingehalt = 20.5%) ersetzt werden kann.

Datenqualität

Die Sachbilanzen der Verwertungswege der Szenarien 7.1-7.3 basieren auf bestehenden und repräsentativen Sachbilanzen aus der BAFU-Datenbank.

Für den Verwertungsweg 7.4 (Pet-Food) lagen Primärdaten von einem Schweizer Produzierenden vor, welche als repräsentativ für die Schweiz betrachtet werden.

Für den Valorisierungsweg 7.5 (direkter Verzehr) lagen keine Daten vor, weshalb dieser Weg mit Daten aus dem Szenario 7.4 angenähert wurde. Der Verarbeitungsprozess (Gefrierverarbeitung) dieser beiden Valorisierungs-/Verwertungswege wird zwar als vergleichbar betrachtet, Unterschiede zwischen den beiden Wegen sind aber entsprechend nicht abgebildet.

Die Datenqualität der Szenarien 7.6 und 7.7 ist als sehr tief zu bewerten, da es sich hier nicht um etablierte Verarbeitungsverfahren handelt und deshalb auf Literaturdaten von vergleichbaren Verarbeitungsprozessen von anderen Produkten zurückgegriffen werden musste. Deshalb sind die Unsicherheiten dieser beiden Valorisierungswege als gross einzustufen.

Poulet-Innereien

Poulet-Innereien werden sehr ähnlich weiterverarbeitet wie die Rind-Innereien (siehe Unterkapitel oben). Aus diesem Grund werden bei Poulet-Innereien die gleichen Valorierungs- und Verwertungswege wie bei Rind-Innereien betrachtet (siehe Tabelle 10). Einzig das Szenario 8.5 Tiermehl wird bei den Poulet-Innereien zusätzlich betrachtet.

Tabelle 10. Übersicht über die untersuchten Verwertungs-/Valorisierungswege des Nebenstroms Poulet-Innereien inkl. Übersicht über die Datengrundlage und deren Qualität gemäss Definition in der Kapiteleinleitung. (+) = tiefe Qualität, (++) = mittlere Qualität, (+++) = hohe Qualität. Verw=Verwertung, Val=Valorisierung

Szenario	Valorisierungs-/Verwertungsweg	Generierte Produkte und Ausbeute in Menge pro kg NS	Substituierbare Produkte und Substitutionsfaktor	Datengrundlage Ökobilanz Verwertung / Valorisierung
8.1 Verw	Verbrennung	<ul style="list-style-type: none"> Wärme = 1.4 MJ Strom = 0.20 kWh 	<ul style="list-style-type: none"> Wärme aus Erdgas = 1 MJ / MJ Wärme Strommix = 1 kWh / kWh Strom 	BAFU:2024 (++)
8.2 Verw	Vergärung	<ul style="list-style-type: none"> Biogas = 9.3 MJ Dünger aus Gärgut = 0.007 kg NPK-Mix 	<ul style="list-style-type: none"> Erdgas 1 MJ / MJ Biogas Synthetischer Düngermix = 1 kg / kg NPK-Mix 	BAFU:2024 (++)
8.3 Verw	Kompostierung	<ul style="list-style-type: none"> Kompost als Dünger = 0.006 kg NPK-Mix Kompost als Bodenverbesserung = 0.4 kg Kompost 	<ul style="list-style-type: none"> Synthetischer Düngermix = 1 kg / kg NPK-Mix Stroh = 0.8 kg / kg Kompost 	Ecoinvent 3.9 (++)
8.4 Verw	Pet-Food	<ul style="list-style-type: none"> Pet-Food = 1 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Sojaproteinkonzentrat = 0.25 kg / kg Pet-Food 	Primärdaten Schweiz (+++)
8.5 Verw	Tiermehl	<ul style="list-style-type: none"> Tiermehl = 0.24 kg Tierfett = 0.13 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Fischmehl = 0.93 kg / kg Tiermehl Melasse = 1 kg / kg Tierfett 	Primärdaten Schweiz (++)
8.6 Val	Direkter Verzehr	<ul style="list-style-type: none"> Innerei = 1 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Pouletfleisch = 0.74 kg / kg Innerei 	Primärdaten Schweiz (++)
8.7 Val	Fleischprotein-konzentrat	<ul style="list-style-type: none"> Fleischproteinisolat = 0.12 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Pouletfleisch = 3.97 kg / kg Fleischproteinisolat 	Literatur (+)
8.8 Val	Fleischextrudat	<ul style="list-style-type: none"> Fleischextrudat = 0.97 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Pouletfleisch = 0.74 kg / kg Fleischextrudat 	Literatur (+)

Der detaillierte Beschrieb der Szenarien 8.1-8.4 und 8.6-8.8 kann dem Unterkapitel Rind-Innereien ab Seite 46 entnommen werden.

Gemäss der Verordnung über tierische Nebenprodukte (VTNP) ist das Verfüttern von verarbeitetem tierischem Protein (Tiermehl) von Nichtwiederkäuern an Wassertiere erlaubt. Ausserdem wird in der Schweiz zurzeit geprüft, ob die Verfütterung Tiermehl an Schweine und Hühner wieder zugelassen werden soll (Der Bundesrat, 2023). Dabei darf Tiermehl von Schweinen nur an Hühner und umgekehrt verfüttert werden. Daher wird für den Nebenstrom Poulet-Innereien zusätzlich die Herstellung von Tiermehl analysiert (8.5). Dazu werden die Poulet-Innereien in einer Tierkörperverwertungsanlage zerkleinert, mit Wärme in Form von Dampf gekocht und anschliessend werden durch ein Pressverfahren die Feststoffe (Tiermehl) vom Tierfett getrennt. Als Datengrundlage wurden Daten einer Schweizer Tierkörperverwertungsanlage für K1 Schlachtnebenprodukte verwendet (Pishgar-Komleh, Sefeedpari, Asbeck, & Vellinga, 2021). Aus der Tierkörperverwertung von 1 kg Nebenstrom entstehen 0.24 kg Tiermehl und 0.13 kg Tierfett. Da aktuell nur die Verfütterung von Tiermehl an Wassertiere zugelassen ist, wurde in dem Szenario davon ausgegangen, dass 0.93 kg Fischmehl pro kg Tiermehl ersetzt werden kann, wobei die Unterschiede im Proteingehalt berücksichtigt wurden. Das Tierfett unterliegt keinem Verfütterungsverbot und wird oft in der Mischfutterindustrie als Staubbinder und Energielieferant eingesetzt. Es wurde davon ausgegangen, dass das Tierfett 1:1 Melasse, welches ebenfalls häufig als Staubbinder eingesetzt wird, in der Mischfutterherstellung ersetzen kann.

Datenqualität

Die Datenqualität der Szenarien 8.1-8.4 und 8.6-8.8 ist im Unterkapitel Rind-Innereien auf Seite 46 beschrieben.

Die Datengrundlage für die Tiermehlherstellung (8.5) wird als repräsentativ für die Schweiz eingeschätzt. Allerdings lagen lediglich Daten für die Tierkörperverwertung von Schlachtnebenprodukten der Risikokategorie 1 (K1) und nicht der Risikokategorie 3 (K3) vor. Unterschiede in der Komposition der Schlachtnebenprodukte könnten zu unterschiedlichen Prozessausbeuten führen.

Poulet-Hals

Poulet-Hals wird grundsätzlich gleich verwertet wie Poulet-Innereien (siehe Unterkapitel oben). Aus diesem Grund werden beim Poulet-Hals die gleichen Verwertungswege wie bei Poulet-Innereien betrachtet. Ebenfalls können Poulet-Hälse direkt anstelle von regulärem Poulet-Fleisch konsumiert werden.

Weitere Valorisierungswege werden in der Schweiz nicht angewendet. Die Weiterverarbeitung ist aufgrund der filigranen Knochen im Hals und hohen Kalziumwerten limitiert.

Die Verwertungs- und Valorisierungswege von Poulet-Hals sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Der detaillierte Beschrieb der Szenarien 9.1-9.6 kann dem Unterkapitel Poulet-Innereien ab Seite 49 entnommen werden.

Tabelle 11. Übersicht über die untersuchten Verwertungs-/Valorisierungswege des Nebenstroms Poulet-Hals inkl. Übersicht über die Datengrundlage und deren Qualität gemäss Definition in der Kapiteleinleitung. (+) = tiefe Qualität, (++) = mittlere Qualität, (+++) = hohe Qualität. Verw=Verwertung, Val=Valorisierung

Szenario	Valorisierungs-/Verwertungsweg	Generierte Produkte und Ausbeute in Menge pro kg NS	Substituierbare Produkte und Substitutionsfaktor	Datengrundlage Ökobilanz Verwertung / Valorisierung
9.1 Verw	Verbrennung	<ul style="list-style-type: none"> Wärme = 2.4 MJ Strom = 0.34 kWh 	<ul style="list-style-type: none"> Wärme aus Erdgas = 1 MJ / MJ Wärme Strommix = 1 kWh / kWh Strom 	BAFU:2024 (++)
9.2 Verw	Vergärung	<ul style="list-style-type: none"> Biogas = 9.3 MJ Dünger aus Gärgut = 0.008 kg NPK-Mix 	<ul style="list-style-type: none"> Erdgas 1 MJ / MJ Biogas Synthetischer Düngermix = 1 kg / kg NPK-Mix 	BAFU:2024 (++)
9.3 Verw	Kompostierung	<ul style="list-style-type: none"> Kompost als Dünger = 0.015 kg NPK-Mix Kompost als Bodenverbesserung = 0.9 kg Kompost 	<ul style="list-style-type: none"> Synthetischer Düngermix = 1 kg / kg NPK-Mix Stroh = 0.8 kg / kg Kompost 	Ecoinvent 3.9 (++)
9.4 Verw	Pet-Food	<ul style="list-style-type: none"> Pet-Food = 1 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Sojaproteinkonzentrat = 0.19 kg / kg Pet-Food 	Primärdaten Schweiz (+++)
9.5 Verw	Tiermehl	<ul style="list-style-type: none"> Tiermehl = 0.24 kg Tierfett = 0.13 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Fischmehl = 0.93 kg / kg Tiermehl Melasse = 1 kg / kg Tierfett 	Primärdaten Schweiz (++)
9.6 Val	Direkter Verzehr	<ul style="list-style-type: none"> Innerei = 1 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Pouletfleisch = 0.57 kg / kg Innerei 	Primärdaten Schweiz (++)

Datenqualität

Die Datenqualität der Szenarien 9.1-9.6 ist im Unterkapitel Poulet-Innereien auf Seite 49 beschrieben.

Schweins-Innereien

Schweins-Innereien werden ähnlich weiterverarbeitet wie die Poulet-Innereien (siehe Unterkapitel oben). Aus diesem Grund werden bei Schweins-Innereien die gleichen Valorisierungs- und Verwertungswege wie bei Poulet-Innereien betrachtet.

Die Verwertungs- und Valorisierungswege von Schweins-Innereien sind in Tabelle 12 zusammengefasst. Der detaillierte Beschrieb der Szenarien 10.1-10.8 kann dem Unterkapitel Poulet-Innereien ab Seite 49 entnommen werden.

Tabelle 12. Übersicht über die untersuchten Verwertungs-/Valorisierungswege des Nebenstroms Schweins-Innereien inkl. Übersicht über die Datengrundlage und deren Qualität gemäss Definition in der Kapiteleinleitung. (+) = tiefe Qualität, (++) = mittlere Qualität, (+++) = hohe Qualität. Verw=Verwertung, Val=Valorisierung

Szenario	Valorisierungs-/Verwertungsweg	Generierte Produkte und Ausbeute in Menge pro kg NS	Substituierbare Produkte und Substitutionsfaktor	Datengrundlage Ökobilanz Verwertung / Valorisierung
10.1 Verw	Verbrennung	<ul style="list-style-type: none"> Wärme = 1.7 MJ Strom = 0.24 kWh 	<ul style="list-style-type: none"> Wärme aus Erdgas = 1 MJ / MJ Wärme Strommix = 1 kWh / kWh Strom 	BAFU:2024 (++)
10.2 Verw	Vergärung	<ul style="list-style-type: none"> Biogas = 10.6 MJ Dünger aus Gärgut = 0.007 kg NPK-Mix 	<ul style="list-style-type: none"> Erdgas 1 MJ / MJ Biogas Synthetischer Düngermix = 1 kg / kg NPK-Mix 	BAFU:2024 (++)
10.3 Verw	Kompostierung	<ul style="list-style-type: none"> Kompost als Dünger = 0.006 kg NPK-Mix Kompost als Bodenverbesserung = 0.4 kg Kompost 	<ul style="list-style-type: none"> Synthetischer Düngermix = 1 kg / kg NPK-Mix Stroh = 0.8 kg / kg Kompost 	Ecoinvent 3.9 (++)
10.4 Verw	Pet-Food	<ul style="list-style-type: none"> Pet-Food = 1 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Sojaproteinkonzentrat = 0.3 kg / kg Pet-Food 	Primärdaten Schweiz (+++)
10.5 Verw	Tiermehl	<ul style="list-style-type: none"> Tiermehl = 0.24 kg Tierfett = 0.13 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Fischmehl = 0.93 kg / kg Tiermehl Melasse = 1 kg / kg Tierfett 	Primärdaten Schweiz (++)
10.6 Val	Direkter Verzehr	<ul style="list-style-type: none"> Innerei = 1 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Schweinefleisch = 0.97 kg / kg Innerei 	Primärdaten Schweiz (++)
10.7 Val	Fleischproteinkonzentrat	<ul style="list-style-type: none"> Fleischproteinisolat = 0.15 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Schweinefleisch = 4.25 kg / kg Fleischproteinisolat 	Literatur (+)
10.8 Val	Fleischextrudat	<ul style="list-style-type: none"> Fleischextrudat = 0.97 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Schweinefleisch = 0.97 kg / kg Fleischextrudat 	Literatur (+)

Datenqualität

Die Datenqualität der Szenarien 10.1-10.8 ist im Unterkapitel Poulet-Innereien auf Seite 49 beschrieben.

2.5 Sensitivitätsanalysen Nutzungsszenario

Für die im Kapitel 2.4 beschriebenen Nutzungsszenarien mit den grössten Unsicherheiten wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Die Tabelle 13 fasst zusammen, für welche der Szenarien eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt wurde, und welches alternative Nutzungsszenario jeweils berücksichtigt wurde.

Tabelle 13. Durchgeführte Sensitivitätsanalyse bezüglich der Annahmen zum Nutzungsszenario

Szenario	Nebenstrom	Verwertungs- / Valorisierungsweg	Substituierbares Produkt Standardszenario	Sensitivitätsanalyse und Substitutionsfaktor
2.1, 4.1, 5.1, 6.1, 7.1, 8.1, 9.1, 10.1	Kleie, Rapskuchen, Bier- , Mosttrester, Innereien, Poulet- Hals	Verbrennung	Schweizer Strommix	<ul style="list-style-type: none"> ■ Strom aus 100% Erdgas = 1 kWh/kWh Strom ■ Strom aus 100% erneuerbarer Energie = 1 kWh/kWh Strom
1.1, 2.2, 3.1, 4.2, 5.2, 6.2, 7.2, 8.2, 9.2, 10.2	Alle	Vergärung	Erdgas	<ul style="list-style-type: none"> ■ Grüner Wasserstoff = 0.008 kg/MJ Biogas
3.3	Melasse	Verfütterung	Pflanzenöl	<ul style="list-style-type: none"> ■ Tierisches Fett = 1kg /kg Futtermelasse
4.5	Rapspresskuchen	Rapsproteinisolat	Sojaproteinisolat	<ul style="list-style-type: none"> ■ Fleisch = 4.1 kg/kg Rapsproteinisolat
5.5	Biertrester	Fleischersatz	Tofu	<ul style="list-style-type: none"> ■ Fleisch = 0.8 kg/kg Fleischersatz
7.6, 8.7, 10.7	Innereien	Fleischproteinisolat	Fleisch	<ul style="list-style-type: none"> ■ Molkenproteinkonzentrat = 1.14 kg/kg Fleischproteinisolat

Für das Szenario der Verbrennung wurde aufgrund der Komplexität des Strommarktes und der Schwierigkeit das effektiv ersetzte Stromprodukt zu identifizieren, eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. In dieser wurde der Ersatz von Strom aus erneuerbaren Quellen und Strom aus 100% fossiler Quelle berücksichtigt. So kann die Spannweite der möglichen Einsparung aufgezeigt werden.

Ähnlich ist auch bei der Vergärung das substituierbare Produkt nicht eindeutig zu identifizieren und abhängig von der Marktsituation. Um die Robustheit der Annahme der Substitution von Erdgas zur prüfen, wurde eine Sensitivitätsanalyse mit der Substitution von grünem Wasserstoff (Wasserstoff produziert mit erneuerbarem Strom) durchgeführt.

Bei der Verfütterung von Melasse könnten grundsätzlich verschiedene Futtermittel ersetzt werden. Nebst dem Pflanzenöl ist der Einsatz von tierischem Fett zur Staubbinding ebenfalls

eine mögliche Alternative zur Melasse. Deshalb wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, in welcher von Futtermelasse als Alternative für Rinderfett ausgegangen wurde, wobei ebenfalls von einem 1:1 Ersatz ausgegangen wurde. Bei den anderen Nebenströmen wurde für das jeweilige Szenario zur Verfütterung keine separate Sensitivitätsanalyse durchgeführt, da in diesen Szenarien bereits ein Futtermittelmix berücksichtigt wurde, der einem Durchschnittsszenario aus verschiedenen Futtermitteln entspricht und die Nährstoff-Äquivalenz sicherstellt. Daher werden keine erheblichen Abweichungen erwartet.

Grundsätzlich kann Rapsproteinisolat ein anderes pflanzliches Protein ersetzen. Allerdings könnte das Rapsproteinisolat auch einem Fleischersatzprodukt beigemischt werden und so ein Fleischprodukt ersetzen. Deshalb wurde in einer Sensitivitätsanalyse der Ersatz von Fleisch durch Rapsproteinisolat analysiert. Bezogen auf den Proteingehalt kann theoretisch 4.1 kg Fleisch pro kg Rapsproteinisolat ersetzt werden. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass ein Fleischersatzprodukt aus Rapsprotein noch aus weiteren Zutaten bestehen würde, welche in der Sensitivitätsanalyse nicht berücksichtigt wurden.

Ähnlich kann die Valorisierung von Biertrester zu einem Fleischersatzprodukt nicht nur andere pflanzliche Fleischersatzprodukte wie Tofu ersetzen. Je nach Marktsituation könnte der Biertresterfleischersatz auch ein Fleischprodukt ersetzen. Die Auswirkung dieser alternativen Annahme auf die Resultate wird im Rahmen der Sensitivitätsanalyse analysiert. Unter Berücksichtigung der Unterschiede im Proteingehalt wurde davon ausgegangen, dass 0.8 kg Fleisch pro kg Biertrester-Fleischersatz substituiert werden könnte.

Die Anwendung von Fleischproteinisolat aus valorisierten Innereien ist aufgrund des ungewissen Marktpotenzials in der Schweiz relativ unklar. Aus diesem Grund wurde nebst der Substitution von Fleisch in einer Sensitivitätsanalyse analysiert, wie sich die Resultate ändern würden, wenn man davon ausgeht, dass das Fleischproteinisolat ein Molkenproteinkonzentrat z.B. in Sportlernahrung ersetzen würde.

3 Resultate

3.1 Ökobilanzen

Im folgenden Kapitel werden die Resultate aus der Ökobilanzierung der untersuchten Valorisierungs- und Verwertungswege für jeden Nebenstrom dargestellt.

Jeweils in der ersten Grafik des Nebenstromes ist die Netto-Bilanz dargestellt. Der Warenkorb und der Nebenstrom-Input (jeweils 1 kg des Nebenstroms), welche bei allen Systemen eines Nebenstromes die gleichgrosse Umweltbelastung verursachen, sind nicht dargestellt. So werden die Unterschiede zwischen den Valorisierungs-/Verwertungswegen deutlich und die absolute Einsparung von Umweltbelastung (bei einer negativen Netto-Umweltbilanz) resp. Zusatzbelastung (bei einer positiven Netto-Umweltbilanz) wird ersichtlich.

In der zweiten Grafik des jeweiligen Nebenstromes ist die Gesamtbilanz der untersuchten Systeme unter Berücksichtigung aller Prozesse innerhalb der Systemgrenzen (vgl. Kapitel 2.3 Systemgrenzen & Allokation) dargestellt. In dieser Grafik wird der Einfluss der Valorisierung/Verwertung auf das untersuchte Gesamtsystem ersichtlich. Ebenfalls werden hier die relativen Unterschiede durch die Darstellung der Einsparung (negative Prozentzahl) resp. Erhöhung (positive Prozentzahl) der Umweltbelastung verglichen mit dem Entsorgungsszenario (jeweils Verwertungsweg ganz links in der Grafik) dargestellt.

Die Einordnung der Nebenströme aus Umweltsicht auf einer Skala von 0-1 können dem Anhang B.2 entnommen werden.

Die Resultate zur Gesamtumweltbelastung (UBP) und THG-Emissionen weisen sehr ähnliche relative Unterschiede zwischen den Verwertungs- und Valorisierungswegen auf, weshalb in diesem Kapitel nur die Ergebnisse der Bewertung der Gesamtumweltbelastung grafisch dargestellt sind. Die grafische Darstellung und Erläuterungen der THG-Emissionen können dem Anhang B.1 entnommen werden. Die wichtigsten wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Bewertungsmethoden sind im Text erwähnt. Ebenfalls im Anhang B sind alle den Grafiken zugrundeliegenden Werte zusammengefasst (vgl. Anhang B.3).

Molke

Für den Nebenstrom Molke wurden sieben Valorisierungs- und Verwertungswege verglichen. Wie der Abbildung 4 entnommen werden kann, führen alle Wege zu einer Netto-Einsparung an Umweltbelastung, das heisst der Umweltnutzen durch die Substitution eines anderen Produktes überwiegt den Zusatzaufwand der Valorisierung/Verwertung der Molke.

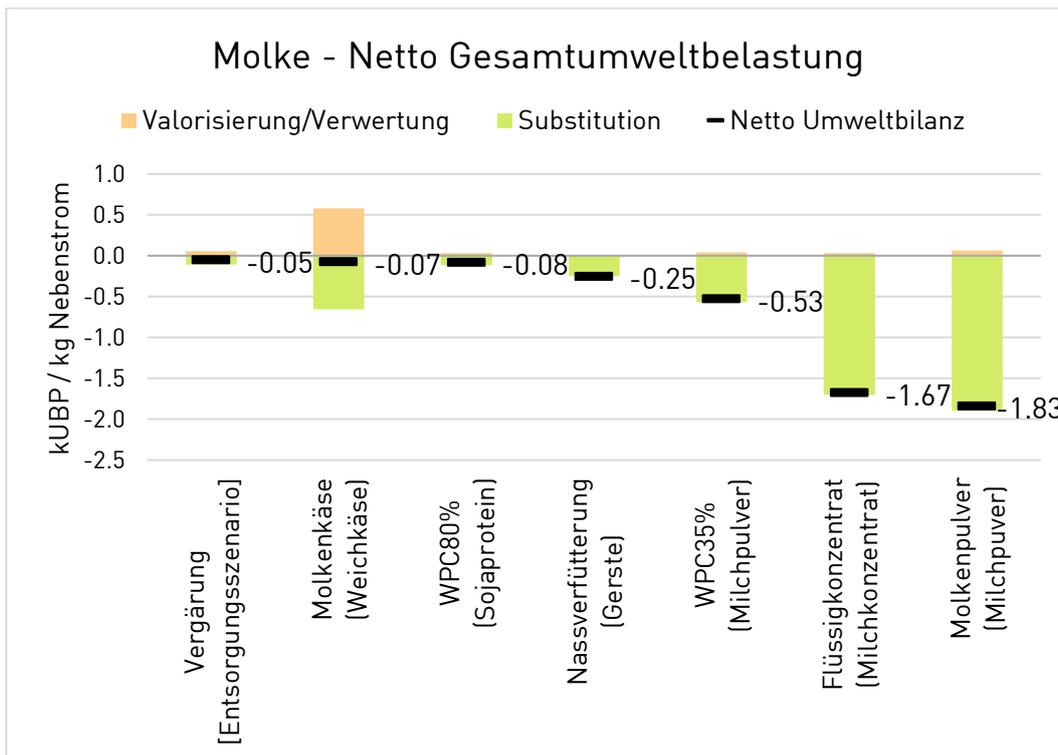


Abbildung 4: Netto-Gesamtumweltbelastung in kUBP pro kg Molke der untersuchten Valorisierungs- und Verwertungswege angeordnet nach zunehmender Einsparung an Umweltbelastung. Das Entsorgungsszenario ist unabhängig von der Höhe der Umwelteinsparung ganz links dargestellt. Der schwarze Balken zeigt die Nettobilanz. Ist diese negativ, kann eine Netto-Einsparung an Umweltbelastung durch die Valorisierung/Verwertung erreicht werden. Ist die Nettobilanz positiv, wird mehr Umweltbelastung durch die Valorisierung/Verwertung verursacht als eingespart werden kann. In runden Klammern ist jeweils das substituierbare Produkt aufgeführt.

Pro kg Molke ist die Einsparung am höchsten beim Molkenpulver, gefolgt von Flüssigkonzentrat und dem WPC35%. Dies ist vor allem auf die hohe Umweltbelastung des substituierbaren Produktes zurückzuführen. Das WPC80% führt, im Vergleich, zu einer relativ tiefen Einsparung an Umweltbelastung. Dies hat mit der tiefen Ausbeute zu tun, weshalb pro kg Nebenstrom nur wenig Produkt ersetzt werden kann. Auch die Valorisierung zum Molkenkäse führt zu einer ähnlich tiefen Einsparung wie das WPC80%. Dies ist auf die hohe Umweltbelastung der Molkenkäseproduktion zurückzuführen. Während bei den anderen Valorisierungswegen der Energieverbrauch den grössten Teil der Umweltbelastung ausmacht, verursacht bei der Molkenkäseproduktion die Zugabe von Magermilch rund 60% der Umweltbelastung. Die Zugabe von Magermilch wurden für die Ökobilanz in diesem Szenario berücksichtigt, um die Gleichwertigkeit mit dem substituierten Produkt (Weichkäse) sicherzustellen. Die Nassverfütterung schneidet etwas besser ab als die Valorisierungswege WPC80% und Molkenkäse jedoch schlechter als die anderen betrachteten Valorisierungswege. Der Umweltnutzen entsteht insbesondere dadurch, dass bei der direkten Verfütterung kein

Verwertungsaufwand entsteht. Die Verwertung in der Vergärungsanlage hat den tiefsten Umweltnutzen, ähnlich tief wie die Molkenkäseproduktion und das WPC80%, da die substituierbaren Produkte Erdgas und Dünger vergleichsweise zu wenig Einsparung an Umweltbelastung führen.

Werden die Valorisierungs- und Verwertungswege mit der Vergärung von Molke verglichen, kann zwischen 0.3% (beim Molkenkäse) und 19% (beim Molkenpulver) Umweltbelastung pro kg verwerteter/valorisierter Nebenstrom eingespart werden (siehe Abbildung 5).

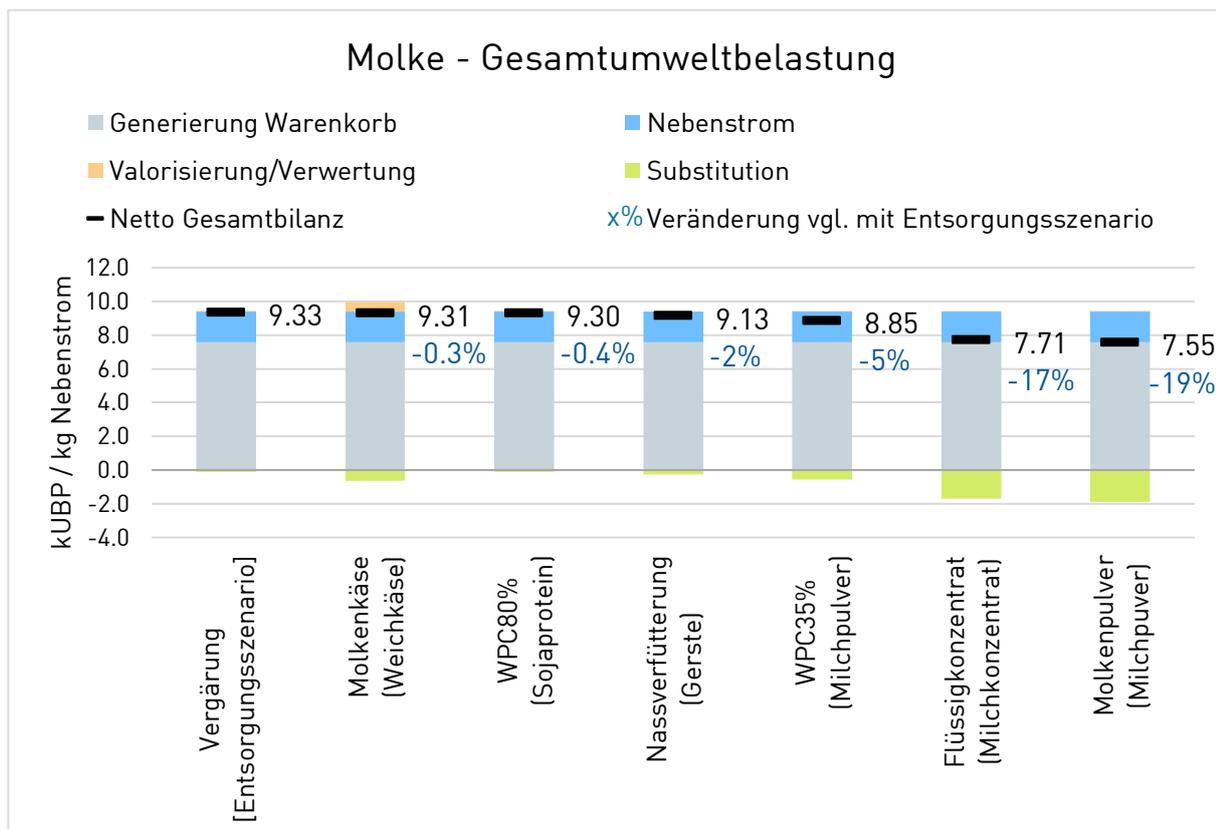


Abbildung 5: Gesamtumweltbelastung in kUBP pro kg Molke der untersuchten Valorisierungs-/Verwertungswege unter Berücksichtigung der vollständigen Systemgrenzen, angeordnet nach zunehmender Einsparung an Umweltbelastung. Das Entsorgungsszenario ist unabhängig von der Höhe der Umwelteinsparung ganz links dargestellt. Die schwarze Zahl zeigt, wie viel Umweltbelastung Netto durch das Gesamtsystem verursacht wird. Je tiefer diese ist, desto sinnvoller ist der Valorisierungs-/Verwertungsweg für die Umwelt. Die blaue Prozentzahl zeigt die Einsparung (negative Prozentzahl) resp. Erhöhung (positive Prozentzahl) der Umweltbelastung verglichen mit dem Entsorgungsszenario. In runden Klammern ist jeweils das substituierbare Produkt aufgeführt.

Bezüglich der THG-Emissionen gibt es zwei wesentliche Unterschiede (vgl. Abbildung 33 im Anhang B.1). Die Nassverfütterung schneidet weniger gut ab und verursacht eine ähnlich hohe THG-Einsparung wie die Szenarien WPC80% und Vergärung, was mit der im Vergleich tieferen Einsparung an THG-Emissionen durch die Substitution erklärt werden kann. Zudem gibt es leichte Verschiebungen in der Einordnung der Szenarien Vergärung, Molkenkäse und WPC80%, welche aufgrund der sehr kleinen Unterschiede als wenig bedeutend eingestuft werden. Im Vergleich zur Einordnung gemäss UBPs schneidet die Vergärung bezüglich THG-Emissionen

tendenziell besser ab, weil die Einsparung an Umweltbelastung durch die Substitution höher ausfällt, wenn man nur die THG-Emissionen betrachtet, da unter anderem ein fossiler Energieträger ersetzt werden kann.

Sensitivitätsanalyse Nutzungsszenario

Beim Nebenstrom Molke wurde die Sensitivität bezüglich des substituierbaren Produkts bei der Vergärung geprüft (vgl. Tabelle 14). Wenn nicht Erdgas wie im Standardszenario, sondern grüner Wasserstoff substituiert wird, ist der Netto-Einsparung an Umweltbelastung und THG-Emissionen tiefer. Bezüglich der THG-Emissionen überwiegen die THG-Emissionen aus der Vergärung sogar den Nutzen aus der Substitution von Wasserstoff. Die Sensitivitätsanalyse bestätigt also den im Vergleich tiefen Umweltnutzen durch die Vergärung von Molke.

Tabelle 14: Resultate aus der Sensitivitätsanalyse zum Nutzungsszenario beim Nebenstrom Molke.

	Sensitivitätsanalyse Vergärung	
	Substitution Grüner H2	Substitution Erdgas (Standard)
Netto-Umweltbilanz [kUBP]	-0.01	-0.05
Netto-Umweltbilanz [kg CO ₂ -eq]	0.02	-0.02

Weizenkleie

Für den Nebenstrom Weizenkleie wurden acht Valorisierungs- und Verwertungswege verglichen. Wie der Abbildung 6 entnommen werden kann, führen alle Wege zu einer Netto-Einsparung an Umweltbelastung, das heisst der Umweltnutzen durch die Substitution eines anderen Produktes überwiegt den Zusatzaufwand der Valorisierung/Verwertung der Weizenkleie.

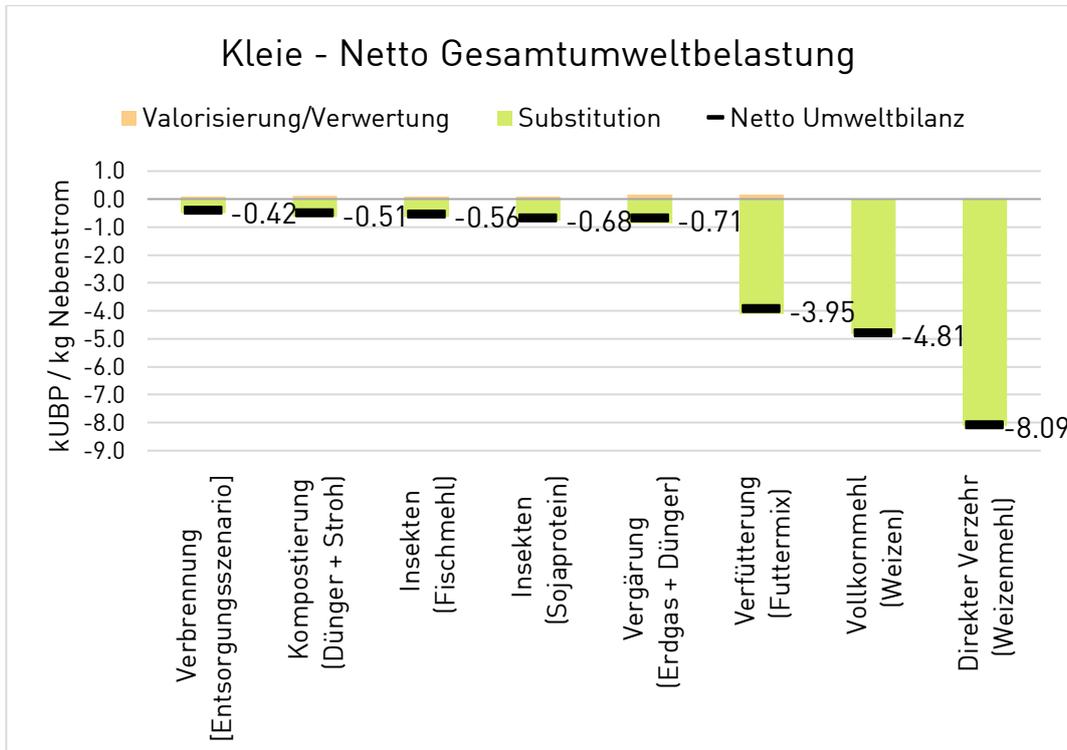


Abbildung 6: Netto-Gesamtumweltbelastung in kUBP pro kg Weizenkleie der untersuchten Valorisierungs- und Verwertungswege angeordnet nach zunehmender Einsparung an Umweltbelastung. Das Entsorgungsszenario ist unabhängig von der Höhe der Umwelteinsparung ganz links dargestellt. Der schwarze Balken zeigt die Nettobilanz. Ist diese negativ, kann eine Netto-Einsparung an Umweltbelastung durch die Valorisierung/Verwertung erreicht werden. Ist die Nettobilanz positiv, wird mehr Umweltbelastung durch die Valorisierung/Verwertung verursacht als eingespart werden kann. In runden Klammern ist jeweils das substituierbare Produkt aufgeführt.

Pro kg Weizenkleie ist die Einsparung am höchsten, wenn Weizenkleie direkt verzehrt wird (z.B. durch Beimischung in Müsli oder Gebäck). Ebenfalls ein hoher Umweltnutzen können durch die Vollkornmehlherstellung und die Verfütterung erreicht werden. Die Vollkornmehlherstellung schneidet leicht schlechter ab als der direkte Verzehr, weil bei ersterem die Einsparung an Umweltbelastung durch die Substitution tiefer ausfällt. Bei der Herstellung von Vollkornmehl wird weniger Weizen als bei der Weissmehlproduktion benötigt, weil die Kleie dem Mehl beigemischt wird und nicht anderweitig verwertet werden muss. Daher bezieht sich die Einsparung an Umweltbelastung auf die ersetzbare Menge Weizen (siehe auch Erklärung in Kapitel 2.4, Seite 35). Beim direkten Verzehr hingegen wurde vom Ersatz von Weissmehl ausgegangen, was aufgrund des verarbeiteten Weizenproduktes zu einer höheren Einsparung an Umweltbelastung führt. Es ist zu berücksichtigen, dass sowohl bei der Valorisierung im Vollkornmehl als auch beim direkten Verzehr die maximal beimischbare Menge an Weizenkleie aus technischen Gründen limitiert ist. Die Verfütterung schneidet ebenfalls relativ gut ab, weil pflanzliche Futtermittel substituiert werden, welche mit relativ hoher Umweltbelastung aus dem Anbau verbunden sind. Die Vergärung, die Insektenzucht, die Kompostierung und die Verbrennung führen im Vergleich zu tieferen Umweltbelastungseinsparungen (in absteigender Reihenfolge). Der Prozess der Insektenzucht führt zwar dank dem energieoptimierten Verfahren zu wenig zusätzlicher Umweltbelastung. Allerdings fällt aufgrund der tiefen Ausbeute auch die Einsparung an Umweltbelastung durch

die substituierbaren Produkte vergleichsweise tief aus. Dies ist sowohl beim Einsatz des Insektenmehls als Fischfutter als auch beim Einsatz für die menschliche Ernährung anstelle von pflanzlichem Protein der Fall. Auch die Verwertungswege Vergärung, Kompostierung und Verbrennung führen aufgrund der tiefen erwarteten Umwelteinsparung durch die substituierbaren Produkte zu vergleichsweise wenig Netto-Einsparung.

Werden die Valorisierungs- und Verwertungswege mit der Verbrennung von Weizenkleie verglichen, kann zwischen 0.2% (bei der Kompostierung) und 16% (beim direkten Verzehr) Umweltsparung pro kg verwerteter/valorisierter Nebenstrom eingespart werden (siehe Abbildung 7).

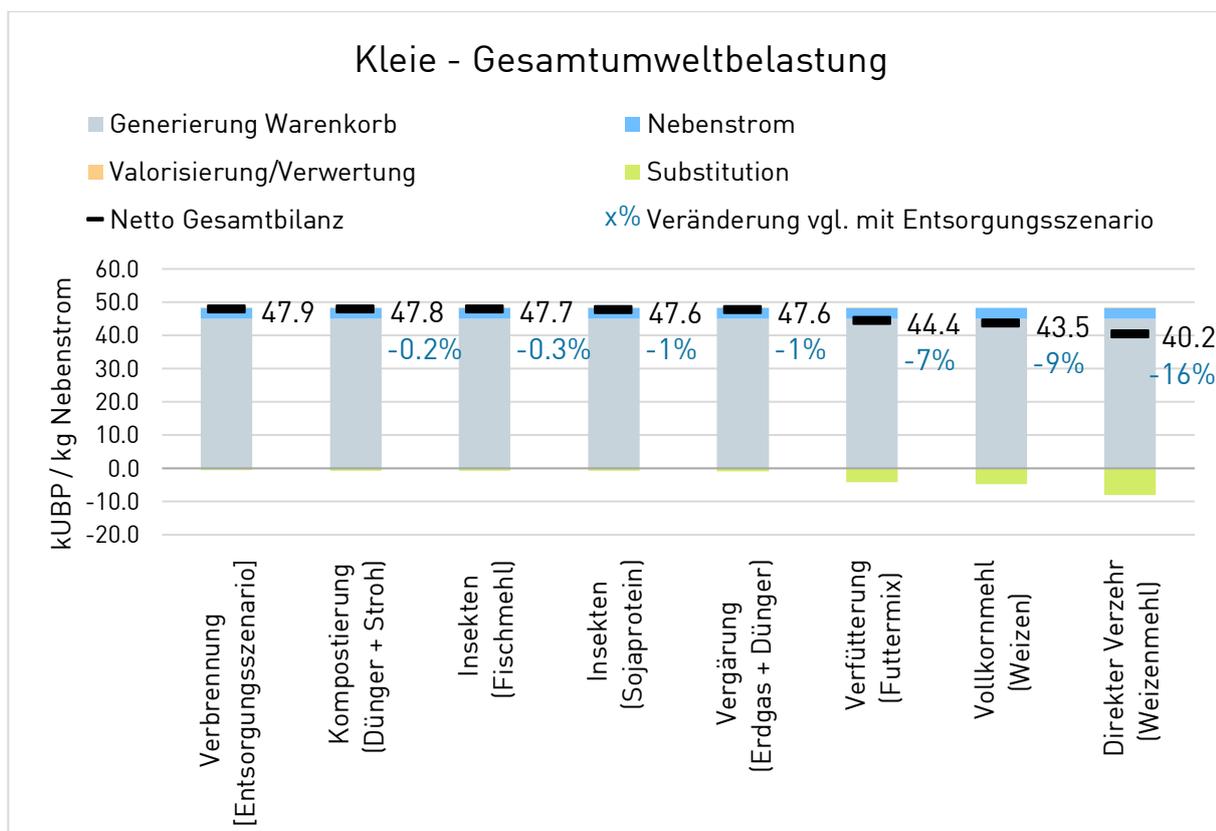


Abbildung 7: Gesamtumweltbelastung in kUBP pro kg Weizenkleie der untersuchten Valorisierungs-/Verwertungswege unter Berücksichtigung der vollständigen Systemgrenzen, angeordnet nach zunehmender Einsparung an Umweltbelastung. Das Entsorgungsszenario ist unabhängig von der Höhe der Umwelteinsparung ganz links dargestellt. Die schwarze Zahl zeigt, wie viel Umweltbelastung Netto durch das Gesamtsystem verursacht wird. Je tiefer diese ist, desto sinnvoller ist der Valorisierungs-/Verwertungsweg für die Umwelt. Die blaue Prozentzahl zeigt die Einsparung (negative Prozentzahl) resp. Erhöhung (positive Prozentzahl) der Umweltbelastung verglichen mit dem Entsorgungsszenario. In runden Klammern ist jeweils das substituierbare Produkt aufgeführt.

Bezüglich der THG-Emissionen gibt es drei relevante Unterschiede (vgl. Abbildung 34 Anhang B.1). Die Verbrennung und Vergärung der Weizenkleie führen zu einer höheren Einsparung an THG-Emissionen und schneiden somit tendenziell besser ab. Das hat vor allem damit zu tun, dass die Einsparung an Umweltbelastung durch die Substitution bei der Verbrennung und Vergärung höher ausfällt, wenn man nur die THG-Emissionen betrachtet, da unter anderem

fossile Energieträger ersetzt werden können. Ein weiterer Unterschied liegt beim Szenario, in welchem das Insektenmehl aus der Insektenzucht Fischmehl ersetzt. Dieses Szenario führt zur tiefsten Einsparung an THG-Emissionen. Dies hat damit zu tun, dass die Umweltbelastung (UBPs) der Fischmehlproduktion vor allem auf die Überfischung und die Emission von Wasserschadstoffen und nicht auf THG-Emissionen zurückzuführen ist. Deshalb ist, wenn lediglich THG-Emissionen betrachtet werden, der Umweltnutzen der Insektenzucht tief. Bei einer Betrachtung der Gesamtumweltbelastung ist der Nutzen jedoch höher.

Sensitivitätsanalyse Nutzungsszenario

Beim Nebenstrom Weizenkleie wurde die Sensitivität bezüglich der substituierbaren Produkte bei der Verbrennung und Vergärung geprüft (vgl. Tabelle 15). Wenn bei der Verbrennung anstelle vom Schweizer Strommix Strom aus fossilen Quellen ersetzt wird, führt die Verbrennung nicht mehr zum tiefsten Umweltnutzen, sondern zu einer etwa gleich hohen Einsparung an Umweltbelastung wie die Kompostierung und Insektenzucht bei Ersatz von Fischmehl führt, jedoch immer noch bedeutend tiefer als die betrachteten Valorisierungswege und die Verfütterung. Wird vom Ersatz von Strom aus erneuerbaren Quellen ausgegangen, hat dies keinen wesentlichen Einfluss auf die Resultate und die Einordnung der Szenarien. Diese Erkenntnisse bestätigen den grundsätzlichen vergleichsweise tiefen Umweltnutzen der Verbrennung von Rapspresskuchen.

Wenn nicht Erdgas wie im Standardszenario, sondern grüner Wasserstoff substituiert wird, schneidet die Vergärung sowohl bezüglich der Gesamtumweltbelastung als auch den THG-Emissionen im Vergleich wesentlich schlechter ab, sogar schlechter als alle anderen untersuchten Verwertungs- und Valorisierungswege. Die Sensitivitätsanalyse bestätigt also den im Vergleich tiefen Umweltnutzen durch die Vergärung von Weizenkleie.

Tabelle 15: Resultate aus der Sensitivitätsanalyse zum Nutzungsszenario beim Nebenstrom Weizenkleie.

	Sensitivitätsanalyse Verbrennung			Sensitivitätsanalyse Vergärung	
	Substitution Strom fossil	Substitution Strom erneuerbar	Substitution Strommix (Standard)	Substitution Grüner H2	Substitution Erdgas (Standard)
Netto-Umweltbilanz [kUBP]	-0.56	-0.24	-0.42	-0.25	-0.71
Netto-Umweltbilanz [kg CO2-eq]	-0.49	-0.22	-0.27	-0.01	-0.59

Melasse

Für den Nebenstrom Melasse wurden sechs Valorisierungs- und Verwertungswege verglichen. Wie der Abbildung 8 entnommen werden kann, führen alle Wege zu einer Netto-Einsparung an Umweltbelastung, das heisst der Umweltnutzen durch die Substitution eines anderen Produktes überwiegt den Zusatzaufwand der Valorisierung/Verwertung der Melasse.

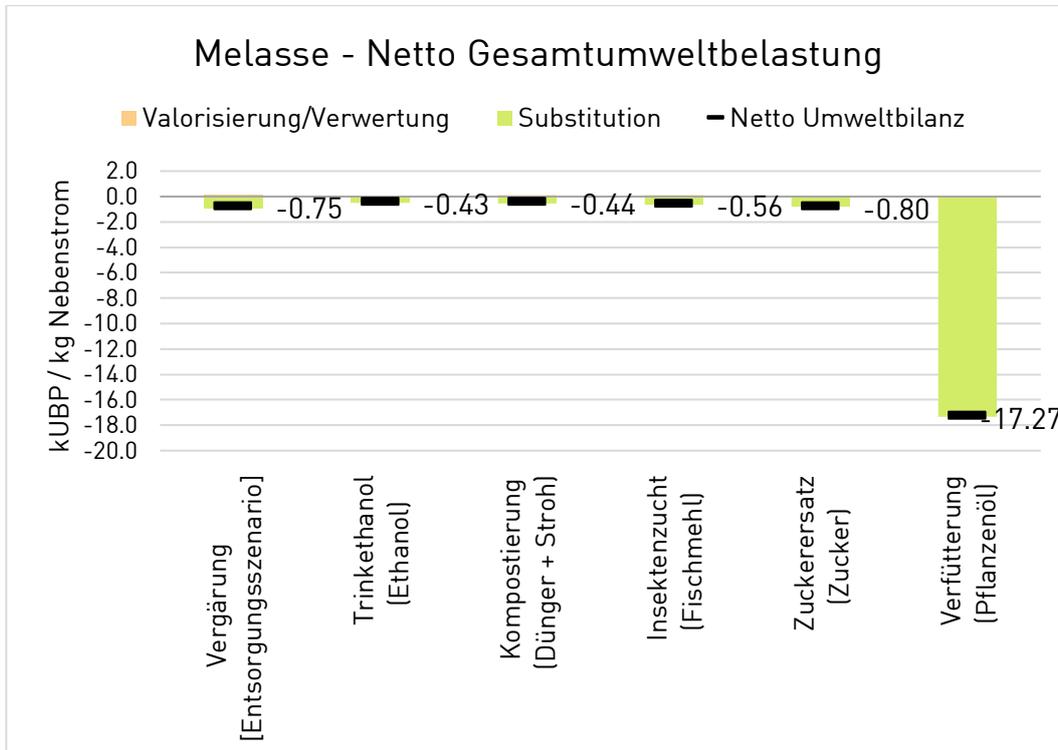


Abbildung 8: Netto-Gesamtumweltbelastung in kUBP pro kg Melasse der untersuchten Valorisierungs- und Verwertungswege angeordnet nach zunehmender Einsparung an Umweltbelastung. Das Entsorgungsszenario ist unabhängig von der Höhe der Umwelteinsparung ganz links dargestellt. Der schwarze Balken zeigt die Nettobilanz. Ist diese negativ, kann eine Netto-Einsparung an Umweltbelastung durch die Valorisierung/Verwertung erreicht werden. Ist die Nettobilanz positiv, wird mehr Umweltbelastung durch die Valorisierung/Verwertung verursacht als eingespart werden kann. In runden Klammern ist jeweils das substituierbare Produkt aufgeführt.

Pro kg Melasse ist die Einsparung mit Abstand am höchsten bei der Fütterung. Während für die Verwertung zur Futtermelasse kaum Umweltbelastung verursacht wird, kann mit der Substitution von Pflanzenöl in Futtermitteln sehr viel Umweltbelastung eingespart werden, was sowohl auf die hohe Umweltbelastung von Pflanzenöl, als auch darauf zurückzuführen ist, dass bei der Verfütterung keine Verluste von Melasse anfallen. Jedoch ist die dem Futtermittel beimischbare Menge an Melasse aus technischen Gründen limitiert (Agroscope, 2016). Vergleichsweise wenig Einsparung an Umweltbelastung kann mit den Valorisierungswegen Zuckerersatz, Insektenzucht und Trinkethanol erreicht werden. Die Valorisierungswegen haben zwar alle tiefe Zusatzumweltbelastung durch den Valorisierungsprozess. Der Ersatz von Zucker mit Melasse führt allerdings wegen der vergleichsweise eher tiefen Umweltbelastung von Zucker und dem tiefen Zuckergehalt von Melasse zu einer tiefen Einsparung an Umweltbelastung durch die Substitution. Auch bei der Substitution von herkömmlichem Trinkethanol mit Trinkethanol aus Melasse ist die substituierbare Umweltbelastung vergleichsweise tief. Aus den gleichen Gründen wie bei der Weizenkleie fällt der Umweltnutzen durch die Insektenzucht ähnlich tief aus. Der Prozess der Insektenzucht führt zwar dank dem energieoptimierten Verfahren zu wenig zusätzlicher Umweltbelastung. Allerdings fällt auch aufgrund der tiefen Ausbeute die Einsparung an Umweltbelastung durch die substituierbaren Produkte vergleichsweise tief aus. Die Vergärung führt tendenziell zu einem höheren Umweltnutzen als die Herstellung von Trinkethanol und der Insektenzucht, jedoch einem

tiefere Nutzen als der Zuckerersatz. Dies ist auch auf den hohen Energiegehalt in der Melasse zurückzuführen. Die Kompostierung führt zu einer ähnlich hohen Einsparung an Umweltbelastung wie die Trinkethanolherstellung.

Werden die Valorisierungs- und Verwertungswege mit der Vergärung von Melasse verglichen, kann zwischen 0.5% höhere Umweltbelastung (bei der Herstellung von Trinkethanol) und 55% tiefere Umweltbelastung (bei der Verfütterung) pro kg verwerteter/valorisierter Nebenstrom entstehen (siehe Abbildung 9).

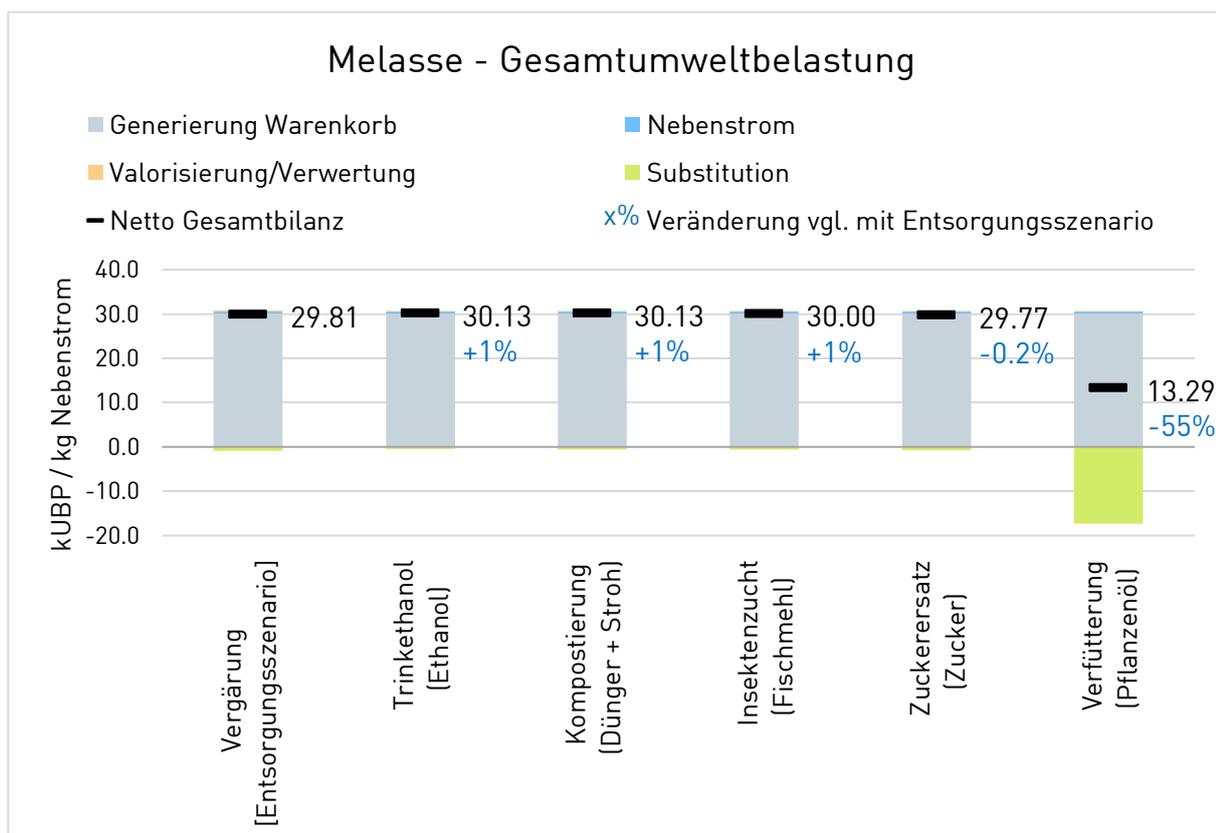


Abbildung 9: Gesamtumweltbelastung in kUBP pro kg Melasse der untersuchten Valorisierungs-/Verwertungswege unter Berücksichtigung der vollständigen Systemgrenzen, angeordnet nach zunehmender Einsparung an Umweltbelastung. Das Entsorgungsszenario ist unabhängig von der Höhe der Umwelteinsparung ganz links dargestellt. Die schwarze Zahl zeigt, wie viel Umweltbelastung Netto durch das Gesamtsystem verursacht wird. Je tiefer diese ist, desto sinnvoller ist der Valorisierungs-/Verwertungsweg für die Umwelt. Die blaue Prozentzahl zeigt die Einsparung (negative Prozentzahl) resp. Erhöhung (positive Prozentzahl) der Umweltbelastung verglichen mit dem Entsorgungsszenario. In runden Klammern ist jeweils das substituierbare Produkt aufgeführt.

Bezüglich der THG-Emissionen gibt es zwei relevante Unterschiede (vgl. Abbildung 35im Anhang B.1). Die Vergärung von Melasse führen zu einer bedeutend höheren Einsparung an THG-Emissionen. Das hat vor allem damit zu tun, dass die Einsparung an Umweltbelastung durch die Substitution bei der Vergärung höher ausfällt, wenn man nur die THG-Emissionen betrachtet, da unter anderem fossile Energieträger ersetzt werden können. Ausserdem hat die Melasse eine relativ hohe Energiedichte, wodurch viel Methan generiert wird. Ein weiterer Unterschied liegt bei der Insektenzucht. Dieses Szenario führt zur tiefsten Einsparung an THG-

Emissionen. Dies hat damit zu tun, dass die Umweltbelastung (UBPs) der ersetzbaren Fischmehlproduktion vor allem auf die Überfischung und die Emission von Wasserschadstoffen zurückzuführen ist. Deshalb ist der Ersatz von Fischmehl vor allem aus Sicht der UBPs sinnvoll, jedoch weniger aus Sicht der THG-Emissionen.

Sensitivitätsanalyse Nutzungsszenario

Beim Nebenstrom Melasse wurde die Sensitivität bezüglich des substituierbaren Produkts bei der Vergärung und der Verfütterung geprüft. Wenn nicht Erdgas wie im Standardszenario, sondern grüner Wasserstoff substituiert wird, schneidet die Vergärung sowohl bezüglich der Gesamtumweltbelastung als auch den THG-Emissionen im Vergleich bedeutend schlechter ab, Dies bestätigt den im Vergleich tiefen Umweltnutzen durch die Vergärung von Melasse.

Bei der Verfütterung wurde geprüft, wie sich die Resultate verändern, wenn nicht Pflanzenöl, sondern tierisches Fett, das zum Teil ebenfalls in der Futtermittelindustrie zur Staubbindung eingesetzt wird, substituiert wird. In diesem Fall würde der Umweltnutzen sowohl bezogen auf die UBPs und die THG-Emissionen wesentlich steigen. Somit bestätigt die Sensitivitätsanalyse auch hier den hohen positiven Umweltnutzen durch die Verfütterung.

Tabelle 16: Resultate aus der Sensitivitätsanalyse zum Nutzungsszenario beim Nebenstrom Melasse.

	Sensitivitätsanalyse Vergärung		Sensitivitätsanalyse Verfütterung	
	Substitution Grüner H2	Substitution Erdgas (Standard)	Substitution tierisches Fett	Substitution Pflanzenöl (Standard)
Netto-Umweltbilanz [kUBP]	-0.27	-0.75	-25.80	-17.27
Netto-Umweltbilanz [kg CO2-eq]	-0.01	-0.63	-7.91	-1.83

Rapspresskuchen

Für den Nebenstrom Rapspresskuchen wurden sechs Valorisierungs- und Verwertungswege verglichen. Wie der Abbildung 10 entnommen werden kann, führen alle Wege zu einer Netto-Einsparung an Umweltbelastung, das heisst der Umweltnutzen durch die Substitution eines anderen Produktes überwiegt den Zusatzaufwand der Valorisierung/Verwertung des Rapspresskuchens.

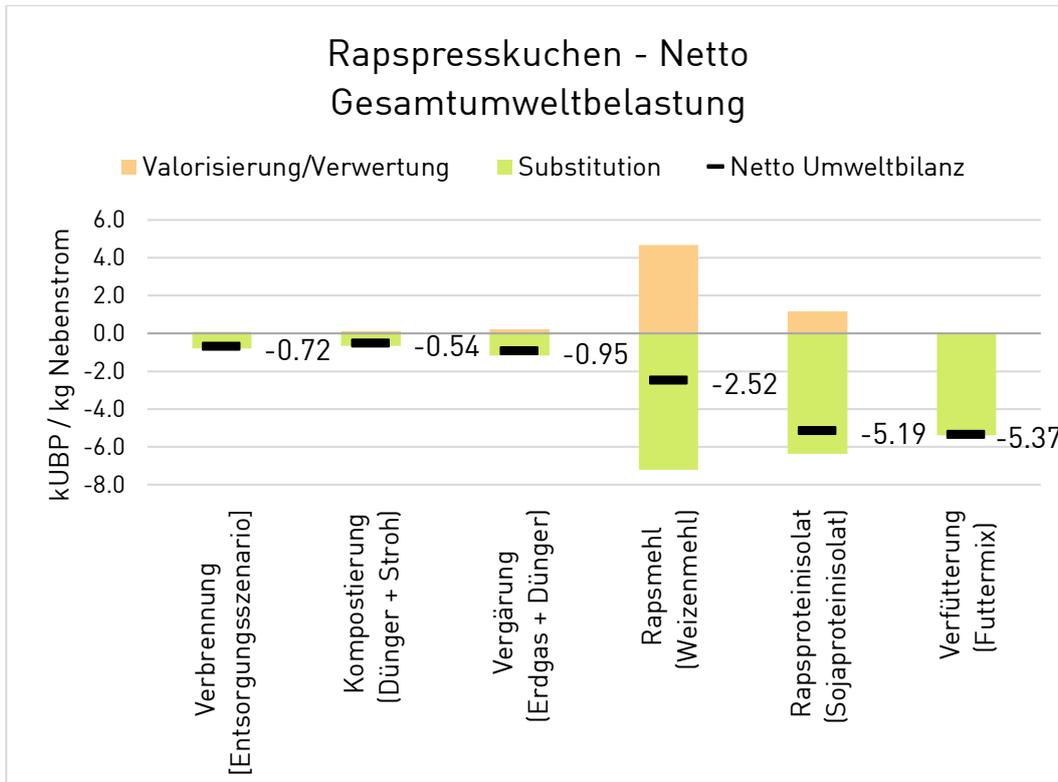


Abbildung 10: Netto-Gesamtumweltbelastung in kUBP pro kg Rapspresskuchen der untersuchten Valorisierungs- und Verwertungswege angeordnet nach zunehmender Einsparung an Umweltbelastung. Das Entsorgungsszenario ist unabhängig von der Höhe der Umwelteinsparung ganz links dargestellt. Der schwarze Balken zeigt die Nettobilanz. Ist diese negativ, kann eine Netto-Einsparung an Umweltbelastung durch die Valorisierung/Verwertung erreicht werden. Ist die Nettobilanz positiv, wird mehr Umweltbelastung durch die Valorisierung/Verwertung verursacht als eingespart werden kann. In runden Klammern ist jeweils das substituierbare Produkt aufgeführt.

Pro kg Rapspresskuchen ist die Einsparung am höchsten bei der Verfütterung, ähnlich hoch wie bei der Herstellung von Rapsproteinisolat. Beim Rapsproteinisolat ist die Einsparung an Umweltbelastung durch den Ersatz von Sojaproteinisolat trotz der tiefen Ausbeute hoch, da Sojaproteinisolat eine hohe Umweltbelastung verursacht. Bei der Verfütterung haben die ersetzten Futtermittel zwar eine tiefere Umweltbelastung und somit eine tiefere Einsparung an Umweltbelastung durch die Substitution als das Sojaproteinisolat, durch die Verfütterung von Rapspresskuchen ohne Verluste ist die Einsparung an Umweltbelastung dennoch beinahe gleich hoch. Da die Herstellung von Rapsproteinisolat mit einer höheren Umweltbelastung verbunden ist als die Verfütterung, bei welcher nur Umweltbelastung vom Transport des Rapspresskuchens zur Futtermühle entsteht, ist der Umweltnutzen durch die Verfütterung leicht höher. Aus den gleichen Gründen führt auch die Valorisierung zu Rapsmehl zu einem tieferen Umweltnutzen als die Verfütterung. Die Valorisierung von Rapsmehl ist besonders energieintensiv, da der Rapspresskuchen enzymatisch behandelt und im Anschluss im Ofen getrocknet wird. Pro kg verwerteten Rapspresskuchen ist die Herstellung von Rapsmehl unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen zum Produktionsprozess sogar noch energieintensiver (ca. 45%) als die Rapsproteinisolat-Herstellung. Bei beiden Valorisierungsverfahren verursacht der Energieverbrauch rund 95% der Umweltbelastung. Im Vergleich zu den drei bereits erwähnten Wegen führen die Verwertungen Verbrennung, Kompostierung und Vergärung zu einer vergleichsweise tiefen Umwelteinsparung, wobei die

Vergärung tendenziell besser abschneidet als die anderen beiden Wege. Dies ist mit der tiefen erwarteten Umwelteinsparung durch die substituierbaren Produkte zu erklären.

Werden die Valorisierungs- und Verwertungswege mit der Verbrennung von Rapspresskuchen verglichen, kann zwischen 0.5% höhere Umweltbelastung (bei der Kompostierung) und 12% tiefere Umweltbelastung (bei der Verfütterung) pro kg verwerteter/valorisierter Nebenstrom entstehen (siehe Abbildung 11).

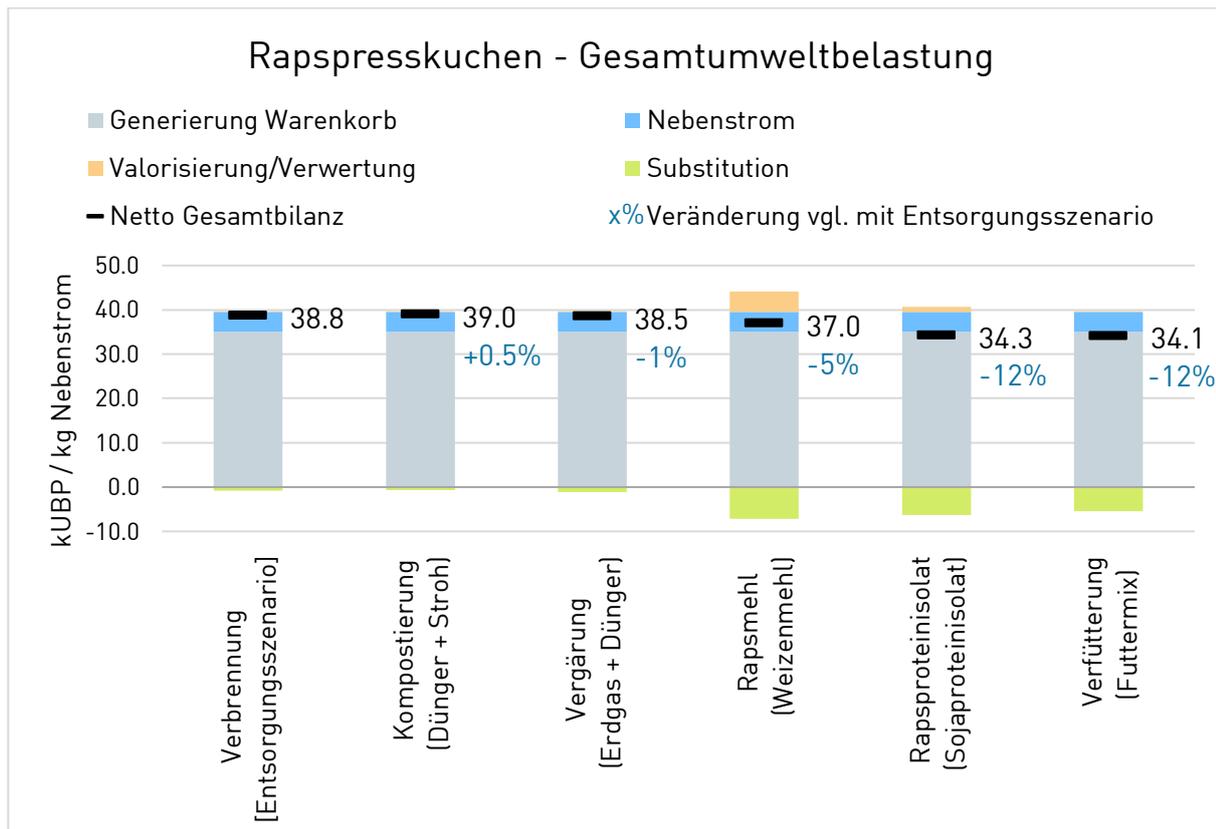


Abbildung 11: Gesamtumweltbelastung in kUBP pro kg Rapspresskuchen der untersuchten Valorisierungs-/Verwertungswege unter Berücksichtigung der vollständigen Systemgrenzen, angeordnet nach zunehmender Einsparung an Umweltbelastung. Das Entsorgungsszenario ist unabhängig von der Höhe der Umwelteinsparung ganz links dargestellt. Die schwarze Zahl zeigt, wie viel Umweltbelastung Netto durch das Gesamtsystem verursacht wird. Je tiefer diese ist, desto sinnvoller ist der Valorisierungs-/Verwertungsweg für die Umwelt. Die blaue Prozentzahl zeigt die Einsparung (negative Prozentzahl) resp. Erhöhung (positive Prozentzahl) der Umweltbelastung verglichen mit dem Entsorgungsszenario. In runden Klammern ist jeweils das substituierbare Produkt aufgeführt.

Bezüglich der THG-Emissionen gibt es einige relevante Unterschiede (vgl. Abbildung 36 im Anhang B.1). Die Verfütterung führt im Vergleich zu einem weniger hohen Umweltnutzen, da die Umweltbelastung der substituierbaren Futtermittel vor allem durch andere Umweltwirkungen als THG-Emissionen dominiert werden (z.B. Pflanzenschutzmittel-, Düngereinsatz) und so die Einsparung an THG-Emissionen im Vergleich weniger ins Gewicht fällt. Dadurch schneidet bezüglich der Einsparung an THG-Emissionen die Valorisierung zu Rapsproteinisolat am besten ab. Ein weiterer wesentlicher Unterschied liegt bei der Valorisierung zu Rapsmehl. Diese führt unter den getroffenen Annahmen zu mehr THG-

Emissionen, als durch den Ersatz von Weizenmehl eingespart werden kann. Ähnlich wie bei den UBPs fällt hier der hohe Energieverbrauch für die Trocknung des Rapsmehl ins Gewicht. Auch die Einsparung an THG-Emissionen für das Weizenmehl fällt vergleichsweise tiefer aus, da bei der Weizenmehlproduktion vor allem Umweltwirkungen durch den Pflanzenschutzmittel- oder Düngereinsatz dominieren, welche weniger THG-relevant sind. Das Szenario Rapsmehl führt also nur zu einem Umweltnutzen, wenn die Gesamtumweltbelastung betrachtet wird, jedoch nicht, wenn nur THG-Emissionen berücksichtigt werden.

Sensitivitätsanalyse Nutzungsszenario

Beim Nebenstrom Rapspresskuchen wurde die Sensitivität bezüglich der substituierbaren Produkte bei der Verbrennung, Vergärung und beim Rapsproteinisolat geprüft (vgl. Tabelle 16).

Wenn bei der Verbrennung anstelle vom Schweizer Strommix Strom aus fossilen Quellen ersetzt wird, führt die Verbrennung zu einem leicht höheren Umweltnutzen, ähnlich hoch wie die Vergärung, jedoch immer noch bedeutend tiefer als die betrachteten Valorisierungswege und die Verfütterung. Im Fall der Substitution von Strom aus erneuerbaren Quellen schneidet die Verbrennung grundsätzlich schlechter ab. Diese Erkenntnisse bestätigen den grundsätzlichen im Vergleich tiefen Umweltnutzen der Verbrennung von Rapspresskuchen.

Wenn nicht Erdgas wie im Standardszenario, sondern grüner Wasserstoff substituiert wird, schneidet die Vergärung sowohl bezüglich der Gesamtumweltbelastung als auch den THG-Emissionen im Vergleich wesentlich schlechter ab, sogar schlechter als alle anderen untersuchten Verwertungs- und Valorisierungswege. Dies bestätigt den im Vergleich tiefen Umweltnutzen durch die Vergärung von Rapspresskuchen

Beim Standardszenario zum Rapsproteinisolat wurde davon ausgegangen, dass ein anderes pflanzliches Proteinisolat ersetzt werden kann. Jedoch werden Proteinisolate oft auch in Fleischersatzprodukten eingesetzt. Daher wurde in der Sensitivitätsanalyse geprüft, wie sich die Resultate verändern, wenn Fleisch substituiert werden würde. Der Umweltnutzen bei einer Substitution von Fleisch ist wesentlich höher verglichen mit dem Standard-Szenario, sowohl bezüglich UBPs als auch bezüglich THG-Emissionen. Dies bestätigt das Resultat, dass die Valorisierung zu Rapsproteinisolat mit einem im Vergleich sehr hohen Umweltnutzen verbunden ist.

Tabelle 17: Resultate aus der Sensitivitätsanalyse zum Nutzungsszenario beim Nebenstrom Rapspresskuchen.

	Sensitivitätsanalyse Verbrennung			Sensitivitätsanalyse Vergärung		Sensitivitätsanalyse Rapsproteinisolat	
	Substitution Strom fossil	Substitution Strom erneuerbar	Substitution Strommix (Standard)	Substitution Grüner H2	Substitution Erdgas (Standard)	Substitution Fleisch	Substitution Sojaisolat (Standard)
Netto-Umweltbilanz [kUBP]	-0.93	-0.43	-0.72	-0.34	-0.95	-51.39	-5.19
Netto-Umweltbilanz [kg CO2-eq]	-0.80	-0.38	-0.45	-0.02	-0.81	-12.62	-1.83

Biertrester

Für den Nebenstrom Biertrester wurden sieben Valorisierungs- und Verwertungswege verglichen. Wie der Abbildung 12 entnommen werden kann, führen alle Wege ausser der Verbrennung von Biertrester zu einer Netto-Einsparung an Umweltbelastung, das heisst der Umweltnutzen durch die Substitution eines anderen Produktes überwiegt den Zusatzaufwand der Valorisierung/Verwertung des Biertresters.

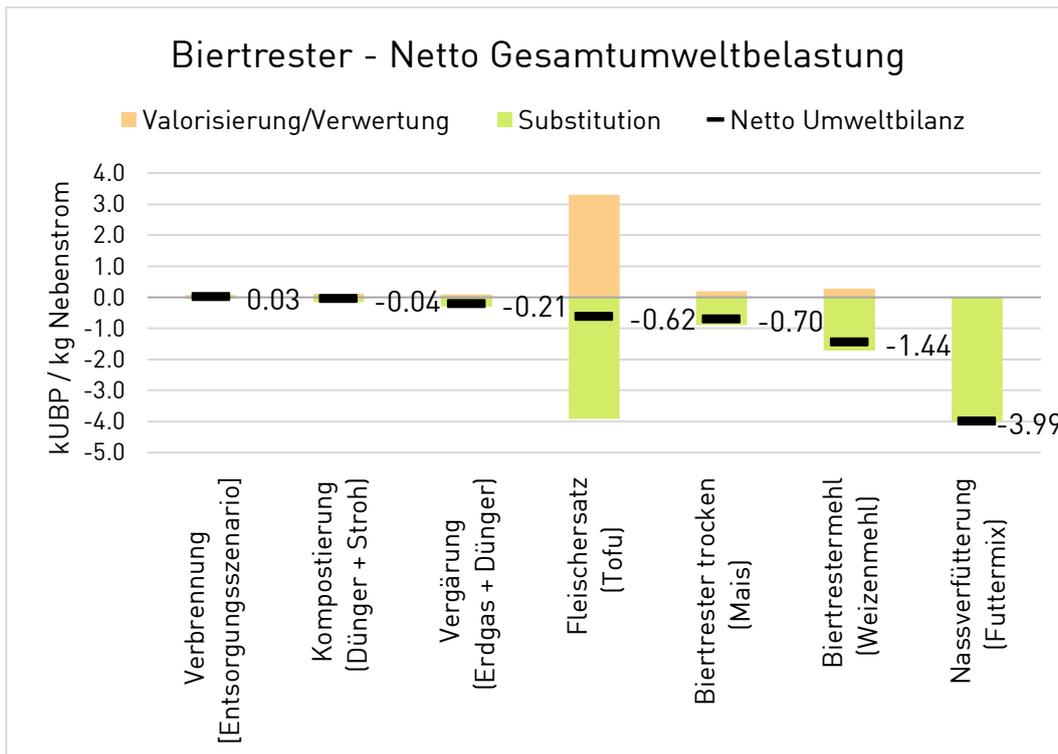


Abbildung 12: Netto-Gesamtumweltbelastung in kUBP pro kg Biertrester der untersuchten Valorisierungs- und Verwertungswege angeordnet nach zunehmender Einsparung an Umweltbelastung. Das Entsorgungsszenario ist unabhängig von der Höhe der Umwelteinsparung ganz links dargestellt. Der schwarze Balken zeigt die Nettobilanz. Ist diese negativ, kann eine Netto-Einsparung an Umweltbelastung durch die Valorisierung/Verwertung erreicht werden. Ist die Nettobilanz positiv, wird mehr Umweltbelastung durch die Valorisierung/Verwertung verursacht als eingespart werden kann. In runden Klammern ist jeweils das substituierbare Produkt aufgeführt.

Pro kg Biertrester ist die Einsparung am höchsten bei der Nassverfütterung, da zum einen keine Umweltbelastung durch die Valorisierung entsteht und zum anderen durch die hohe Ausbeute viel Umweltbelastung durch die substituierbaren Futtermittel eingespart werden kann. Die zweit- und dritthöchste Einsparung an Umweltbelastung kann durch die Valorisierung zu Biertrestermehl resp. getrocknetem Biertrester erreicht werden. Während die Herstellung von Biertrestermehl zwar eine rund 1.5-mal höhere Umweltbelastung verursacht im Vergleich zur reinen Biertrestertrocknung (unter anderem wegen der energie-optimierten Produktionsverfahren von Biertrestertrocknung (vgl. Kapitel 2.4)) und auch die Ausbeute ähnlich hoch ist, wird ein höherer Umweltnutzen durch die Substitution von Weissmehl mit Biertrestermehl als die Substitution von Mais mit getrocknetem Biertrester erwartet. Dies weil die Umweltbelastung vom Weizenmehl höher ist als diejenige von Mais. Die Netto-Umweltbilanz ist jedoch bei beiden Valorisierungswegen tiefer als bei der Verfütterung, da die Prozessausbeute tiefer ausfällt. Der Fleischersatz aus Biertrester schneidet schlechter ab als

die anderen Valorisierungswege jedoch besser als die Verwertungswege Verbrennung, Kompostierung und Vergärung. Trotz der vergleichsweise hohen Einsparung an Umweltbelastung durch die Substitution von Tofu fällt der Umweltnutzen durch die hohe Umweltbelastung der Valorisierung/Fleischersatzherstellung tiefer aus verglichen mit den anderen Valorisierungswegen und der Verfütterung. Dies hat mit der hohen Umweltbelastung durch die Zugabe von weiteren Zutaten für die Herstellung von Biertrester-Fleischersatz zu tun. 84% der Umweltbelastung der Valorisierung stammt aus der Herstellung des zugegebenen Sojaproteinkonzentrats und lediglich 10% ist auf den Energieverbrauch zurückzuführen. Die weiteren Zutaten wurden für die Ökobilanz in diesem Szenario berücksichtigt, um die Gleichwertigkeit mit dem substituierten Produkt (Tofu) sicherzustellen. Die Verwertungen Verbrennung, Kompostierung und Vergärung schneiden im Vergleich zu den anderen untersuchten Wegen schlechter ab, wobei die Vergärung leicht besser als die anderen beiden Wege abschneidet. Dies ist mit der tiefen erwarteten Umwelteinsparung durch die substituierbaren Produkte zu erklären. Durch den tiefen Brennwert des Biertresters führt die Verbrennung sogar zu einer höheren Umweltbelastung als durch die Substitution von Strom und Wärme eingespart werden kann.

Werden die Valorisierungs- und Verwertungswege mit der Verbrennung von Biertrester verglichen, kann zwischen 0.5% (bei der Kompostierung) und 28% (bei der Verfütterung) Umweltbelastung pro kg verwerteter/valorisierter Biertrester eingespart werden (siehe Abbildung 13).

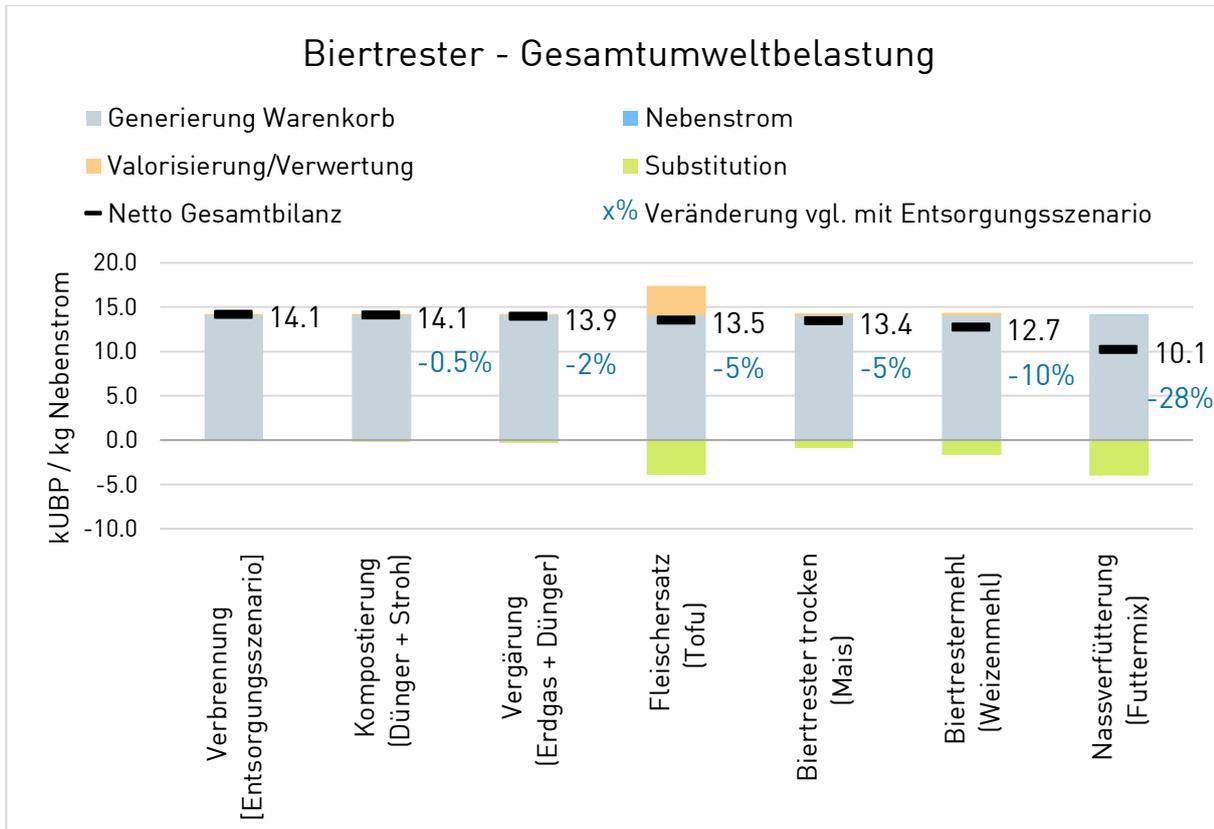


Abbildung 13: Gesamtumweltbelastung in kUBP pro kg Biertrester der untersuchten Valorisierungs-/Verwertungswege unter Berücksichtigung der vollständigen Systemgrenzen, angeordnet nach zunehmender Einsparung an Umweltbelastung. Das Entsorgungsszenario ist unabhängig von der Höhe der Umwelteinsparung ganz links dargestellt. Die schwarze Zahl zeigt, wie viel Umweltbelastung Netto durch das Gesamtsystem verursacht wird. Je tiefer diese ist, desto sinnvoller ist der Valorisierungs-/Verwertungsweg für die Umwelt. Die blaue Prozentzahl zeigt die Einsparung (negative Prozentzahl) resp. Erhöhung (positive Prozentzahl) der Umweltbelastung verglichen mit dem Entsorgungsszenario. In runden Klammern ist jeweils das substituierbare Produkt aufgeführt.

Bezüglich der THG-Emissionen gibt es einen wesentlichen Unterschied (vgl. Abbildung 37 im Anhang B.1). Die Vergärung schneidet bezüglich der THG-Emissionen besser ab als die beiden Valorisierungswegen Biertrestermehlherstellung und die Herstellung von getrocknetem Biertrester. Dies ist auf Unterschiede in der Einsparung an THG-Emissionen zurückzuführen. Die Einsparung an Umweltbelastung fällt im Vergleich zu den UBPs höher aus bei der Vergärung, da fossile Energieträger ersetzt werden können. Bei den Valorisierungswegen hingegen werden pflanzliche Produkte ersetzt, deren Umweltbelastung durch andere Indikatoren als die THG-Emissionen dominiert werden (v.a. Einsatz von Pflanzenschutzmittel und Düngemittel). Ausserdem ist die Valorisierung zu Mehl resp. die Trocknung mit vergleichsweise hohen THG-Emissionen verbunden.

Sensitivitätsanalyse Nutzungsszenario

Beim Nebenstrom Biertrester wurde die Sensitivität bezüglich der substituierbaren Produkte bei der Verbrennung, Vergärung und beim Fleischersatz geprüft (vgl. Tabelle 18). Wenn bei der Verbrennung anstelle vom Schweizer Strommix Strom aus fossilen Quellen ersetzt wird, ist der Netto-Umweltnutzen verglichen mit dem Standardszenario höher. Umgekehrt ist, wenn Strom

aus erneuerbaren Quellen ersetzt werden würde, der Umweltnutzen verglichen mit dem Standardszenario tiefer. Die Abweichungen sind jedoch im Vergleich mit den anderen betrachteten Valorisierungs- & Verwertungswegen sehr klein. Die Sensitivitätsanalyse bestätigt somit den grundsätzlichen im Vergleich tiefen Umweltnutzen der Verbrennung von Biertrester.

Wenn nicht Erdgas wie im Standardszenario, sondern grüner Wasserstoff substituiert wird, schneidet die Vergärung sowohl bezüglich der Gesamtumweltbelastung als auch den THG-Emissionen im Vergleich wesentlich schlechter ab. Dies bestätigt den im Vergleich tiefen Umweltnutzen durch die Vergärung von Biertrester.

Beim Standardszenario zum Biertrester-Fleischersatz wurde davon ausgegangen, dass ein anderes pflanzliches Fleischersatzprodukt (Tofu) ersetzt werden kann. Jedoch kann es je nach Konsumverhalten auch sein, dass der Biertrester-Fleischersatz Fleisch substituiert. Daher wurde in der Sensitivitätsanalyse geprüft, wie sich die Resultate verändern, wenn Fleisch substituiert werden würde. Der Umweltnutzen bei einer Substitution von Fleisch ist wesentlich höher verglichen mit dem Standard-Szenario, sowohl bezüglich UBPs als auch bezüglich THG-Emissionen. In diesem Fall schneidet die Valorisierung zum Fleischersatz besser ab als alle untersuchten Verwertungs- und Valorisierungswege. Dies bestätigt das Resultat, dass die Valorisierung zu Fleischersatz mit einem im Vergleich hohen Umweltnutzen verbunden ist.

Tabelle 18: Resultate aus der Sensitivitätsanalyse zum Nutzungsszenario beim Nebenstrom Biertrester.

	Sensitivitätsanalyse Verbrennung			Sensitivitätsanalyse Vergärung		Sensitivitätsanalyse Fleischersatz	
	Substitution Strom fossil	Substitution Strom erneuerbar	Substitution Strommix (Standard)	Substitution Grüner H2	Substitution Erdgas (Standard)	Substitution Fleisch	Substitution Tofu (Standard)
Netto-Umweltbilanz [kUBP]	0.01	0.05	0.03	-0.08	-0.21	-27.67	-0.62
Netto-Umweltbilanz [kg CO2-eq]	-0.01	0.01	0.01	0.01	-0.16	-6.72	-0.37

Mosttrester

Für den Nebenstrom Mosttrester wurden fünf Valorisierungs- und Verwertungswege verglichen. Wie der Abbildung 14 entnommen werden kann, führen alle Wege ausser der Verbrennung und Trockenverfütterung zu einer Netto-Einsparung an Umweltbelastung, das heisst der Umweltnutzen durch die Substitution eines anderen Produktes überwiegt den Zusatzaufwand der Valorisierung/Verwertung des Mosttresters.

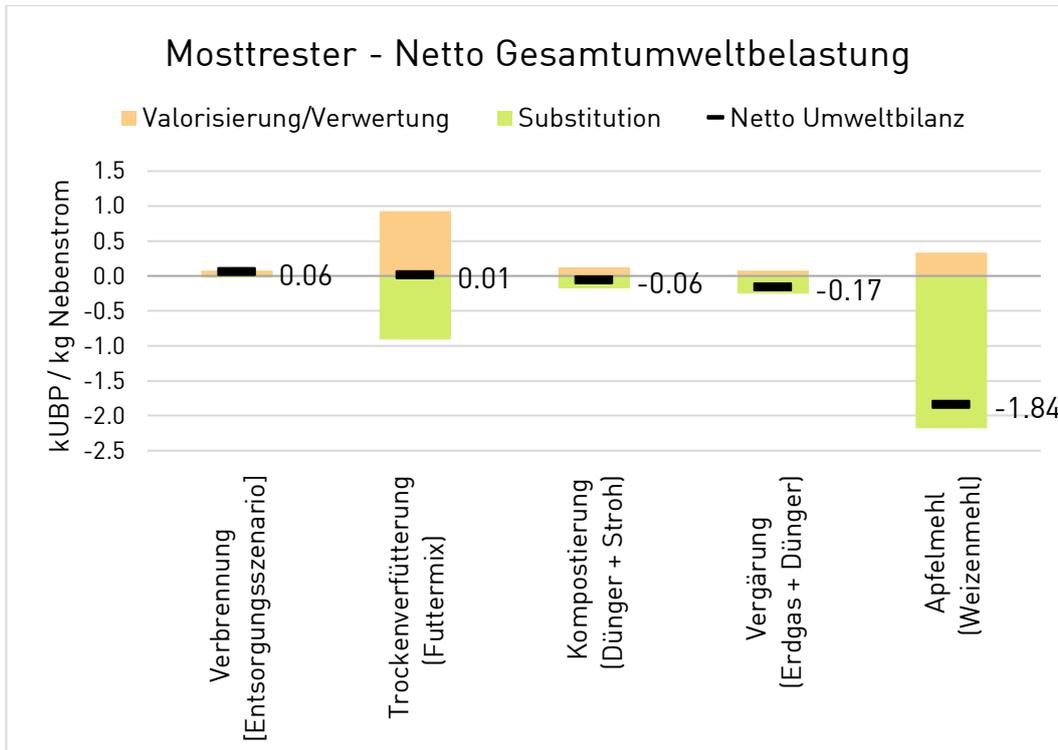


Abbildung 14: Netto-Gesamtumweltbelastung in kUBP pro kg Mosttrester der untersuchten Valorisierungs- und Verwertungswege angeordnet nach zunehmender Einsparung an Umweltbelastung. Das Entsorgungsszenario ist unabhängig von der Höhe der Umwelteinsparung ganz links dargestellt. Der schwarze Balken zeigt die Nettobilanz. Ist diese negativ, kann eine Netto-Einsparung an Umweltbelastung durch die Valorisierung/Verwertung erreicht werden. Ist die Nettobilanz positiv, wird mehr Umweltbelastung durch die Valorisierung/Verwertung verursacht als eingespart werden kann. In runden Klammern ist jeweils das substituierbare Produkt aufgeführt.

Pro kg Mosttrester ist die Einsparung am höchsten beim Apfelmehl. Obwohl die Umweltbelastung durch die Valorisierung höher als z.B. bei der Vergärung ist, ist die Einsparung an Umweltbelastung durch die Substitution von Weizenmehl höher, trotz der tiefen Ausbeute von Apfelmehl pro kg nassem Mosttrester. Es muss jedoch beachtet werden, dass durch mögliche Limitierungen im Beimischanteil, das Potenzial dieses Valorisierungsweges beschränkt ist. Die Verwertungswege Kompostierung und Vergärung führen vergleichsweise zu einem relativ tiefen Umweltnutzen, was mit der tiefen erwarteten Umwelteinsparung durch die substituierbaren Produkte erklärt werden kann. Die Verwertung von getrocknetem Mosttrester führt Netto zu mehr Umweltbelastung durch die Verwertung, als mit der Substitution von Futtermitteln vermieden werden kann. Aufgrund unterschiedlicher berücksichtigter Trocknungsvorgehen und der zugrundeliegenden Energieeffizienzen bei der Futtermittelherstellung und Apfelmehlherstellung (Hochtemperaturtrocknung bei der Futtermittelherstellung vs. Mahltrocknung bei der Herstellung von Apfelmehl) fällt auch die Umweltbelastung durch den Verwertungs-/Valorisierungsprozess unterschiedlich hoch aus. Bei der Verfütterung ist zu berücksichtigen, dass nur die Trockenverfütterung betrachtet wurde. Bei einer Nassverfütterung fällt der Aufwand für die Verwertung weg (analog zur Nassverfütterung von Biertrester). In diesem Fall ist zu erwarten, dass die Verfütterung zu einer Netto-Einsparung an Umweltbelastung führt und tendenziell besser als die Vergärung und Kompostierung jedoch schlechter als die Apfelmehlherstellung abschneidet.

Gleichermassen führt auch die Verbrennung zu keinem Umweltnutzen. Durch den tiefen Brennwert des Mostresters führt die Verbrennung zu einer höheren Umweltbelastung als durch die Substitution von Strom und Wärme eingespart werden kann.

Werden die Valorisierungs- und Verwertungswege mit der Verbrennung von Mostrestern verglichen, kann zwischen 0.3% (bei der Verfütterung) und 15% (beim Apfelmehl) Umweltbelastung pro kg verwerteter/valorisierter Mostrestern eingespart werden (siehe Abbildung 15).

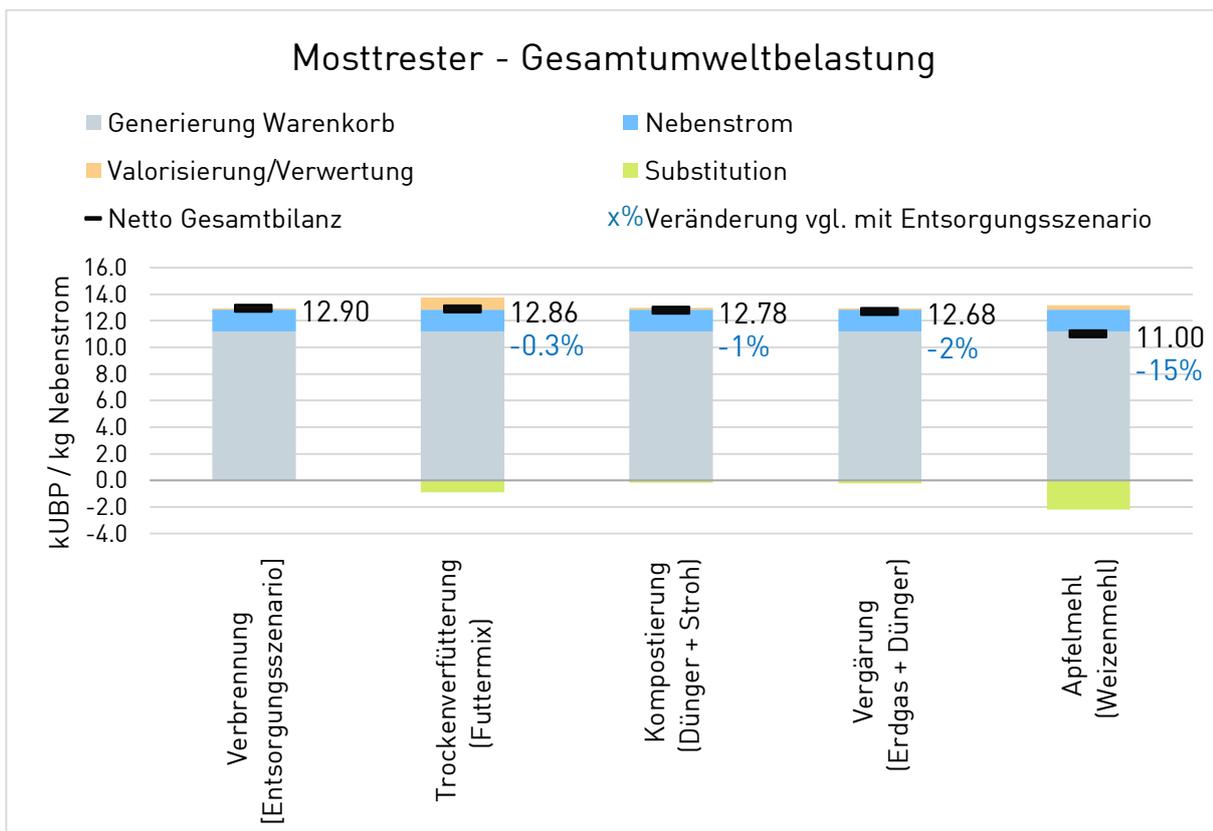


Abbildung 15: Gesamtumweltbelastung in kUBP pro kg Mostrestler der untersuchten Valorisierungs-/Verwertungswege unter Berücksichtigung der vollständigen Systemgrenzen, angeordnet nach zunehmender Einsparung an Umweltbelastung. Das Entsorgungsszenario ist unabhängig von der Höhe der Umwelteinsparung ganz links dargestellt. Die schwarze Zahl zeigt, wie viel Umweltbelastung Netto durch das Gesamtsystem verursacht wird. Je tiefer diese ist, desto sinnvoller ist der Valorisierungs-/Verwertungsweg für die Umwelt. Die blaue Prozentzahl zeigt die Einsparung (negative Prozentzahl) resp. Erhöhung (positive Prozentzahl) der Umweltbelastung verglichen mit dem Entsorgungsszenario. In runden Klammern ist jeweils das substituierbare Produkt aufgeführt.

Bezüglich der THG-Emissionen gibt es zwei relevante Unterschiede (vgl. Abbildung 38 im Anhang B.1). Die Trockenverfütterung von Mostrestern führt Netto zu einem wesentlichen Anstieg der THG-Emissionen, da die Umweltbelastung der substituierbaren Futtermittel vor allem durch andere Umweltwirkungen als THG-Emissionen dominiert werden (z.B. Pflanzenschutzmittel-, Düngereinsatz) und so die Einsparung an THG-Emissionen durch die Substitution weniger ins Gewicht fällt. Somit ist die Trockenverfütterung sowohl aus Sicht der UB als auch aus Sicht der THG-Emissionen nicht empfehlenswert. Der zweite Unterschied

liegt bei der Vergärung. Diese schneidet bezüglich der THG-Emission gleich gut wie die Valorisierung zum Apfelmehl ab. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Substitution von fossilen Energieträgern bei der Vergärung bei den THG-Emissionen stärker ins Gewicht fällt.

Sensitivitätsanalyse Nutzungsszenario

Beim Nebenstrom Mosttrester wurde die Sensitivität bezüglich der substituierbaren Produkte bei der Verbrennung und Vergärung geprüft (vgl. Tabelle 19). Wenn bei der Verbrennung anstelle vom Schweizer Strommix Strom aus fossilen Quellen ersetzt wird, ist der Netto-Umweltnutzen verglichen mit dem Standardszenario höher. Umgekehrt ist, wenn Strom aus erneuerbaren Quellen ersetzt werden würde, der Umweltnutzen verglichen mit dem Standardszenario tiefer. Jedoch überwiegen in beiden Fällen die zusätzliche Umweltbelastung die mögliche Einsparung. Die Sensitivitätsanalyse bestätigt somit den fehlenden Umweltnutzen der Verbrennung von Mosttrester.

Wenn nicht Erdgas wie im Standardszenario, sondern grüner Wasserstoff substituiert wird, schneidet die Vergärung sowohl bezüglich der Gesamtumweltbelastung als auch den THG-Emissionen im Vergleich bedeutend schlechter ab. Dies bestätigt den im Vergleich tiefen Umweltnutzen durch die Vergärung von Mosttrester

Tabelle 19: Resultate aus der Sensitivitätsanalyse zum Nutzungsszenario beim Nebenstrom Mosttrester.

	Sensitivitätsanalyse Verbrennung			Sensitivitätsanalyse Vergärung	
	Substitution Strom fossil	Substitution Strom erneuerbar	Substitution Strommix (Standard)	Substitution Grüner H2	Substitution Erdgas (Standard)
Netto-Umwelbilanz [kUBP]	0.05	0.07	0.06	-0.06	-0.17
Netto-Umwelbilanz [kg CO2-eq]	0.02	0.03	0.03	0.02	-0.12

Rind-Innereien

Für den Nebenstrom Rind-Innereien wurden sieben Valorisierungs- und Verwertungswege verglichen. Wie der Abbildung 16 entnommen werden kann, führen alle Wege zu einer Netto-Einsparung an Umweltbelastung, das heisst der Umweltnutzen durch die Substitution eines anderen Produktes überwiegt den Zusatzaufwand der Valorisierung/Verwertung der Rind-Innereien.

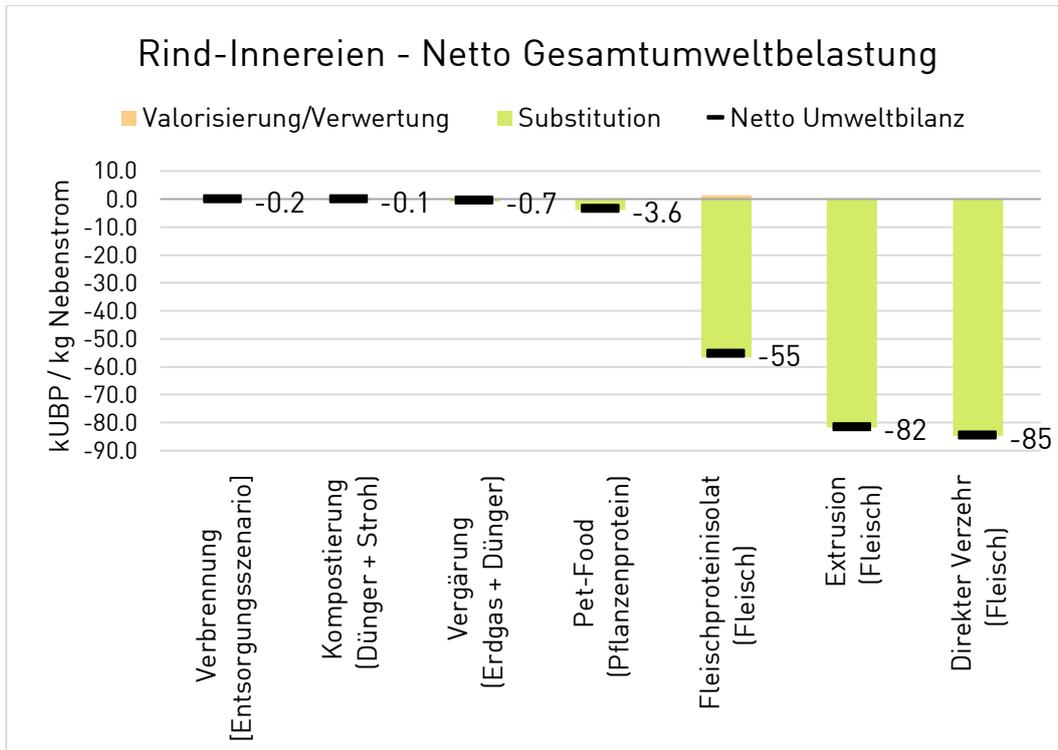


Abbildung 16: Netto-Gesamtumweltbelastung in kUBP pro kg Rind-Innereien der untersuchten Valorisierungs- und Verwertungswege angeordnet nach zunehmender Einsparung an Umweltbelastung. Das Entsorgungsszenario ist unabhängig von der Höhe der Umwelteinsparung ganz links dargestellt. Der schwarze Balken zeigt die Nettobilanz. Ist diese negativ, kann eine Netto-Einsparung an Umweltbelastung durch die Valorisierung/Verwertung erreicht werden. Ist die Nettobilanz positiv, wird mehr Umweltbelastung durch die Valorisierung/Verwertung verursacht als eingespart werden kann. In runden Klammern ist jeweils das substituierbare Produkt aufgeführt.

Pro kg Rind-Innereien ist die Einsparung am höchsten bei den Valorisierungswegen direkter Verzehr und Extrusion, weil mit diesen Valorisierungswegen Fleisch ersetzt werden kann. Ebenfalls einen hohen Umweltnutzen bietet die Valorisierung von Rind-Innereien zu Fleischproteinisolat. Obwohl die Ausbeute relativ tief ist und die Umweltbelastung durch die Valorisierung höher als bei den anderen beiden Valorisierungswegen ist, kann durch den hohen Proteingehalt des Fleischproteinisolates eine hohe Einsparung an Umweltbelastung durch die Substitution von Fleisch erzielt werden. Das Potenzial dieses Weges ist jedoch durch den maximalen Anteil von Fleischproteinisolat in verarbeiteten Fleischwaren limitiert (siehe auch Kapitel 4.2 Marktnachfrage). Die betrachteten Verwertungswege führen im Vergleich zu einem bedeutend tieferen Umweltnutzen, da die Umweltbelastung der substituierbaren Produkte tiefer ist. Der Verwertungsweg Pet-Food schneidet unter den betrachteten Verwertungsweisen am besten ab, da die Umweltbelastung vom ersetzbaren pflanzlichen Protein vergleichsweise hoch ist. Die Kompostierung führt tendenziell zum tiefsten Umweltnutzen.

Werden die Valorisierungs- und Verwertungswege mit der Verbrennung von Rind-Innereien verglichen, kann zwischen 0.01% höhere Umweltbelastung (bei der Kompostierung) und 5% tiefere Umweltbelastung (beim direkten Verzehr) pro kg verwerteter/valorisierter Nebenstrom entstehen (siehe Abbildung 17).

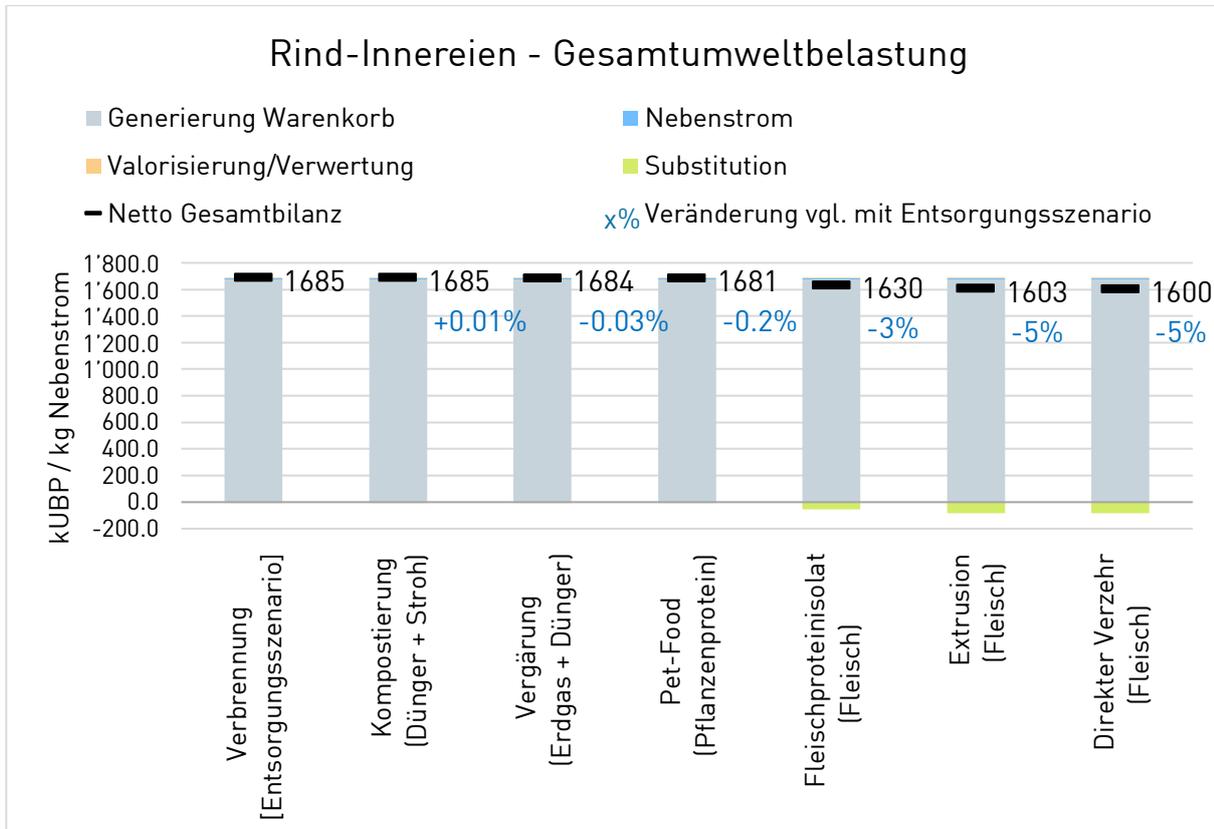


Abbildung 17: Gesamtumweltbelastung in kUBP pro kg Rind-Innereien der untersuchten Valorisierungs-/Verwertungswege unter Berücksichtigung der vollständigen Systemgrenzen, angeordnet nach zunehmender Einsparung an Umweltbelastung. Das Entsorgungsszenario ist unabhängig von der Höhe der Umwelteinsparung ganz links dargestellt. Die schwarze Zahl zeigt, wie viel Umweltbelastung Netto durch das Gesamtsystem verursacht wird. Je tiefer diese ist, desto sinnvoller ist der Valorisierungs-/Verwertungsweg für die Umwelt. Die blaue Prozentzahl zeigt die Einsparung (negative Prozentzahl) resp. Erhöhung (positive Prozentzahl) der Umweltbelastung verglichen mit dem Entsorgungsszenario. In runden Klammern ist jeweils das substituierbare Produkt aufgeführt.

Bezüglich der THG-Emissionen gibt es keine relevanten Unterschiede (vgl. Abbildung 39 im Anhang B.1). Die relativen Unterschiede zwischen den untersuchten Valorisierungs- und Verwertungswege sind sehr ähnlich für THG-Emissionen und UBPs. Die Betrachtung der THG-Emissionen führt somit zu denselben Erkenntnissen wie die Betrachtung der Gesamtumweltbelastung.

Sensitivitätsanalyse Nutzungsszenario

Beim Nebenstrom Rind-Innereien wurde die Sensitivität bezüglich der substituierbaren Produkte bei der Verbrennung, Vergärung und beim Fleischproteinisolat geprüft (vgl. Tabelle 20). Wenn bei der Verbrennung anstelle vom Schweizer Strommix Strom aus fossilen Quellen ersetzt wird, ist der Netto-Umweltnutzen verglichen mit dem Standardszenario höher. Umgekehrt ist, wenn Strom aus erneuerbaren Quellen ersetzt werden würde, der Umweltnutzen verglichen mit dem Standardszenario tiefer. Die Unterschiede sind jedoch im Vergleich mit den anderen betrachteten Valorisierungs- & Verwertungswegen sehr klein. Die Sensitivitätsanalyse bestätigt somit den grundsätzlichen im Vergleich tiefen Umweltnutzen der Verbrennung von Rind-Innereien.

Wenn nicht Erdgas wie im Standardszenario, sondern grüner Wasserstoff substituiert wird, schneidet die Vergärung sowohl bezüglich der Gesamtumweltbelastung als auch den THG-Emissionen im Vergleich wesentlich schlechter ab. Dies bestätigt den im Vergleich tiefen Umweltnutzen durch die Vergärung von Rind-Innereien.

Beim Standardszenario zum Fleischproteinisolat wurde davon ausgegangen, dass durch die Beimischung in verarbeiteten Fleischprodukten Fleisch ersetzt werden kann. Jedoch kann Fleischproteinisolat auch andere Proteinisolate wie zum Beispiel Molkenproteinisolat substituieren. Daher wurde in der Sensitivitätsanalyse geprüft, wie sich die Resultate verändern, wenn Molkenproteinisolat substituiert werden würde. Der Umweltnutzen bei einer Substitution von Molkenprotein ist etwas tiefer bezogen auf die Gesamtumweltbelastung jedoch höher bezogen auf die THG-Emissionen verglichen mit dem Standard-Szenario. Durch die generell tiefe Ausbeute beim Molkenproteinisolat (vgl. auch Resultate zu Molke), sind die Umweltbelastung und THG-Emissionen von Molkenproteinisolat im Vergleich relativ hoch. Diese Analyse bestätigt den hohen Umweltnutzen des Fleischproteinisolates.

Tabelle 20: Resultate aus der Sensitivitätsanalyse zum Nutzungsszenario beim Nebenstrom Rind-Innereien.

	Sensitivitätsanalyse Verbrennung			Sensitivitätsanalyse Vergärung		Sensitivitätsanalyse Fleischproteinisolat	
	Substitution Strom fossil	Substitution Strom erneuerbar	Substitution Strommix (Standard)	Substitution on Grüner H2	Substitution Erdgas (Standard)	Substitution Molkenprotein	Substitution Fleisch (Standard)
Netto-Umweltbilanz [kUBP]	-0.27	-0.10	-0.20	-0.23	-0.65	-39.08	-55.32
Netto-Umweltbilanz [kg CO2-eq]	-0.25	-0.10	-0.13	-0.003	-0.55	-17.08	-15.03

Poulet-Innereien

Für den Nebenstrom Poulet-Innereien wurden acht Valorisierungs- und Verwertungswege verglichen. Wie der Abbildung 18 entnommen werden kann, führen alle Wege zu einer Netto-Einsparung an Umweltbelastung, das heisst der Umweltnutzen durch die Substitution eines anderen Produktes überwiegt den Zusatzaufwand der Valorisierung/Verwertung der Poulet-Innereien.

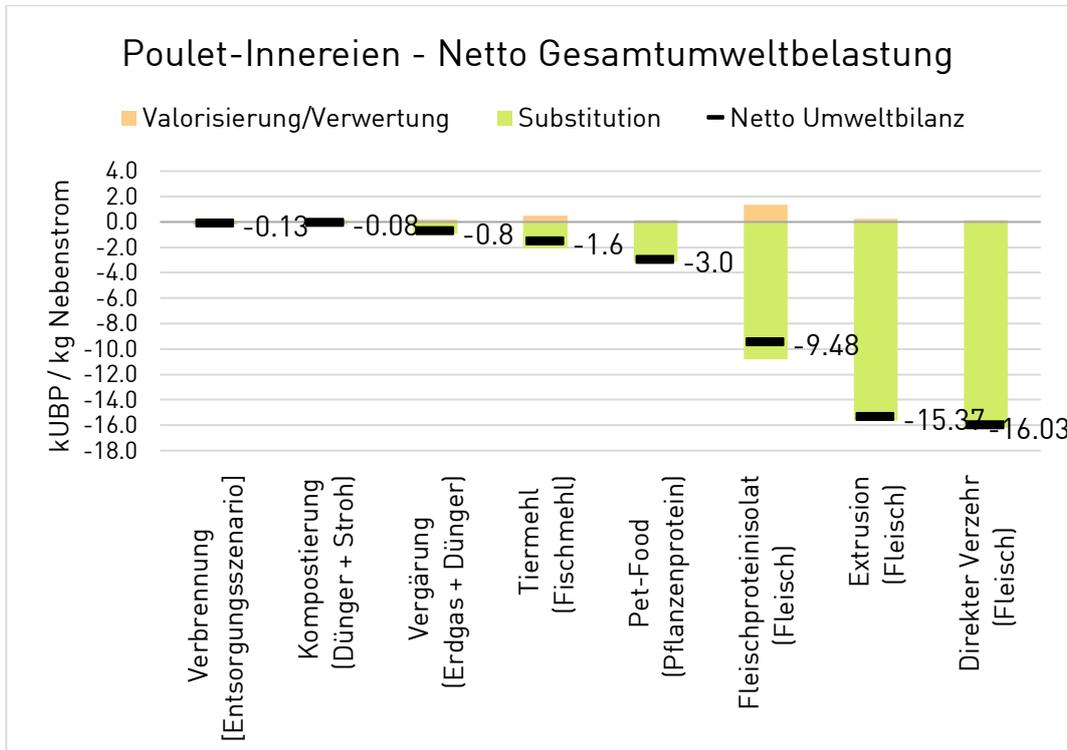


Abbildung 18: Netto-Gesamtumweltbelastung in kUBP pro kg Poulet-Innereien der untersuchten Valorisierungs- und Verwertungswege angeordnet nach zunehmender Einsparung an Umweltbelastung. Das Entsorgungsszenario ist unabhängig von der Höhe der Umwelteinsparung ganz links dargestellt. Der schwarze Balken zeigt die Nettobilanz. Ist diese negativ, kann eine Netto-Einsparung an Umweltbelastung durch die Valorisierung/Verwertung erreicht werden. Ist die Nettobilanz positiv, wird mehr Umweltbelastung durch die Valorisierung/Verwertung verursacht als eingespart werden kann. In runden Klammern ist jeweils das substituierbare Produkt aufgeführt.

Pro kg Poulet-Innereien ist die Einsparung am höchsten bei den Valorisierungswegen direkter Verzehr und Extrusion, weil mit diesen Valorisierungswegen Fleisch ersetzt werden kann. Ebenfalls einen hohen Umweltnutzen bietet die Valorisierung von Poulet-Innereien zu Fleischproteinisolat. Obwohl die Ausbeute relativ tief ist und die Umweltbelastung durch die Valorisierung höher als bei den anderen beiden Valorisierungswegen ist, kann durch den hohen Proteingehalt des Fleischproteinisolates eine hohe Einsparung an Umweltbelastung durch die Substitution von Fleisch erzielt werden. Das Potenzial dieses Weges ist jedoch durch den maximalen Anteil von Fleischproteinisolat in verarbeiteten Fleischwaren limitiert (siehe auch Kapitel 4.2 Marktnachfrage). Die betrachteten Verwertungswege führen im Vergleich zu einem wesentlich tieferen Umweltnutzen, da die Umweltbelastung der substituierbaren Produkte tiefer ist. Der Verwertungsweg Pet-Food schneidet unter den betrachteten Verwertungsweisen am besten ab, da die Umweltbelastung vom ersetzbaren pflanzlichen Protein vergleichsweise hoch ist. Der Umweltnutzen durch die Verwertung als Tiermehl ist im Vergleich leicht tiefer, jedoch etwas höher als bei der Vergärung, Verbrennung und Kompostierung. Bei der Herstellung von Tiermehl hat zusätzlich die eher tiefe Ausbeute und die vergleichsweise hohe Umweltbelastung durch den Verwertungsprozess einen Einfluss auf die Netto-Umweltbilanz. Die Kompostierung führt tendenziell zum tiefsten Umweltnutzen.

Werden die Valorisierungs- und Verwertungswege mit der Verbrennung von Poulet-Innereien verglichen, kann zwischen 0.03% höhere Umweltbelastung (bei der Kompostierung) und 7%

tieferer Umweltbelastung (beim direkten Verzehr) pro kg verwerteter/valorisierter Nebenstrom entstehen (siehe Abbildung 19).

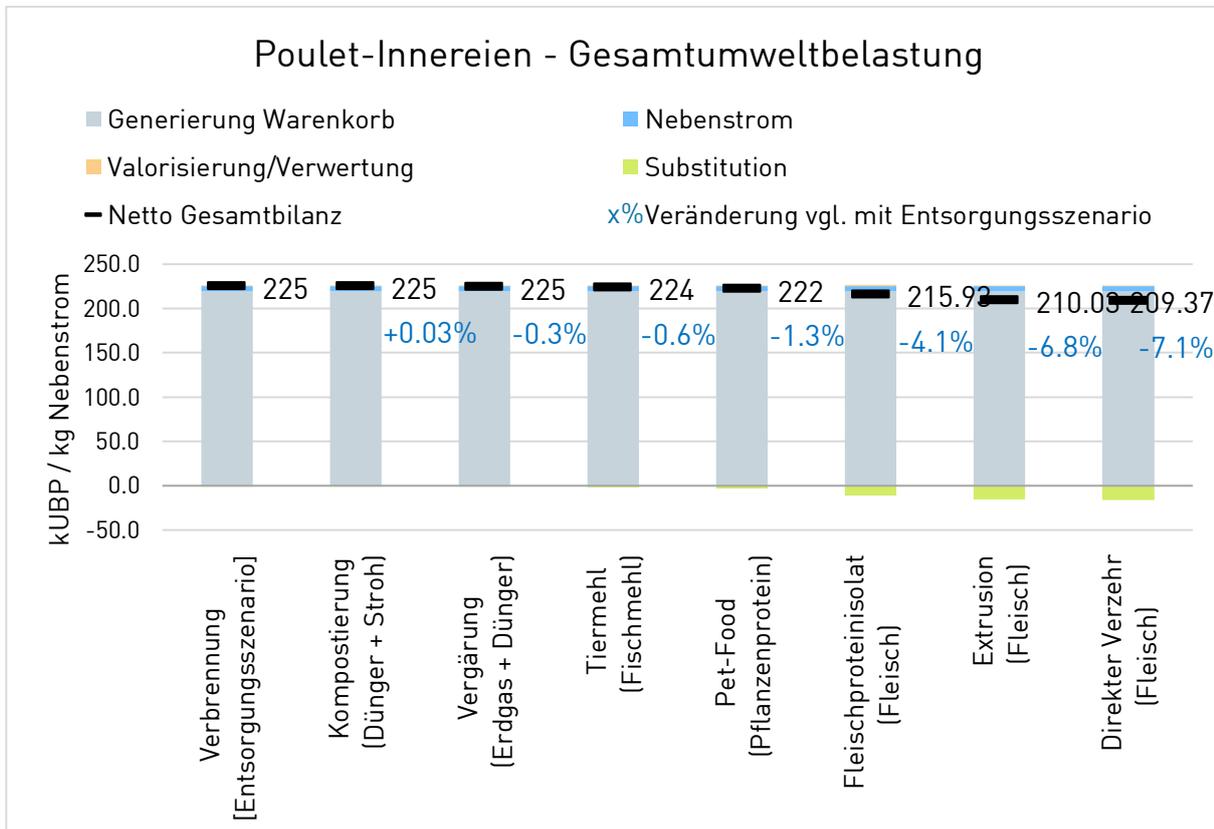


Abbildung 19: Gesamtumweltbelastung in kUBP pro kg Poulet-Innereien der untersuchten Valorisierungs-/Verwertungswege unter Berücksichtigung der vollständigen Systemgrenzen, angeordnet nach zunehmender Einsparung an Umweltbelastung. Das Entsorgungsszenario ist unabhängig von der Höhe der Umwelteinsparung ganz links dargestellt. Die schwarze Zahl zeigt, wie viel Umweltbelastung Netto durch das Gesamtsystem verursacht wird. Je tiefer diese ist, desto sinnvoller ist der Valorisierungs-/Verwertungsweg für die Umwelt. Die blaue Prozentzahl zeigt die Einsparung (negative Prozentzahl) resp. Erhöhung (positive Prozentzahl) der Umweltbelastung verglichen mit dem Entsorgungsszenario. In runden Klammern ist jeweils das substituierbare Produkt aufgeführt.

Bezüglich der THG-Emissionen gibt es einen relevanten Unterschied (vgl. Abbildung 40 im Anhang B.1). Die Verwertung als Tiermehl führt zu mehr THG-Emissionen als durch den Ersatz von Fischmehl eingespart werden kann. Dies hat damit zu tun, dass die Umweltbelastung (UBPs) der ersetzbaren Fischmehlproduktion vor allem auf die Überfischung und der Emission von Wasserschadstoffen zurückzuführen ist. Werden also lediglich THG-Emissionen betrachtet, gibt es keinen Umweltnutzen durch die Verwertung als Tiermehl. Wird jedoch die Gesamtumweltbelastung berücksichtigt, gibt es einen Umweltnutzen.

Sensitivitätsanalyse Nutzungsszenario

Beim Nebenstrom Poulet-Innereien wurde die Sensitivität bezüglich der substituierbaren Produkte bei der Verbrennung, Vergärung und beim Fleischproteinisolat geprüft (vgl. Tabelle 21). Wenn bei der Verbrennung anstelle vom Schweizer Strommix Strom aus fossilen Quellen

ersetzt wird, ist der Netto-Umweltnutzen verglichen mit dem Standardszenario höher. Umgekehrt ist, wenn Strom aus erneuerbaren Quellen ersetzt werden würde, der Umweltnutzen verglichen mit dem Standardszenario tiefer. Die Unterschiede sind jedoch im Vergleich mit den anderen betrachteten Valorisierungs- & Verwertungswegen sehr klein. Die Sensitivitätsanalyse bestätigt somit den grundsätzlichen im Vergleich tiefen Umweltnutzen der Verbrennung von Poulet-Innereien.

Wenn nicht Erdgas wie im Standardszenario, sondern grüner Wasserstoff substituiert wird, schneidet die Vergärung sowohl bezüglich der Gesamtumweltbelastung als auch den THG-Emissionen im Vergleich wesentlich schlechter ab. Dies bestätigt den im Vergleich tiefen Umweltnutzen durch die Vergärung von Poulet-Innereien.

Beim Standardszenario zum Fleischproteinisolat wurde davon ausgegangen, dass durch die Beimischung in verarbeiteten Fleischprodukten Fleisch ersetzt werden kann. Jedoch kann Fleischproteinisolat auch andere Proteinisolate wie zum Beispiel Molkenproteinisolat substituieren. Daher wurde in der Sensitivitätsanalyse geprüft, wie sich die Resultate verändern, wenn Molkenproteinisolat substituiert werden würde. Der Umweltnutzen bei einer Substitution von Molkenprotein ist höher verglichen mit dem Standard-Szenario, sowohl bezüglich Gesamtumweltbelastung als auch THG-Emissionen. Durch die generell tiefe Ausbeute beim Molkenproteinisolat (vgl. auch Resultate zu Molke), sind die Umweltbelastung und THG-Emissionen von Molkenproteinisolat im Vergleich relativ hoch. Diese Analyse bestätigt den hohen Umweltnutzen des Fleischproteinisolates.

Tabelle 21: Resultate aus der Sensitivitätsanalyse zum Nutzungsszenario beim Nebenstrom Poulet-Innereien.

	Sensitivitätsanalyse Verbrennung			Sensitivitätsanalyse Vergärung		Sensitivitätsanalyse Fleischproteinisolat	
	Substitu- tion Strom fossil	Substitu- tion Strom erneuer- bar	Substituti- on Strommix (Standard)	Substituti- on Grüner H2	Substitution Erdgas (Standard)	Substitu- tion Molkenp- rotein	Substitutio- n Fleisch (Standard)
Netto- Umweltbilanz [kUBP]	-0.19	-0.06	-0.13	-0.27	-0.76	-32.18	-9.48
Netto- Umweltbilanz [kg CO2-eq]	-0.19	-0.07	-0.09	-0.008	-0.64	-14.00	-1.02

Poulet-Hals

Für den Nebenstrom Poulet-Hals wurden sechs Valorisierungs- und Verwertungswege verglichen. Wie der Abbildung 20 entnommen werden kann, führen alle Wege zu einer Netto-Einsparung an Umweltbelastung, das heisst der Umweltnutzen durch die Substitution eines anderen Produktes überwiegt den Zusatzaufwand der Valorisierung/Verwertung des Poulet-Halses.

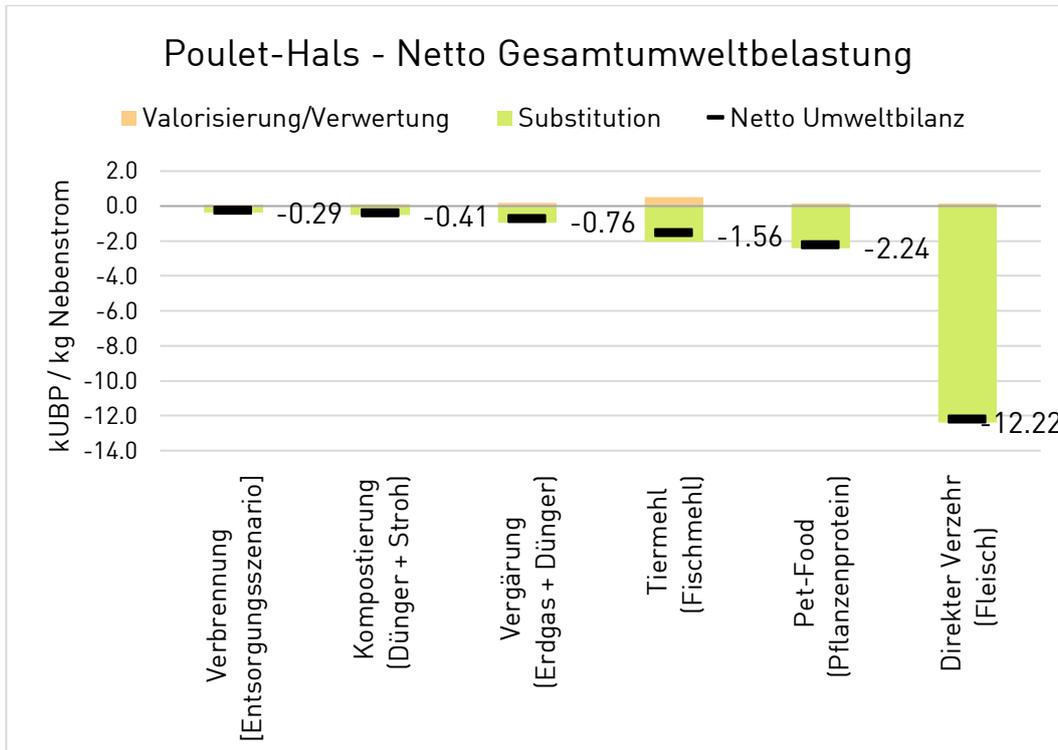


Abbildung 20: Netto-Gesamtumweltbelastung in KUBP pro kg Poulet-Hals der untersuchten Valorisierungs- und Verwertungswege angeordnet nach zunehmender Einsparung an Umweltbelastung. Das Entsorgungsszenario ist unabhängig von der Höhe der Umwelteinsparung ganz links dargestellt. Der schwarze Balken zeigt die Nettobilanz. Ist diese negativ, kann eine Netto-Einsparung an Umweltbelastung durch die Valorisierung/Verwertung erreicht werden. Ist die Nettobilanz positiv, wird mehr Umweltbelastung durch die Valorisierung/Verwertung verursacht als eingespart werden kann. In runden Klammern ist jeweils das substituierbare Produkt aufgeführt.

Pro kg Poulet-Hals ist die Einsparung am höchsten beim direkten Verzehr. Während kaum Umweltbelastung durch die Valorisierung entsteht, kann durch die mögliche Substitution von Poulet-Fleisch eine sehr hohe Einsparung an Umweltbelastung erzielt werden. Die betrachteten Verwertungswege schneiden im Vergleich wesentlich schlechter ab, da die Umweltbelastung der substituierbaren Produkte tiefer ist. Der Verwertungsweg Pet-Food schneidet unter den betrachteten Verwertungswegen am besten ab, da die Umweltbelastung vom ersetzbaren pflanzlichen Protein vergleichsweise hoch ist. Der Umweltnutzen durch die Verwertung als Tiermehl ist im Vergleich leicht tiefer, jedoch etwas höher als bei der Vergärung, Verbrennung und Kompostierung. Bei der Herstellung von Tiermehl hat zusätzlich die eher tiefe Ausbeute und die vergleichsweise hohe Umweltbelastung durch den Verwertungsprozess einen Einfluss auf die Netto-Umweltbilanz. Die Verbrennung führt tendenziell zum tiefsten Umweltnutzen.

Werden die Valorisierungs- und Verwertungswege mit der Verbrennung von Poulet-Hals verglichen, kann zwischen 0.1% (bei der Kompostierung) und 6% (beim direkten Verzehr) pro kg verwerteter/valorisierter Nebenstrom eingespart werden (siehe Abbildung 21).

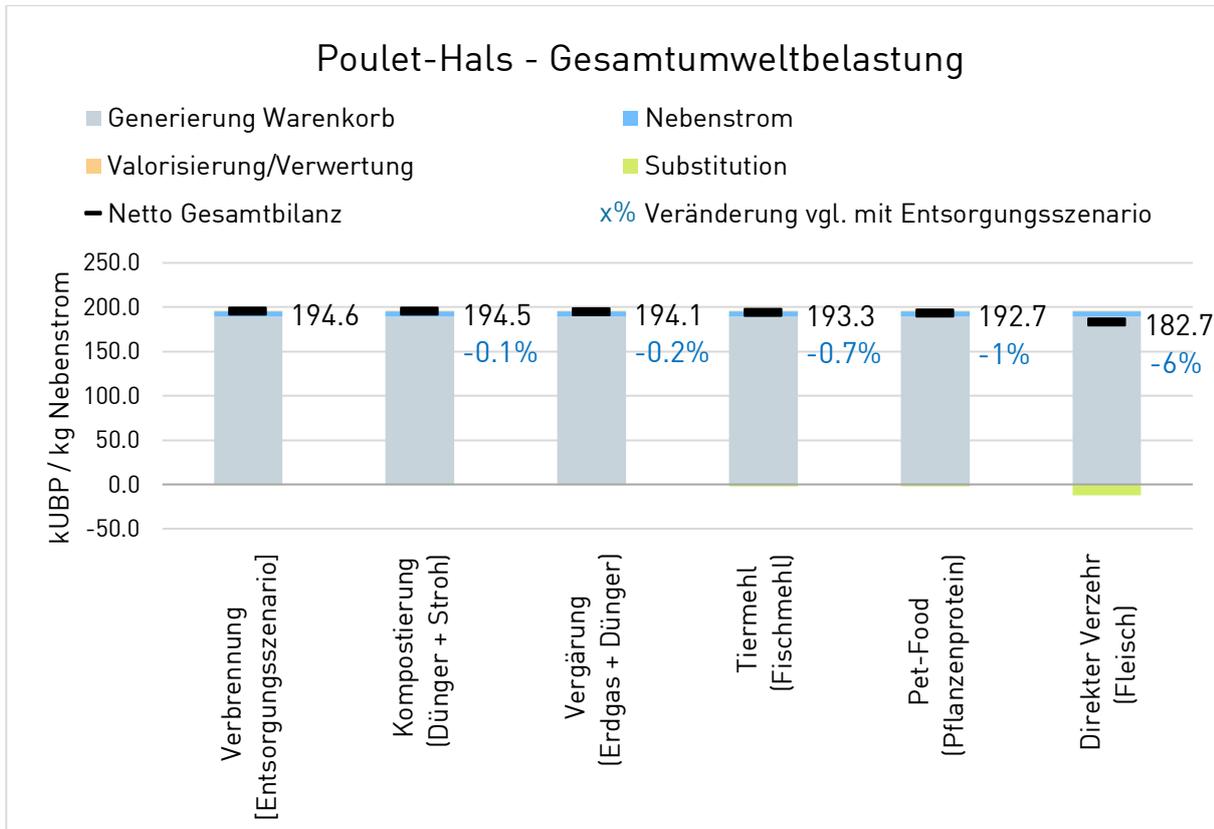


Abbildung 21: Gesamtumweltbelastung in kUBP pro kg Poulet-Hals der untersuchten Valorisierungs-/Verwertungswege unter Berücksichtigung der vollständigen Systemgrenzen, angeordnet nach zunehmender Einsparung an Umweltbelastung. Das Entsorgungsszenario ist unabhängig von der Höhe der Umwelteinsparung ganz links dargestellt. Die schwarze Zahl zeigt, wie viel Umweltbelastung Netto durch das Gesamtsystem verursacht wird. Je tiefer diese ist, desto sinnvoller ist der Valorisierungs-/Verwertungsweg für die Umwelt. Die blaue Prozentzahl zeigt die Einsparung (negative Prozentzahl) resp. Erhöhung (positive Prozentzahl) der Umweltbelastung verglichen mit dem Entsorgungsszenario. In runden Klammern ist jeweils das substituierbare Produkt aufgeführt.

Bezüglich der THG-Emissionen gibt es einen relevanten Unterschied (vgl. Abbildung 41 im Anhang B.1). Die Verwertung als Tiermehl führt zu mehr THG-Emissionen als durch den Ersatz von Fischmehl eingespart werden kann. Dies hat damit zu tun, dass die Umweltbelastung (UBPs) der ersetzbaren Fischmehlproduktion vor allem auf die Überfischung und der Emission von Wasserschadstoffen zurückzuführen ist. Werden also lediglich THG-Emissionen betrachtet, gibt es keinen Umweltnutzen durch die Verwertung als Tiermehl. Wird jedoch die Gesamtumweltbelastung berücksichtigt, gibt es einen Umweltnutzen.

Sensitivitätsanalyse Nutzungsszenario

Beim Nebenstrom Poulet-Hals wurde die Sensitivität bezüglich der substituierbaren Produkte bei der Verbrennung und Vergärung geprüft (vgl. Tabelle 22). Wenn bei der Verbrennung anstelle vom Schweizer Strommix Strom aus fossilen Quellen ersetzt wird, ist der Netto-Umweltnutzen verglichen mit dem Standardszenario höher. Umgekehrt ist, wenn Strom aus erneuerbaren Quellen ersetzt werden würde, der Umweltnutzen verglichen mit dem Standardszenario tiefer. Die Unterschiede sind jedoch im Vergleich mit den anderen betrachteten Valorisierungs- & Verwertungswegen sehr klein. Die Sensitivitätsanalyse

bestätigt somit den grundsätzlichen im Vergleich tiefen Umweltnutzen der Verbrennung von Poulet-Hals. Wenn nicht Erdgas wie im Standardszenario, sondern grüner Wasserstoff substituiert wird, schneidet die Vergärung sowohl bezüglich der Gesamtumweltbelastung als auch den THG-Emissionen im Vergleich bedeutend schlechter ab. Dies bestätigt den im Vergleich tiefen Umweltnutzen durch die Vergärung von Poulet-Hals.

Tabelle 22: Resultate aus der Sensitivitätsanalyse zum Nutzungsszenario beim Nebenstrom Poulet-Hals.

	Sensitivitätsanalyse Verbrennung			Sensitivitätsanalyse Vergärung	
	Substitution Strom fossil	Substitution Strom erneuerbar	Substitution Strommix (Standard)	Substitution Grüner H2	Substitution Erdgas (Standard)
Netto-Umweltbilanz [kUBP]	-0.39	-0.16	-0.29	-0.27	-0.76
Netto-Umweltbilanz [kg CO2-eq]	-0.35	-0.15	-0.19	-0.009	-0.64

Schweins-Innereien

Für den Nebenstrom Schweins-Innereien wurden acht Valorisierungs- und Verwertungswege verglichen. Wie der Abbildung 22 entnommen werden kann, führen alle Wege zu einer Netto-Einsparung an Umweltbelastung, das heißt der Umweltnutzen durch die Substitution eines anderen Produktes überwiegt den Zusatzaufwand der Valorisierung/Verwertung der Schweins-Innereien.

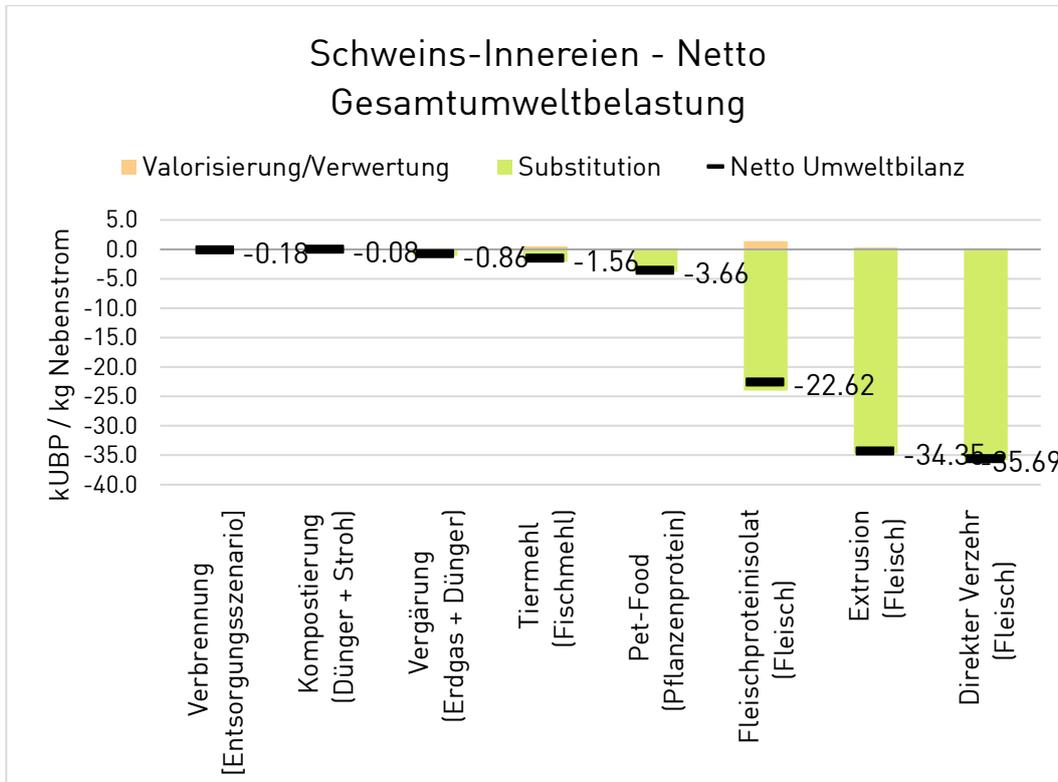


Abbildung 22: Netto-Gesamtumweltbelastung in KUBP pro kg Schweins-Innereien der untersuchten Valorisierungs- und Verwertungswege angeordnet nach zunehmender Einsparung an Umweltbelastung. Das Entsorgungsszenario ist unabhängig von der Höhe der Umwelteinsparung ganz links dargestellt. Der schwarze Balken zeigt die Nettobilanz. Ist diese negativ, kann eine Netto-Einsparung an Umweltbelastung durch die Valorisierung/Verwertung erreicht werden. Ist die Nettobilanz positiv, wird mehr Umweltbelastung durch die Valorisierung/Verwertung verursacht als eingespart werden kann. In runden Klammern ist jeweils das substituierbare Produkt aufgeführt.

Pro kg Schweins-Innereien ist die Einsparung am höchsten bei den Valorisierungswegen direkter Verzehr und Extrusion, weil mit diesen Valorisierungswegen Fleisch ersetzt werden kann. Ebenfalls einen hohen Umweltnutzen bietet die Valorisierung von Schweins-Innereien zu Fleischproteinisolat. Obwohl die Ausbeute relativ tief ist und die Umweltbelastung durch die Valorisierung höher als bei den anderen beiden Valorisierungswegen ist, kann durch den hohen Proteingehalt des Fleischproteinisolates eine hohe Einsparung an Umweltbelastung durch die Substitution von Fleisch erzielt werden. Das Potenzial dieses Weges ist jedoch durch den maximalen Anteil von Fleischproteinisolat in verarbeiteten Fleischwaren limitiert (siehe auch Kapitel 4.2 Marktnachfrage). Die betrachteten Verwertungswege führen im Vergleich zu einem wesentlich tieferen Umweltnutzen, da die Umweltbelastung der substituierbaren Produkte tiefer ist. Der Verwertungsweg Pet-Food schneidet unter den betrachteten Verwertungswegen am besten ab, da die Umweltbelastung vom ersetzbaren pflanzlichen Protein vergleichsweise hoch ist. Der Umweltnutzen durch die Verwertung als Tiermehl ist im Vergleich leicht tiefer, jedoch etwas höher als bei der Vergärung, Verbrennung und Kompostierung. Bei der Herstellung von Tiermehl hat zusätzlich die eher tiefe Ausbeute und die vergleichsweise hohe Umweltbelastung durch den Verwertungsprozess einen Einfluss auf die Netto-Umweltbilanz. Die Kompostierung führt tendenziell zum tiefsten Umweltnutzen.

Werden die Valorisierungs- und Verwertungswege mit der Verbrennung von Schweins-Innereien verglichen, kann zwischen 0.01% höhere Umweltbelastung (bei der Kompostierung) und 6% tiefere Umweltbelastung (beim direkten Verzehr) pro kg verwerteter/valorisierter Nebenstrom entstehen (siehe Abbildung 23).

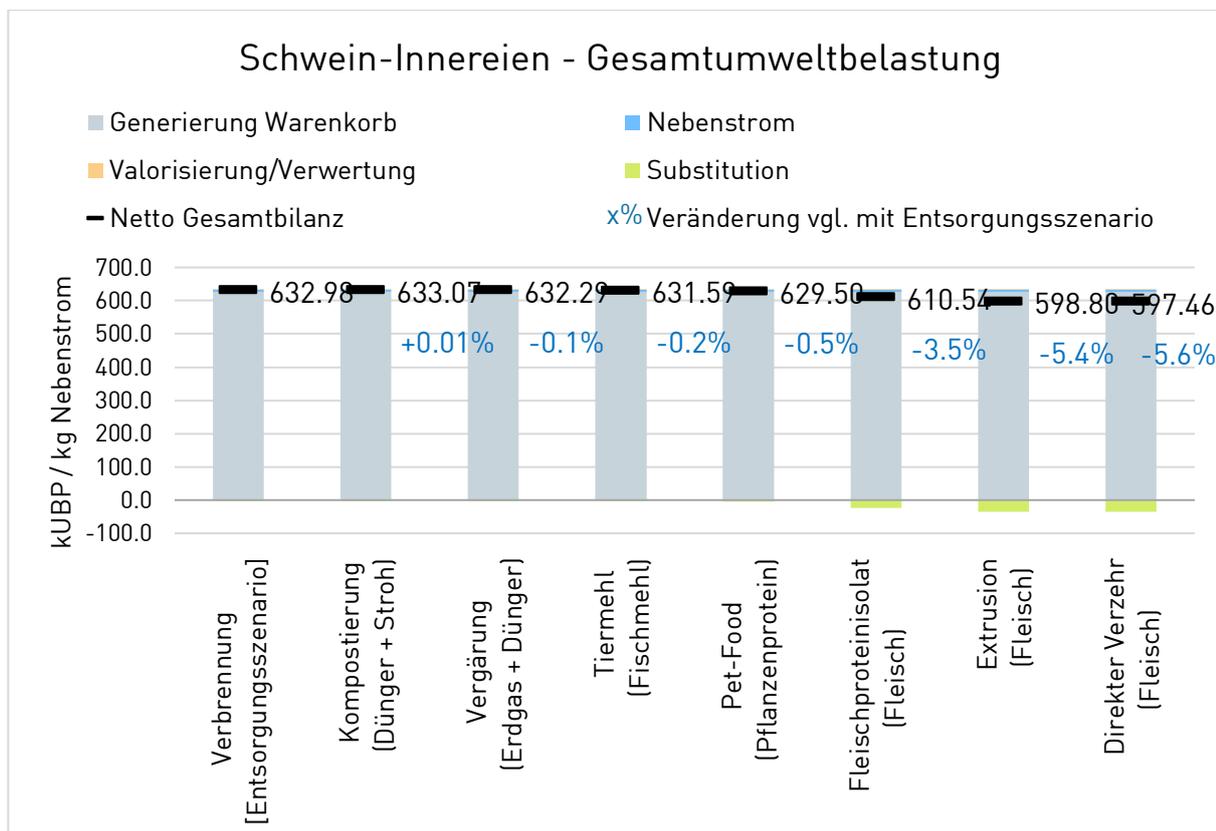


Abbildung 23: Gesamtumweltbelastung in kUBP pro kg Schweins-Innereien der untersuchten Valorisierungs-/Verwertungswege unter Berücksichtigung der vollständigen Systemgrenzen, angeordnet nach zunehmender Einsparung an Umweltbelastung. Das Entsorgungsszenario ist unabhängig von der Höhe der Umwelteinsparung ganz links dargestellt. Die schwarze Zahl zeigt, wie viel Umweltbelastung Netto durch das Gesamtsystem verursacht wird. Je tiefer diese ist, desto sinnvoller ist der Valorisierungs-/Verwertungsweg für die Umwelt. Die blaue Prozentzahl zeigt die Einsparung (negative Prozentzahl) resp. Erhöhung (positive Prozentzahl) der Umweltbelastung verglichen mit dem Entsorgungsszenario. In runden Klammern ist jeweils das substituierbare Produkt aufgeführt.

Bezüglich der THG-Emissionen gibt es einen relevanten Unterschied (vgl. Abbildung 42 im Anhang B.1). Die Verwertung als Tiermehl führt zu mehr THG-Emissionen als durch den Ersatz von Fischmehl eingespart werden kann. Dies hat damit zu tun, dass die Umweltbelastung (UBPs) der ersetzbaren Fischmehlproduktion vor allem auf die Überfischung und der Emission von Wasserschadstoffen zurückzuführen ist. Werden also lediglich THG-Emissionen betrachtet, gibt es keinen Umweltnutzen durch die Verwertung als Tiermehl. Wird jedoch die Gesamtumweltbelastung berücksichtigt, gibt es einen Umweltnutzen.

Sensitivitätsanalyse Nutzungsszenario

Beim Nebenstrom Schweins-Innereien wurde die Sensitivität bezüglich der substituierbaren Produkte bei der Verbrennung, Vergärung und beim Fleischproteinisolat geprüft (vgl. Tabelle 23). Wenn bei der Verbrennung anstelle vom Schweizer Strommix Strom aus fossilen Quellen ersetzt wird, ist der Netto-Umweltnutzen verglichen mit dem Standardszenario höher. Umgekehrt ist, wenn Strom aus erneuerbaren Quellen ersetzt werden würde, der Umweltnutzen verglichen mit dem Standardszenario tiefer. Die Unterschiede sind jedoch im Vergleich mit den anderen betrachteten Valorisierung- & Verwertungswegen sehr klein. Die Sensitivitätsanalyse bestätigt somit den grundsätzlichen im Vergleich tiefen Umweltnutzen der Verbrennung von Schweins-Innereien.

Wenn nicht Erdgas wie im Standardszenario, sondern grüner Wasserstoff substituiert wird, schneidet die Vergärung sowohl bezüglich der Gesamtumweltbelastung als auch den THG-Emissionen im Vergleich wesentlich schlechter ab. Dies bestätigt den im Vergleich tiefen Umweltnutzen durch die Vergärung von Schweins-Innereien.

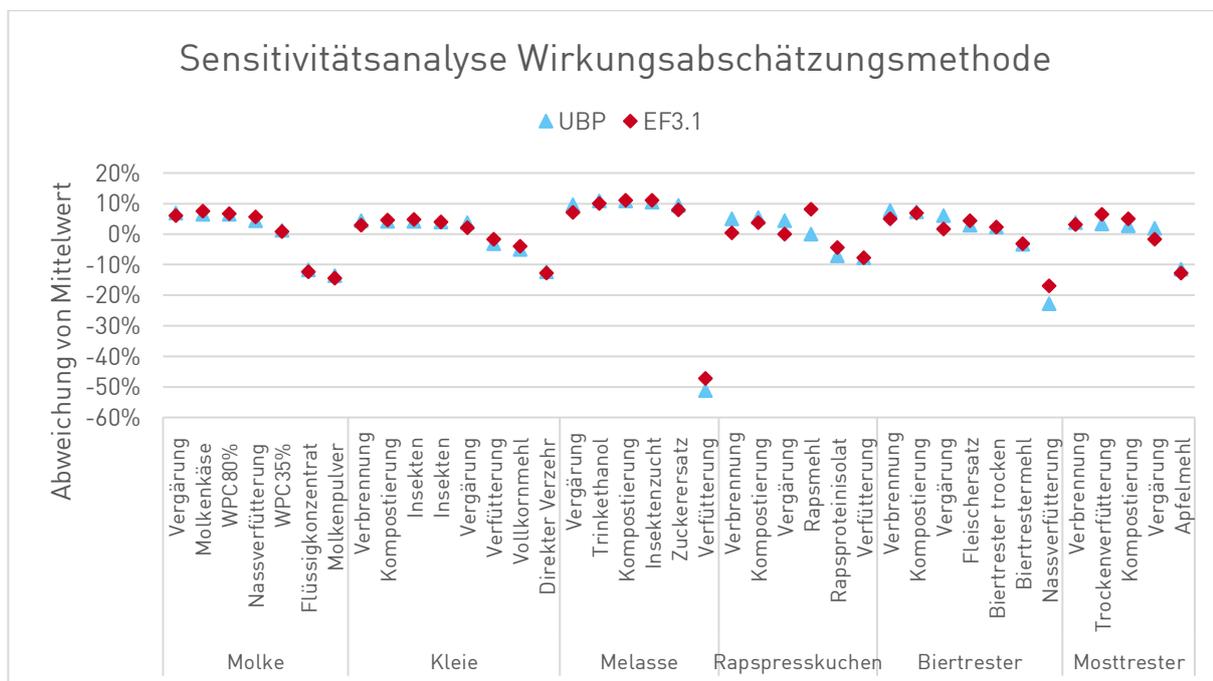
Beim Standardszenario zum Fleischproteinisolat wurde davon ausgegangen, dass durch die Beimischung in verarbeiteten Fleischprodukten Fleisch ersetzt werden kann. Jedoch kann Fleischproteinisolat auch andere Proteinisolate wie zum Beispiel Molkenproteinisolat substituieren. Daher wurde in der Sensitivitätsanalyse geprüft, wie sich die Resultate verändern, wenn Molkenproteinisolat substituiert werden würde. Der Umweltnutzen bei einer Substitution von Molkenprotein ist höher verglichen mit dem Standard-Szenario, sowohl bezüglich Gesamtumweltbelastung als auch THG-Emissionen. Durch die generell tiefe Ausbeute beim Molkenproteinisolat (vgl. auch Resultate zu Molke), ist die Umweltbelastung und THG-Emissionen von Molkenproteinisolat im Vergleich relativ hoch. Diese Analyse bestätigt den hohen Umweltnutzen des Fleischproteinisolates.

Tabelle 23: Resultate aus der Sensitivitätsanalyse zum Nutzungsszenario beim Nebenstrom Schweins-Innereien.

	Sensitivitätsanalyse Verbrennung			Sensitivitätsanalyse Vergärung		Sensitivitätsanalyse Fleischproteinisolat	
	Substitu- tion Strom fossil	Substitu- tion Strom erneuer- bar	Substituti- on Strommix (Standard)	Substituti- on Grüner H2	Substitution Erdgas (Standard)	Substitu- tion Molkenp- rotein	Substitutio- n Fleisch (Standard)
Netto- Umweltbilanz [kUBP]	-0.25	-0.08	-0.18	-0.30	-0.86	-39.47	-22.62
Netto- Umweltbilanz [kg CO2-eq]	-0.23	-0.09	-0.12	-0.012	-0.73	-17.26	-5.67

3.2 Resultate Sensitivitätsanalyse Wirkungsabschätzung

Um die Robustheit der Resultate gegenüber der Wahl der Methode der ökologischen Knappheit (UBPs) zur Bewertung der Gesamtumweltbelastung zu beurteilen, wurde wie in Kapitel 2.3 beschrieben eine Sensitivitätsanalyse mit der Methode EF3.1 durchgeführt. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse können der Abbildung 24 entnommen werden. Wenn die prozentuale Abweichung vom Mittelwert für ein Szenario ähnlich gross bei beiden Wirkungsabschätzungsmethoden ist, können die Resultate als wenig sensitiv gegenüber der Wahl der Wirkungsabschätzungsmethode beurteilt werden. Wenn es grössere Unterschiede zwischen der prozentualen Abweichung innerhalb eines Szenarios gibt, sind die Resultate sensitiver gegenüber der Wahl der Wirkungsabschätzungsmethode. Grundsätzlich sind die Ergebnisse relativ robust gegenüber der Wahl der Wirkungsabschätzungsmethode.



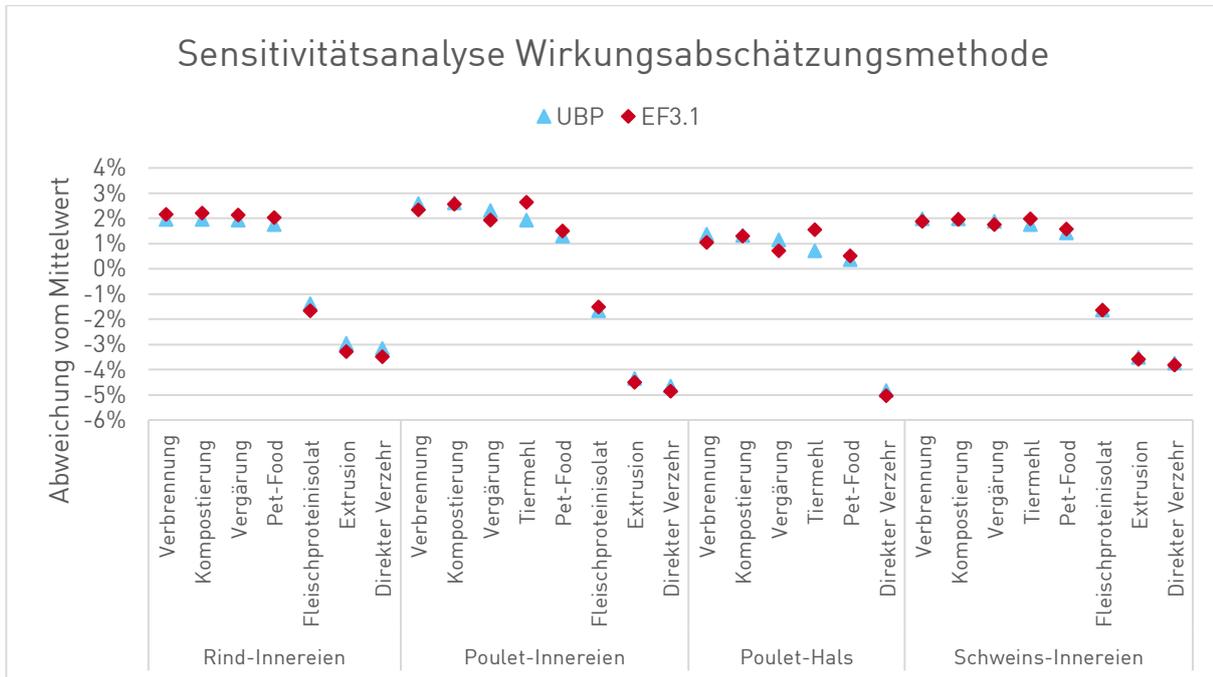


Abbildung 24: Umweltbelastung der verschiedenen Szenarien, bewertet nach der Methode der ökologischen Knappheit (UBP) und EF3.1, ausgedrückt in prozentualer Abweichung vom Mittelwert je Nebenstrom gemäß der jeweiligen Wirkungsabschätzungsmethode. Je ähnlich gross die Abweichung der beiden Methoden für ein Szenario ausfällt, desto robuster sind die Resultate gegenüber der Wirkungsabschätzungsmethode.

Beim Nebenstrom Molke ist zu erwähnen, dass wenn die Umweltbelastung mit der Methode EF3.1 bewertet wird, die Weichkäseproduktion mehr Umweltbelastung verursacht, als durch die Gutschrift eingespart werden kann. Dies bestätigt die oben beschriebenen Resultate, dass aus ökologischer Sicht die Valorisierung zu Molkenkäse im Vergleich weniger sinnvoll ist.

Beim Nebenstrom Kleie schneidet bei der Methode EF3.1 die Insektenzucht mit Ersatz von Fischmehl schlechter ab als bei der Betrachtung von UBPs. Dies hat damit zu tun, dass bei der Methode EF3.1 der Aspekt des biotischen Ressourcenverbrauchs (hier Überfischung) im Vergleich zur Methode der ökologischen Knappheit nicht berücksichtigt wird. Deshalb fällt die Gutschrift in diesem Szenario tiefer aus. Im Gegensatz dazu, ist die Gutschrift beim Szenario Verbrennung höher bei der Methode EF3.1, weshalb das Szenario unter dieser Betrachtung tendenziell besser als die Kompostierung und Insektenzucht abschneidet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass beim Ersatz von Strom die Umweltauswirkungen durch die ionisierende Strahlung nur bei der Methode EF3.1 nicht aber bei der Methode der ökologischen Knappheit berücksichtigt wird.

Die Resultate des Nebenstroms Melasse sind relativ sensitiv gegenüber der Wirkungsabschätzungsmethode. Vor allem das Szenario Insektenzucht schneidet bei der Wirkungsabschätzung mit der Methode EF3.1 schlechter ab. Analog zur Weizenkleie ist dies auf Unterschiede in der Bewertung der Überfischung zurückzuführen. Da die anderen Szenarien bei der Melasse zu einer sehr ähnlich hohen Einsparung an Umweltbelastung führen, ändert die Reihenfolge der ökologischen Sinnhaftigkeit der Szenarien je nach Wahl der Wirkungsabschätzungsmethode. Der Umweltnutzen ist aber auch bei der Methode EF3.1 ähnlich tief.

Beim Nebenstrom Rapspresskuchen führt das Szenario Rapsmehl zu unterschiedlichen Resultaten verglichen mit der Methode der ökologischen Knappheit. Mit der Methode EF3.1 führt die Herstellung von Rapsmehl zu Netto mehr Umweltbelastung als durch den Ersatz von Weizenmehl eingespart werden kann. Dies widerspricht dem berechneten Umweltnutzen in UBPs, bestätigt jedoch den Netto-Umweltschaden bei der Betrachtung der THG-Emissionen. Die Resultate zum Rapsmehl sind somit mit einer hohen Unsicherheit verbunden.

Beim Nebenstrom Biertrester schneidet das Szenario Vergärung mit der Methode EF3.1 besser ab, sogar besser als der getrocknete Biertrester und der Fleischersatz aus Biertrester. Auch die Verbrennung schneidet leicht besser ab, da analog zur Weizenkleie die Gutschrift für den Strom höher ausfällt.

Gleichermassen schneidet beim Nebenstrom Mosttrester die Verbrennung und Vergärung besser ab aufgrund der höheren Gutschrift für Strom bei der Methode EF3.1.

Die Resultate beim Nebenstrom Rind-Innereien sind kaum sensitiv gegenüber der Wahl der Wirkungsabschätzungsmethode. Die Reihenfolge des Umweltnutzens der untersuchten Szenarien bleibt gleich.

Bei den Nebenströmen Poulet-Innereien, Poulet-Hals und Schweins-Innereien weichen vor allem die Resultate beim Szenario Tiermehl ab. Mit der Methode EF3.1 verursacht die Tiermehlproduktion eine höhere Umweltbelastung als durch den Ersatz von unter anderem Fischmehl eingespart werden kann. Analog zur Insektenzucht ist das auf die nicht-Berücksichtigung der Überfischung zurückzuführen. Dies widerspricht dem berechneten Umweltnutzen in UBPs, bestätigt jedoch den Netto-Umweltschaden bei der Betrachtung der THG-Emissionen. Die Resultate zeigen, dass die Tiermehlherstellung vor allem zur Minderung der Überfischung beiträgt, jedoch kaum zur Minderung anderer Umweltauswirkung.

4 Diskussion

4.1 Einordnung der Resultate

Die Studie hat gezeigt, dass sich über alle Nebenströme betrachtet eine Valorisierung und Verwertung der Nebenströme aus ökologischer Sicht fast in allen Fällen lohnt. Einzig bei einigen der untersuchten Nebenströme kann die Kompostierung und die Verbrennung eine Mehrbelastung der Umwelt verursachen. Ebenso ist bei der Trockenverfütterung, mit welcher ein hoher Energieaufwand einhergeht, und auch bei der Rapsmehlherstellung mit einer Mehrbelastung der Umwelt zu rechnen. Die Resultate verdeutlichen ebenfalls, dass durch die Verwertung und Valorisierung in den allermeisten Fällen eine Einsparung an Umweltbelastung verglichen mit einem Standard-Entsorgungsszenario erzielt werden kann. Während diese Einsparung bei einigen untersuchten Nebenströmen relativ klein ausfällt, gibt es bei jedem Nebenstrom einen Weg, mit dem eine Einsparung von rund 10% oder mehr verglichen mit einer Entsorgung erreicht werden kann. Bei den Nebenströmen Molke, Biertrester und Melasse liegt das Potenzial des am besten abschneidenden Weges sogar bei rund 20% oder mehr.

Wird das Abschneiden der Valorisierungswege mit dem der Verwertungswege verglichen, ist das Ergebnis vom jeweiligen betrachteten Nebenstrom abhängig. Jedoch sind Valorisierungswege meistens mit einem tendenziell höheren Umweltnutzen verbunden und somit aus ökologischer Sicht oft sinnvoller. Bei den Verwertungswegen haben insbesondere die Kompostierung, Verbrennung und Vergärung häufig eine tiefere Einsparung an Umweltbelastung zur Folge, vor allem bezogen auf die Gesamtumweltbelastung und sind daher aus Umweltsicht meist weniger sinnvoll. Andere Verwertungswege (z.B. die Verfütterung) können jedoch ähnlich oder in gewissen Fällen sogar besser als gewisse Valorisierungswege abschneiden.

Die zusätzliche Umweltbelastung durch den Valorisierungs-/Verwertungsprozess hat nur selten einen wesentlichen Einfluss auf das Gesamtergebnis. Die Ergebnisse hängen viel mehr von der möglichen Einsparung an Umweltbelastung durch die Substitution anderer Produkte ab. Die durchgeführte Sensitivitätsanalyse verdeutlicht dies. Während die Resultate grundsätzlich relativ robust gegenüber den getroffenen Annahmen zu den substituierbaren Produkten sind, gibt es vor allem beim Verwertungsweg Vergärung und bei den Szenarien Biertrester-Fleischersatz und Rapsproteinisolat grössere Unterschiede in der ökologischen Bewertung dieser Wege je nach berücksichtigtem substituierbarem Produkt.

Die Sensitivitätsanalyse zum Ersatz eines fossilen resp. erneuerbaren Strommixes bei der Verbrennung führt generell zu keinen grösseren Verschiebungen in den Resultaten. Bei der Sensitivitätsanalyse zur Vergärung (Ersatz von grünem Wasserstoff anstelle von Erdgas) schneidet die Vergärung über alle Nebenströme wesentlich schlechter ab. Während die Vergärung vor allem zur Reduktion von THG-Emissionen beiträgt, unter der Voraussetzung, dass fossile Energiequellen ersetzt werden, trägt sie wenig zur Reduktion von anderen Umweltbelastungen bei. Daher ist die Vergärung, insbesondere wenn erneuerbare Energiequellen ersetzt werden, aus ökologischer Sicht weniger sinnvoll.

Weiter sind die Resultate grundsätzlich relativ robust gegenüber der Wahl Wirkungsabschätzungsmethode zur Bewertung der Gesamtumweltbelastung. Die Wahl der

Wirkungsabschätzungsmethode hat vor allem einen Einfluss auf Szenarien, in welchen Fischmehl ersetzt wird, da die Überfischung je nach gewählter Methode unterschiedlich bewertet wird. Zudem hat die Analyse gezeigt, dass der Umweltnutzen der Szenarien Verbrennung und Vergärung bei der Bewertung der Umweltbelastung gemäss der Methode der ökologischen Knappheit im Vergleich zu anderen Wirkungsabschätzungsmethoden eher tief ausfällt. Der berechnete Umweltnutzen dieser beiden Szenarien könnte somit als eher konservativ eingeschätzt werden.

Die Resultate zeigen aufgrund der Wahl der funktionellen Einheit keine Sensitivität gegenüber einer Allokation von Umweltwirkung zwischen Hauptprodukt und Nebenstrom (vgl. auch Kapitel 2.3 Sensitivitätsanalyse).

Während die absoluten Resultate aufgrund von Unterschieden in den Systemgrenzen, der funktionellen Einheit und der bewerteten Umweltwirkungen nicht direkt mit den Resultaten anderer Ökobilanzierungsstudien vergleichbar sind, gibt es dennoch Studien, die zu ähnlichen Schlussfolgerungen kommen. Zum Beispiel bei der Molke hat die Studie von Kopf-Bolanz et al. (2015) ebenfalls gezeigt, dass höher konzentrierte WPCs aus Umweltsicht weniger sinnvoll als tiefer konzentrierte WPCs sind. In einer Studie zur Ökobilanz zum Ersatz von Fischmehl durch die Verwertung von Schlachtabfällen als Tiermehl wurde gezeigt, dass Fischmehl und -öl höhere THG-Emissionen als die Produktion von Poulet-Tiermehl und Poulet-Fett haben (Campos, Pinheiro Valente, Matos, Marques, & Freire, 2020). Dieses Ergebnis weicht vom Resultat dieser Studie ab. Mögliche Gründe für die Unterschiede liegen in der verwendeten Datengrundlage und unterschiedlichen Annahmen bezüglich dem Produktionsverfahren. Die Studie zeigt nämlich auch, dass die THG-Emissionen zwischen -40% bis +85% je nach verwendetem Energieträger abweichen können. Eine Studie zur Ökobilanz von Insektenmehl hat gezeigt, dass dieses ähnlich hohe THG-Emissionen wie Fischmehl verursacht und tendenziell höhere THG-Emissionen als pflanzliche Proteine (Smetana, Schmitt, & Mathys, 2019). Die Insektenzucht führt also je nach substituiertem Produkt zu höheren THG-Emissionen als eingespart werden können. Die vorliegende Studie hat ebenfalls gezeigt, dass die Insektenzucht im Vergleich zu anderen Valorisierungs-/Verwertungswegen zu einem eher tiefen Umweltnutzen führt. Dennoch ist die Einsparung höher als die Umweltbelastung durch die Insektenzucht. Dies kann auf die energieoptimierte Insektenzucht, welche berücksichtigt wurde, zurückgeführt werden. Ebenfalls ist zu erwähnen, dass mit der Insektenzucht die Möglichkeit besteht, Nebenströme tieferer Qualität einzusetzen (z.B. auch verfaulte oder verunreinigte Produkte) und somit vor allem auch eine Alternative zur Verbrennung oder Vergärung darstellen kann. Nicht zuletzt zeigt auch die Studie von Scherhauser et al. (2020), dass es bei der Verwertung und Valorisierung von Biertrester und Mosttrester zu unterschiedlichen Ergebnissen je nach getroffenen Annahmen zum substituierbaren Produkt kommen kann, was auch unsere Analysen bestätigen.

Generell ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den Resultaten um eine Abschätzung der durchschnittlichen Umweltwirkung der Valorisierung und Verwertung von Nebenströmen handelt. Der spezifische Fall kann daher aufgrund unterschiedlicher Gegebenheiten von den Resultaten dieser Studie abweichen und ist jeweils separat zu analysieren.

4.2 Limitationen und Hinweise zur Interpretation

Bei der Interpretation der Ergebnisse sind einige Limitationen und Hinweise zu berücksichtigen, welche in diesem Kapitel erläutert werden.

Untersuchte Verwertungs- und Valorisierungsverfahren

Die vorliegenden Resultate wurden wo immer möglich anhand zurzeit in der Schweiz vorhandenen und verbreiteten Verfahren und Technologien modelliert und berechnet. Somit sind die Resultate auch nur für die berücksichtigten Technologien gültig. Die Entwicklung von umweltfreundlicheren Verfahren oder die Effizienzsteigerung bei bestehenden Verfahren (z.B. durch technologische Optimierungen oder Skalierung von bestehenden Verfahren) kann daher auch die Ökobilanz einzelner Valorisierungs-/Verwertungswege beeinflussen. Somit sind das Einsparpotenzial und die Einordnung der einzelnen Wege als Status quo unter den gegebenen Annahmen und nicht als statisch zu betrachten.

Gleichermassen ist die Studie als nicht abschliessend bezüglich der Valorisierungs- und Verwertungsverfahren zu betrachten. Einige Verfahren konnten aufgrund fehlender Kenntnis von deren Existenz, fehlender Datengrundlage oder des begrenzten Umfangs der Studie nicht berücksichtigt werden. Insbesondere die Einordnung auf der Skala von 0-1 (siehe Kapitel B.2) ist somit nicht als absolut zu betrachten. Neue Verfahren könnten sich am ganz rechten oder linken Ende der Skala einordnen.

Annahmen zum substituierbaren Produkt/Nutzungsszenario

Analog sind die Resultate auch nur für die untersuchten Nutzungsszenarien gültig. Wie die Sensitivitätsanalyse gezeigt hat (vgl. 2.5), kann die Annahme zum substituierbaren Produkt die Resultate unter Umständen wesentlich beeinflussen. Für die Definition der substituierten Produkte mussten verschiedene Annahmen getroffen werden, insbesondere wenn mehrere Produkte substituiert werden können und/oder ungenügende Informationen zum Markt vorhanden waren. Dies verdeutlicht, dass der Umweltnutzen des spezifischen Anwendungsfall von den Resultaten dieser Studie abweichen kann.

Bei gewissen Szenarien ergeben sich zudem aufgrund inhärenter Unterschiede zwischen dem Produkt aus der Valorisierung/Verwertung und dem substituierbaren Produkt weitere Unsicherheiten rund um die Resultate (vgl. auch Kapitel 2.3 Systemgrenzen & Allokation). Bei den Produkten gibt es oft Unterschiede in gewissen Nährstoffgehalten oder funktionalen Eigenschaften. Wo sinnvoll wurden die wichtigsten Unterschiede bei der Bestimmung des Substitutionsfaktors berücksichtigt (z.B. bei Protein-Produkten oder Futtermitteln). Bei anderen Produkten konnten Unterschiede aufgrund der vielfältigen Funktionen eines Lebensmittels jedoch nicht berücksichtigt werden, weshalb Produkte aus der Valorisierung/Verwertung nicht in allen Aspekten ernährungsphysiologisch identisch mit den substituierbaren Produkten sind. Auch unterschiedliche Wertigkeiten von Proteinen wurden in den Berechnungen nicht berücksichtigt. Daher können bei einer Berücksichtigung von anderen/weiteren ernährungsphysiologischen Eigenschaften die Ergebnisse von denen dieser Studie abweichen.

Datengrundlage und Unsicherheiten

Die Datenqualität variiert je nach untersuchtem Valorisierungs- und Verwertungsweg, sie wird jedoch weitgehendst als repräsentativ für die Schweizer Industrie bewertet (vgl. Tabelle 3 - Tabelle 12 im Kapitel 2.4). Für gewisse Wege konnten aktuelle Primärdaten aus der Schweizer

Industrie in Erfahrung gebracht werden. Einige davon sind aber repräsentativ für eine optimierte Produktion oder werden noch nicht grossindustriell angewendet. Dies ist bei der Interpretation der Resultate zu berücksichtigen (vgl. auch Kapitel 4.2 Untersuchte Verwertungs- und Valorisierungsverfahren).

Für gewisse Wege standen nur Literaturdaten oder Daten aus bestehenden Ökobilanzdatenbanken zur Verfügung. Hier muss berücksichtigt werden, dass diese zum Teil nur ähnliche/vergleichbare Produktionsverfahren abbilden, zum Teil weniger detailliert sind resp. Nebenstrom-spezifische Eigenschaften nicht zwingend vollumfänglich berücksichtigen oder auf älteren Datengrundlagen basieren. Die basierend auf Literaturwerten analysierten Verwertungs-/Valorisierungswege sind somit mit einer höheren Unsicherheit verbunden.

Für die Berechnung der Umweltbelastung der substituierbaren Produkte wurde generell auf bestehende Ökoinventare zurückgegriffen. Daraus ergeben sich einige Limitationen. Es liegen nicht für alle substituierbaren Produkte Schweiz-spezifische Ökoinventare vor, weshalb die Umweltbelastung der substituierbaren Produkte nicht zwingend diejenigen der Schweizer Produktion widerspiegelt. Die Abbildung Schweiz-spezifischer Produktion von substituierbaren Produkten war jedoch nicht Ziel und Gegenstand dieser Studie. Die Aussagekraft der Studie könnte durch die Verfeinerung der Datengrundlage der substituierbaren Produkte verbessert werden, was im Rahmen von weiterführenden Analysen berücksichtigt werden könnte.

Wie im Unterkapitel 2.3 Systemgrenzen & Allokation erwähnt wird bei den substituierbaren Produkten aus Koppelprozessen keine Systemerweiterung, sondern eine Allokation entsprechend der vorhandenen Inventare in der Hintergrunddatenbank vorgenommen. Dies kann die Resultate und somit das Abschneiden einzelner Wege unter Umständen beeinflussen.

Marktnachfrage

Die erfolgreiche Valorisierung ist abhängig von einer vorhandenen Marktnachfrage, denn ohne Konsumierende ist auch ein valorisierter Nebenstrom nur ein weiterer Lebensmittelverlust. Die vorhandene Nachfrage wurde teilweise bei der Auswahl der Nebenströme und Valorisierungs- und Verwertungswege berücksichtigt (vgl. Kapitel 2.2). Jedoch wurden auch Wege berücksichtigt, welche aktuell wenig oder noch nicht nachgefragt werden (z.B. aufgrund fehlender Akzeptanz, fehlender Bekanntheit oder limitierten Anwendungsbereichen des valorisierten Produktes). Die Marktnachfrage und das Marktpotenzial ist jedoch ein relevanter Parameter, welcher bei der Interpretation der Resultate berücksichtigt werden muss.

Die Resultate dieser Studie machen eine Aussage über die Umwelteinsparung eines Valorisierungs-/Verwertungsweges relativ zur valorisierten/verwerteten Menge Nebenstrom, wobei das Marktpotenzial nicht berücksichtigt wird. Je nach Valorisierungs-/Verwertungsweg kann die Marktnachfrage zum heutigen Zeitpunkt aber limitiert sein, was sich auf das gesamte Einsparpotenzial des Weges auswirkt. Zum Beispiel kann mit dem direkten Verzehr von Weizenkleie pro kg Kleie am meisten Umweltbelastung eingespart werden. Das Potenzial dieses Valorisierungsweges ist jedoch durch den maximalen Anteil, mit dem Kleie einem Produkt wie Müsli oder Backwaren beigemischt werden kann, begrenzt. Die ganze in der Schweiz anfallende Weizenkleie-Menge kann somit kaum nur über diesen einen aus ökologischer Sicht am sinnvollsten Valorisierungsweg valorisiert werden. Gleiches gilt für die Valorisierung von Kleie zu Vollkornmehl, denn auch da ist der Anteil Kleie im Mehl begrenzt. Auch beim Nebenstrom Rapspresskuchen und Mosttrester ist der Einsatz von Rapsmehl resp. Apfelmehl in Gebäck limitiert. Ein weiteres Beispiel ist die Valorisierung von

Fleischproteinisolat aus Innereien, bei denen Fleischproteinisolat als Ersatz von regulärem Fleisch in verarbeiteten Fleischprodukten eingesetzt werden kann. Auch dort ist der Anteil des beigemischten Fleischproteinisolates limitiert und somit auch das Umweltpotenzial dieses Valorisierungsweges. Die Studie macht also keine Aussage über das Gesamtumweltpotenzial eines Valorisierungs-/Verwertungsweges.

Einige der Valorisierungen/Verwertungen werden aktuell in der Schweiz nicht durchgeführt, die entsprechenden Produkte sind somit auch kaum auf dem Markt erhältlich und werden nicht nachgefragt (z.B. Fleischextrudat, Fleischproteinkonzentrat, Rapsproteinisolat, Rapsmehl). Diese Wege wurden dennoch untersucht, um ihr Umweltpotenzial aufzuzeigen und mögliche Argumente rund um die Einführung und Etablierung neuer Produkte zu liefern.

Daher zeigen die Resultate eine Priorisierung der Valorisierungs-/Verwertungswege aus Umweltsicht. Es bedarf jedoch darauf aufbauender Massnahmen, um diese Prioritäten und deren potenziellen Umweltnutzen zu realisieren. Zum Beispiel kann die aktive Vermarktung von innovativen Produkten - mit dem in der Studie gezeigten potenziellen Umweltnutzen als mögliches Argument - deren Absatz wirksam fördern und das Gesamtumweltpotenzial so erhöhen. In der Realität werden wahrscheinlich kurz- und mittelfristig auch Wege mit weniger hohen Umweltbelastungseinsparungen nötig sein, welche aber in der Schweiz verbreitet, akzeptiert und eine breite Anwendung finden, um die in der Schweiz anfallende Gesamtmenge an Nebenströmen valorisieren zu können.

Gesetzgebung

Die Studie berücksichtigt weitgehendst die aktuellen Schweizer Regulatorien rund um Lebensmittelprodukte. Durch mögliche künftige regulatorische Anpassungen oder auch die Möglichkeit der Beantragung von neuen Zulassungen für Produkte, könnte sich die Umwelteinsparung einzelner Verwertungs-/Verwertungswegen verändern. Zum Beispiel ist die Verfütterung von Insekten oder auch Tiermehl an Nutztiere mit wenigen Ausnahmen nicht zugelassen. Bei einer Gesetzesanpassung könnten andere Futtermittel als in der Studie angenommen ersetzt werden, welche möglicherweise eine höhere Umweltbelastung aufweisen und deren Substitution demzufolge auch mit einem höheren Umweltnutzen verbunden wäre.

Ebenfalls können neuartige Produkte künftig Zulassungen erhalten und neue Umweltpotenziale erschliessen, z.B. neue Produkte, welche aus Rapspresskuchen gewonnen werden und einer Zulassungspflicht unterliegen. Gleichzeitig wirkt das Zulassungsverfahren auch als Hürde, um neue Verfahren zu entwickeln und anzuwenden.

Komplexität und Wechselwirkungen im Agri-Food-System

Die Ökobilanzierung von Lebensmitteln ist unweigerlich mit gewissen Unsicherheiten verbunden durch die komplexe Modellierung von Umweltbelastung landwirtschaftlicher Produkte, welche je nach lokalen Gegebenheiten (Witterung, Bodenbeschaffenheit etc.) stark variieren können.

Zusätzlich kann es durch die vielzähligen Vernetzungen im Agri-Food System zu Wechselwirkungen kommen, welche durch die methodische Wahl der attributionalen Ökobilanz in diesem Bericht nicht berücksichtigt wurden. Um diese indirekten Effekte abbilden zu können, könnte eine konsequentielle Ökobilanz durchgeführt werden, welche diese Wechselwirkungen im Agrarmarkt berücksichtigen würde. Diese Betrachtungsweise war nicht Gegenstand der Studie.

Weitere Dimensionen der Nachhaltigkeit nicht berücksichtigt

Die Studie beschränkt sich wie in der Einleitung beschrieben auf die Analyse der Dimension Umwelt. Die anderen Nachhaltigkeitsdimensionen Wirtschaft und Soziales wurden nicht analysiert. Somit sind auch die potenziellen positiven Effekte der Valorisierung von Nebenströmen zum Beispiel auf die Ernährungssicherheit nicht berücksichtigt. Die Valorisierung von Nebenströmen kann gewissen bestehenden Herausforderungen der Schweizer Ernährungssicherheit entgegenwirken. Zum Beispiel kann durch die Valorisierung von Nebenströmen die Flächenproduktivität der in der Schweiz sinkenden Agrarfläche gesteigert werden (Ritzel & von Ow, 2023) oder die Verfügbarkeit von Proteinen für eine ausgewogene Ernährung erhöht werden.

Diese weiteren Nachhaltigkeitsaspekte sollten zusätzlich zu den Resultaten dieser Studie bei der Priorisierung von Valorisierungs- und Verwertungswegen berücksichtigt werden.

5 Schlussfolgerung

Erkenntnisse

Der vorliegende Bericht hat mittels der Erstellung von Ökobilanzen den potenziellen ökologischen Nutzen durch die Verwertung/Valorisierung von 10 in der Schweiz anfallenden Nebenströmen aufgezeigt, wobei sowohl die ökologische Zusatzbelastung des Verwertungs-/Valorisierungsprozesses als auch der ökologische Nutzen durch den Ersatz von anderen Produkten berücksichtigt wurde. Die Studie zeigt, dass eine Verwertung und Valorisierung von Nebenströmen mit einigen wenigen Ausnahmen einen Umweltnutzen bieten, wobei eine Valorisierung tendenziell zu einem höheren Umweltnutzen verglichen mit der Verwertung führt. Dies ist vor allem der Fall, wenn Primärprodukte mit einer hohen Umweltbelastung durch die Valorisierung ersetzt werden können. Die Verwertung ist aus Umweltsicht vor allem dann sinnvoll, wenn fossile Energieträger substituiert werden können. Die Verfüterung eines Nebenstromes kann je nach Nebenstrom aus Umweltsicht ebenfalls sinnvoll sein.

Diese Erkenntnisse können in die Priorisierung der einzelnen Valorisierungs- und Verwertungswege in der Industrie einfließen. Ebenfalls wurden mit der Studie Grundlagen geschaffen und Möglichkeiten aufgezeigt, wie die Verwertung und Valorisierung von Nebenströmen zur Erreichung der gesetzten Ziele im Rahmen des Aktionsplans gegen die Lebensmittelverschwendung beitragen können.

Ausblick

Die Studie beschränkt sich auf 10 für die Schweiz relevante Nebenströme (vgl. Kapitel 2.2). In der Schweiz fallen jedoch noch weitere Nebenströme an, deren Umweltpotenzial durch die Valorisierung/Verwertung aktuell kaum untersucht wurden. Die Durchführung von vergleichbaren Analysen für weitere Nebenströme ist daher sinnvoll, um allen in der Schweiz angesiedelten Lebensmittelindustrien Handlungsgrundlagen zur Verfügung zu stellen.

Die Studie hat sich auf bereits verbreitete oder bekannte Verwertungs- und Valorisierungswege konzentriert, sowie auf Wege, die den Nebenstrom nach Möglichkeit wieder für die menschliche Ernährung nutzbar machen. Die Studie ist also nicht als abschliessend bezüglich der untersuchten Valorisierungs- und Verwertungswege zu betrachten. Neue Innovationen in der Lebensmittelentwicklung bieten noch nicht untersuchte Potenziale. Gleichermassen wurden auch Verwertungen ausserhalb des Ernährungssystems kaum berücksichtigt. Die Nutzung von Nebenströmen für die Herstellung von Plastik, Pharmaprodukte oder Lederimitate - um nur einige Beispiele zu nennen - könnten ebenfalls weitere Umweltpotenziale bieten, welches in weiterführenden Analysen betrachtet werden könnte.

Wie in Kapitel 4.2 beschrieben, berücksichtigt die Studie kein schweizweites Gesamtumweltpotenzial, sondern lediglich das Umweltpotenzial pro kg valorisierter/verwerteter Nebenstrom. Eine Verknüpfung der Resultate aus dieser Studie mit einer Mengenanalyse der schweizweit anfallenden Nebenstrommengen und der Kapazität der Valorisierungs-/Verwertungswege könnten ergänzende Aussagen zum schweizweiten Gesamtumweltpotenzial der Verwertung und Valorisierung von Nebenströmen liefern.

Weiter könnten die Resultate dieser Studie in eine umfassende Nachhaltigkeitsbewertung von Valorisierungs- und Verwertungswegen zum Beispiel im Rahmen eines Life Cycle Sustainability Assessments (LCSA) einfließen. Eine umfassende Nachhaltigkeitsanalyse unter zusätzlicher

Berücksichtigung der sozialen und wirtschaftlichen Dimension der Nachhaltigkeit könnte zusätzliche Erkenntnisse liefern.

6 Referenzen

- Agroscope. (2016). *Futtermittelkatalog Melasse*. Von <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/de/home/services/dienste/futtermittel/futtermittelkatalog.html> abgerufen
- Agroscope. (2016). *Schweizerische Futtermitteldatenbank*. Von www.feedbase.ch abgerufen
- Agroscope. (2024). *Konzentrate und Trockenprodukte mit Milchhaltsstoffen*. Abgerufen am 27. September 2024 von <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/de/home/themen/lebensmittel/qualitaet/kaese-milch-milchprodukte/konzentrate-und-trockenprodukte-mit-milchhaltsstoffen.html#-970478673>
- Alig, M., Maeder, S., & Gehr, K. (2023). *Literaturrecherche – Valorisierung von Nebenströmen in der Lebensmittelindustrie (interner Bericht)*. Zürich: intep - Integrale Planung GmbH.
- AlpBioEco. (2020). *AlpBioEco Abschlussbericht*. Von https://www.alpine-space.eu/wp-content/uploads/2022/09/alpbioeco_final_report.zip abgerufen
- Andreasi Bassi, S., B. F., Ferrara, N., Amadei, A., Valente, A., Sala, S., & Ardente, F. (2023). Updated characterisation and normalisation factors for the Environmental Footprint 3.1. *Publications Office of the European Union*.
- Bacenetti, J., Bava, L., Schievano, A., & Zucali, M. (2018). Whey protein concentrate (WPC) production: Environmental impact. *Journal of Food Engineering*, 224, 139-147.
- BAFU. (2024). Die Ökoinventardatenbank des Schweizer Bundesamtes für Umwelt (BAFU). Zugänglich auf Anfrage an lca@bafu.admin.ch.
- Baier, U., Fuchs, J., Galli, U., & Konrad, S. (2022). *Produkte aus Vergärung + Kompostierung. Qualitätsrichtlinie der Branche 2022*. Verein Inspektorat der Kompostier- und Vergärungsanlagen der Schweiz.
- Beretta, C., & Hellweg, S. (2019). *Lebensmittelverluste in der Schweiz: Mengen und Umweltbelastung. Wissenschaftlicher Schlussbericht*. ETH Zürich.
- Beretta, C., Stucki, M., & Hellweg, S. (2017). Environmental Impacts and Hotspots of Food Losses: Value Chain Analysis of Swiss Food Consumption. *Environmental Science & Technology*(51), 11165-11173.
- BFE. (2020). *Energieperspektiven 2050+*.
- BFE. (2023). *Einheitliche Heizwert- und Energiekennzahlenberechnung der Schweizer KVA nach europäischem Standardverfahren*. BFE, BAFU, VBSA, Bern.
- Bintsis, T., & Papademas, P. (2023). Sustainable Approaches in Whey Cheese Production: A Review. *Dairy*(4), 249-270.

- Blonk, H., van Paassen, M., Draijer, N., Tyszler, M., Braconi, N., & van Rijn, J. (2023). *Agri-footprint 6 and Agri-footprint FLAG Methodology Report. Part2: Description of Data*. Gouda, NL.
- BLV. (2024). *Neuartige Lebensmittel und Lebensmittelzutaten, die gemäss der Verordnungen (EG) Nr. 258/97 und 2015/2283 in Verkehr gebracht werden können*.
- BLV. (2024). *Schweizer Nährwertdatenbank V6.5*. Von <https://naehrwertdaten.ch/de/downloads/> abgerufen
- Campos, I., Pinheiro Valente, L., Matos, E., Marques, P., & Freire, F. (2020). Life-cycle assessment of animal feed ingredients: Poultry fat, poultry by-product meal and hydrolyzed feather meal. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119845.
- Chen, W., Oldfield, T. L., Cinelli, P., Righetti, M. C., & Holden, N. M. (2020). Hybrid life cycle assessment of potato pulp valorisation in biocomposite production. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122366.
- Chuck-Hernandez, C., & Ozuna, C. (2019). Protein Isolates From Meat Processing By-Products. In C. Galanakis, *Proteins: Sustainable Source, Processing and Applications* (S. 131-162). Academic Press.
- Der Bundesrat. (2022). *Aktionsplan gegen die Lebensmittelverschwendung*. Von <https://www.news.admin.ch/news/message/attachments/70975.pdf> abgerufen
- Der Bundesrat. (18. 09 2023). *Tierische Proteine an Geflügel und Schweine verfüttern: Vernehmlassung eröffnet*. Abgerufen am 28. 10 2024 von <https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-97757.html>
- Dinkel, F., Zschokke, M., & Schleiss, K. (2012). *Ökobilanzen zur Biomasseverwertung*. Carbotech AG. Bundesamt für Energie BFE.
- DüV. (1. November 2023). *Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngern*.
- EFSA. (2013). Scientific Opinion on the safety of “rapeseed protein isolate” as a Novel Food ingredient. *EFSA Journal*, 11(10), 3420.
- EFSA. (2020). Safety of rapeseed powder from Brassica rapa L. and Brassica napus L. as a Novel food pursuant to Regulation. *EFSA Journal*, 18(7), 6197.
- Frischknecht, R., Doka, G., Lasvaux, S., Margni, M., Oberschelp, C., & Zschokke, M. (2023). *Database protocol—FOEN LCI data DQRv2*. treeze Ltd. commissioned by the Swiss Federal .
- Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.-J., Doka, G., Dones, R., Heck, T., . . . Wenet, G. (2007). *Overview and Methodology. ecoinvent report No. 1*. Dübendorf: Swiss Center for Life Cycle Inventories.

- Frischknecht, R., Krebs, L., Dinkel, F., Kägi, T., Stettler, C., Zschokke, M., . . . Stucki, M. (2021). *Ökofaktoren Schweiz 2021 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit. Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz*. Bern: Bundesamt für Umwelt BAFU.
- Gomez, M., Gutkoski, L., & Bravo-Nunez, A. (2020). Understanding whole-wheat flour and its effect in breads: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 1-25.
- Heine, D., Rauch, M., Ramseier, H., Müller, S., Schmid, A., Kopf-Bolanz, K., & Eugster, E. (2018). Pflanzliche Proteine als Fleischersatz: eine Betrachtung für die Schweiz. *Agrarforschung Schweiz*, 91(1), 4-11.
- Herzog, C., Edlinger, A., Walder, F., & van der Heijden, M. (2020). Kompost zur Förderung der Bodenqualität. *compost magazine*(2), S. 3-6.
- IPCC. (2021). The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou*. Cambridge University Press.
- ISO. (2006). *Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen*. ISO 14044:2006. International Organization for Standardization (ISO).
- ISO. (2006). *Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen*. ISO 14040:2006. International Organization for Standardization (ISO).
- Kopf-Bolanz, K., Bisig, W., Jungbluth, N., & Denkel, C. (2015). Quantitatives Potenzial zur Verwertung von Molke in Lebensmitteln in der Schweiz. *Agrarforschung Schweiz*, 6(6), 270-277.
- Kumar, M. T. (2021). Advances in the plant protein extraction: Mechanism and recommendations. *Food Hydrocolloids*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106595>
- LGV. (16. Dezember 2016). Lebensmittel- und Gebrauchsgegenständeverordnung.
- Moretti, C., Vera, I., Junginger, M., López-Contreras, A., & Shen, L. (2022). Attributional and consequential LCAs of a novel bio-jet fuel from Dutch potato by-products. *Science of the Total Environment*, 813, 152505.
- Muller, A. M., Álvarez, C., Zeugolis, D. I., Henschion, M., O'Neill, E., & Drummond, L. (2017). Alternative uses for co-products: Harnessing the potential of valuable compounds from meat processing chains. *Meat Science*(132), 90-98.
- Nemecek, T., Bengoa, X., Lansche, J., Roesch, A., Faist-Emmenegger, M., Rossi, V., & Humbert, S. (2019). *Methodological Guidelines for the Life Cycle Inventory of Agricultural Products. Version 3.5*. Lausanne and Zurich, Switzerland: Quantis und Agroscope.

- Offiah, V., Kontogiorgos, V., & Falade, K. (2019). Extrusion processing of raw food materials and by-products: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(18), 2979-2998.
- Pires, A. F., Marnotes, N. G., Rubio, O. D., Garcia, A. C., & Pereira, C. D. (2021). Dairy By-Products: A Review on the Valorization of Whey and Second Cheese Whey. *Foods*(10), 1067. doi:<https://doi.org/10.3390>
- Pishgar-Komleh, S. H., Sefeedpari, P., Asbeck, L., & Vellinga, T. (2021). *Lebenszyklus-Inventarisierung der Produkt-Klimabilanz, Landnutzung und Sozialperformance der Schweizer Rindfleischproduktion*. Wageningen Livestock Research.
- Richner, W., Flisch, R., Mayer, J., Schlegel, P., Zähler, M., & Menzi, H. (2017). Eigenschaften und Anwendung von Düngern. In *Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD)*. Agroscope.
- Ritzel, C., & von Ow, A. (2023). Ernährungssicherheit der Schweiz 2023. Aktuelle Ereignisse und Entwicklungen. *Agroscope Sciencee*, 167.
- Saerens, W., Smetana, S., Van Campenhout, L., Lammers, V., & Heinz, V. (2021). Life cycle assessment of burger patties produced with extruded meat substitutes. *Journal of Cleaner Production*, 306, 127177.
- Scherhauer, S., Davis, J., Metcalfe, P., Gollnow, S., Colin, F., De Menna, F., . . . Östergren, K. (2020). Environmental assessment of the valorisation and recycling of selected food production side flows. *Resources, Conservation & Recycling*, 161, 104921.
- Sefeedpari, P., Pishgar-Komleh, S. H., & Asbeck, L. (2023). *CO2 Fußabdruck der Schweinefleischproduktion in der Schweiz*. Wageningen Livestock Research.
- Smetana, S., Schmitt, E., & Mathys, A. (2019). Sustainable use of *Hermetia illucens* insect biomass for feed and food: Attributional and consequential life cycle assessment. *Resources, Conservation & Recycling*, 144, 285-296.
- StMELF. (2016). *Biogasausbeuten-Datenbank*. (L. F. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Herausgeber) Von <https://www.lfl.bayern.de/iba/energie/049711/index.php> abgerufen
- Stucki, M., Jungbluth, N., & Leuenberger, M. (2011). *Life Cycle Assessment of Biogas Production from Different Substrates*. ESU-services Ltd., Uster.
- Stucki, M., Wettstein, S., Mathis, A., & Amrein, S. (2019). *Erweiterung der Studie «Torf und Torfersatzprodukte im Vergleich»: Eigenschaften, Verfügbarkeit, ökologische Nachhaltigkeit und soziale Auswirkungen*. Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen. Wädenswil: Zücher Hochschule für Angewandte Wissenschaften.
- Tsermoula, P., Virgili, C., Ortega, R. G., Mullen, A. M., Álvarez, C., O'Brien, N. M., . . . O'Neill, E. E. (2019). Functional protein rich extracts from bovine and porcine hearts using acid or

alkali solubilisation and isoelectric precipitation. *International Journal of Food Science and Technology*, 54, 1292-1298.

UMWEKO. (2019). *Kompostier- und Vergärungsanlagen. Erhebung in der Schweiz und Lichtenstein*. Grenchen: BAFU.

Vargas-Moreno, J., Callejón-Ferre, A., Pérez-Alonso, J., & Velázquez-Martí, B. (2012). A review of the mathematical models for predicting the heating value of biomass materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 3065-3083.

Zhang, R. F. (2024). Protein from rapeseed for food applications: Extraction, sensory quality, functional and nutritional properties. *Food Chemistry*.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138109>

Zhao, X., Zou, Y.-F., Shao, J.-J., Chen, X., Han, M.-Y., & Xu, X.-L. (2016). Comparison of the acidic and alkaline treatment on emulsion composite gel properties of the proteins recovered from chicken breast by isoelectric solubilization/precipitation process. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(3), e12884.

A Dokumentation Ökobilanzen

A.1 Dokumentation Systemgrenzen

Molke

Die Systemgrenzen des Nebenstroms Molke können der Abbildung 3 entnommen werden.

Weizenkleie

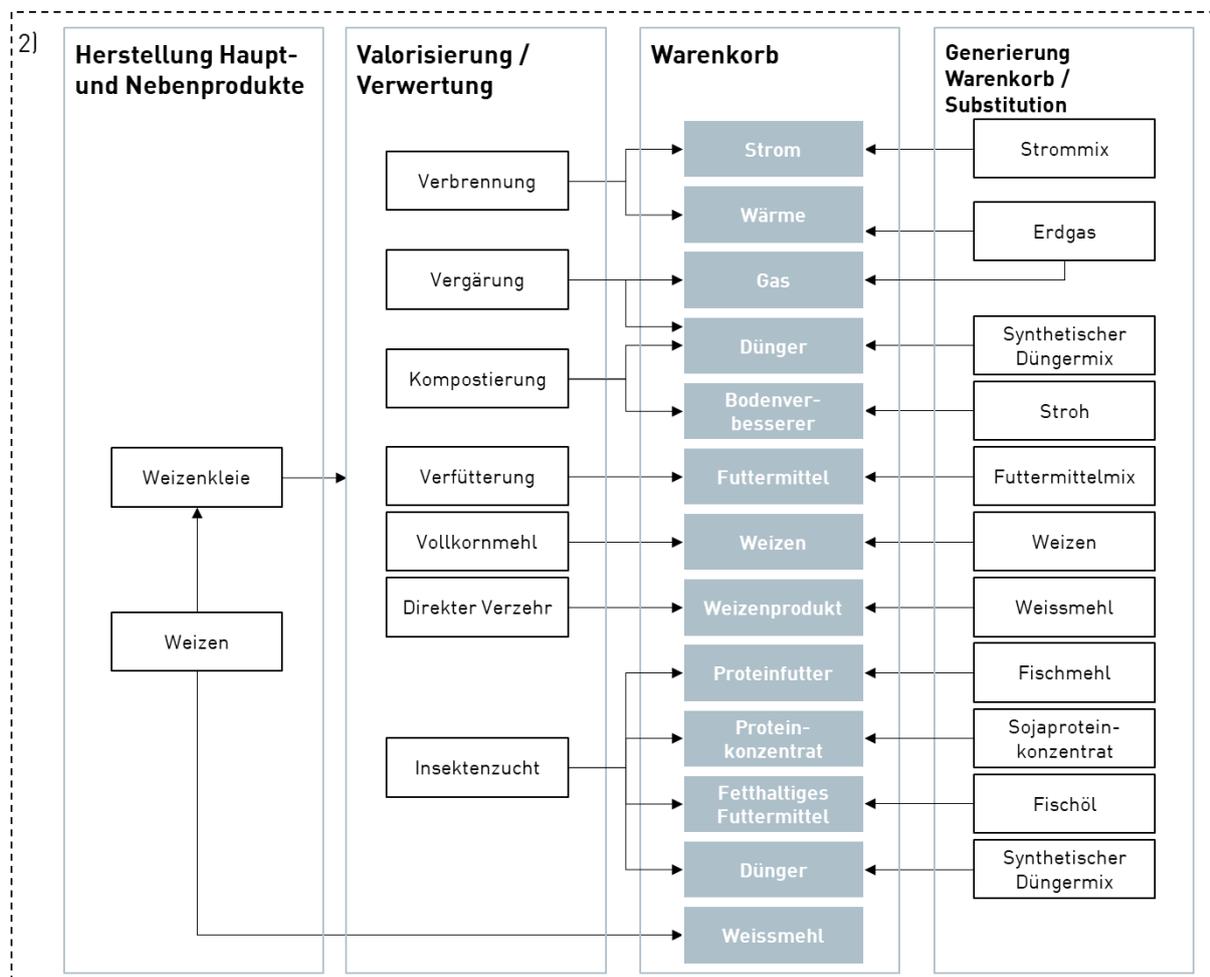


Abbildung 25: Systemgrenzen der Ökobilanzen der Verwertungs- und Valorisierungswege von Weizenkleie. Die Abbildung umfasst alle Szenarien gemäss Tabelle 4. Die Systemgrenzen der einzelnen Szenarien werden analog dem Beispiel in Abbildung 3 gezogen. Graue Felder = System-Output

Melasse

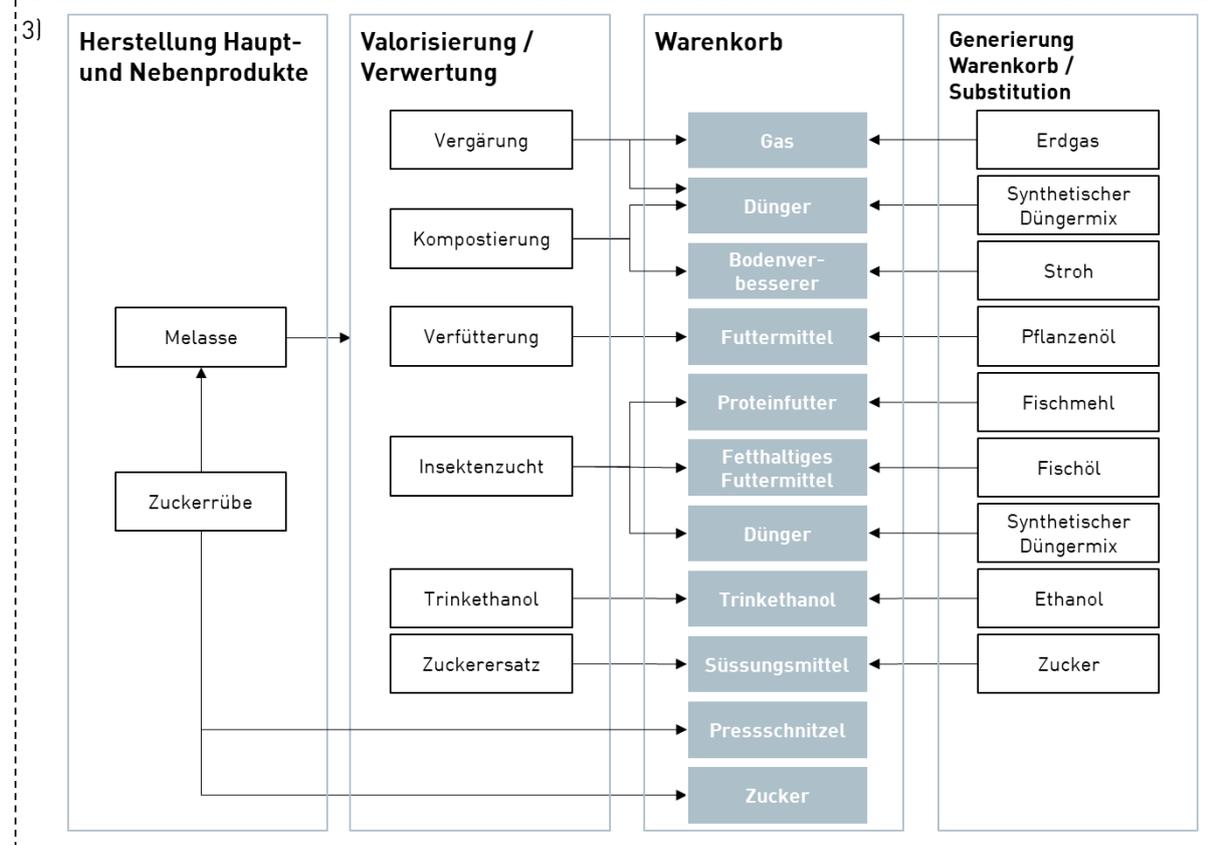


Abbildung 26: Systemgrenzen der Ökobilanzen der Verwertungs- und Valorisierungswege von Melasse. Die Abbildung umfasst alle Szenarien gemäss Tabelle 5. Die Systemgrenzen der einzelnen Szenarien werden analog dem Beispiel in Abbildung 3 gezogen. Graue Felder = System-Output

Rapspresskuchen

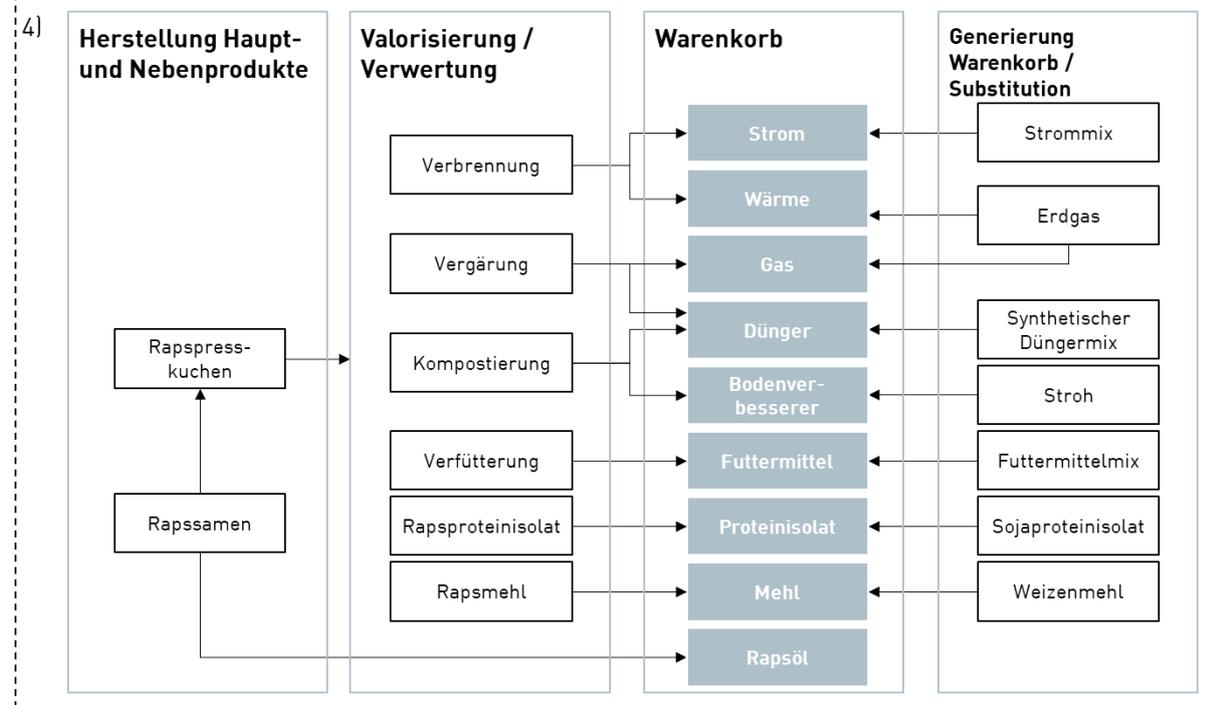


Abbildung 27: Systemgrenzen der Ökobilanzen der Verwertungs- und Valorisierungswege von Rapspresskuchen. Die Abbildung umfasst alle Szenarien gemäss Tabelle 6. Die Systemgrenzen der einzelnen Szenarien werden analog dem Beispiel in Abbildung 3 gezogen. Graue Felder = System-Output

Biertrester

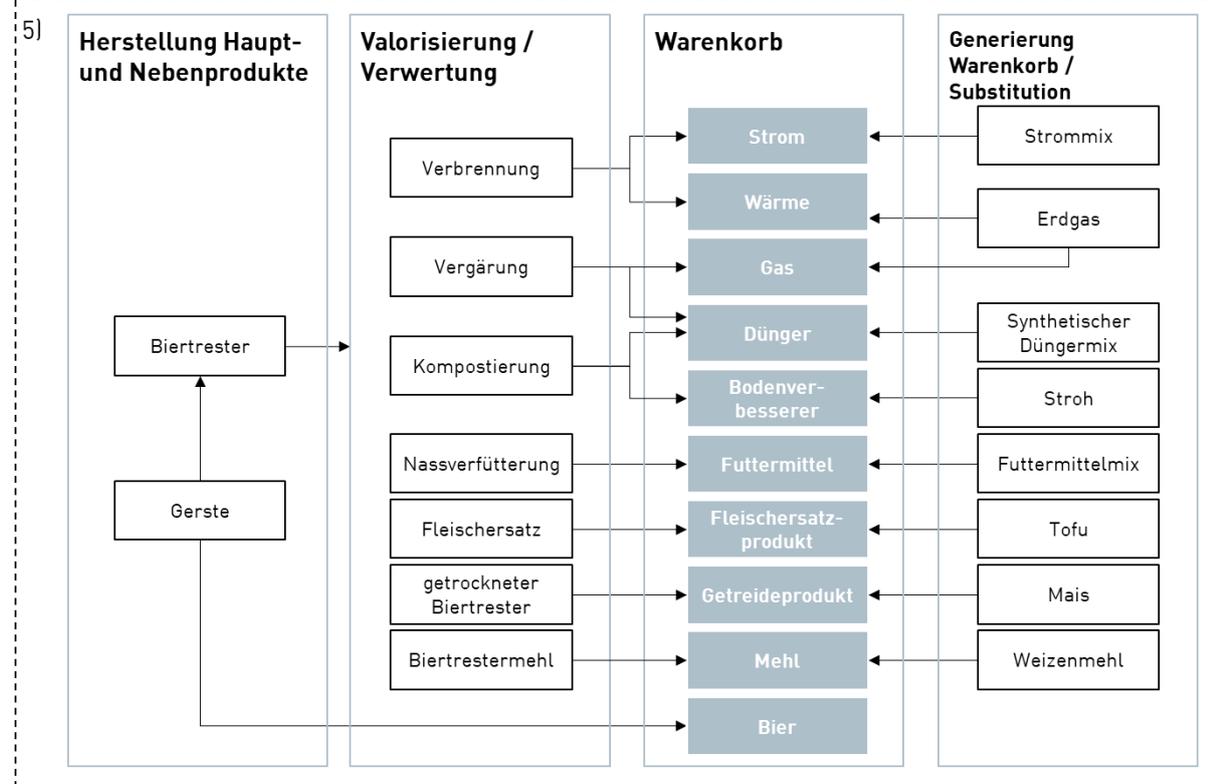


Abbildung 28: Systemgrenzen der Ökobilanzen der Verwertungs- und Valorisierungswege von Biertrester. Die Abbildung umfasst alle Szenarien gemäss Tabelle 7. Die Systemgrenzen der einzelnen Szenarien werden analog dem Beispiel in Abbildung 3 gezogen. Graue Felder = System-Output

Mosttrester

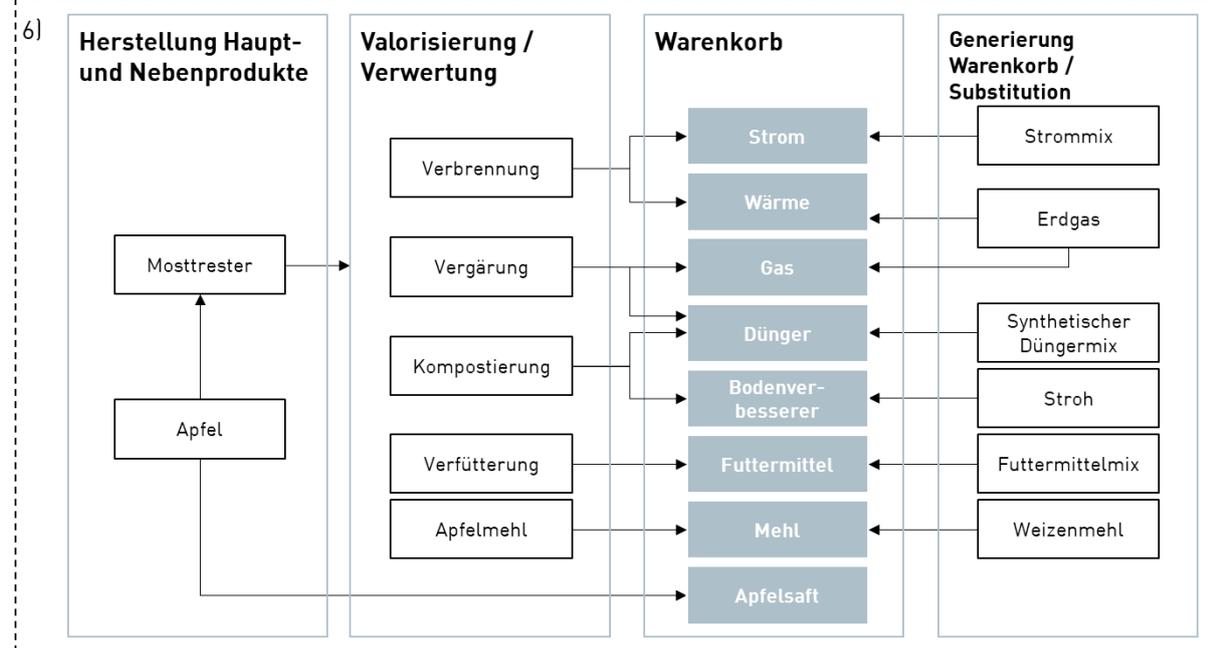


Abbildung 29: Systemgrenzen der Ökobilanzen der Verwertungs- und Valorisierungswege von Mosttrester. Die Abbildung umfasst alle Szenarien gemäss Tabelle 8. Die Systemgrenzen der einzelnen Szenarien werden analog dem Beispiel in Abbildung 3 gezogen. Graue Felder = System-Output

Rind-Innereien

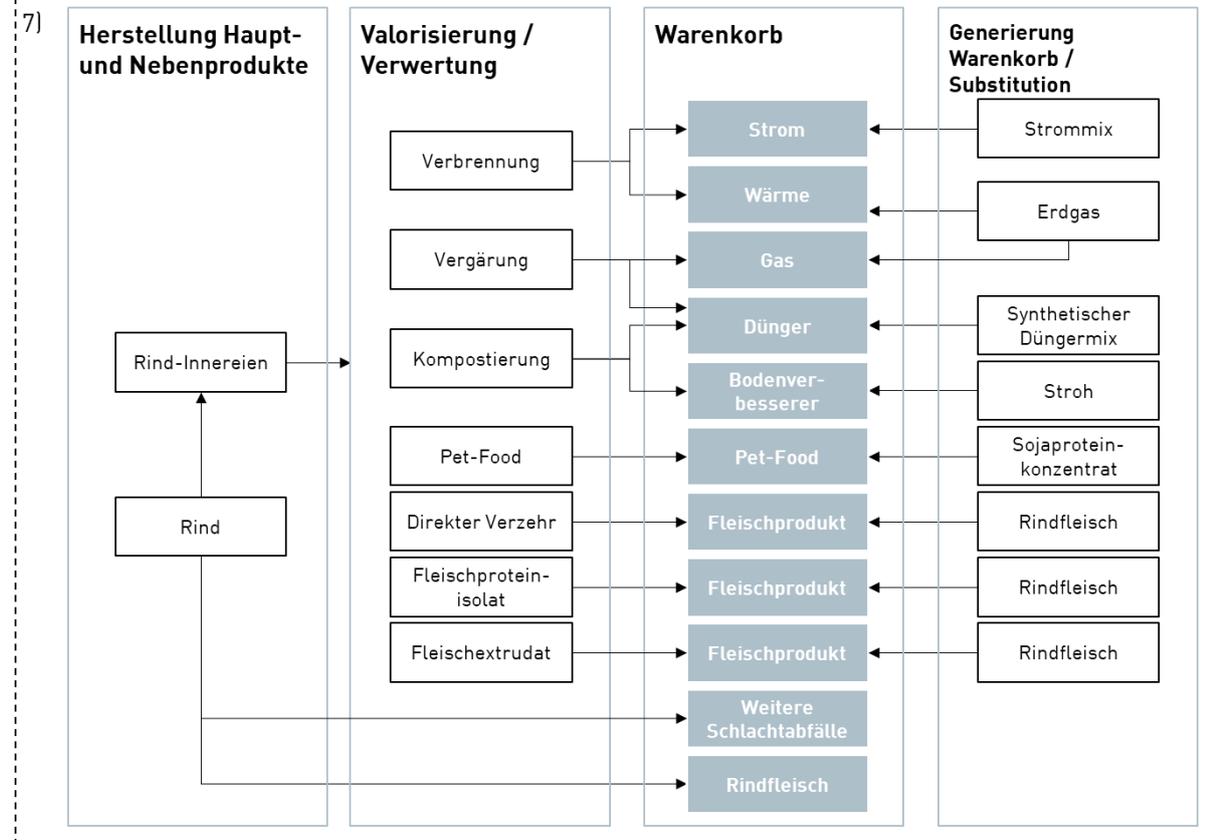


Abbildung 30: Systemgrenzen der Ökobilanzen der Verwertungs- und Valorisierungswege von Rind-Innereien. Die Abbildung umfasst alle Szenarien gemäss Tabelle 9. Die Systemgrenzen der einzelnen Szenarien werden analog dem Beispiel in Abbildung 3 gezogen. Graue Felder = System-Output

Poulet-Innereien, Schwein-Innereien

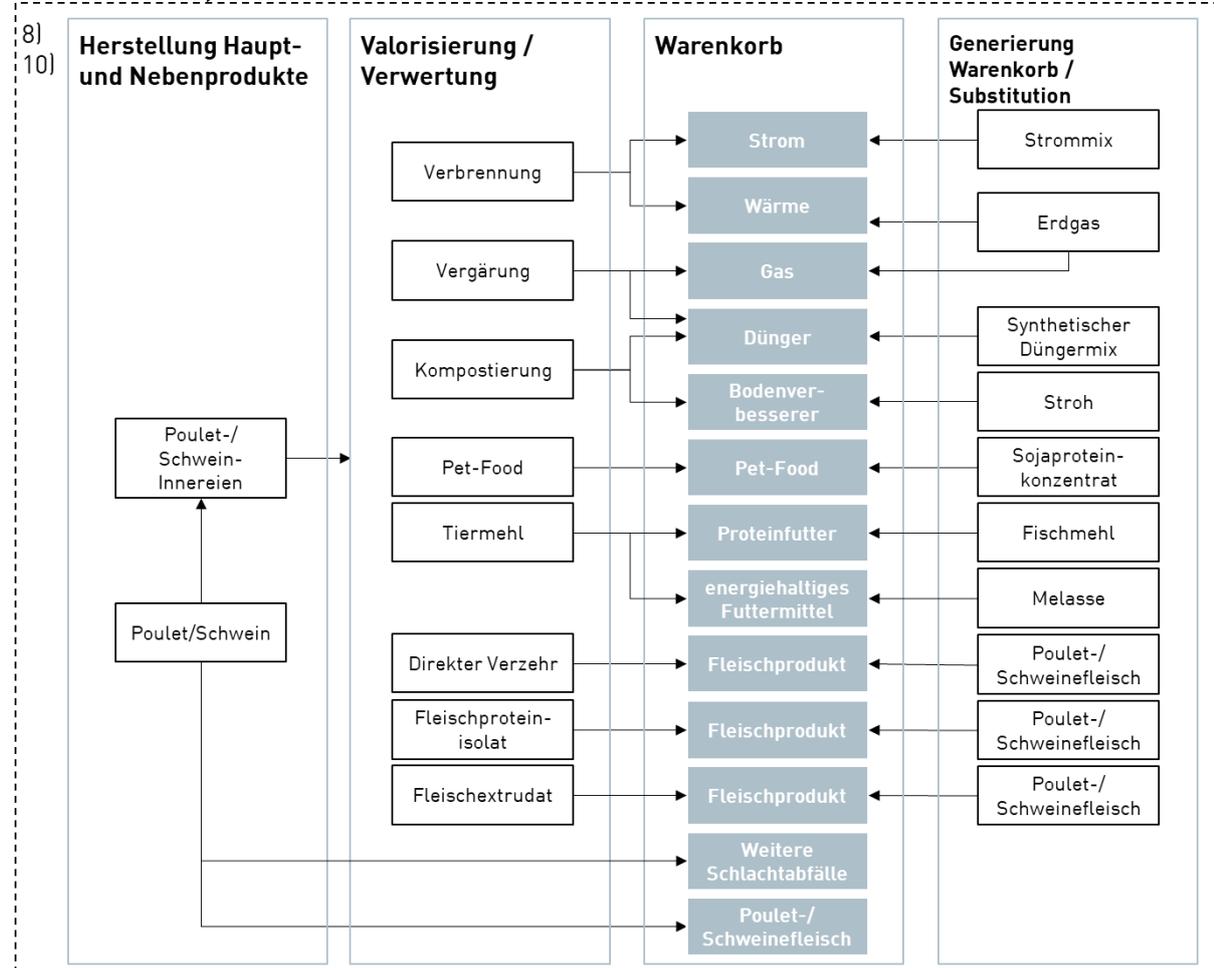


Abbildung 31: Systemgrenzen der Ökobilanzen der Verwertungs- und Valorisierungswege von Poulet- resp. Schwein-Innereien. Die Abbildung umfasst alle Szenarien gemäss Tabelle 10 resp. Tabelle 12. Die Systemgrenzen der einzelnen Szenarien werden analog dem Beispiel in Abbildung 3 gezogen. Graue Felder = System-Output

Poulet-Hals

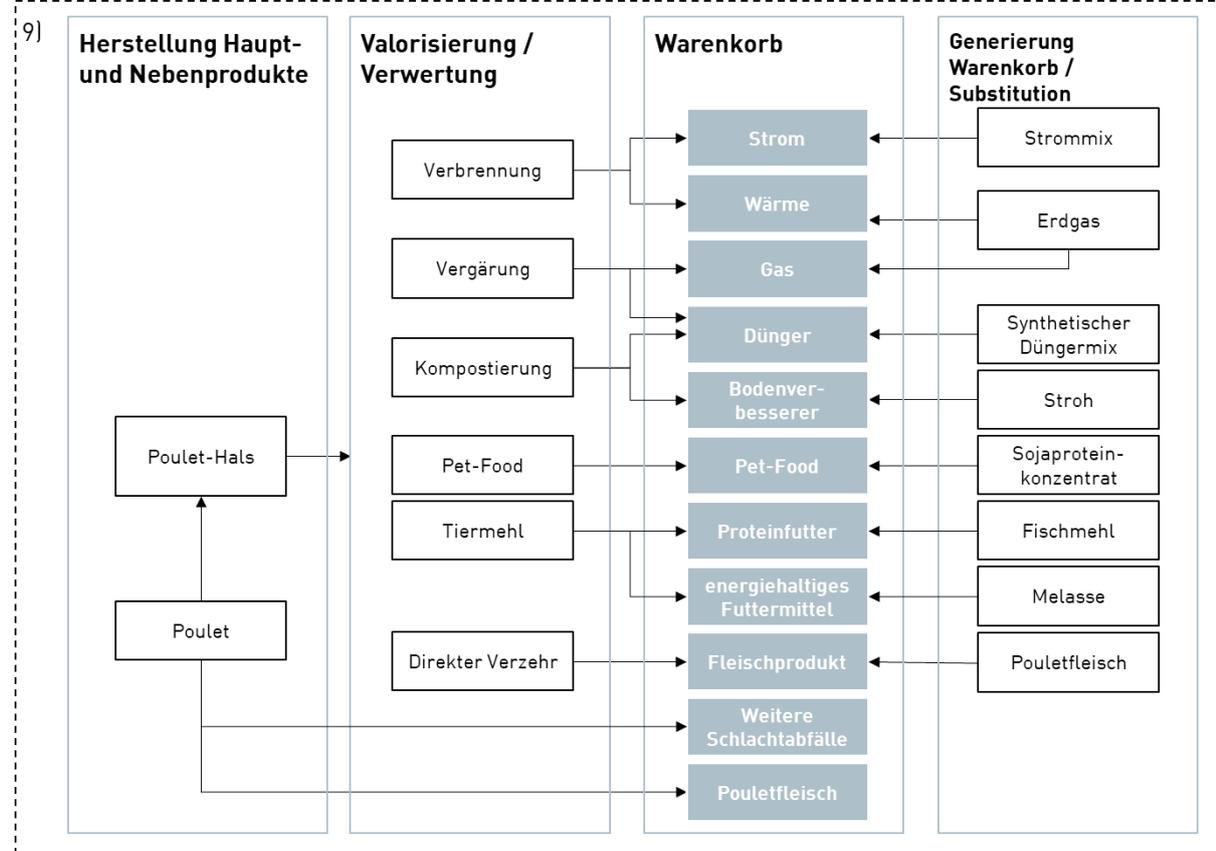


Abbildung 32: Systemgrenzen der Ökobilanzen der Verwertungs- und Valorisierungswege von Poulet-Hals. Die Abbildung umfasst alle Szenarien gemäss Tabelle 11. Die Systemgrenzen der einzelnen Szenarien werden analog dem Beispiel in Abbildung 3 gezogen. Graue Felder = System-Output

A.2 Dokumentation Herstellung Haupt- und Nebenprodukte

Durch die methodische Wahl der Systemerweiterung werden alle Koppelprodukte, die zusammen mit dem Nebenstrom produziert werden, als Teil des Warenkorbes berücksichtigt (wie in den Grafiken im Anhang A.1 dargestellt). Die Menge an anfallendem Hauptprodukt ergibt sich aus dem Produktionsprozess, so dass 1 kg Nebenstrom (funktionelle Einheit) anfällt. Die in der Studie berücksichtigte Menge im Warenkorb je Nebenstrom ist in Tabelle 24 zusammenfasst und wurde basierend auf der jeweiligen Sachbilanz gemäss WFLDB oder BAFU-Datenbank bestimmt.

Tabelle 24: Menge an anfallenden Haupt- und Nebenprodukten pro kg berücksichtigtem Nebenstrom gemäss Sachbilanz von der WFLDB oder BAFU-Datenbank.

In Studie berücksichtigter Nebenstrom	Hauptprodukt	Weiteres Nebenprodukt	Quelle
Molke = 1kg	Käse = 0.13 kg	Rahm = 0.006 kg	Whey, from hard cheese production, at dairy (WFLDB 3.1)/GLO U
Weizenkleie = 1kg	Weizenmehl = 3.05 kg		Wheat bran, at industrial mill (WFLDB 3.1)/GLO U
Melasse = 1kg	Zucker = 4.37 kg	Rübenschnitzel = 5.68 kg	Molasses, from sugar beet, at sugar refinery {CH} U
Rapspresskuchen = 1kg	Rapsöl = 0.83 kg		Rapeseed oil cake, at oil mill (WFLDB 3.1)/GLO U
Biertrester = 1kg	Bier = 5.75 kg		Barley spent grains, at plant {CH} U
Mosttrester = 1kg	Apfelsaft = 0.42 kg		Apple pomace, fresh, from concentrated apple juice production, at plant {GLO} U
Rind-Innereien = 1kg	Rindfleisch = 15.3 kg	Weitere Schlachtabfälle = 17.0 kg	Beef, food grade offal, at slaughterhouse (WFLDB 3.1)/US U
Poulet-Innereien = 1kg	Poulet-Fleisch = 7.75 kg	Weitere Schlachtabfälle = 3.75 kg	Chicken, food grade offal, at slaughterhouse (WFLDB 3.1)/US U
Poulet-Hals = 1kg	Poulet-Fleisch = 7.75 kg	Weitere Schlachtabfälle = 3.75 kg	Chicken, food grade offal, at slaughterhouse (WFLDB 3.1)/US U
Schwein-Innereien = 1kg	Schweinefleisch = 13.5 kg	Weitere Schlachtabfälle = 10.5 kg	Pork, food grade offal, at slaughterhouse (WFLDB 3.1)/DE U

A.3 Dokumentation Sachbilanzen

In diesem Kapitel wird die Herleitung der Sachbilanzen der Verwertungs-/Valorisierungswege, die Berechnung der Substitutionsfaktoren und die Sachbilanzen der substituierbaren Produkte beschrieben, falls nicht bereits im Kapitel 2.4 dokumentiert. Die Begründung für die substituierbaren Produkte ist generell im Kapitel 2.4 dokumentiert. Die detaillierten Sachbilanzen der Verwertungs-/Valorisierungswege können auf Anfrage bei den Autorinnen der Studie im Excel-Format bereitgestellt werden, sofern diese nicht auf vertraulichen Daten basieren.

Verbrennung

Die Modellierung der Verwertung in einer Verbrennungsanlage baut auf dem Vorgehen von Beretta et al. (2017) auf. Für die Sachbilanz der Verbrennung wurde für alle Nebenströme ein bestehendes Ökoinventar aus der BAFU-Datenbank für die Verbrennung von Bioabfall verwendet: *Disposal, biowaste, 60% H2O, to municipal incineration, allocation price {CH} U*.

Für die Anlieferung der Nebenströme zu den Verbrennungsanlage wurde gemäss den ecoinvent v2.2 Richtlinien von einer durchschnittlichen Distanz von 10 km ausgegangen (Frischknecht, et al., 2007).

Bei der Verbrennung wird Wärme und Strom generiert. Die Menge an produziertem Strom und Wärme wurde proportional zum unteren Heizwert bestimmt. Der Heizwert wurde unter Berücksichtigung der Nährstoffzusammensetzung mit Gleichung 1 berechnet:

$$\text{Gleichung 1} \quad H_U = P * B_P + F * B_F + C * B_C + Fi * B_{Fi} - W * B_W$$

wobei P = Porteingehalt,

F = Fettgehalt,

C = Kohlenhydratgehalt,

Fi = Ballaststoffgehalt,

W = Wassergehalt,

B_i = physikalischer Brennwert Nährstoff

Die Nährstoffgehalte der pflanzlichen Nebenströme basiert auf der Swiss Feed Database (Agroscope, 2016). Die Nährstoffgehalte der Nebenströme Rind- und Schwein-Innereien basieren auf Einträgen zu Leber in der Schweizer Nährwertedatenbank (BLV, 2024). Für die Nebenströme Poulet-Innereien und Poulet-Hals existieren keine Einträge in einer der Datenbanken. Der Wassergehalt wurde daher mit dem eines ganzen Poulet angenähert. Die Nährwerte wurden basierend auf Nährwertangaben von im Handel erhältliche Poulet-Leber resp. Poulet-Hals bestimmt.

Der physikalische Brennwert der Nährstoffe wurde sofern nicht anderweitig vermerkt von Beretta et al. (2017) übernommen:

- Protein (B_P) = 23 MJ/kg
- Fett (B_F) = 38.9 MJ/kg
- Kohlenhydraten (B_C) = 17.2 MJ/kg
- Ballaststoff (B_{Fi}) = 18 MJ/kg

Annäherung mit Brennwert von Cellulose (Vargas-Moreno, Callejón-Ferre, Pérez-Alonso, & Velázquez-Martí, 2012)

- Wasser (B_W) = -2.441 MJ/kg

Die resultierende Menge an Strom und Wärme aus der Verbrennung wurden mit dem aktuellen Schweizer Mittelwert des Strom- resp. Wärmenutzungsgrad von Kehrrechtverbrennungsanlagen errechnet. Der Stromnutzungsgrad beläuft sich auf 17 %, der Wärmenutzungsgrad auf 33.2 % (BFE, 2023). Die berechneten Heizwerte sowie die resultierende Strom- und Wärmeproduktion aus der Verbrennung der Nebenströme können der Tabelle 25 entnommen werden.

Die Sachbilanzen der ersetzbaren Produkte wurden mit bestehenden Inventaren aus der BAFU-Datenbank angenähert. Es wurde davon ausgegangen, dass der produzierte Strom den Schweizer Verbrauchermix ersetzt. Die produzierte Wärme ersetzt Wärme aus Erdgas (Begründung siehe Kapitel 2.4).

Tabelle 25. Unterer Heizwert und Ertrag an elektrischer und thermischer Energie durch die Verbrennung der Nebenströme. FS = Frischsubstanz

Nebenstrom	Unterer Heizwert [MJ/kg FS]	Stromproduktion [MJ/kg FS]	Wärmeproduktion [MJ/kg FS]
Weizenkleie	9.89	1.682	3.284
Rapspresskuchen	15.65	2.661	5.196
Biertrester	1.06	0.179	0.351
Mosttrester	0.49	0.083	0.161
Rind-Innereien	5.46	0.928	1.812
Poulet-Innereien	4.24	0.720	1.406
Poulet-Hals	7.29	1.240	2.421
Schweins-Innereien	5.07	0.861	1.682

Vergärung

Die Modellierung der Vergärung der Nebenströme baut auf dem Vorgehen von Beretta et al. (2017) auf. Für die Sachbilanz der Vergärung wurde für alle Nebenströme ein bestehendes Ökoinventar aus der BAFU-Datenbank für die Vergärung von Bioabfall verwendet, wobei keine Allokation zwischen der Entsorgung und der Biogasproduktion vorgenommen wurde, sondern das System erweitert wird (vgl. Kapitel 2.3): *Disposal, biowaste, to anaerobic digestion, economic allocation {CH}* U & *Biogas, from biowaste, at storage, economic allocation {CH}* U. Nebst der Produktion des Biogases wurden auch die direkten Emissionen durch die Verbrennung des Biogases berücksichtigt: *Operation, biogas combustion, in cogen with biogas engine, direct emissions {CH}* U.

Für die Anlieferung der Nebenströme zur Vergärungsanlage wurde von der gleichen Transportdistanz wie bei der Verbrennung ausgegangen (10 km).

Die Berechnung der Menge an produziertem Biogas basiert auf dem spezifischen Biogasertrag der Nebenströme. Der Heizwert von Biogas ist 22.73 MJ/Nm³, wobei sich der Heizwert auf ein Methangehalt von 63.3 % bezieht (Stucki, Jungbluth, & Leuenberger, 2011). Der spezifische Biogasertrag der Nebenströme wurde daher bezüglich dessen Methangehalt korrigiert.

Der Biogasertrag und Methangehalt der pflanzlichen Nebenströme wurde der Biogasausbeuten-Datenbank des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Tourismus (StMELF) entnommen (StMELF, 2016). Der Biogasertrag und Methangehalt für Rind-Innereien und Schweins-Innereien basieren auf Studien zur Schweizer Fleischproduktion (Sefeedpari, Pishgar-Komleh, & Asbeck, 2023; Pishgar-Komleh, Sefeedpari, Asbeck, & Vellinga, 2021). Für die Nebenströme Poulet-Innereien und Poulet-Hals lagen keine spezifischen Daten vor. Der Biogasertrag und die Methanausbeute wurden daher mit dem Mittelwert aus Rinds- und Schweins-Innereien angenähert. Die berechneten produzierten Mengen an Biogas können der Tabelle 26 entnommen werden.

Tabelle 26. Biogasertrag, Methangehalt und methan-korrigierter Biogasertrag durch die Vergärung der Nebenströme. FS = Frischsubstanz

Nebenstrom	Biogas Ertrag [Nm ³ /kg FS]	Methangehalt [%]	Methan-korrigierter Biogasertrag [Nm ³ /kg FS]
Molke	0.034	53.10%	0.029
Weizenkleie	0.437	54.80%	0.378
Melasse	0.490	52.20%	0.404
Rapspresskuchen	0.533	60.90%	0.512
Biertrester	0.122	59.30%	0.114
Mosttrester	0.112	51.70%	0.091
Rind-Innereien	0.223	100%	0.352
Poulet-Innereien	0.259	100%	0.409
Poulet-Hals	0.259	100%	0.409
Schweins-Innereien	0.295	100%	0.466

Nebst der Produktion von Biogas wird bei der Vergärung auch flüssiges und festes Gärgut produziert, welches als Düngemittel eingesetzt werden kann. Pro kg Biomasse wird grundsätzlich 0.3 kg flüssiges Gärgut und 0.32 kg festes Gärgut produziert (Beretta, Stucki, & Hellweg, 2017). Gemäss Düngerverordnung (DüV, 2023) wird Gärgut mit einer Trockensubstanz (TS) >20% als flüssig und <20% als fest definiert, wobei flüssiges Gärgut einen durchschnittlichen TS-Gehalt von 14% und festes Gärgut von 43% aufweist (UMWEKO, 2019). Daher wurden bei Nebenströmen mit einer TS von >20% davon ausgegangen, dass 100% des Gärguts in flüssiger Form anfällt. Gleichermassen wurde bei Nebenströmen mit einer überdurchschnittlichen TS verglichen mit festem Gärgut davon ausgegangen, dass 100% in Form von festem Gärgut anfällt. Diese Methodik zur Bestimmung der Menge an Gärgut ist somit als relativ grob zu bewerten. Eine Datengrundlage, um die Nebenstrom-spezifischen Parameter in der Berechnung der Gärgutmengen zu berücksichtigen, fehlt jedoch.

Für den Einsatz von Gärgut als Düngemittel wurde die Zufuhr der Nährstoffe Stickstoff (N), Phosphat (P2O5) und Kalium (K2O) berücksichtigt. Der Stickstoff- und Phosphat-Gehalt im Gärgut basiert auf Daten der Studie der UMWEKO (2019), der Kalium-Gehalt wurde von der Publikation Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD) übernommen (siehe Tabelle 27) (Richner, et al., 2017).

Die berücksichtigten Angaben für jeden der Nebenströme kann der Tabelle 28 entnommen werden.

Gemäss aktuellen Erkenntnissen wird Gärgut als Ersatz von synthetischem Dünger eingesetzt. Eine bodenverbessernde Wirkung von Gärgut ist nicht erwiesen und wird daher in den Berechnungen nicht berücksichtigt (Herzog, Edlinger, Walder, & van der Heijden, 2020; Baier, Fuchs, Galli, & Konrad, 2022).

Die Sachbilanzen der ersetzbaren Produkte wurden mit bestehenden Inventaren aus der BAFU-Datenbank angenähert. Das Biogas ersetzt Erdgas (Begründung siehe Kapitel 2.4) und die synthetischen Düngemittel wurden mit Sachbilanzen von mineralischen N-, P205- resp. K20-Düngern angenähert.

Tabelle 27. Eigenschaften von flüssigem und festem Gärgut (UMWEKO, 2019; Richner, et al., 2017). FS = Frischsubstanz

Nährstoff	Einheit	Flüssiges Gärgut	Festes Gärgut	Kompost
Trockensubstanz	%	14%	43%	54%
Stickstoff gesamt	kg N/kg Gärgut FS	0.005	0.0059	0.0076
Phosphat	kg P205/kg Gärgut FS	0.0019	0.0028	0.0035
Kalium	kg K20/kg Gärgut FS	0.0033	0.0042	0.005

Tabelle 28. Menge Gärgut und Nährstoffgehalt im Gärgut je Nebenstrom (NS)

Nebenstrom	Gärgut flüssig [kg/kg NS]	Gärgut fest [kg/kg NS]	Menge N [kg N/kg NS]	Menge P [kg P205/kg NS]	Menge K [kg K20/kg NS]
Molke	0.62	0	0.0031	0.0012	0.0020
Weizenkleie	0	0.62	0.0037	0.0017	0.0026
Melasse	0	0.62	0.0037	0.0017	0.0026
Rapspresskuchen	0	0.62	0.0037	0.0017	0.0026
Biertrester	0.3	0.32	0.0034	0.0015	0.0023
Mosttrester	0.3	0.32	0.0034	0.0015	0.0023
Rind-Innereien	0.3	0.32	0.0034	0.0015	0.0023
Poulet-Innereien	0.3	0.32	0.0034	0.0015	0.0023
Poulet-Hals	0	0.62	0.0037	0.0017	0.0026
Schweins-Innereien	0.3	0.32	0.0034	0.0015	0.0023

Kompostierung

Die Modellierung der Kompostierung der Nebenströme baut auf dem Vorgehen von Beretta et al. (2017) auf. Da in der BAFU-Datenbank kein Ökoinventar für Kompostierung vorhanden ist, wurde für die Sachbilanz der Kompostierung für alle Nebenströme auf Sachbilanzdaten aus der Ecoinvent 3.9 Datenbank zurückgegriffen: *Biowaste, treatment of biowaste, industrial composting*.

Für die Anlieferung der Nebenströme zur Kompostieranlage wurde von der gleichen Transportdistanz wie bei der Verbrennung ausgegangen (10 km).

Bei der Kompostierung entsteht Kompost, welcher als Düngemittel und zur Verbesserung der Bodenqualität eingesetzt werden kann. Pro kg Biomasse wird durchschnittlich 0.5 kg Kompost produziert, welcher je nach Fraktion einen gemittelten TS-Gehalt von 39% aufweist (Dinkel, Zschokke, & Schleiss, 2012). Aufgrund der Unterschiede im TS-Gehalt der Nebenströme wurde der durchschnittliche Kompost-Ertrag bezüglich dem TS-Gehalt der Nebenströme korrigiert (siehe Tabelle 29).

Beim Einsatz von Kompost als Düngemittel wurde die Zufuhr der Nährstoffe Stickstoff (N), Phosphat (P2O5) und Kalium (K2O) berücksichtigt. Der Stickstoff- und Phosphat-Gehalt im Kompost basiert auf Daten der Studie der UMWEKO (2019), der Kalium-Gehalt wurde von der Publikation Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD) übernommen (siehe Tabelle 27) (Richner, et al., 2017).

Zusätzlich wird Kompost für die Verbesserung der Bodenqualität eingesetzt, wobei verschiedene Substrate ersetzt werden können (Stucki, Wettstein, Mathis, & Amrein, 2019). Analog zu Dinkel et al. (2012) wurde von der Substitution von Stroh ausgegangen, wobei pro kg Kompost 0.8 kg Stroh ersetzt werden können.

Die berücksichtigten Angaben für jeden der Nebenströme kann der Tabelle 29 entnommen werden, wobei vergleichbare Nährwertzusammensetzungen berücksichtigt wurden.

Die Sachbilanzen der ersetzbaren Produkte wurden mit bestehenden Inventaren aus der BAFU-Datenbank angenähert. Die synthetischen Düngemittel wurden mit Sachbilanzen von mineralischen N-, P2O5- resp. K2O-Düngern angenähert, das Stroh mit einem Ökoinventar für konventionelles Weizenstroh.

Tabelle 29. Menge Kompost und Nährstoffgehalt im Kompost je Nebenstrom (NS)

Nebenstrom	Menge Kompost TS-korrigiert [kg/kg NS]	Menge N [kg N/kg NS]	Menge P [kg P205/kg NS]	Menge K [kg K20/kg NS]	Menge Stroh-Ersatz [kg/kg NS]
Weizenkleie	1.12	0.0085	0.0039	0.0056	0.90
Melasse	0.99	0.0075	0.0034	0.0050	0.79
Rapspresskuchen	1.17	0.0089	0.0041	0.0059	0.94
Biertrester	0.28	0.0022	0.0010	0.0014	0.23
Mosttrester	0.33	0.0025	0.0011	0.0016	0.26
Rind-Innereien	0.40	0.0030	0.0014	0.0020	0.32
Poulet-Innereien	0.35	0.0027	0.0012	0.0018	0.28
Poulet-Hals	0.94	0.0071	0.0033	0.0047	0.75
Schweins-Innereien	0.36	0.0028	0.0013	0.0018	0.29

Verfütterung

Bei den Nebenströmen Molke und Biertrester wurde von einer Nassverfütterung ausgegangen. Daher ist keine Weiterverarbeitung nötig und die Sachbilanz dieser Verwertungswege besteht aus keinen Inputs oder Outputs. Wie in Kapitel 2.3 Systemgrenzen & Allokation beschrieben, wurde der Transport zum Landwirt:in/Kund:in nicht berücksichtigt.

Bei den Nebenströmen Kleie, Melasse, Rapspresskuchen und Mosttrester wurde der Einsatz als Komponente in der Mischfutterherstellung berücksichtigt. Der Prozess der Mischfutterherstellung ist nicht Teil der Ökobilanz, da der Prozess beim Einsatz von Nebenströmen anstelle eines anderen Rohstoffes gleich abläuft (vgl. Kapitel 2.3 Systemgrenzen & Allokation).

Weizenkleie wird bei der Müllerei pelletiert, bevor es zum Mischfutterwerk transportiert wird. Aufgrund fehlender Primärdaten wurde der Pelletier-Prozess mit dem Ökoinventar *Coffee ground pellets, on site [CH]* U der BAFU-Datenbank angenähert. Für den Transport zum Mischfutterwerk wurde von 70 km LKW-Transport ausgegangen, was der generischen Transportdistanz für Futtermittel in der Schweiz entspricht (Frischknecht, et al., 2007).

Die Melasse kann mit minimalen Weiterverarbeitungsschritten in der Mischfutterherstellung genutzt werden. Für die Sachbilanz dieses Verwertungsweges wurden vertrauliche Daten eines Schweizer Herstellers genutzt. Für den Transport zum Mischfutterwerk wurde analog zur Weizenkleie von 70 km ausgegangen.

Rapspresskuchen wird in loser Form direkt zum Mischfutterwerk transportiert und dort direkt dem Futter beigemischt. Daher wurde in der Sachbilanz lediglich der Transport vom Ölproduzierenden zum Mischfutterwerk berücksichtigt, wobei ebenfalls von 70 km ausgegangen wurde (analog Weizenkleie).

Damit Mosttrester in der Mischfutterindustrie eingesetzt werden kann, muss dieser erst vor Ort getrocknet werden. Aufgrund fehlender Primärdaten wurde die Sachbilanz mittels eines bestehenden Trocknungsprozesses der BAFU-Datenbank bestimmt: *Grain drying, natural gas, high temperature {CH}* U. Gemäss feedbase.ch (Agroscope, 2016) wird rund 0.65 kg Wasser pro kg Nebenstrom verdunstet. Dadurch entstehen aus 1 kg frischem Mosttrester 0.35 kg getrockneter Mosttrester. Für den Transport zum Mischfutterwerk wurde analog zur Weizenkleie von 70 km ausgegangen.

Die Nebenströme aus der Fleischindustrie werden als Komponente in der Heimtierfutterherstellung (Pet-Food) eingesetzt. Die Herstellung dieser Komponente erfolgt durch die Gefrierverarbeitung der Innereien resp. des Poulet-Halses. Auch hier wird der Prozess der Mischung und weitere Komponenten des fertigen Tierfutters nicht berücksichtigt. Die Sachbilanz des Gefrierverarbeitungsprozesses basiert auf Angaben aus Sefeedpari et al. (2023) Die Nebenströme werden über eine Distanz von durchschnittlich 200 km zum Verwertungsort per LKW transportiert. Für die Verarbeitung wird 82 kWh/t eingesetzt, wobei vom Schweizer Strommix ausgegangen wurde. Gemäss der Studie fallen keine Ausschüsse oder Abfälle an. Aufgrund fehlender Angaben zur benötigten Infrastruktur wurden Zahlen zur Landnutzung, Gebäude und Maschinen pro kg verarbeitetem Produkt vom Ökoinventar *slaughtering, beef cattle (WFLDB 3.1)/GLO U* aus der WFLDB übernommen.

Je nach Nebenstrom können unterschiedliche Futtermittel ersetzt werden. In Tabelle 30 sind die Futtermittel, welche aus dem jeweiligen Nebenstrom produziert werden können, und die spezifische Menge jedes Futtermittels, welche durch diese Nebenstrom-Futtermittel ersetzt werden können, aufgelistet. Molke kann gemäss der Studie von Kopf-Bolanz et al. (2015) Gerste ersetzen, wobei der Substitutionsfaktor basierend auf dem physiologischen Brennwert von Gerste und Molke (gemäss feedbase.ch (Agroscope, 2016)) bestimmt wurde. Bei den Nebenströmen Weizenkleie, Rapspresskuchen, Biertrester und Mosttrester kann ein Mix aus verschiedenen Futtermitteln ersetzt werden. Der Mix basiert auf Expertenangaben aus der Futtermittelindustrie und berücksichtigt eine vergleichbare Nährwertzusammensetzungen. Melasse ersetzt gemäss Angaben aus der Futtermittelindustrie Pflanzenöl. Da eine der Hauptfunktionen von Melasse in der Mischfutterindustrie die Bindung von Staub ist, wurde von einem 1:1 Ersatz ausgegangen. Die Innereien und Poulet-Hals Nebenströme ersetzen gemäss Expertenangaben aus der Fleischindustrie sowie der Studie von Sefeedpari et al. (2023) pflanzliche Proteine. Der Substitutionsfaktor wurde basierend auf dem Proteingehalt der Fleisch-Nebenströme und dem Sojaproteinkonzentrat bestimmt.

Die Sachbilanzen der ersetzbaren Produkte wurden mit bestehenden Inventaren aus der BAFU-Datenbank und WFLDB angenähert. Hierfür wurden grundsätzlich Ökoinventare von konventioneller Schweizer Produktion berücksichtigt. Sofern kein spezifisches Inventar für den Schweizer Anbau vorhanden war, wurde auf ein Ökoinventar einer vergleichbaren Region zurückgegriffen.

Tabelle 30. Ersetzbarer Futtermittelmix in kg je Futtermittel, das aus einem Nebenstrom generiert wird.

NS-Futtermittel [kg]	Gerste	Weizen	Weizenkleie	Lucerne	Rapskuchen	Rapsschrot	Sojaschrot	Sonnenblumenkuchen	Maiskleber	Pflanzenöl	Dextrose	Haferspelz	Sojaprotein-konzentrat
Molke	0.06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kleiepellet	0.45	0.2	-	0.13	0.07	-	0.07	0.08	-	-	-	-	-
Futtermelasse	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	-	-	-
Rapspresskuchen	-	-	0.21	-	-	0.31	0.1	0.23	0.12	0.04	-	-	-
Biertrester nass	0.45	-	0.38	-	-	-	0.05	0.08	-	-	-	-	-
Mosttrester trocken	-	-	-	0.45	-	-	-	-	-	-	0.08	0.47	-
Rind-Innerei	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.3
Poulet-Innerei	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.25
Poulet-Hals	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.19
Schwein-Innerei	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.3

Molke Verwertung/Valorisierung

Herstellung WPC35% & WPC80%

Die Sachbilanz der Herstellung von WPC35% und WPC80% basiert auf Literaturangaben von Bacenetti et al. (2018). Fehlende Daten wurden mit Informationen aus Pires et al. (2021) und Sachbilanzdaten aus der WFLDB ergänzt.

Bei grossindustriellen Molkereien wird die Molke direkt vor Ort weiterverarbeitet. Für die Sachbilanz wurde der folgende Produktionsprozess berücksichtigt: In einem ersten Schritt wird die Molke (TS-Gehalt 6%) durch eine Umkehrosmose konzentriert und durch eine Ultrafiltration die gewünschten Komponenten aus der Molke gewonnen. Dieser Prozess benötigt Strom und Wärme sowie bei WPC80% die Zugabe von Wasser (siehe Bacenetti et al. (2018)). Beim Stromverbrauch wurde vom Schweizer Strommix ausgegangen, bei der Wärme wurde Wärme aus Erdgas berücksichtigt. Dieser Prozess generiert flüssiges WPC35% resp. WPC80% (30% TS) sowie ein Permeat, welches in der Biogasanlage entsorgt wird. In einem zweiten Schritt wird das flüssige WPC35% resp. WPC80% durch Verdunstung und anschliessende Sprühtrocknung auf einen Wassergehalt von 5% resp. 6% getrocknet (Pires, Marnotes, Rubio, Garcia, & Pereira, 2021). Die Sachbilanz der Verdunstung und Sprühtrocknung sowie die benötigte Infrastruktur für den gesamten Prozess wurde mit Ökoinventaren aus der WFLDB 3.5 angenähert: *Evaporation, dairy products, at dairy*

(WFLDB)/RER U & Dehydration, spray drying, dairy products, at dairy, per kg water evaporated (WFLDB)/RER U. Mit diesem Prozess kann aus einem kg Molke, 0.019 kg WPC35% und 0.0078 kg WPC80% hergestellt werden.

WPC35% kann anstelle von Magermilchpulver eingesetzt werden (Kopf-Bolanz, Bisig, Jungbluth, & Denkel, 2015). Die Sachbilanz von Magermilchpulver basiert auf einem bestehenden Ökoinventar aus der WFLDB: *Milk powder, skimmed, spray dried, at dairy (WFLDB 3.1)/GLO U*

Beim WPC80% wurde davon ausgegangen, dass es anstelle von Sojaproteinkonzentrat eingesetzt werden kann. Die Sachbilanz von Sojaproteinkonzentrat wurde aus der Datenbank Agri-Footprint 6 übernommen.

Herstellung Molkenpulver

Bei grossindustriellen Molkereien wird die Molke direkt vor Ort zu Molkenpulver weiterverarbeitet. Um Molkenpulver herzustellen, wird die Molke (TS-Gehalt 6%) erst einem Verdunstungsprozess und dann einem Sprühtrocknungsprozess unterzogen. Für diese beiden Prozesse werden Strom und Wärme sowie Wasser für die Dampfproduktion benötigt. Beim Stromverbrauch wurde vom Schweizer Strommix ausgegangen, bei der Wärme wurde Wärme aus Erdgas berücksichtigt. Das Wasser in der Molke wird verdunstet. Der Prozess generiert Molkenpulver mit einem TS-Gehalt von 97%, wobei aus 1kg Molke 0.062 kg Molkenpulver produziert werden kann. Die Sachbilanz dieses Prozesses basiert auf einem Ökoinventar aus der WFLDB 3.5: *Whey powder, spray dried, at dairy (WFLDB)/RER U*

Molkenpulver kann anstelle von Magermilchpulver eingesetzt werden (Kopf-Bolanz, Bisig, Jungbluth, & Denkel, 2015; Agroscope, 2024). Die Sachbilanz von Magermilchpulver basiert auf einem bestehenden Ökoinventar aus der WFLDB: *Milk powder, skimmed, spray dried, at dairy (WFLDB 3.1)/GLO U*

Herstellung Flüssigkonzentrat

Bei grossindustriellen Molkereien wird die Molke direkt vor Ort zu Flüssigkonzentrat weiterverarbeitet. Um Flüssigkonzentrat herzustellen, wird die Molke (TS-Gehalt 6%) einem Verdunstungsprozess unterzogen. Für diese beiden Prozesse werden Strom und Wärme sowie Wasser für die Dampfproduktion benötigt. Beim Stromverbrauch wurde vom Schweizer Strommix ausgegangen, bei der Wärme wurde Wärme aus Erdgas berücksichtigt. Das Wasser in der Molke wird verdunstet. Der Prozess generiert Flüssigkonzentrat mit einem TS-Gehalt von 27%, wobei aus 1kg Molke 0.22 kg Molkenflüssigkonzentrat produziert werden kann. Die Sachbilanz dieses Prozesses basiert auf einem Ökoinventar aus der WFLDB 3.5: *Whey, thick whey, 27% dry matter, at dairy (WFLDB)/RER U*

Flüssigkonzentrat kann anstelle von Milchkonzentrat eingesetzt werden. Die Sachbilanz von Milchkonzentrat basiert auf einem bestehenden Ökoinventar aus der WFLDB: *Concentrated milk, 25% dry matter, whole milk, unsweetened, at dairy (WFLDB 3.1)/GLO U*

Herstellung Molkenkäse

Bei grossindustriellen Molkereien wird die Molke direkt vor Ort zu Molkenkäse wie Ricotta weiterverarbeitet. Das Produktionsverfahren ist ähnlich zur normalen Käseproduktion und umfasst folgende Prozessschritte (wie z.B. in Bintsis et al. (2023) beschrieben): Der Molke wird rund 10% Magermilch und wenig Salz beigemischt. Anschliessend wird sie erwärmt und unter

Zugabe von Zitronensäure oder Milchsäure wird der Molkenkäse aus der Molke gefällt. Anschliessend wird der Käse ausgeschwemmt und abgetropft. Dieser Prozess benötigt nebst den weiteren Zutaten und Hilfsstoffen auch Strom und Wärme. Beim Stromverbrauch wurde vom Schweizer Strommix ausgegangen, bei der Wärme wurde Wärme aus Erdgas berücksichtigt. Ein Teil des Wassers wird verdunstet, ein anderer Teil wird in einer Abwasserreinigungsanlage aufbereitet. Mit diesem Prozess kann aus einem kg Molke rund 0.05 kg Molkenkäse hergestellt werden. Für die Sachbilanz des Prozesses wurden Primärdaten der industriellen Schweizer Molkenkäseproduktion berücksichtigt. Einzig die benötigte Infrastruktur, sowie die Menge verdunstetes Wasser wurde mit Daten aus einem WFLDB-Ökoinventar angenähert (*Soft cheese, Camembert-style, at dairy (WFLDB 3.1)/GLO U*).

Es wurde davon ausgegangen, dass Molkenkäse anstelle von Weichkäse aus Milch konsumiert wird. Die Sachbilanz von Weichkäse basiert auf einem bestehenden Ökoinventar aus der WFLDB: *Soft cheese, Camembert-style, at dairy (WFLDB 3.1)/GLO U*

Weizenkleie Verwertung/Valorisierung

Vollkornmehl

Bei der Vollkornmehlherstellung werden die gleichen Produktionsprozesse, wie bei der regulären Mehlherstellung durchgeführt. Deshalb werden bei der Sachbilanz keine Inputs oder Outputs berücksichtigt (vgl. Kapitel 2.3 Systemgrenzen & Allokation).

Es wurde davon ausgegangen, dass Weizenkleie Weissmehl ersetzt. Für die Produktion von einem kg Weissmehl werden unter Berücksichtigung der Verluste 1.35 kg Weizen benötigt (gemäss Sachbilanz von Mehl in der WFLDB). Die Sachbilanz von Weizen wurde mit einem bestehenden Ökoinventar zur konventionellen Weizenproduktion in der Schweiz aus der WFLDB angenähert: *Wheat grains IP, at farm {CH} U*

Direkter Verzehr

Die Beimischung von Weizenkleie zum Beispiel in Gebäck benötigt keine weiteren Aufbereitungsprozesse. Das heisst die Sachbilanz dieses Valorisierungsprozesses beinhaltet nur den Transport von der Mühle bis zum Lebensmittelverarbeiter. Hier wurde von einer durchschnittlichen LKW-Transportdistanz von 70 km ausgegangen (Frischknecht, et al., 2007).

Die Sachbilanz des Weissmehls, das durch die Beimischung von Weizenkleie ersetzt werden kann, basiert auf einem Ökoinventar aus der WFLDB: *Wheat flour, at industrial mill (WFLDB 3.1)/GLO U*

Insektenzucht

Bei der Verfütterung von Weizenkleie an Soldatenfliegenlarven werden die Larven über mehrere Tage mit einer Substratmischung gefüttert. Das Substrat kann nebst feuchteren Komponenten wie z.B. faulem Obst bis zu 10% Weizenkleie enthalten. Durch die Abwärme der Larven wird Feuchtigkeit im Substrat verdunstet. Dank diese Passivkühlung ist keine energieintensive Kühlung nötig. Die ausgewachsenen Larven werden im Anschluss getrocknet und gepresst. Für diesen Prozess wird also lediglich Strom benötigt, wobei vom Schweizer Strommix ausgegangen wurde. Das Abwasser aus dem Prozess wird in einer Abwasserreinigungsanlage geklärt. Aus einem kg verfütterter Weizenkleie entsteht rund 50g Insektenmehl und 20g Insektenöl. Ausserdem entsteht während der Aufzucht 230g Insektendünger. Für die Sachbilanz der Insektenzucht wurden Primärdaten der Schweizer

Industrie verwendet. Für die Berechnungen wurde lediglich der Anteil von Weizenkleie an der Insektenzucht berücksichtigt. Die benötigte Infrastruktur wurde mit dem Ökoinventar *Ethanol fermentation plant {CH} U* angenähert. Für die Anlieferung der Weizenkleie wurde von 70km ausgegangen, was der generischen Transportdistanz von Futtermitteln entspricht (Frischknecht, et al., 2007). Basierend auf dem Erlös dieser drei Produkte wird 63% des Impacts auf Insektenmehl, 17% auf Insektenöl und 20% auf den Insektendünger alloziert (ökonomische Allokation).

Nebst dem Ersatz von Fischmehl resp. Sojaproteinkonzentrat und Fischöl durch das Insektenmehl und Insektenöl kann Dünger ersetzt werden. Gemäss Herstellerangaben kann mit einem kg Insektendünger 0.01 kg N, 0.02 kg P2O5 und 0.014 kg K2O ersetzt werden.

Für die Sachbilanz des ersetzbaren Fischmehls und Fischöls wurde auf Inventare aus ecoinvent 3.9 zurückgegriffen: *Fishmeal, 65-67% protein {PE} / fishmeal and fish oil production, 65-67% protein*. Für den Ersatz von Sojaproteinkonzentrat wurde die Sachbilanz von Sojaproteinkonzentrat aus der Datenbank Agri-Footprint 6 übernommen. Die ersetzbaren synthetischen Düngemittel wurden mit Sachbilanzen von durchschnittlichem mineralischen N-/P2O5-/K2O-Dünger angenähert.

Melasse Verwertung/Valorisierung

Insektenzucht

Für die Verfütterung von Melasse an Insekten wurden die gleichen Datengrundlagen wie bei Weizenkleie verwendet (siehe oben). Einzig wurde lediglich von 5% Melasse im Substrat ausgegangen. Für die Berechnungen wurde nur der Anteil von Melasse an der Insektenzucht berücksichtigt.

Trinkethanol

Der Herstellungsprozess und die zugrundeliegende Sachbilanz ist vertraulich und wird nicht weiter erläutert. Sie wurde im Rahmen der externen Reviews geprüft.

Zuckerersatz

Beim Einsatz von Melasse als Zuckerersatz sind keine zusätzlichen Produktionsschritte erforderlich und die Melasse wird lediglich von der Zuckerfabrik zum Lebensmittelverarbeiter transportiert. Es wurde von einer Transportdistanz per LKW von 70 km ausgegangen (Frischknecht, et al., 2007).

Für die Sachbilanz des ersetzbaren Zuckers wurde das bestehende Ökoinventar aus der BAFU-Datenbank verwendet: *sugar, from sugar beet, at sugar refinery {CH} U*

Rapspresskuchen Verwertung/Valorisierung

Rapsproteinisolat

Die Herstellung von pflanzlichem Proteinisolat umfasst grundsätzlich drei Schritte: Entfettung, Extraktion und Fällung, wobei für jeden Schritt unterschiedliche Verfahren angewendet werden können (Kumar, 2021; Heine, et al., 2018). Da in der Schweiz keine Primärdaten zu Verfügung stehen, wurde auf Literaturdaten zurückgegriffen. Gemäss der EU-Zulassungsstudie wird der Rapspresskuchen erst bis auf einen Fettgehalt von 0.5% entfettet (EFSA, 2013; Zhang, 2024). Hierfür wurde vom in der Ölindustrie weit verbreiteten Lösemittel Hexan ausgegangen. Die

Menge an Lösemittel, welche zur Extraktion von Öl benötigt wird, wurde basierend auf dem Ökoinventar zur Rapsölherstellung aus der WFLDB abgeleitet (*Rapeseed oil, at oil mill (WFLDB 3.1)/GLO U*). Im Anschluss folgen die alkalische Extraktion und isoelektrische Fällung des Isolates. Für diese Produktionsschritte wurden Sachbilanzdaten zur Sojaproteinisolat-Produktion gemäss der Agri-Footprint 6 Datenbank verwendet (Blonk, et al., 2023). In diesen Schritten wird dem entfetteten Rapspresskuchen Wasser, Salzsäure (zur Einstellung des pH-Wertes) und Natriumhydroxid (zur alkalischen Extraktion) beigefügt. Für diese Schritte werden zudem Wärme und Strom benötigt. Beim Stromverbrauch wurde vom Schweizer Strommix ausgegangen, bei der Wärme wurde Wärme aus Erdgas berücksichtigt. Bei der Fällung entstehen Abwasser, welches in die ARA geleitet wird, sowie Raps-Rückstände. Hier wurde davon ausgegangen, dass diese in einer Biogasanlage entsorgt werden. Ein für die Herstellung von Rapsproteinisolat spezifischen Produktionsschritt ist die enzymatische Behandlung, um den natürlich im Raps vorkommenden Antinährstoff Phytat zu zersetzen (EFSA, 2013). Dazu wird das Enzym Phytase (300ppm) zur wässrigen Lösung gegeben. Zur Neutralisation der zugegebenen Chemikalien und zur Anschliessenden Trocknung wird das Substrat unter Vakuum erwärmt, zentrifugiert und sprühgetrocknet (EFSA, 2013). Dazu wird dem Substrat erneut Wasser zugeführt. Ausserdem wird Strom und Wärme für die Erwärmung, Zentrifugation und Sprüh Trocknung benötigt. Diese Schritte wurden ebenfalls mit Sachbilanzdaten zur Sojaproteinisolat-Produktion angenähert (Blonk, et al., 2023). Die benötigte Infrastruktur wurde mit Daten aus dem Ökoinventar *Rapeseed oil, at oil mill (WFLDB 3.1)/GLO U* angenähert. Für die Anlieferung des Rapspresskuchens wurde von 70km ausgegangen, was der generischen Transportdistanz von Futtermitteln entspricht (Frischknecht, et al., 2007).

Generell wurden die Sachbilanzdaten, welche von der Sojaproteinisolat-Produktion übernommen wurden, bezüglich des Proteingehaltes und der Verluste durch die Entfettung korrigiert. Für die Produktion von Sojaproteinisolat wird Sojapresskuchen mit einem Proteingehalt von 56% in der Trockensubstanz eingesetzt. Rapspresskuchen hat einen Proteingehalt von ungefähr 31% in der Frischsubstanz und Ölgehalt von 10% (Agroscope, 2016). Entfetteter Rapspresskuchen hat somit einen Proteingehalt von rund 38% in der Trockensubstanz. Entsprechend wird rund 1.5-mal mehr Rapspresskuchen benötigt, um die gleiche Menge Proteinisolat mit Proteingehalt von 91% herzustellen. Entsprechend liegt dies Ausbeute des Prozesses bei 0.23 kg Rapsproteinisolat pro kg Rapspresskuchen.

Es wurde davon ausgegangen, dass Rapsproteinisolat anstelle von Sojaproteinisolat eingesetzt wird. Die Sachbilanz von Sojaproteinisolat wurde aus der Datenbank Agri-Footprint 6 übernommen.

Rapsmehl

Um Rapsmehl herzustellen, wird der Rapspresskuchen erst entfettet, dann vorbereitet und angesäuert um anschliessend das natürlich in der Pflanze vorkommende Phytat enzymatisch zu zersetzen (EFSA, 2020). Da in der Schweiz keine Primärdaten zu Verfügung stehen, wurde auf Literaturdaten zurückgegriffen. Für den ersten Schritt der Lösemittel-basierte Entfettung wird von dem in der Ölindustrie weit verbreiteten Lösemittel Hexan ausgegangen. Die Menge an Lösemittel, welche zur Extraktion benötigt wird, wurde basierend auf dem Ökoinventar zur Rapsölherstellung aus der WFLDB abgeleitet (*Rapeseed oil, at oil mill (WFLDB 3.1)/GLO U*). Die Sachbilanzdaten für die Ansäuerung zur Einstellung des pH-Wertes wurden von Sachbilanzdaten zur Sojaproteinisolat-Produktion gemäss der Agri-Footprint 6 Datenbank abgeleitete (Blonk, et al., 2023), da dieser Prozessschritt vergleichbar zum entsprechenden

Prozessschritt in der Isolat-Produktion ist. Berücksichtigt wurde die Zugabe von Wasser und Salzsäure sowie der Strom- und Wärmeverbrauch für diesen Prozessschritt. Beim Stromverbrauch wurde vom Schweizer Strommix ausgegangen, bei der Wärme wurde Wärme aus Erdgas berücksichtigt. Das entstandene Abwasser wird in die ARA geleitet. Ein für die Herstellung von Rapsmehl spezifischer Produktionsschritt ist die enzymatische Behandlung, um den natürlich im Raps vorkommenden Antinährstoff Phytat zu zersetzen (EFSA, 2020). Dazu wird das Enzym Phytase (0.04% in der Trockenmasse) zur wässrigen Lösung gegeben und anschliessend durch Erhitzung neutralisiert. Im Anschluss wird das Produkt im Ofen getrocknet und gemahlen (EFSA, 2020). Für die Trocknung im Ofen wurde die Sachbilanz mittels eines bestehenden Trocknungsprozesses der BAFU-Datenbank bestimmt: *Grain drying, natural gas, high temperature {CH} U*. Die Menge an zu verdunstetem Wasser wurde basierend auf der Wasserbilanz aus den vorangegangenen Prozessschritten ermittelt. Das fertige Rapsmehl hat einen Wassergehalt von 2% (EFSA, 2020). Für die Sachbilanz der anschliessenden Vermahlung wurden Daten aus einem bestehenden Ökoinventar zur Mehlerstellung aus der WFLDB verwendet (*Wheat flour, at industrial mill (WFLDB 3.1)/GLO U*). Die benötigte Infrastruktur für den gesamten Prozess wurde mit Daten aus dem Ökoinventar *Rapeseed oil, at oil mill (WFLDB 3.1)/GLO U* angenähert. Für die Anlieferung des Rapspresskuchens wurde von 70km ausgegangen, was der generischen Transportdistanz von Futtermitteln entspricht (Frischknecht, et al., 2007).

Es wurde davon ausgegangen, dass Rapsmehl anstelle von Weizenmehl eingesetzt wird. Die Sachbilanz von Weizenmehl basiert auf einem Ökoinventar aus der WFLDB: *Wheat flour, at industrial mill (WFLDB 3.1)/GLO U*

Biertrester Verwertung/Valorisierung

Fleischersatz

Die Sachbilanz der Produktion des Fleischersatzes aus Biertrester basiert auf einer Mischung aus Primärdaten eines Schweizer Produzierenden und Literaturdaten. In einem ersten Schritt wird der Biertrester getrocknet und vermahlen. Die Trocknung ist rein mechanisch, es wird also lediglich Strom benötigt. Es wurde vom Schweizer Strommix ausgegangen. Die benötigte Menge an Strom für die mechanische Trocknung und Vermahlung wurde mit dem Stromverbrauch aus der Biertrestermehlerstellung (siehe unten) angenähert. Das abgeschiedene Wasser wird nach der mechanischen Trocknung dem gemahlene Biertrester für die Nassextrusion wieder zugeführt. Im Anschluss wird der Biertrester mit den weiteren Zutaten gemischt. Die für die Ökobilanz berücksichtigte Rezeptur basiert auf dem im Handel erhältlichen Produkt der Marke YUP!³. Somit wurde die Zugabe von 30% Sojaproteinkonzentrat berücksichtigt. Durch die Nassextrusion der Masse wird das Fleischersatzprodukt hergestellt. Die Sachbilanzdaten der Nassextrusion wurden mit Literaturdaten für Soja-Extrusion angenähert (Saerens, Smetana, Van Campenhout, Lammers, & Heinz, 2021). Diese beinhaltet die weitere Zugabe von Wasser (Menge berechnet basierend auf Wasserbilanz) und der Stromverbrauch für die Extrusion. Die benötigte Infrastruktur für den Prozess wurde mit Daten analog zum Biertrestermehl (siehe unten) angenähert. Für die Anlieferung des Biertrester wurde von 70km ausgegangen, was der generischen Transportdistanz von Futtermitteln entspricht (Frischknecht, et al., 2007).

³ <https://www.yup.swiss/produkte/produkt-gehacktes>

Es wurde davon ausgegangen, dass der Biertrester-Fleischersatz anstelle von Tofu eingesetzt wird. Die Sachbilanz von Tofu basiert auf einem Ökoinventar aus ecoinvent 3.9: *Tofu {CA-QC}/tofu production*.

Biertrester trocken

Für die reine Trocknung des Biertresters wurde ein in der Schweiz angewendetes Produktionsverfahren berücksichtigt, mit welchem in einem elektrisch betriebenen Prozess der Biertrester vor Ort energieeffizient getrocknet werden kann. Der Biertrester wird erst mechanisch und im Anschluss elektrisch getrocknet. Für die Sachbilanz dieses Valorisierungsweges standen Primärdaten von Schweizer Produzierenden zur Verfügung. Für den Stromverbrauch wurde der Schweizer Strommix berücksichtigt. Die benötigte Infrastruktur für den gesamten Prozess wurde mit Daten aus dem Ökoinventar *Grain drying, high temperature {CH} U* und der spezifisch benötigten Produktionsfläche gemäss Hersteller modelliert. Das Verfahren generiert 0.23 kg getrockneter Biertrester pro kg Nasstrester sowie Presswasser (Entsorgung in ARA) und Wasserdampf. Ebenfalls fällt ein kleiner Teil an Substrat aus dem Presswasser an, welches in einer Biogasanlage entsorgt wird.

Es wurde davon ausgegangen, dass der trockene Biertrester anstelle von Mais eingesetzt wird. Die Sachbilanz von Mais basiert auf einem Ökoinventar aus der BAFU-Datenbank: *Grain maize IP, at farm {CH} U*

Biertrestermehl

Für die Herstellung von Mehl aus Biertrester wird in der Schweiz ein Mahltrocknungsverfahren angewendet. Die Sachbilanz dieses Prozesses basiert auf Primärdaten von Schweizer Verarbeitern. Für das Verfahren wird lediglich Strom und Wärme benötigt. Beim Stromverbrauch wurde vom Schweizer Strommix ausgegangen, bei der Wärme wurde Wärme aus Erdgas berücksichtigt. Die benötigte Infrastruktur für den gesamten Prozess wurde mit Daten aus dem Ökoinventar *Grain drying, high temperature {CH} U* und der spezifisch benötigten Produktionsfläche gemäss Hersteller modelliert. Die Anlieferung des Biertresters erfolgt gemäss Angaben von Produzierenden per LKW über eine Distanz von 17 km. Das Verfahren generiert 0.21 kg Biertrestermehl pro kg Nasstrester sowie Wasserdampf.

Es wurde davon ausgegangen, dass Biertrestermehl anstelle von Weizenmehl eingesetzt wird. Die Sachbilanz von Weizenmehl basiert auf einem Ökoinventar aus der WFLDB: *Wheat flour, at industrial mill (WFLDB 3.1)/GLO U*

Mosttrester Verwertung/Valorisierung

Apfelmehl

Aufgrund fehlender Datengrundlage wurde für die Herstellung von Apfelmehl die gleiche Sachbilanz wie für die Biertrestermehlherstellung verwendet (siehe oben). Der TS-Gehalt von Mosttrester liegt bei 27% (Agroscope, 2016), derjenige von Biertrester gemäss Angabe vom Produzierenden bei 20%. Die Sachbilanz wurde entsprechend bezüglich des Unterschiedes in der TS angepasst.

Die Sachbilanz des Weissmehls, das durch die Nutzung von Apfelmehl ersetzt werden kann, basiert auf einem Ökoinventar aus der WFLDB: *Wheat flour, at industrial mill (WFLDB 3.1)/GLO U*

Innereien & Poulet-Hals Verwertung/Valorisierung

Bei den betrachteten Verwertungen/Valorisierungen von Innereien und Poulet-Hals werden grundsätzlich keine wesentlichen Unterschiede im Produktionsverfahren zwischen den untersuchten Fleisch-Nebenströmen erwartet. Entsprechend unterscheidet sich die Sachbilanz abgesehen von der Art des Nebenstrom-Inputs und sofern nicht anderweitig vermerkt zwischen den betrachteten Fleisch-Nebenströmen nicht.

Tiermehl

Für die Herstellung von Tiermehl werden die Fleisch-Nebenströme in einer Tierkörperverwertungsanlage zerkleinert, mit Wärme in Form von Dampf gekocht und anschliessend werden durch ein Pressverfahren die Feststoffe (Tiermehl) vom Tierfett getrennt. Als Datengrundlage wurden Daten einer Schweizer Tierkörperverwertungsanlage für K1 Schlachtnebenprodukte verwendet (Pishgar-Komleh, Sefeedpari, Asbeck, & Vellinga, 2021). Für das Verfahren wird lediglich Strom und Wärme benötigt. Beim Stromverbrauch wurde vom Schweizer Strommix ausgegangen, bei der Wärme wurde Wärme aus Erdgas berücksichtigt. Die benötigte Infrastruktur für den Prozess wurde mit Daten aus dem Ökoinventar *slaughtering, beef cattle (WFLDB 3.1)/GLO U* angenähert. Die Anlieferung der Nebenströme per LKW beträgt gemäss Studie 100 km. Das Verfahren generiert pro kg Nebenstrom 0.24 kg Tiermehl, 0.13 kg Tierfett, sowie Wasser, das verdunstet. Für die Allokation zwischen Tiermehl und Tierfett wurden die ökonomischen Allokationsfaktoren von Campos et al. (2020) übernommen. Entsprechend wird 67% der Umweltbelastung auf Tiermehl und 33% auf Tierfett alloziert.

Es wurde davon ausgegangen, dass Tiermehl anstelle von Fischmehl eingesetzt wird. Die Sachbilanz von Fischmehl basiert auf einem Ökoinventar aus ecoinvent 3.9: *Fishmeal, 65-67% protein {PE} | fishmeal and fish oil production, 65-67% protein*. Beim Tierfett wurde davon ausgegangen, dass Melasse ersetzt werden kann. Die Sachbilanz von Melasse basiert auf einem bestehenden Ökoinventar aus der BAFU-Datenbank: *Molasses, from sugar beet, at sugar refinery {CH} U*

Direkter Verzehr

Für den direkten Verzehr der Fleisch-Nebenströme muss die Lebensmittelqualität der Innereien aufrechterhalten werden. Da dieser Mehraufwand für die Weiterverarbeitung und Einhaltung der Kühlkette nicht genau beziffert werden konnte, wurden für diese Prozesse näherungsweise der Prozess für die Gefrierverarbeitung der Fleisch-Nebenströme analog zur Pet-Food Herstellung berücksichtigt (siehe Kapitel Verfütterung auf Seite 117).

Es wurde davon ausgegangen, dass die Fleisch-Nebenströme anstelle von regulärem Fleisch (Rind, Schwein resp. Poulet entsprechend dem berücksichtigten Nebenstrom) eingesetzt wird. Die Sachbilanz von Fleisch basiert auf Ökoinventar aus der *WFLDB: Beef, fresh meat, at slaughterhouse (WFLDB 3.1)/US U, Chicken, fresh meat, at slaughterhouse (WFLDB 3.1)/US U, Pork, fresh meat, at slaughterhouse (WFLDB 3.1)/DE U*

Fleischproteinisolat

Für die Herstellung von Fleischproteinisolat aus Innereien wurde auf Literaturdaten zurückgegriffen. Die spezifischen Produktionsschritte für die Herstellung von Fleischproteinisolat wurden mittels Review- und Laborstudien identifiziert (Chuck-Hernandez & Ozuna, 2019; Zhao, et al., 2016; Tsermoula, et al., 2019). Die Datengrundlage aus diesen Studien sind jedoch für die Sachbilanzierung des Valorisierungsprozesses ungenügend,

weshalb für die Sachbilanz auf Daten vergleichbarer Prozesse zurückgegriffen wurde. Das Verfahren zur Herstellung von Fleischproteinisolat ist ähnlich wie das Verfahren zur Herstellung eines pflanzlichen Proteinisolates und umfasst die Schritte Homogenisierung, Extraktion, Fällung und Trocknung. Bei der Homogenisierung werden die Innereien zerkleinert und zu einer homogenen Masse gemischt. Der Stromverbrauch wurde mit dem Stromverbrauch, der für die Herstellung von Tiermehl (siehe oben) benötigt wird, angenähert. Im Anschluss wird das Protein mittels alkalischer Extraktion und isoelektrischer Fällung isoliert. Für diese Produktionsschritte wurden Sachbilanzdaten zur Sojaproteinisolat-Produktion gemäss der Agri-Footprint 6 Datenbank verwendet (Blonk, et al., 2023). In diesen Schritten wird den Innereien Wasser, Salzsäure (zur Einstellung des pH-Wertes) und Natriumhydroxid beigefügt. Für diese Schritte werden zudem Wärme und Strom benötigt. Beim Stromverbrauch wurde vom Schweizer Strommix ausgegangen, bei der Wärme wurde Wärme aus Erdgas berücksichtigt. Bei der Fällung entstehen Abwasser, welches in die ARA geleitet wird, sowie Innereien-Rückstände. Hier wurde davon ausgegangen, dass diese in einer Biogasanlage entsorgt werden. Im Anschluss wird das Isolat neutralisiert und sprühgetrocknet. Dazu wird ebenfalls Wasser, Strom und Wärme benötigt. Die benötigte Infrastruktur wurde mit Daten aus dem Ökoinventar *slaughtering, beef cattle (WFLDB 3.1)/GLO U* angenähert. Für die Anlieferung der Innereien wurde von 70km ausgegangen, was der generischen Transportdistanz von Futtermitteln entspricht (Frischknecht, et al., 2007).

Generell wurden die Sachbilanzdaten, welche von der Sojaproteinisolat-Produktion übernommen wurden, bezüglich des Proteingehaltes des berücksichtigten Innereien-Nebenstroms korrigiert. Für die Produktion von Sojaproteinisolat wird Sojapresskuchen mit einem Proteingehalt von 56% in der Trockensubstanz eingesetzt. Rind-Innereien haben einen Proteingehalt von 66% in der Trockensubstanz, Poulet-Innereien 62% und Schwein-Innereien 74% (BLV, 2024). Allerdings liegt der Trockensubstanz-Gehalt bei Rind-Innereien bei 31%, bei Poulet-Innereien bei 27% und bei Schweins-Innereien bei 28% (BLV, 2024). Entsprechend wird rund 2.5-mal mehr Rind-Innereien, 3-mal mehr Poulet-Innereien und 2.4-mal mehr Schwein-Innereien benötigt, um die gleiche Menge Proteinisolat mit Proteingehalt von 91% herzustellen. Entsprechend liegt die Ausbeute bei 0.15 kg Fleischproteinisolat pro kg Rind-Innereien, 0.12 kg pro Poulet-Innereien und 0.15 kg pro kg Schweins-Innereien.

Es wurde davon ausgegangen, dass Fleischproteinisolat anstelle von Fleisch (Rind, Schwein resp. Poulet entsprechend dem berücksichtigten Nebenstrom) eingesetzt wird. Die Sachbilanz von Fleisch basiert auf Ökoinventar aus der *WFLDB: Beef, fresh meat, at slaughterhouse (WFLDB 3.1)/US U, Chicken, fresh meat, at slaughterhouse (WFLDB 3.1)/US U, Pork, fresh meat, at slaughterhouse (WFLDB 3.1)/DE U*

Extrusion

Die Sachbilanz der Extrusion von Fleisch-Innereien basiert auf Literaturdaten. In einem ersten Schritt werden die Innereien zerkleinert und gemischt. Der Stromverbrauch für diese Prozesse wurde mit dem Stromverbrauch, der für die Herstellung von Pet-Food (siehe oben) benötigt wird, angenähert. Anschliessend werden die zerkleinerten Innereien in einem herkömmlichen Nassextrusionsverfahren zu einem Extrudat weiterverarbeitet. Die Sachbilanzdaten der Nassextrusion wurden mit Literaturdaten für Soja-Extrusion angenähert (Saerens, Smetana, Van Campenhout, Lammers, & Heinz, 2021). Diese beinhaltet den Stromverbrauch für die Extrusion, wobei vom Schweizer Strommix ausgegangen wurde. Es wurde angenommen, dass aufgrund des hohen Wassergehaltes in den Fleisch-Innereien (ca. 70% (BLV, 2024)) kein weiteres Wasser mehr beigefügt wird.

Es wurde davon ausgegangen, dass Fleischextrudat anstelle von Fleisch (Rind, Schwein resp. Poulet entsprechend dem berücksichtigten Nebenstrom) eingesetzt wird. Die Sachbilanz von Fleisch basiert auf Ökoinventar aus der *WFLDB: Beef, fresh meat, at slaughterhouse (WFLDB 3.1)/US U, Chicken, fresh meat, at slaughterhouse (WFLDB 3.1)/US U, Pork, fresh meat, at slaughterhouse (WFLDB 3.1)/DE U*

B Übersicht weitere Resultate

B.1 Resultate THG-Emissionen

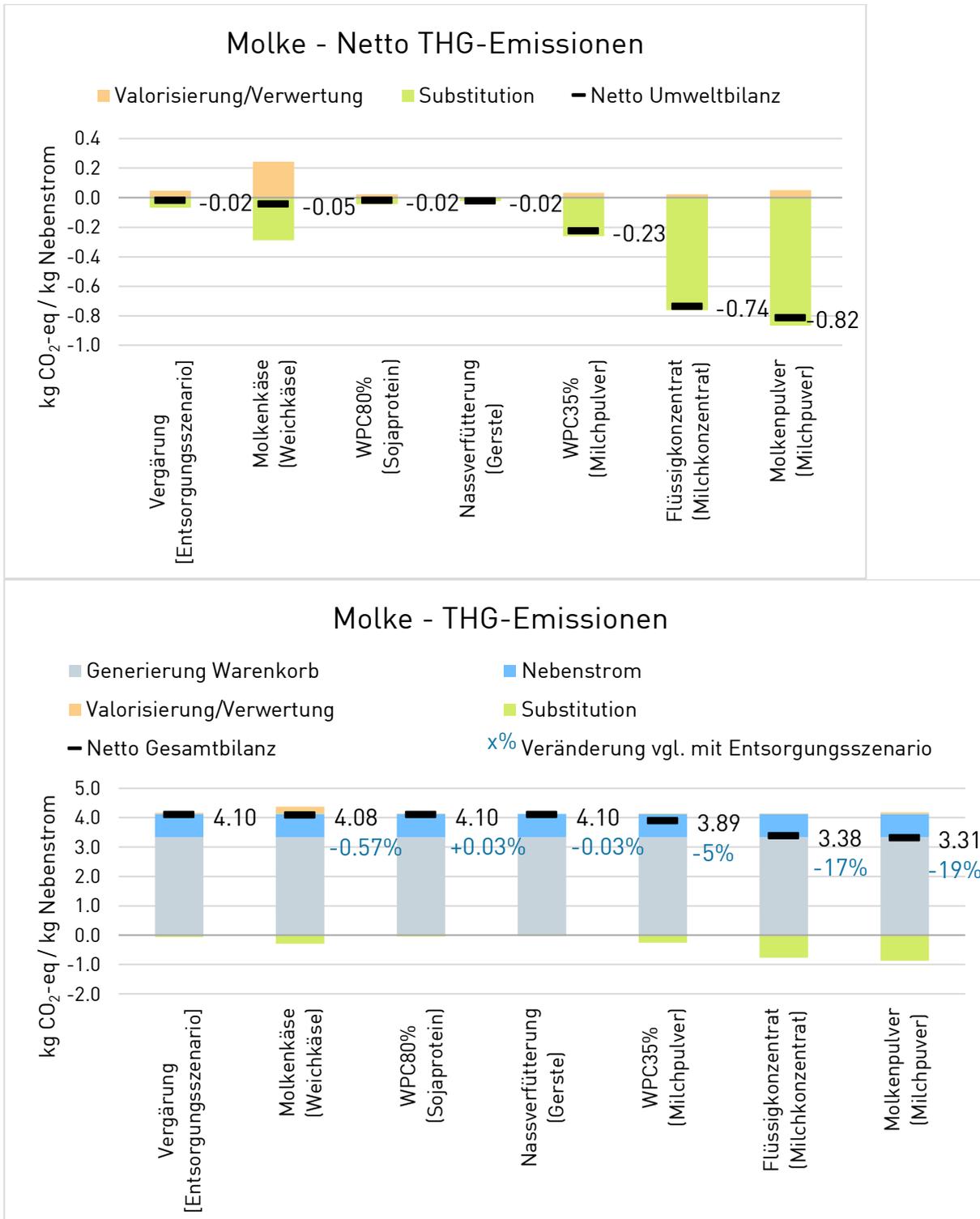


Abbildung 33: Netto-THG-Emissionen pro kg Molke der untersuchten Valorisierungs- und Verwertungswege (oben). THG-Emissionen pro kg Molke der untersuchten Valorisierungs-/Verwertungswege unter Berücksichtigung der vollständigen Systemgrenzen (unten). Die Grafiken sind analog zu den Grafiken zur Gesamtumweltbelastung dargestellt und zu interpretieren (vgl. Abbildung 4 und Abbildung 5).

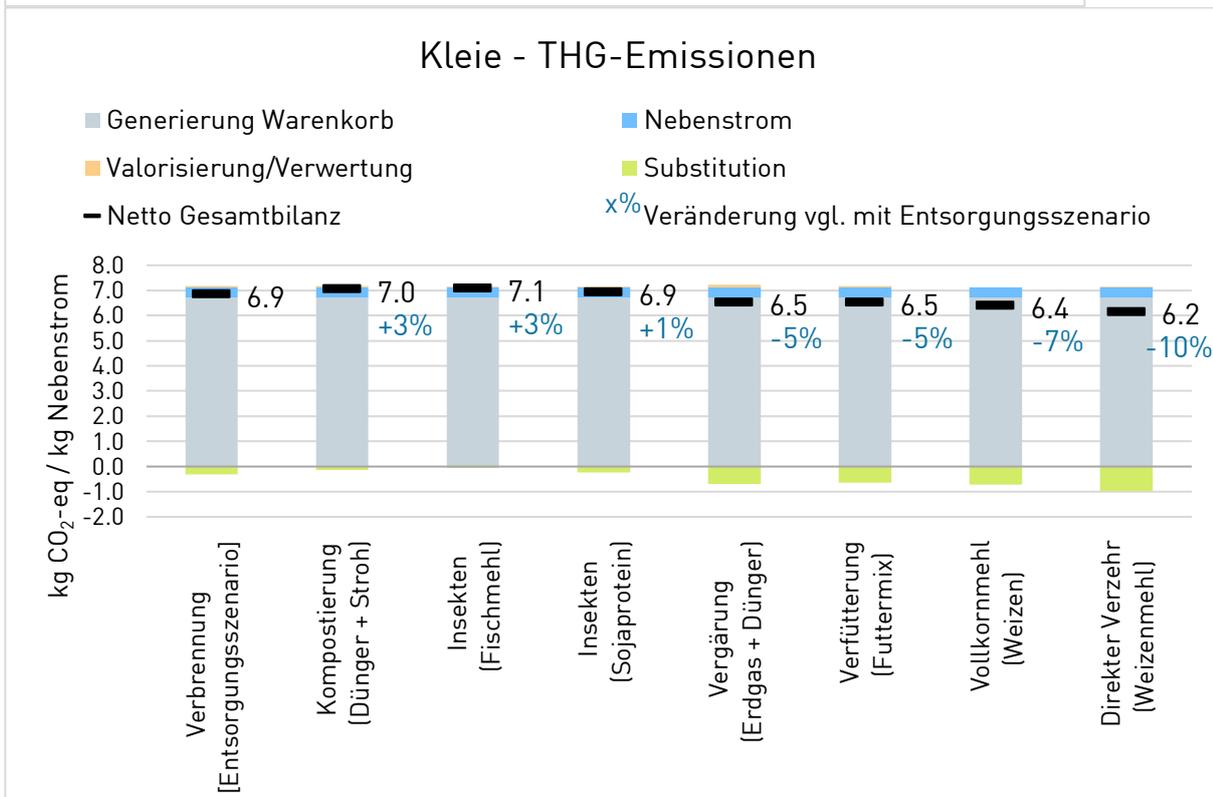
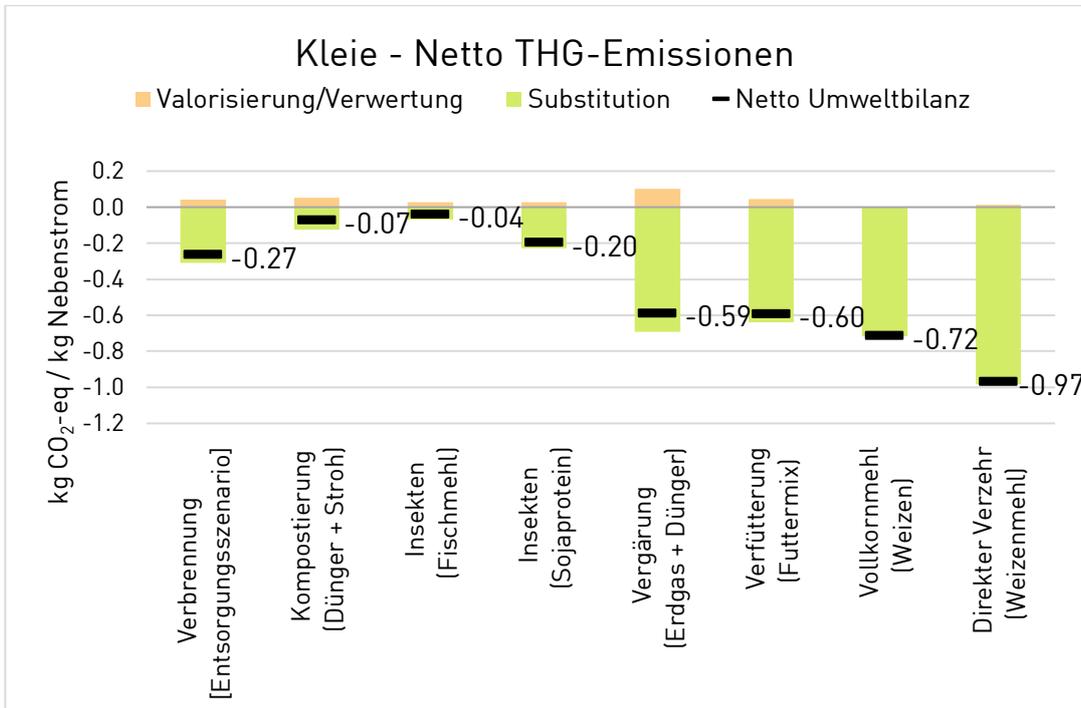


Abbildung 34: Netto-THG-Emissionen pro kg Weizenkleie der untersuchten Valorisierungs-/Verwertungswege (oben). THG-Emissionen pro kg Weizenkleie der untersuchten Valorisierungs-/Verwertungswege unter Berücksichtigung der vollständigen Systemgrenzen (unten). Die Grafiken sind analog zu den Grafiken zur Gesamtumweltbelastung dargestellt und zu interpretieren (vgl. Abbildung 6 und Abbildung 7).

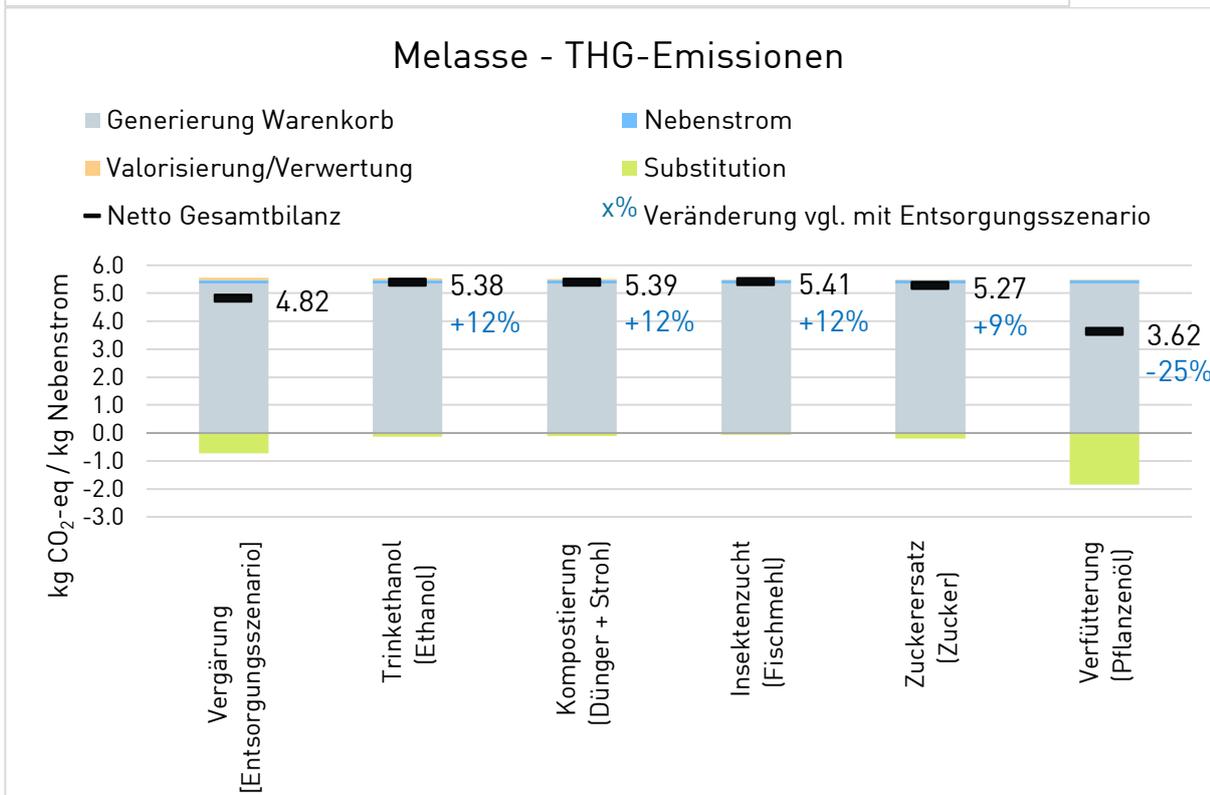
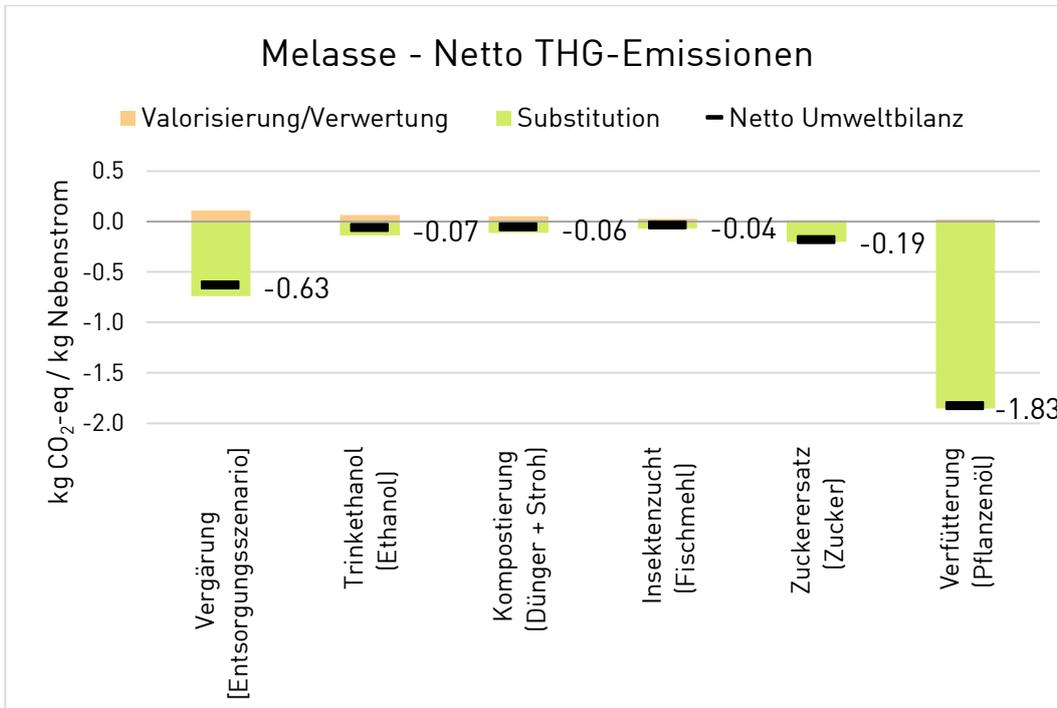


Abbildung 35: Netto-THG-Emissionen pro kg Melasse der untersuchten Valorisierungs- und Verwertungswege (oben). THG-Emissionen pro kg Melasse der untersuchten Valorisierungs-/Verwertungswege unter Berücksichtigung der vollständigen Systemgrenzen (unten). Die Grafiken sind analog zu den Grafiken zur Gesamtumweltbelastung dargestellt und zu interpretieren (vgl. Abbildung 8 und Abbildung 9).

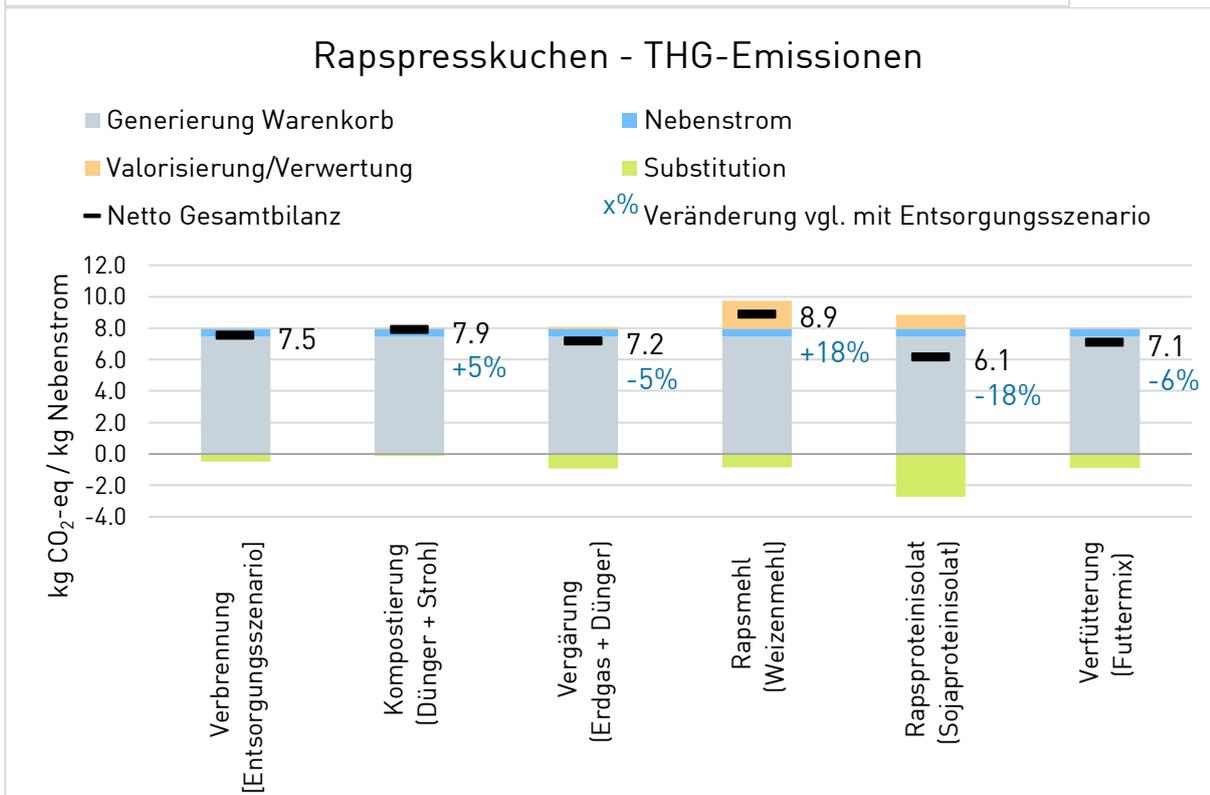
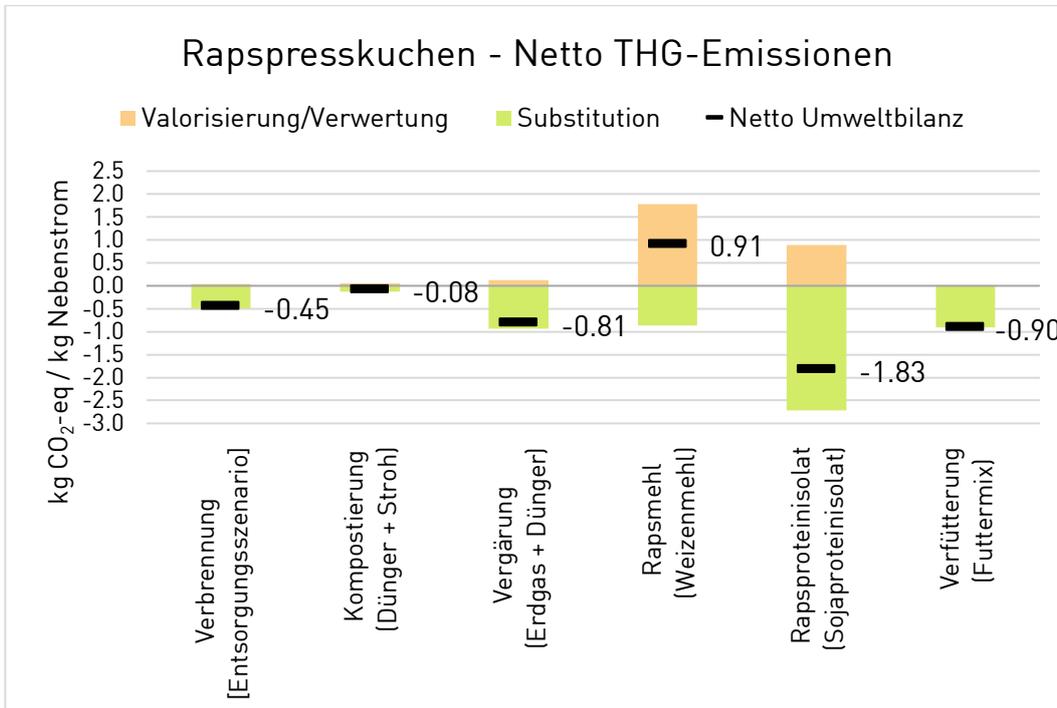


Abbildung 36: Netto-THG-Emissionen pro kg Rapspresskuchen der untersuchten Valorisierungs- und Verwertungswege (oben). THG-Emissionen pro kg Rapspresskuchen der untersuchten Valorisierungs-/Verwertungswege unter Berücksichtigung der vollständigen Systemgrenzen (unten). Die Grafiken sind analog zu den Grafiken zur Gesamtumweltbelastung dargestellt und zu interpretieren (vgl. Abbildung 10 und Abbildung 11).

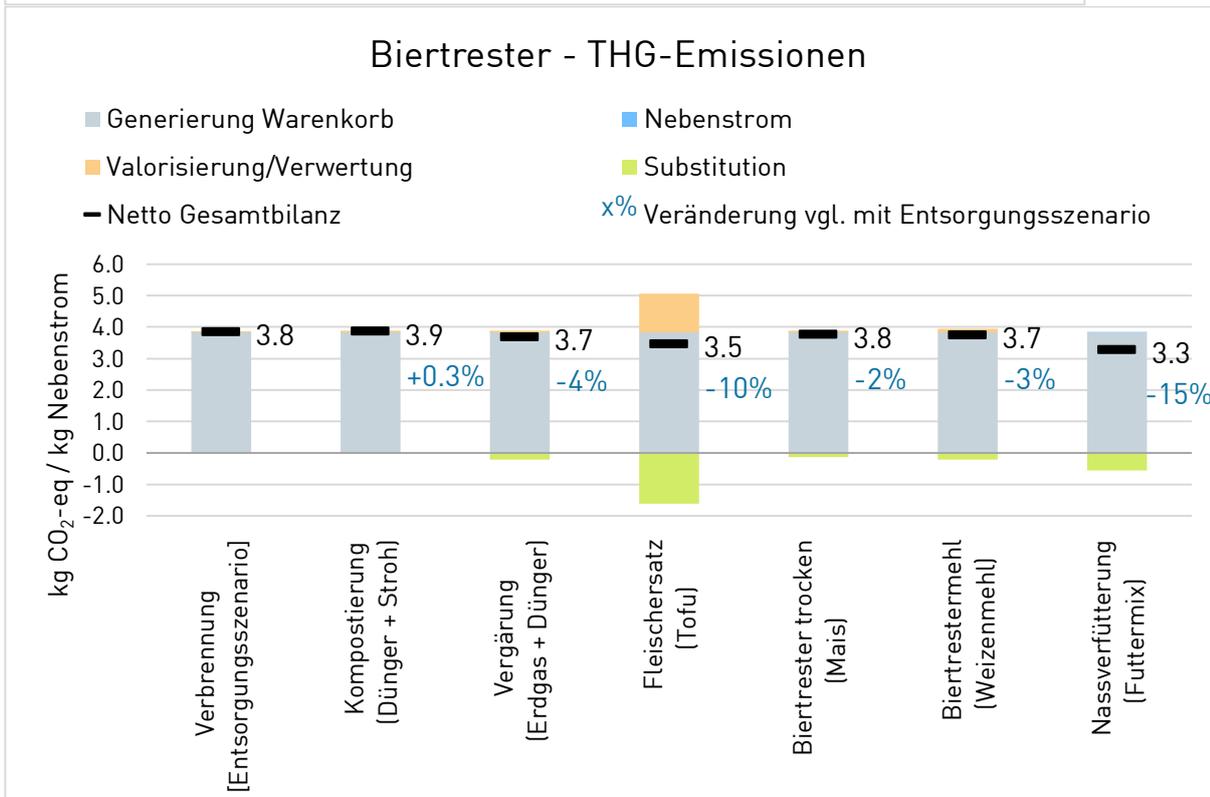
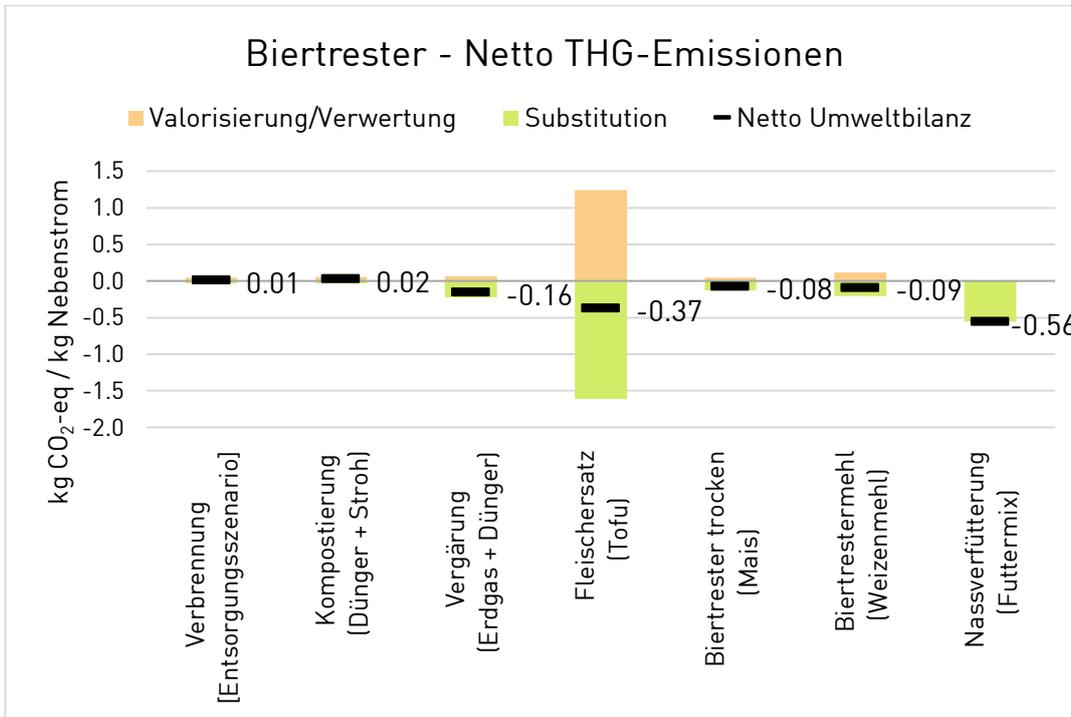


Abbildung 37: Netto-THG-Emissionen pro kg Biertrester der untersuchten Valorisierungs- und Verwertungswege (oben). THG-Emissionen pro kg Biertrester der untersuchten Valorisierungs-/Verwertungswege unter Berücksichtigung der vollständigen Systemgrenzen (unten). Die Grafiken sind analog zu den Grafiken zur Gesamtumweltbelastung dargestellt und zu interpretieren (vgl. Abbildung 12 und Abbildung 13).

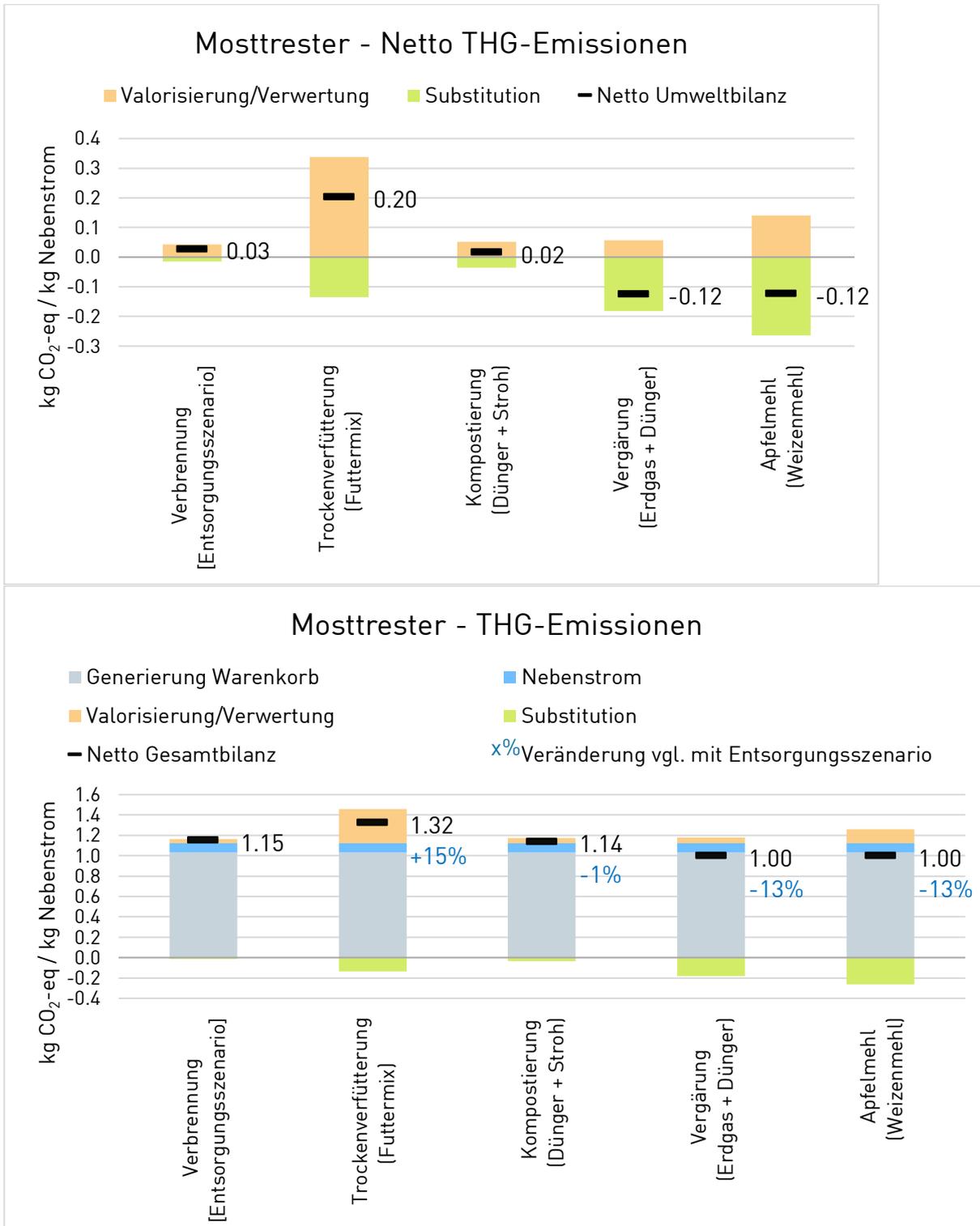


Abbildung 38: Netto-THG-Emissionen pro kg Mostrestester der untersuchten Valorisierungs- und Verwertungswege (oben). THG-Emissionen pro kg Mostrestester der untersuchten Valorisierungs-/Verwertungswege unter Berücksichtigung der vollständigen Systemgrenzen (unten). Die Grafiken sind analog zu den Grafiken zur Gesamtumweltbelastung dargestellt und zu interpretieren (vgl. Abbildung 14 und Abbildung 15).

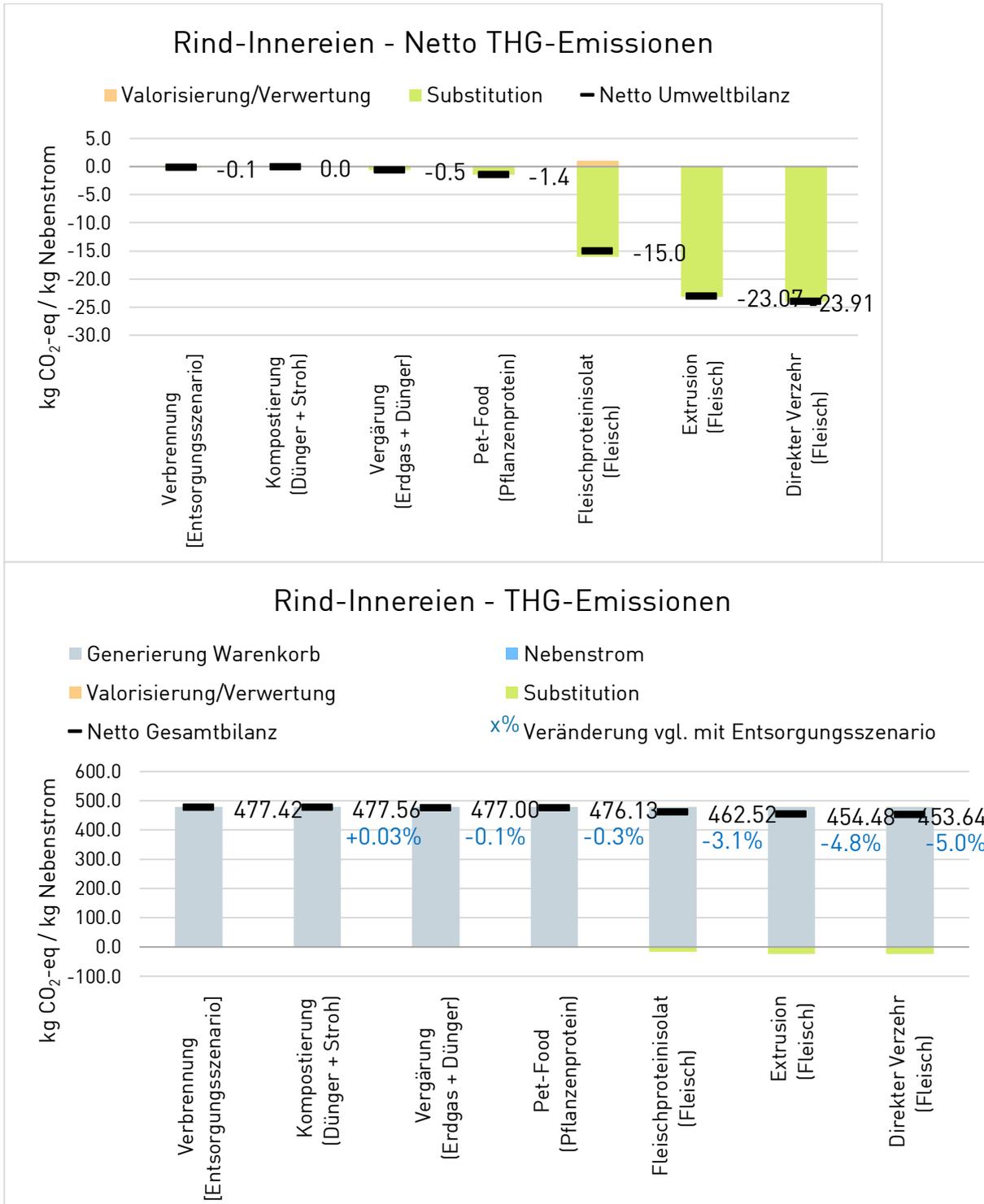


Abbildung 39: Netto-THG-Emissionen pro kg Rind-Innereien der untersuchten Valorisierungs- und Verwertungswege (oben). THG-Emissionen pro kg Rind-Innereien der untersuchten Valorisierungs-/Verwertungswege unter Berücksichtigung der vollständigen Systemgrenzen (unten). Die Grafiken sind analog zu den Grafiken zur Gesamtumweltbelastung dargestellt und zu interpretieren (vgl. Abbildung 16 und Abbildung 17).

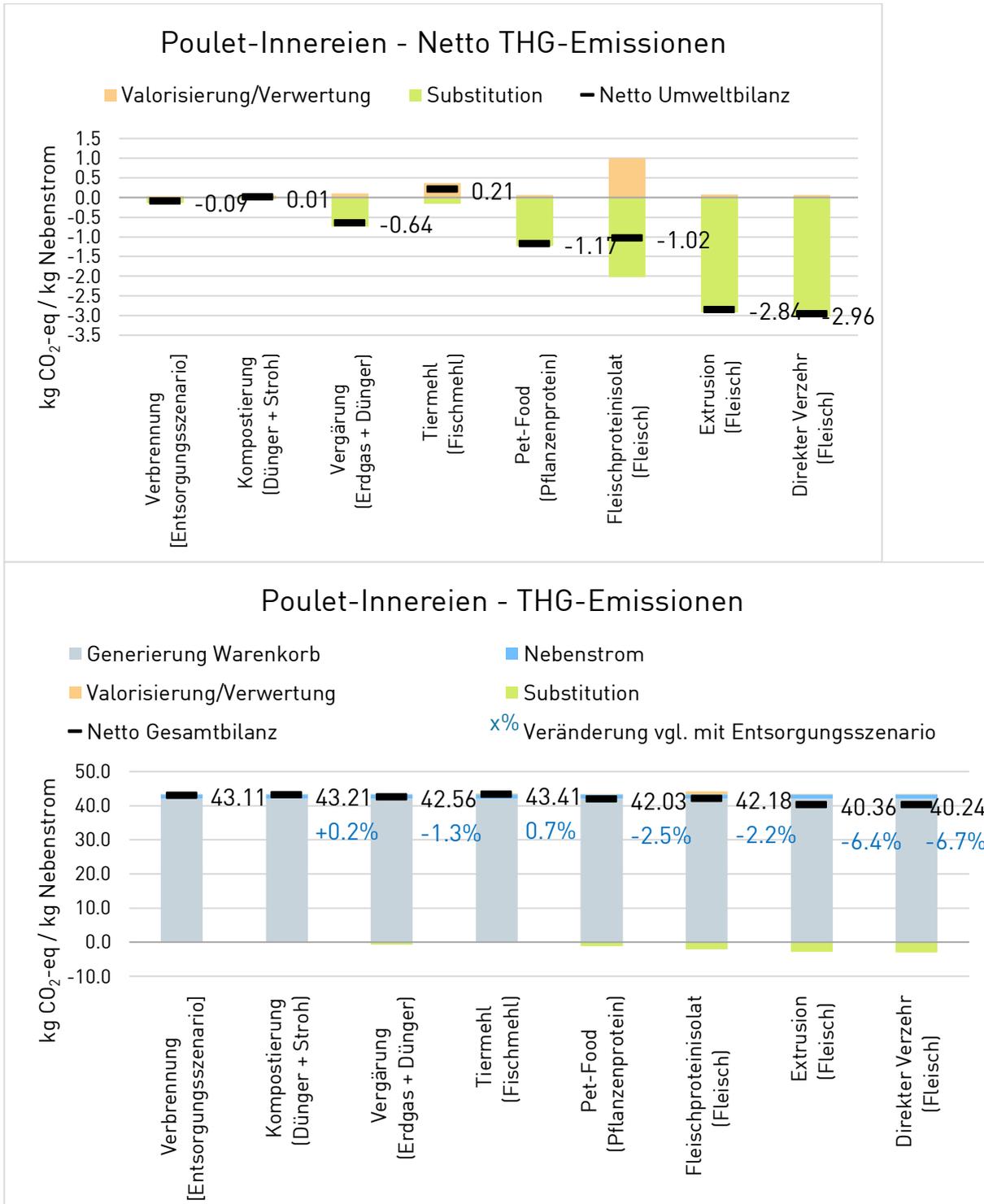


Abbildung 40: Netto-THG-Emissionen pro kg Poulet-Innereien der untersuchten Valorisierungs- und Verwertungswege (oben). THG-Emissionen pro kg Poulet-Innereien der untersuchten Valorisierungs-/Verwertungswege unter Berücksichtigung der vollständigen Systemgrenzen (unten). Die Grafiken sind analog zu den Grafiken zur Gesamtumweltbelastung dargestellt und zu interpretieren (vgl. Abbildung 18 und Abbildung 19).

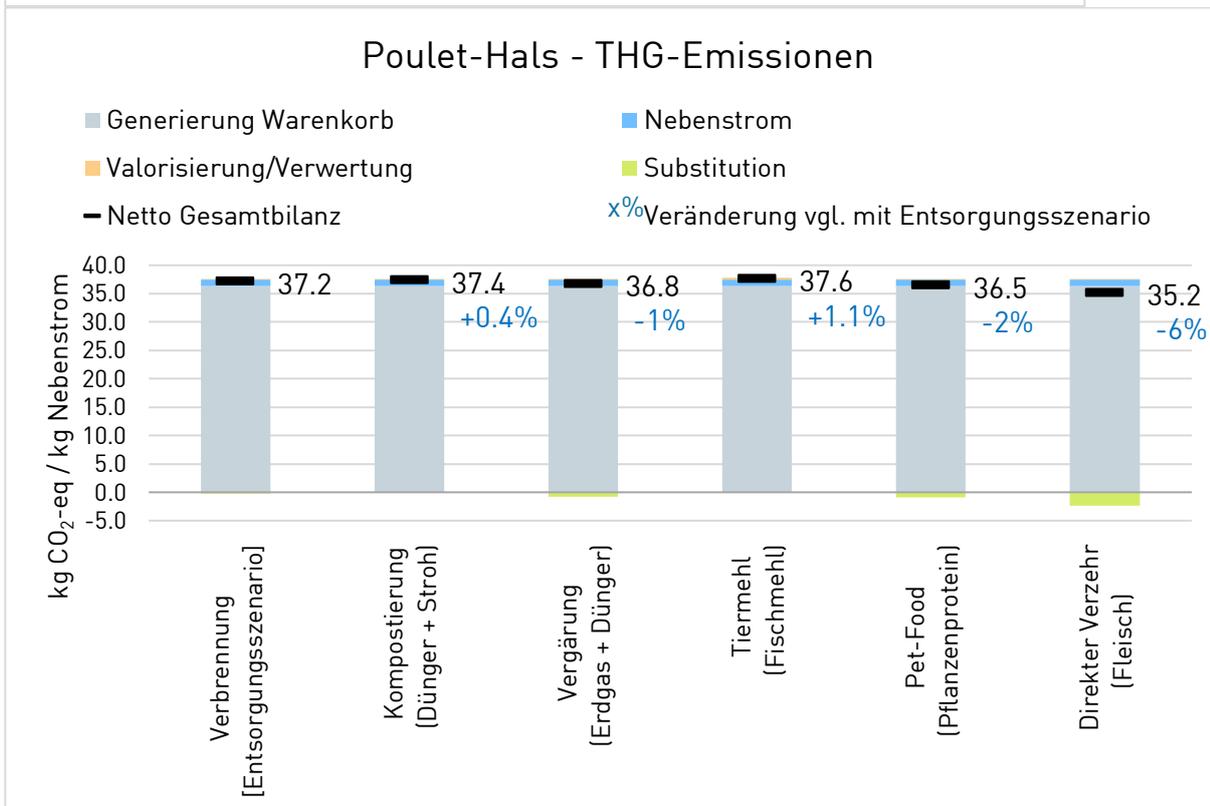
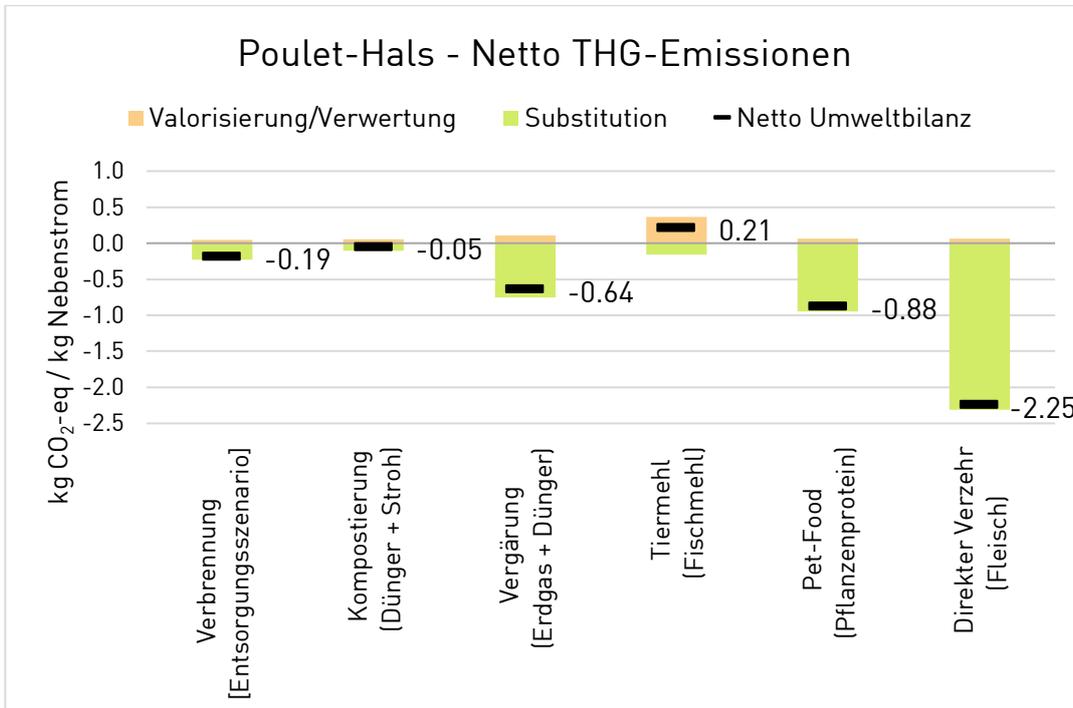


Abbildung 41: Netto-THG-Emissionen pro kg Poulet-Hals der untersuchten Valorisierungs- und Verwertungswege (oben). THG-Emissionen pro kg Poulet-Hals der untersuchten Valorisierungs-/Verwertungswege unter Berücksichtigung der vollständigen Systemgrenzen (unten). Die Grafiken sind analog zu den Grafiken zur Gesamtumweltbelastung dargestellt und zu interpretieren (vgl. Abbildung 20 und Abbildung 21).

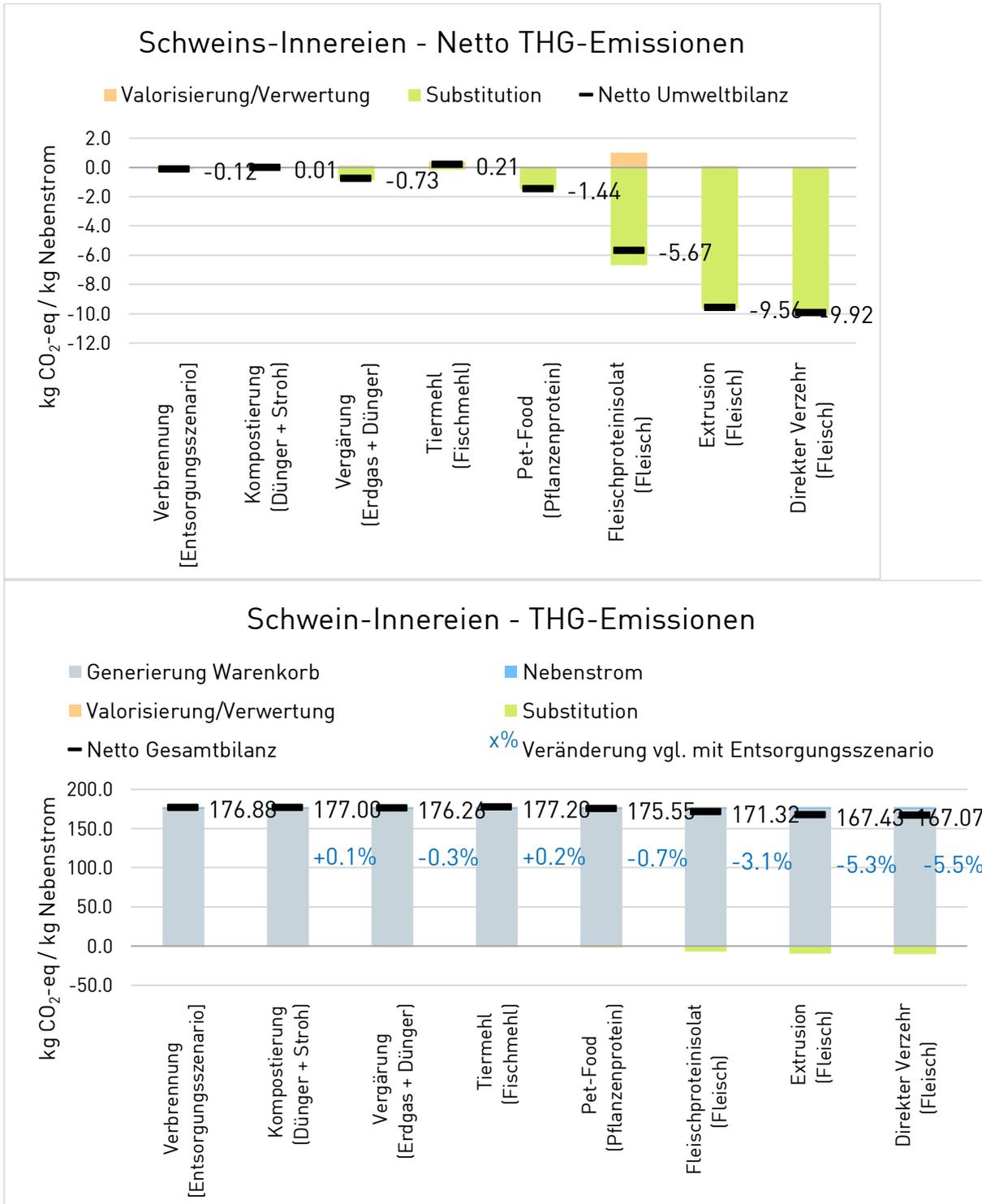


Abbildung 42: Netto-THG-Emissionen pro kg Schweins-Innereien der untersuchten Valorisierungs- und Verwertungswege (oben). THG-Emissionen pro kg Schweins-Innereien der untersuchten Valorisierungs-/Verwertungswege unter Berücksichtigung der vollständigen Systemgrenzen (unten). Die Grafiken sind analog zu den Grafiken zur Gesamtumweltbelastung dargestellt und zu interpretieren (vgl. Abbildung 22 und Abbildung 23).

B.2 Einordnung Verwertungs-/Valorisierungswege

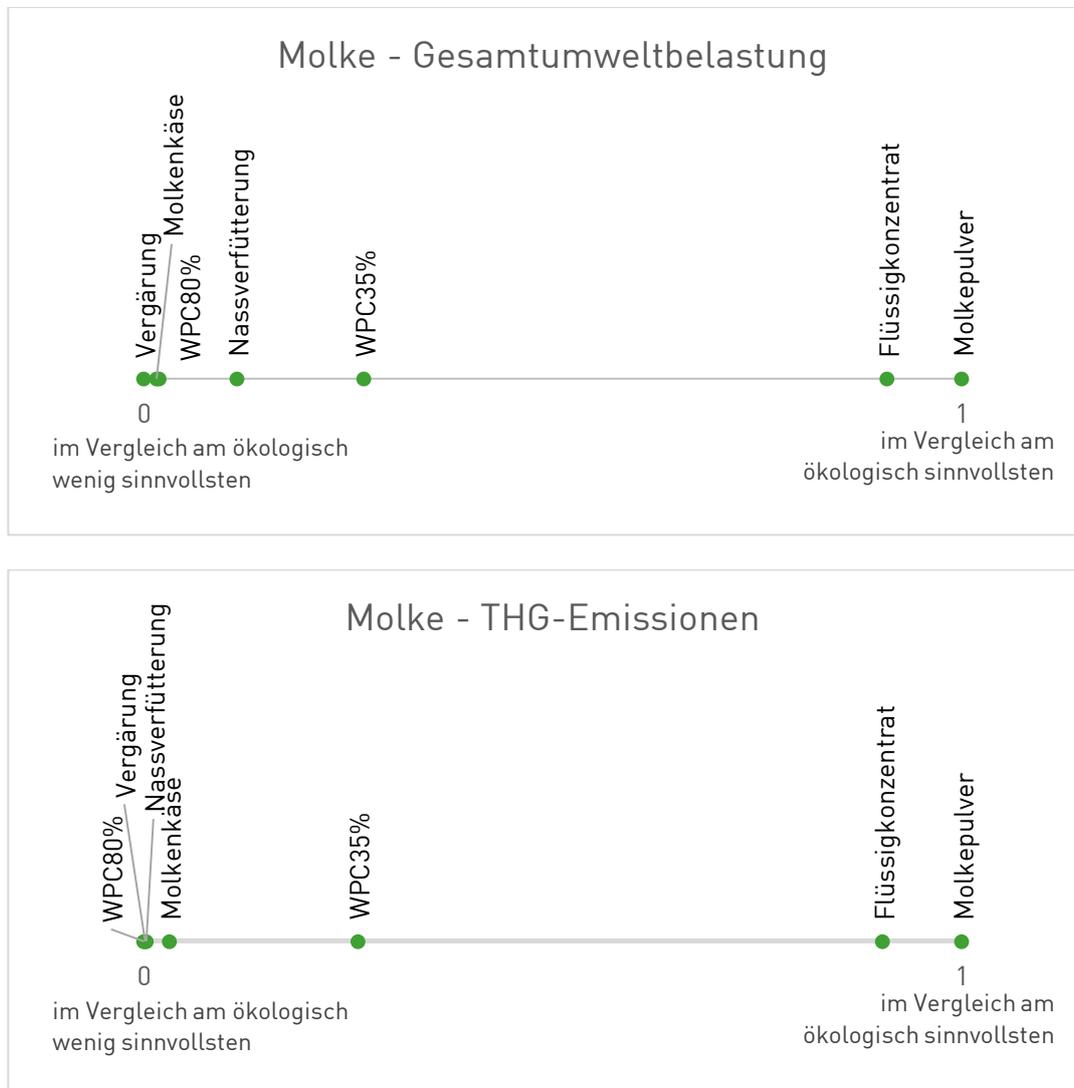


Abbildung 43: Einordnung der Verwertungs-/Valorisierungswege von Molke auf einer Skala von «0 – Im Vergleich am ökologisch wenig sinnvollsten» bis «1 – Im Vergleich am ökologisch sinnvollsten» proportional zur Gesamtumweltbelastung (oben) resp. den THG-Emissionen (unten).

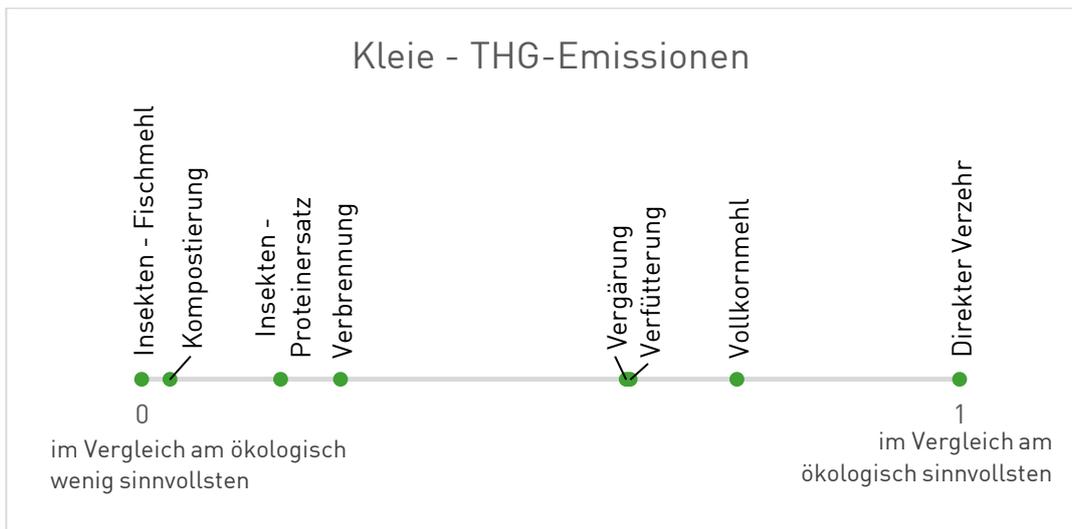


Abbildung 44: Einordnung der Verwertungs-/Valorisierungswege von Weizenkleie auf einer Skale von «0 – Im Vergleich am ökologisch wenig sinnvollsten» bis «1 – Im Vergleich am ökologisch sinnvollsten» proportional zur Gesamtumweltbelastung (oben) resp. den THG-Emissionen (unten).

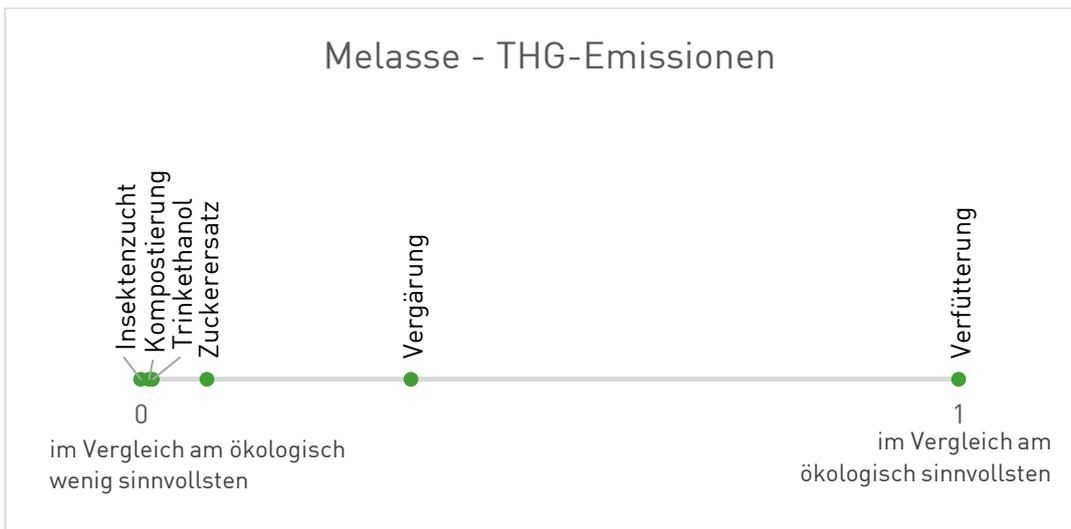
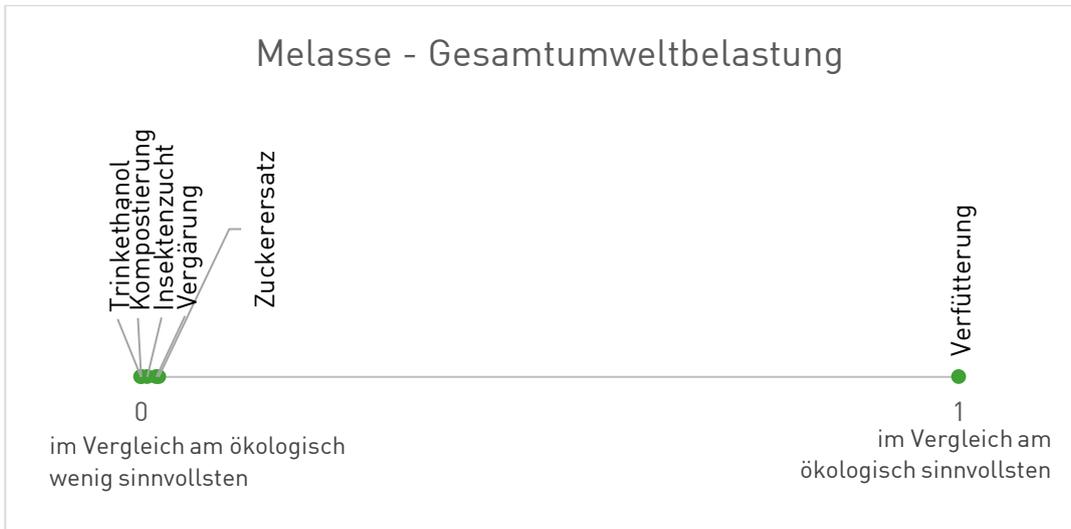


Abbildung 45: Einordnung der Verwertungs-/Valorisierungswege von Melasse auf einer Skale von «0 – Im Vergleich am ökologisch wenig sinnvollsten» bis «1 – Im Vergleich am ökologisch sinnvollsten» proportional zur Gesamtumweltbelastung (oben) resp. den THG-Emissionen (unten).

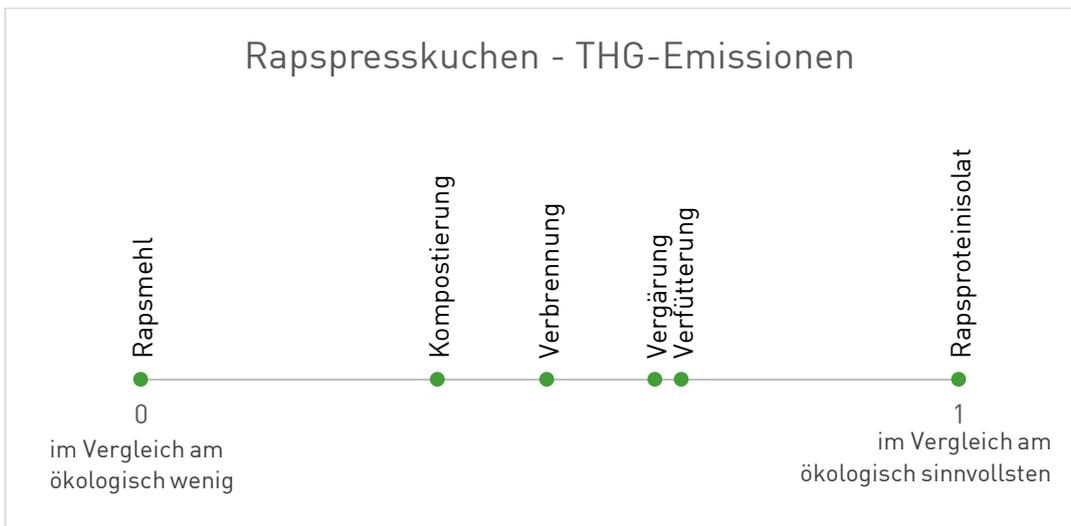
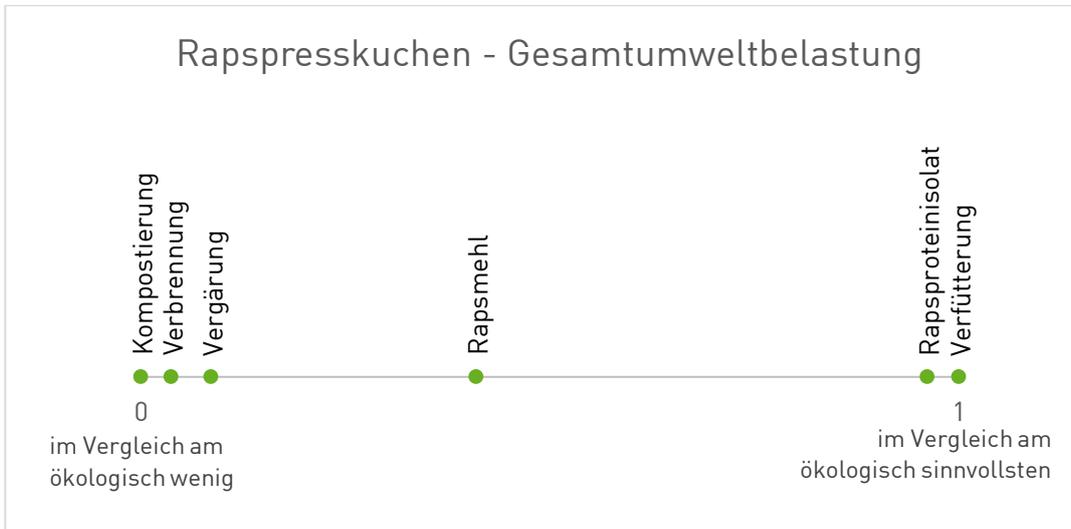


Abbildung 46: Einordnung der Verwertungs-/Valorisierungswege von Rapspresskuchen auf einer Skale von «0 – Im Vergleich am ökologisch wenig sinnvollsten» bis «1 – Im Vergleich am ökologisch sinnvollsten» proportional zur Gesamtumweltbelastung (oben) resp. den THG-Emissionen (unten).

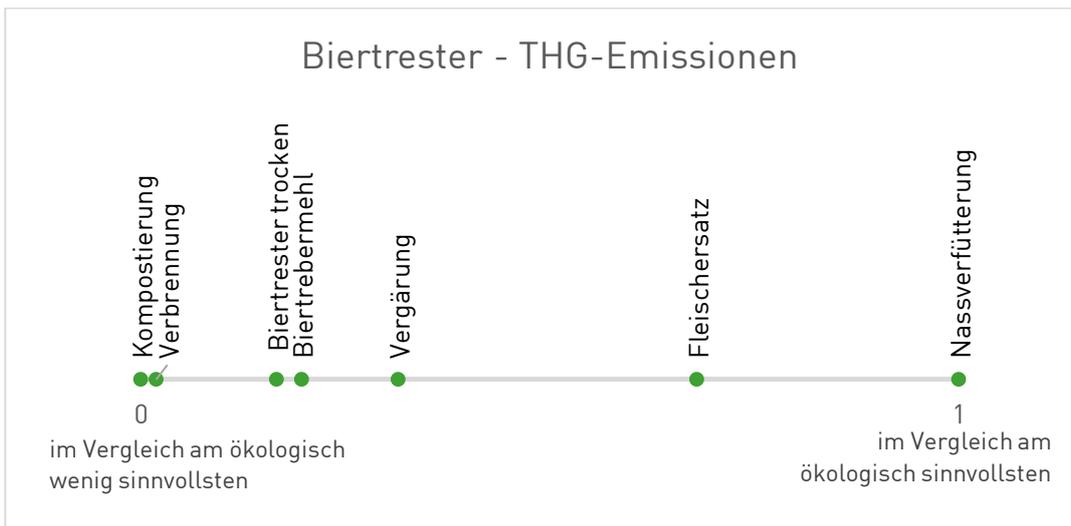
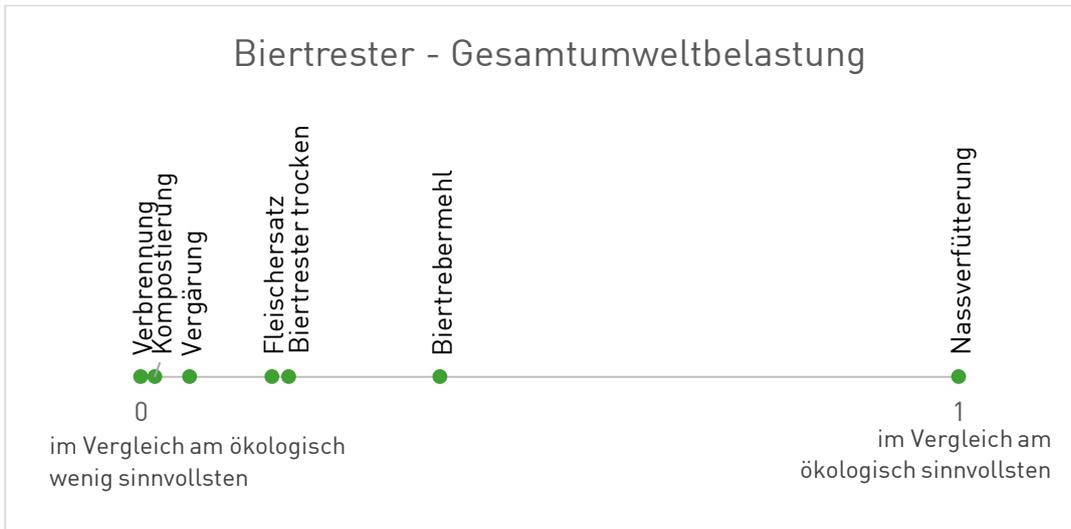


Abbildung 47: Einordnung der Verwertungs-/Valorisierungswege von Biertrester auf einer Skale von «0 – Im Vergleich am ökologisch wenig sinnvollsten» bis «1 – Im Vergleich am ökologisch sinnvollsten» proportional zur Gesamtumweltbelastung (oben) resp. den THG-Emissionen (unten).

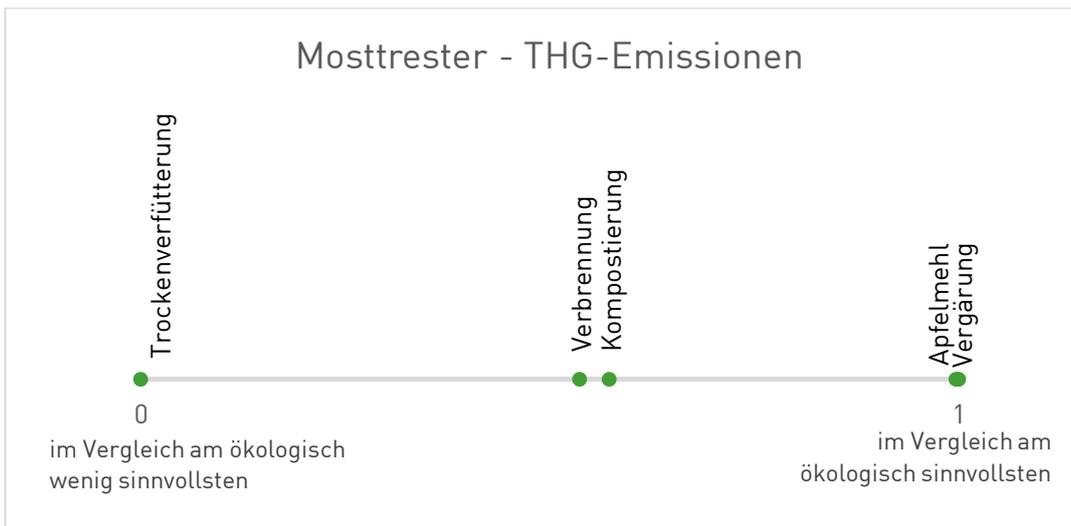
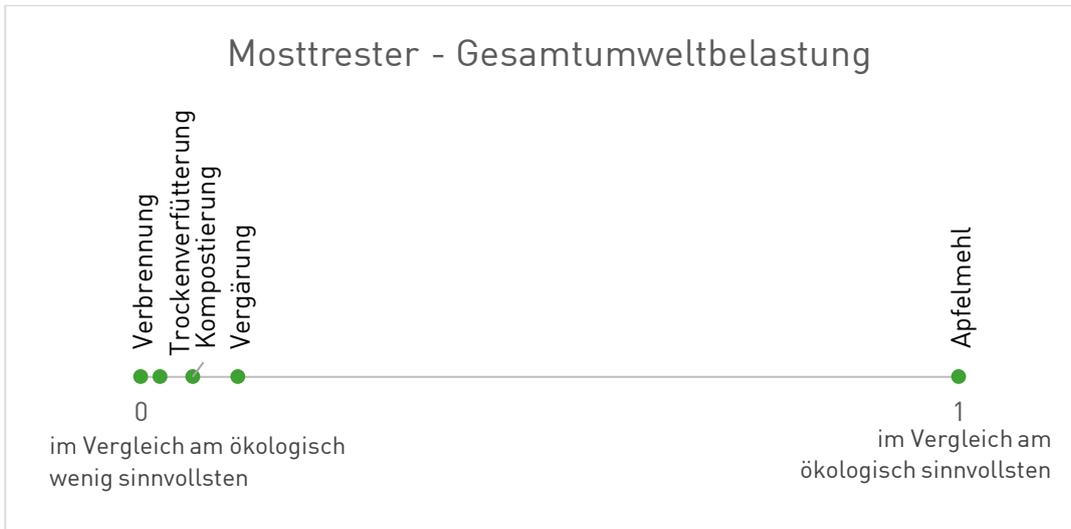


Abbildung 48: Einordnung der Verwertungs-/Valorisierungswege von Mostrester auf einer Skale von «0 – Im Vergleich am ökologisch wenig sinnvollsten» bis «1 – Im Vergleich am ökologisch sinnvollsten» proportional zur Gesamtumweltbelastung (oben) resp. den THG-Emissionen (unten).

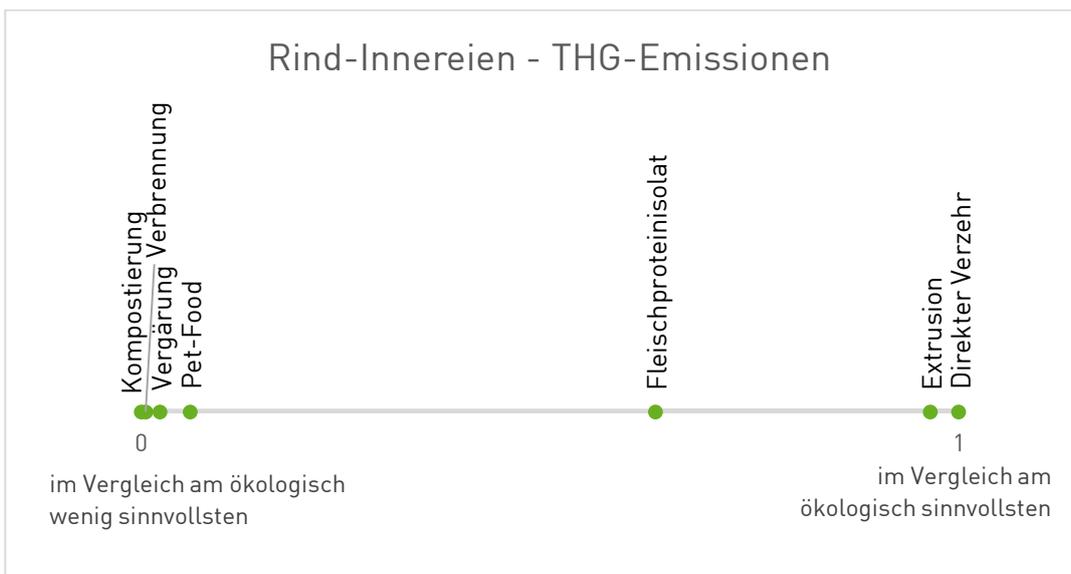
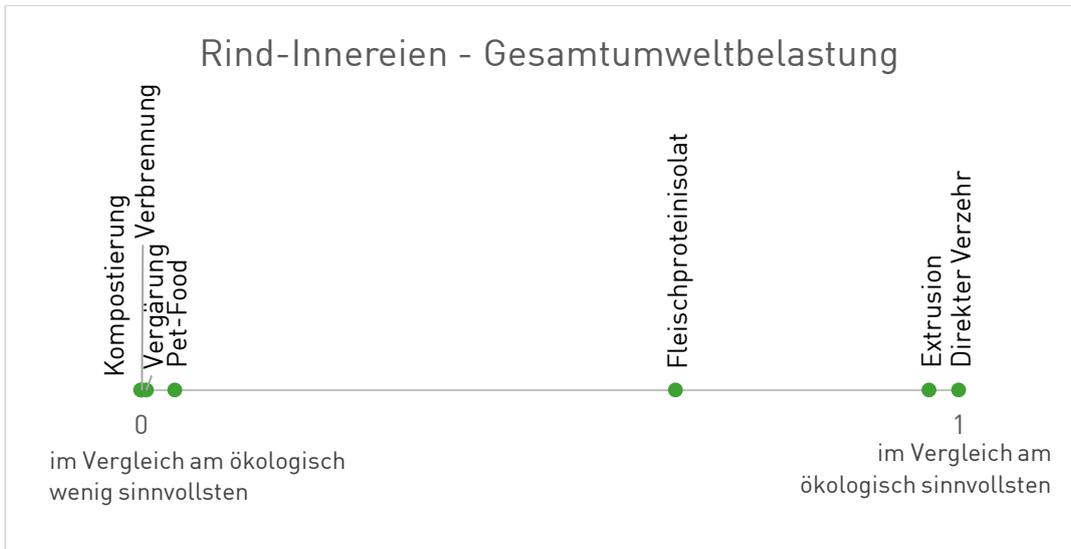


Abbildung 49: Einordnung der Verwertungs-/Valorisierungswege von Rind-Innereien auf einer Skala von «0 – Im Vergleich am ökologisch wenig sinnvollsten» bis «1 – Im Vergleich am ökologisch sinnvollsten» proportional zur Gesamtumweltbelastung (oben) resp. den THG-Emissionen (unten).

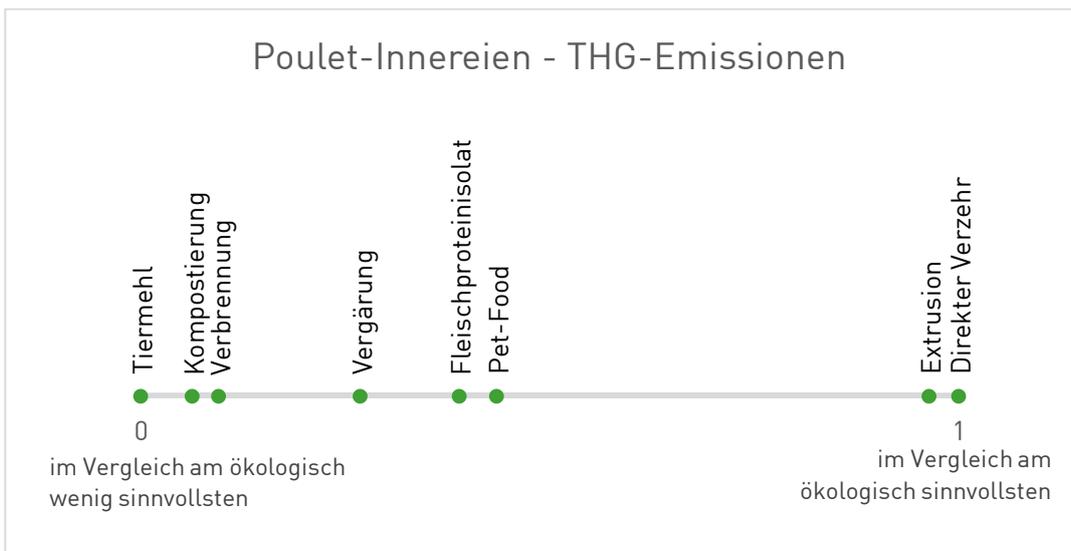
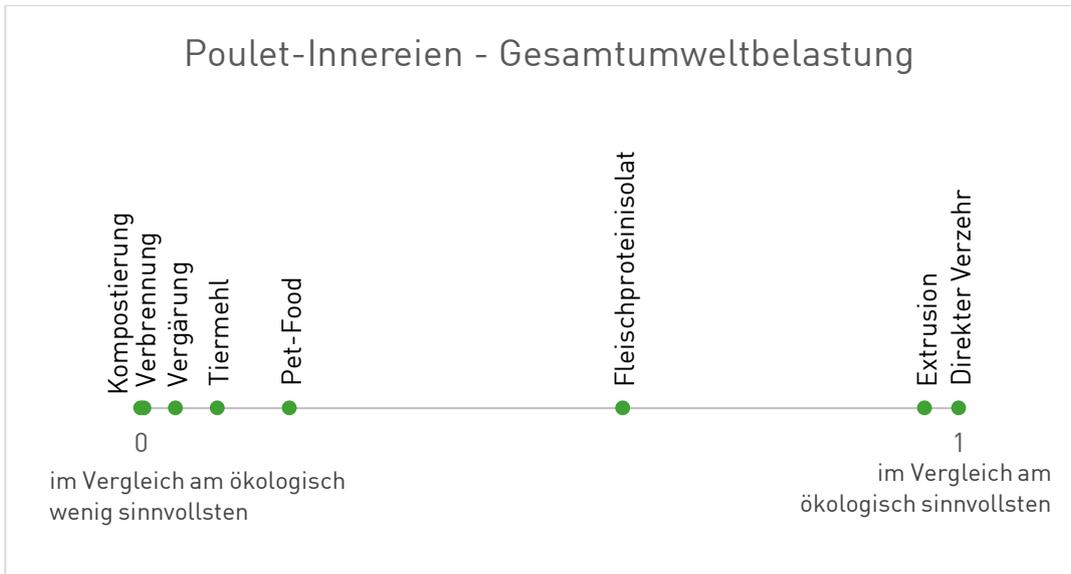


Abbildung 50: Einordnung der Verwertungs-/Valorisierungswege von Poulet-Innereien auf einer Skala von «0 – Im Vergleich am ökologisch wenig sinnvollsten» bis «1 – Im Vergleich am ökologisch sinnvollsten» proportional zur Gesamtumweltbelastung (oben) resp. den THG-Emissionen (unten).

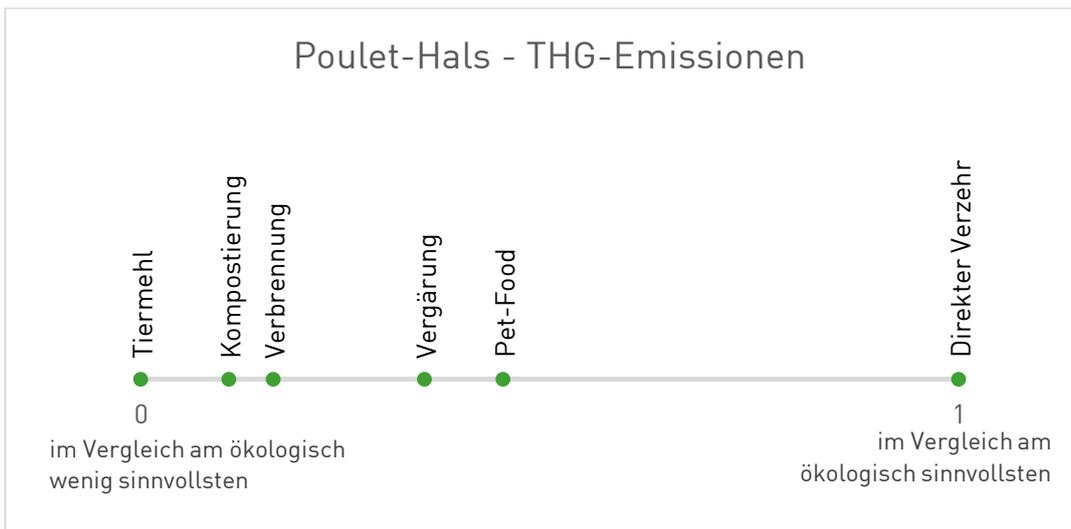
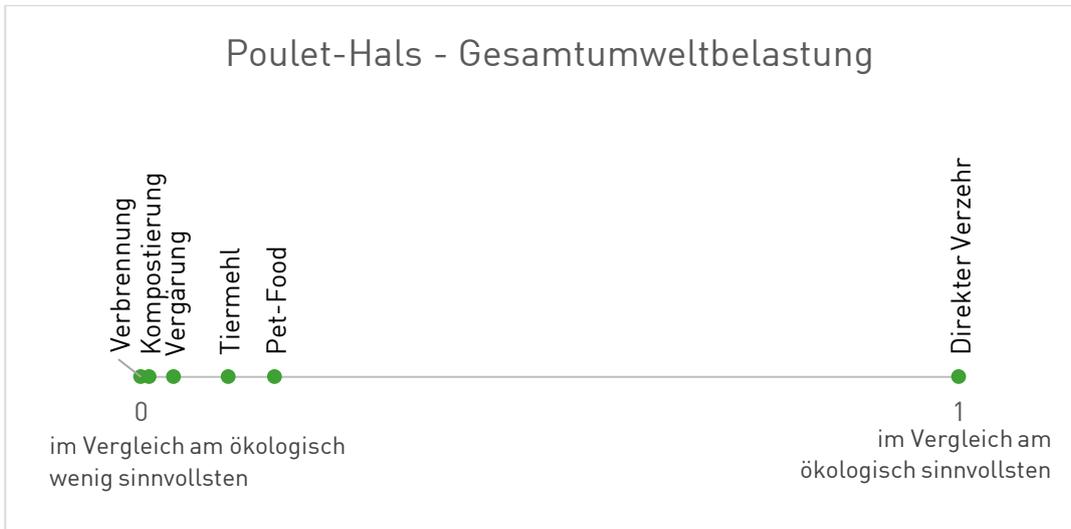


Abbildung 51: Einordnung der Verwertungs-/Valorisierungswege von Poulet-Hals auf einer Skale von «0 – Im Vergleich am ökologisch wenig sinnvollsten» bis «1 – Im Vergleich am ökologisch sinnvollsten» proportional zur Gesamtumweltbelastung (oben) resp. den THG-Emissionen (unten).

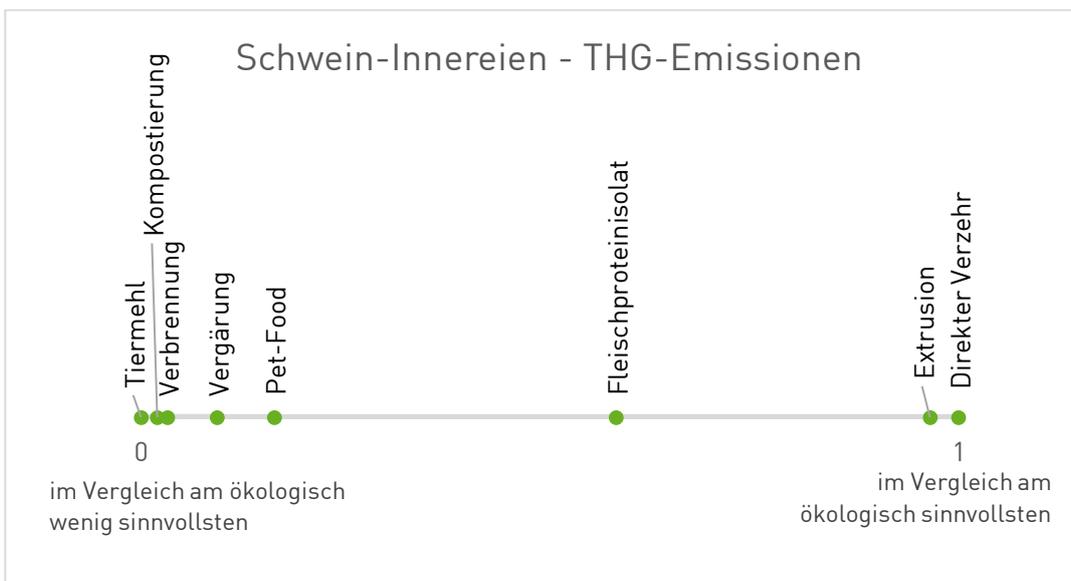
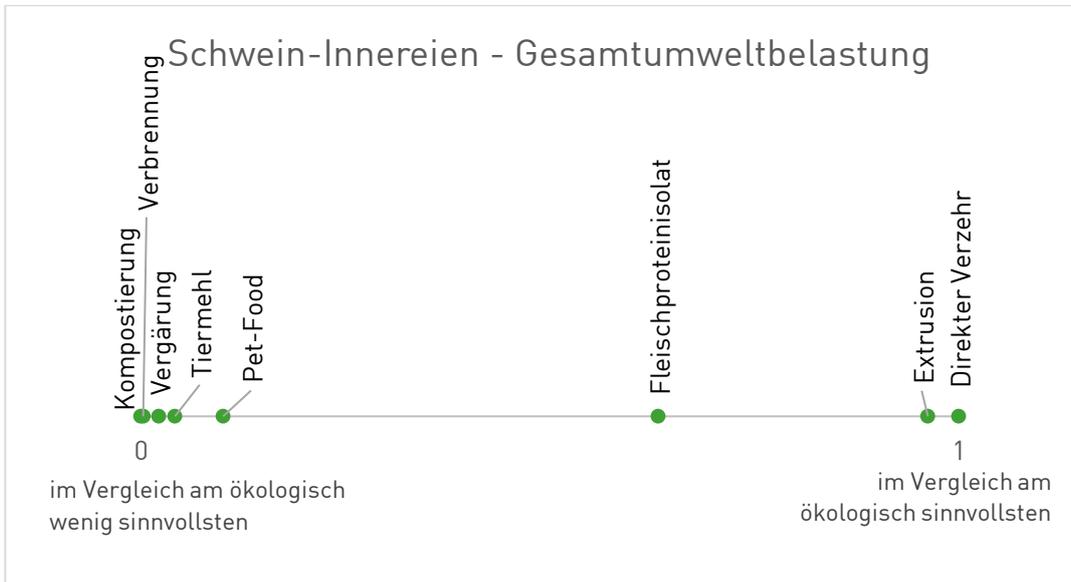


Abbildung 52: Einordnung der Verwertungs-/Valorisierungswege von Schweins-Innereien auf einer Skale von «0 – Im Vergleich am ökologisch wenig sinnvollsten» bis «1 – Im Vergleich am ökologisch sinnvollsten» proportional zur Gesamtumweltbelastung (oben) resp. den THG-Emissionen (unten).

B.3 Resultate-Tabellen

Tabelle 31: Gesamtumweltbelastung der Verwertungs-/Valorisierungswege pro kg Molke. Werte zu Abbildung 4 und Abbildung 5

Gesamtumweltbelastung [kUBP/kg Nebenstrom]	Vergärung	WPC80%	Nassverfütterung	Molkenkäse	WPC35%	Flüssigkonzentrat	Molkenpulver
Valorisierungs-/Verwertungsprozess	0.06	0.58	0.03	0.00	0.04	0.03	0.07
Nebenstrom	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80
Generierung Warenkorb	7.58	7.58	7.58	7.58	7.58	7.58	7.58
Davon Herstellung Hauptprodukt	2.29	2.29	2.29	2.29	2.29	2.29	2.29
Substitution	-0.11	-0.65	-0.11	-0.25	-0.57	-1.70	-1.90
Netto-Gesamtbilanz	9.33	9.31	9.30	9.13	8.85	7.71	7.55
Netto-Umweltbilanz	-0.05	-0.07	-0.08	-0.25	-0.53	-1.67	-1.83
Veränderung vgl. mit Entsorgungsszenario		-0.29%	-0.36%	-2.17%	-5.15%	-17.4%	-19.2%

Tabelle 32: THG-Emissionen der Verwertungs-/Valorisierungswege pro kg Molke. Werte zu Abbildung 33.

THG-Emissionen [kg CO₂-eq/kg Nebenstrom]	Vergärung	WPC80%	Nassverfütterung	Molkenkäse	WPC35%	Flüssigkonzentrat	Molkenpulver
Valorisierungs-/Verwertungsprozess	0.05	0.24	0.02	0.00	0.03	0.02	0.05
Nebenstrom	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79
Generierung Warenkorb	3.33	3.33	3.33	3.33	3.33	3.33	3.33
Davon Herstellung Hauptprodukt	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
Substitution	-0.07	-0.29	-0.05	-0.02	-0.26	-0.76	-0.87
Netto-Gesamtbilanz	4.10	4.08	4.10	4.10	3.89	3.38	3.31
Netto-Umweltbilanz	-0.02	-0.05	-0.02	-0.02	-0.23	-0.74	-0.82
Veränderung vgl. mit Entsorgungsszenario		-0.57%	0.03%	-0.03%	-5.04%	-17.5%	-19.4%

Tabelle 33: Gesamtumweltbelastung der Verwertungs-/Valorisierungswege pro kg Weizenkleie. Werte zu Abbildung 6 und Abbildung 7.

Gesamtumweltbelastung [kUBP/kg Nebenstrom]	Verbrennung	Kompostierung	Insekten - Fischmehl	Insekten - Proteinersatz	Vergärung	Verfütterung	Vollkornmehl	Direkter Verzehr
Valorisierungs-/Verwertungsprozess	0.08	0.12	0.08	0.08	0.17	0.15	0.00	0.02
Nebenstrom	3.38	3.38	3.38	3.38	3.38	3.38	3.38	3.38
Generierung Warenkorb	44.93	44.93	44.93	44.93	44.93	44.93	44.93	44.93
Davon Herstellung Hauptprodukt	24.78	24.78	24.78	24.78	24.78	24.78	24.78	24.78
Substitution	-0.50	-0.63	-0.65	-0.77	-0.87	-4.11	-4.81	-8.12
Netto-Gesamtbilanz	47.89	47.80	47.75	47.63	47.61	44.36	43.50	40.22
Netto-Umweltbilanz	-0.42	-0.51	-0.56	-0.68	-0.71	-3.95	-4.81	-8.09
Veränderung vgl. mit Entsorgungsszenario		-0.2%	-0.3%	-0.5%	-0.6%	-7.4%	-9.2%	-16.0%

Tabelle 34: THG-Emissionen der Verwertungs-/Valorisierungswege pro kg Weizenkleie. Werte zu Abbildung 34.

THG-Emissionen [kg CO ₂ -eq/kg Nebenstrom]	Verbrennung	Kompostierung	Insekten - Fischmehl	Insekten - Proteinersatz	Vergärung	Verfütterung	Vollkornmehl	Direkter Verzehr
Valorisierungs-/Verwertungsprozess	0.04	0.05	0.03	0.03	0.10	0.04	0.00	0.01
Nebenstrom	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
Generierung Warenkorb	6.71	6.71	6.71	6.71	6.71	6.71	6.71	6.71
Davon Herstellung Hauptprodukt	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Substitution	-0.31	-0.12	-0.07	-0.23	-0.69	-0.64	-0.72	-0.98
Netto-Gesamtbilanz	6.86	7.05	7.08	6.92	6.53	6.53	6.41	6.15
Netto-Umweltbilanz	-0.27	-0.07	-0.04	-0.20	-0.59	-0.60	-0.72	-0.97
Veränderung vgl. mit Entsorgungsszenario		2.8%	3.3%	1.0%	-4.7%	-4.8%	-6.6%	-10.2%

Tabelle 35: Gesamtumweltbelastung der Verwertungs-/Valorisierungswege pro kg Melasse. Werte zu Abbildung 8 und Abbildung 9.

Gesamtumweltbelastung [kUBP/kg Nebenstrom]	Vergärung	Trinkethanol	Kompostierung	Insektenzucht	Zuckerersatz	Verfütterung
Valorisierungs-/Verwertungsprozess	0.17	0.08	0.12	0.08	0.02	0.05
Nebenstrom	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44
Generierung Warenkorb	30.13	30.13	30.13	30.13	30.13	30.13
Davon Herstellung Hauptprodukt	9.34	9.34	9.34	9.34	9.34	9.34
Substitution	-0.93	-0.51	-0.56	-0.65	-0.82	-17.32
Netto-Gesamtbilanz	29.81	30.13	30.13	30.00	29.77	13.29
Netto-Umweltbilanz	-0.75	-0.43	-0.44	-0.56	-0.80	-17.27
Veränderung vgl. mit Entsorgungsszenario		1.1%	1.1%	0.6%	-0.2%	-55.4%

Tabelle 36: THG-Emissionen der Verwertungs-/Valorisierungswege pro kg Melasse. Werte zu Abbildung 35.

THG-Emissionen [kg CO₂-eq/kg Nebenstrom]	Vergärung	Trinkethanol	Kompostierung	Insektenzucht	Zuckerersatz	Verfütterung
Valorisierungs-/Verwertungsprozess	0.11	0.07	0.05	0.03	0.01	0.02
Nebenstrom	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
Generierung Warenkorb	5.35	5.35	5.35	5.35	5.35	5.35
Davon Herstellung Hauptprodukt	2.24	2.24	2.24	2.24	2.24	2.24
Substitution	-0.74	-0.13	-0.11	-0.07	-0.20	-1.85
Netto-Gesamtbilanz	4.82	5.38	5.39	5.41	5.27	3.62
Netto-Umweltbilanz	-0.63	-0.07	-0.06	-0.04	-0.19	-1.83
Veränderung vgl. mit Entsorgungsszenario		11.7%	11.9%	12.3%	9.3%	-24.8%

Tabelle 37: Gesamtumweltbelastung der Verwertungs-/Valorisierungswege pro kg Rapspresskuchen. Werte zu Abbildung 10 und Abbildung 11.

Gesamtumweltbelastung [kUBP/kg Nebenstrom]	Verbrennung	Kompostierung	Vergärung	Rapsmehl	Rapsprotein-isolat	Verfütterung
Valorisierungs-/Verwertungsprozess	0.08	0.12	0.21	4.68	1.17	0.02
Nebenstrom	4.43	4.43	4.43	4.43	4.43	4.43
Generierung Warenkorb	35.06	35.06	35.06	35.06	35.06	35.06
Davon Herstellung Hauptprodukt	13.50	13.50	13.50	13.50	13.50	13.50
Substitution	-0.80	-0.66	-1.16	-7.20	-6.35	-5.40
Netto-Gesamtbilanz	38.77	38.95	38.54	36.97	34.30	34.12
Netto-Umweltbilanz	-0.72	-0.54	-0.95	-2.52	-5.19	-5.37
Veränderung vgl. mit Entsorgungsszenario		0.5%	-0.6%	-4.6%	-11.5%	-12.0%

Tabelle 38: THG-Emissionen der Verwertungs-/Valorisierungswege pro kg Rapspresskuchen. Werte zu Abbildung 36.

THG-Emissionen [kg CO₂-eq/kg Nebenstrom]	Verbrennung	Kompostierung	Vergärung	Rapsmehl	Rapsprotein-isolat	Verfütterung
Valorisierungs-/Verwertungsprozess	0.04	0.05	0.12	1.78	0.89	0.01
Nebenstrom	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47
Generierung Warenkorb	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49
Davon Herstellung Hauptprodukt	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44
Substitution	-0.49	-0.13	-0.93	-0.87	-2.72	-0.91
Netto-Gesamtbilanz	7.52	7.89	7.16	8.88	6.14	7.07
Netto-Umweltbilanz	-0.45	-0.08	-0.81	0.91	-1.83	-0.90
Veränderung vgl. mit Entsorgungsszenario		4.9%	-4.8%	18.1%	-18.3%	-6.0%

Tabelle 39: Gesamtumweltbelastung der Verwertungs-/Valorisierungswege pro kg Biertrester. Werte zu Abbildung 12 und Abbildung 13.

Gesamtumweltbelastung [kUBP/kg Nebenstrom]	Verbrennung	Kompostierung	Vergärung	Fleischersatz	Biertrester trocken	Biertrestermehl	Nassverfütterung
Valorisierungs-/Verwertungsprozess	0.08	0.12	0.09	3.29	0.19	0.28	0.00
Nebenstrom	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Generierung Warenkorb	14.11	14.11	14.11	14.11	14.11	14.11	14.11
Davon Herstellung Hauptprodukt	3.09	3.09	3.09	3.09	3.09	3.09	3.09
Substitution	-0.05	-0.16	-0.30	-3.91	-0.89	-1.72	-3.99
Netto-Gesamtbilanz	14.15	14.08	13.91	13.50	13.42	12.68	10.13
Netto-Umweltbilanz	0.03	-0.04	-0.21	-0.62	-0.70	-1.44	-3.99
Veränderung vgl. mit Entsorgungsszenario		-0.5%	-1.7%	-4.5%	-5.1%	-10.4%	-28.4%

Tabelle 40: THG-Emissionen der Verwertungs-/Valorisierungswege pro kg Biertrester. Werte zu Abbildung 37.

THG-Emissionen [kg CO ₂ -eq/kg Nebenstrom]	Verbrennung	Kompostierung	Vergärung	Fleischersatz	Biertrester trocken	Biertrestermehl	Nassverfütterung
Valorisierungs-/Verwertungsprozess	0.04	0.05	0.06	1.24	0.05	0.11	0.00
Nebenstrom	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Generierung Warenkorb	3.83	3.83	3.83	3.83	3.83	3.83	3.83
Davon Herstellung Hauptprodukt	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04
Substitution	-0.03	-0.03	-0.22	-1.61	-0.12	-0.21	-0.56
Netto-Gesamtbilanz	3.84	3.85	3.67	3.46	3.76	3.74	3.27
Netto-Umweltbilanz	0.01	0.02	-0.16	-0.37	-0.08	-0.09	-0.56
Veränderung vgl. mit Entsorgungsszenario		0.3%	-4.5%	-10.0%	-2.2%	-2.7%	-14.8%

Tabelle 41: Gesamtumweltbelastung der Verwertungs-/Valorisierungswege pro kg Mosttrester. Werte zu Abbildung 14 und Abbildung 15.

Gesamtumweltbelastung [kUBP/kg Nebenstrom]	Verbrennung	Trockenverfütterung	Kompostierung	Vergärung	Apfelmehl
Valorisierungs-/Verwertungsprozess	0.08	0.93	0.12	0.08	0.33
Nebenstrom	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
Generierung Warenkorb	11.18	11.18	11.18	11.18	11.18
Davon Herstellung Hauptprodukt	7.64	7.64	7.64	7.64	7.64
Substitution	-0.02	-0.91	-0.18	-0.25	-2.18
Netto-Gesamtbilanz	12.90	12.86	12.78	12.68	11.00
Netto-Umweltbilanz	0.06	0.01	-0.06	-0.17	-1.84
Veränderung vgl. mit Entsorgungsszenario		-0.3%	-0.9%	-1.7%	-14.7%

Tabelle 42: THG-Emissionen der Verwertungs-/Valorisierungswege pro kg Mosttrester. Werte zu Abbildung 38.

THG-Emissionen [kg CO ₂ -eq/kg Nebenstrom]	Verbrennung	Trockenverfütterung	Kompostierung	Vergärung	Apfelmehl
Valorisierungs-/Verwertungsprozess	0.04	0.34	0.05	0.06	0.14
Nebenstrom	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
Generierung Warenkorb	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
Davon Herstellung Hauptprodukt	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
Substitution	-0.02	-0.13	-0.04	-0.18	-0.26
Netto-Gesamtbilanz	1.15	1.32	1.14	1.00	1.00
Netto-Umweltbilanz	0.03	0.20	0.02	-0.12	-0.12
Veränderung vgl. mit Entsorgungsszenario		15.3%	-1.0%	-13.2%	-13.1%

Tabelle 43: Gesamtumweltbelastung der Verwertungs-/Valorisierungswege pro kg Rind-Innereien. Werte zu Abbildung 16 und Abbildung 17.

Gesamtumweltbelastung [kUBP/kg Nebenstrom]	Verbrennung	Kompostierung	Vergärung	Pet-Food	Fleischprotein-isolat	Extrusion	Direkter Verzehr
Valorisierungs-/Verwertungsprozess	0.08	0.12	0.16	0.16	1.35	0.26	0.16
Nebenstrom	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88
Generierung Warenkorb	1676.04	1676.04	1676.04	1676.04	1676.04	1676.04	1676.04
Davon Herstellung Hauptprodukt	1447.67	1447.67	1447.67	1447.67	1447.67	1447.67	1447.67
Substitution	-0.28	-0.22	-0.81	-3.78	-56.67	-81.84	-84.77
Netto-Gesamtbilanz	1685	1685	1684	1681	1630	1603	1600
Netto-Umweltbilanz	-0.20	-0.10	-0.65	-3.62	-55.32	-81.58	-84.62
Veränderung vgl. mit Entsorgungsszenario		0.01%	-0.03%	-0.2%	-3.3%	-4.8%	5.0%

Tabelle 44: THG-Emissionen der Verwertungs-/Valorisierungswege pro kg Rind-Innereien. Werte zu Abbildung 39.

THG-Emissionen [kg CO ₂ -eq/kg Nebenstrom]	Verbrennung	Kompostierung	Vergärung	Pet-Food	Fleischprotein-isolat	Extrusion	Direkter Verzehr
Valorisierungs-/Verwertungsprozess	0.04	0.05	0.10	0.07	1.00	0.08	0.07
Nebenstrom	2.51	2.51	2.51	2.51	2.51	2.51	2.51
Generierung Warenkorb	475.04	475.04	475.04	475.04	475.04	475.04	475.04
Davon Herstellung Hauptprodukt	409.52	409.52	409.52	409.52	409.52	409.52	409.52
Substitution	-0.17	-0.04	-0.65	-1.49	-16.03	-23.15	-23.98
Netto-Gesamtbilanz	477.42	477.56	477.00	476.13	462.52	454.48	453.64
Netto-Umweltbilanz	-0.13	0.01	-0.55	-1.42	-15.0	-23.07	-23.91
Veränderung vgl. mit Entsorgungsszenario		0.03%	-0.1%	-0.3%	-3.1%	-4.8%	-5.0%

Tabelle 45: Gesamtumweltbelastung der Verwertungs-/Valorisierungswege pro kg Poulet-Innereien. Werte zu Abbildung 18 und Abbildung 19.

Gesamtumweltbelastung [kUBP/kg Nebenstrom]	Verbrennung	Kompostierung	Vergärung	Tiermehl	Pet-Food	Fleischprotein-isolat	Extrusion	Direkter Verzehr
Valorisierungs-/Verwertungsprozess	0.08	0.12	0.18	0.50	0.16	1.35	0.26	0.16
Nebenstrom	5.82	5.82	5.82	5.82	5.82	5.82	5.82	5.82
Generierung Warenkorb	219.59	219.59	219.59	219.59	219.59	219.59	219.59	219.59
Davon Herstellung Hauptprodukt	170.41	170.41	170.41	170.41	170.41	170.41	170.41	170.41
Substitution	-0.22	-0.20	-0.93	-2.06	-3.13	-10.82	-15.63	-16.19
Netto-Gesamtbilanz	225	225	225	224	222	215.93	210.03	209.37
Netto-Umweltbilanz	-0.13	-0.08	-0.8	-1.6	-3.0	-9.48	-15.37	-16.03
Veränderung vgl. mit Entsorgungsszenario		+0.03%	-0.3%	-0.6%	-1.3%	-4.1%	-6.8%	-7.1%

Tabelle 46: THG-Emissionen der Verwertungs-/Valorisierungswege pro kg Poulet-Innereien. Werte zu Abbildung 40.

THG-Emissionen [kg CO ₂ -eq/kg Nebenstrom]	Verbrennung	Kompostierung	Vergärung	Tiermehl	Pet-Food	Fleischprotein-isolat	Extrusion	Direkter Verzehr
Valorisierungs-/Verwertungsprozess	0.04	0.05	0.11	0.37	0.07	1.00	0.08	0.07
Nebenstrom	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09
Generierung Warenkorb	42.11	42.11	42.11	42.11	42.11	42.11	42.11	42.11
Davon Herstellung Hauptprodukt	31.84	31.84	31.84	31.84	31.84	31.84	31.84	31.84
Substitution	-0.13	-0.04	-0.75	-0.15	-1.24	-2.02	-2.92	-3.03
Netto-Gesamtbilanz	43.11	43.21	42.56	43.41	42.03	42.18	40.36	40.24
Netto-Umweltbilanz	-0.09	0.01	-0.64	0.21	-1.17	-1.02	-2.84	-2.96
Veränderung vgl. mit Entsorgungsszenario		+0.2%	-1.3%	0.7%	-2.5%	-2.2%	-6.4%	-6.7%

Tabelle 47: Gesamtumweltbelastung der Verwertungs-/Valorisierungswege pro kg Poulet-Hals. Werte zu Abbildung 20 und Abbildung 21.

Gesamtumweltbelastung [kUBP/kg Nebenstrom]	Verbrennung	Kompostierung	Vergärung	Tiermehl	Pet-Food	Direkter Verzehr
Valorisierungs-/Verwertungsprozess	0.08	0.12	0.18	0.50	0.16	0.16
Nebenstrom	5.82	5.82	5.82	5.82	5.82	5.82
Generierung Warenkorb	189.08	189.08	189.08	189.08	189.08	189.08
Davon Herstellung Hauptprodukt	170.41	170.41	170.41	170.41	170.41	170.41
Substitution	-0.37	-0.53	-0.94	-2.06	-2.40	-12.38
Netto-Gesamtbilanz	194.60	194.49	194.13	193.33	192.66	182.67
Netto-Umweltbilanz	-0.29	-0.41	-0.76	-1.56	-2.24	-12.22
Veränderung vgl. mit Entsorgungsszenario		-0.1%	-0.2%	-0.7%	-1.0%	-6.1%

Tabelle 48: THG-Emissionen der Verwertungs-/Valorisierungswege pro kg Poulet-Hals. Werte zu Abbildung 41.

THG-Emissionen [kg CO₂-eq/kg Nebenstrom]	Verbrennung	Kompostierung	Vergärung	Tiermehl	Pet-Food	Direkter Verzehr
Valorisierungs-/Verwertungsprozess	0.04	0.05	0.11	0.37	0.07	0.07
Nebenstrom	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09
Generierung Warenkorb	36.33	36.33	36.33	36.33	36.33	36.33
Davon Herstellung Hauptprodukt	31.84	31.84	31.84	31.84	31.84	31.84
Substitution	-0.23	-0.10	-0.75	-0.15	-0.94	-2.31
Netto-Gesamtbilanz	37.23	37.37	36.78	37.63	36.54	35.17
Netto-Umweltbilanz	-0.19	-0.05	-0.64	0.21	-0.88	-2.25
Veränderung vgl. mit Entsorgungsszenario		0.4%	-1.2%	1.1%	-1.9%	-5.5%

Tabelle 49: Gesamtumweltbelastung der Verwertungs-/Valorisierungswege pro kg Schweins-Innereien. Werte zu Abbildung 22 und Abbildung 23.

Gesamtumweltbelastung [kUBP/kg Nebenstrom]	Verbrennung	Kompostierung	Vergärung	Tiermehl	Pet-Food	Fleischprotein-isolat	Extrusion	Direkter Verzehr
Valorisierungs-/Verwertungsprozess	0.08	0.12	0.19	0.50	0.16	1.35	0.26	0.16
Nebenstrom	8.02	8.02	8.02	8.02	8.02	8.02	8.02	8.02
Generierung Warenkorb	625.13	625.13	625.13	625.13	625.13	625.13	625.13	625.13
Davon Herstellung Hauptprodukt	523.32	523.32	523.32	523.32	523.32	523.32	523.32	523.32
Substitution	-0.26	-0.20	-1.06	-2.06	-3.81	-23.97	-34.61	-35.85
Netto-Gesamtbilanz	632.98	633.07	632.29	631.59	629.50	610.54	598.80	597.46
Netto-Umweltbilanz	-0.18	-0.08	-0.86	-1.56	-3.66	-22.62	-34.35	-35.69
Veränderung vgl. mit Entsorgungsszenario		+0.01%	-0.1%	-0.2%	-0.5%	-3.5%	-5.4%	-5.6%

Tabelle 50: THG-Emissionen der Verwertungs-/Valorisierungswege pro kg Schweins-Innereien. Werte zu Abbildung 42.

THG-Emissionen [kg CO ₂ -eq/kg Nebenstrom]	Verbrennung	Kompostierung	Vergärung	Tiermehl	Pet-Food	Fleischprotein-isolat	Extrusion	Direkter Verzehr
Valorisierungs-/Verwertungsprozess	0.04	0.05	0.12	0.37	0.07	1.00	0.08	0.07
Nebenstrom	2.23	2.23	2.23	2.23	2.23	2.23	2.23	2.23
Generierung Warenkorb	174.76	174.76	174.76	174.76	174.76	174.76	174.76	174.76
Davon Herstellung Hauptprodukt	145.75	145.75	145.75	145.75	145.75	145.75	145.75	145.75
Substitution	-0.16	-0.04	-0.85	-0.15	-1.50	-6.67	-9.64	-9.99
Netto-Gesamtbilanz	176.88	177.00	176.26	177.20	175.55	171.32	167.43	167.07
Netto-Umweltbilanz	-0.12	0.01	-0.73	0.21	-1.44	-5.67	-9.56	-9.92
Veränderung vgl. mit Entsorgungsszenario		+0.1%	-0.3%	+0.2%	-0.7%	-3.1%	-5.3%	-5.5%

C Prüfbericht externes Review

Kritische Prüfung der vergleichenden Ökobilanzstudie: «Valorisierung von Nebenströmen in der Lebensmittelindustrie»

März 2025

Dr. Franziska Stössel, Dozentin

Matthias Stucki, Forschungsgruppenleiter

Forschungsgruppe Ökobilanzierung, Institut für Umwelt und natürliche Ressourcen (IUNR),
Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften (ZHAW)

Kontakt:

Grüntal, Postfach, CH-8820 Wädenswil

T +41 (0) 58 934 5112, franziska.stoessel@zhaw.ch
www.zhaw.ch/iunr/lca

Einleitung

Die verarbeitende Lebensmittel-Industrie steht vor der Herausforderung, Nebenströme bei der Herstellung von Lebensmitteln sinnvoll zu verwenden. Dieses kritische Review befasst sich mit einer Studie, welche im Rahmen des Aktionsplans des Bundes gegen die Lebensmittelverschwendung durchgeführt wurde. Ziel des Aktionsplans ist es, die Verluste entlang der Wertschöpfungskette bis im Jahre 2030 im Vergleich zu 2017 zu halbieren.

Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU) führte die Intep - Integrale Planung GmbH, eine Ökobilanzstudie über die Verwendungs- und Verwertungswege von 10 verschiedenen Lebensmittelnebenströmen mit je 2-3 Verwertungswegen und 5-6 Verwendungen durch. Daraus ergaben sich ca. 70-80 Inventardatensätze und ein Bericht, welche im Rahmen von einer begleitenden kritischen Prüfung begutachtet wurden.

Hauptziele der begleitenden kritischen Prüfung waren Folgende:

1. Die Qualität der Ökobilanz mit einem systemerweiternden Ansatz durch eine begleitende Überprüfung in Anlehnung an ISO14040 (ISO, 2006a) und ISO14044 (ISO, 2006b) zu unterstützen;
2. Die Dokumentation und die EcoSpold v1-Datensätze der Sachbilanz anhand des Datenbankprotokolls der BAFU Ökoinventardaten DQRv2.2 (Frischknecht et al., 2023) zu überprüfen. Diese Prüfung soll folgende Punkte beinhalten:
 - Vollständigkeit der Dokumentation
 - Übereinstimmung mit den Qualitätsrichtlinien
 - Plausibilität der Input- und Outputflüsse
 - Vollständigkeit der Inputs und Outputs sowie
 - die mathematische Korrektheit der Berechnungen

Beobachtungen und Kommentare der Prüfenden wurden in mehreren Besprechungen mit den Studienautorinnen laufend erörtert. Auf Basis des überarbeiteten Ökobilanzberichts wurde dieser Prüfbericht erstellt, welcher als Anhang der Studie veröffentlicht wird.

Titel der Studie: «Vergleichende Ökobilanzen: Valorisierung von Nebenströmen in der Lebensmittelindustrie»

Auftraggebende: Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Ökonomie und Innovationen,
Monbijoustrasse 40, 3003 Bern
Ansprechpersonen: Dr. Danielle Tendall, Jonathan Brünggel

Ausführende der Studie: Intep - Integrale Planung GmbH, Pfingstweidstrasse 16, 8005 Zürich
Verfassende: Stefanie Maeder, Emilija Vukasinovic, Stéphanie Jamet, Martina Alig

Version des Berichtes, welche dem Prüfbericht zugrunde liegt:
«4580_08_41219_BAFU_LCA_Nebenströme_Entwurf_Abschlussbericht.pdf»

Vorgehen

Für die Sicherung der Qualität der Ökobilanz mit systemerweiterndem Ansatz gemäss ISO 14040/44 (ISO, 2006a, 2006b) wurde vom BAFU eine begleitende Überprüfung durch externe Sachverständige in Auftrag gegeben. Basierend auf ISO 14044 (ISO, 2006a) Abschnitt 6.3 wurde von den beiden Gutachtenden eine begleitende Überprüfung durchgeführt. Alle Gutachtenden waren extern und unabhängig vom Projekt.

1. Dr. Franziska Stössel – Dozentin und wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Forschungsgruppe Ökobilanzierung an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW).
Franziska Stössel ist erfahrene Agraringenieurin und Dozentin am Institut für Umwelt und natürliche Ressourcen der ZHAW und leitet nationale und internationale Forschungsprojekte im Bereich der Ökobilanzierung. Ihre Forschungsergebnisse wurden u.a. in wissenschaftlichen Zeitschriften wie dem Science of the Total Environment, International Journal of Life Cycle Assessment, Journal of Environmental Management, Environmental Science and Technology, Waste Management, Water Resources Research, Chemosphere veröffentlicht.
2. Matthias Stucki – Leiter Forschungsgruppe Ökobilanzierung und Leiter des Forschungsbereichs Ökotechnologien und Energiesysteme an der ZHAW (Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften).
Matthias Stucki ist erfahrener Umweltnaturwissenschaftler und Dozent am Institut für Umwelt und natürliche Ressourcen der ZHAW und leitet nationale und internationale Forschungsprojekte im Bereich der Ökobilanzierung.
Er war als Konferenzorganisator, Mitglied des wissenschaftlichen Komitees oder als Sitzungsleiter beim Swiss Discussion Forum on Life Cycle Assessment (DF-LCA), dem World Sustainability Forum, der International Conference on Life Cycle Management, dem Closed Cycles Symposium, der CIRP Conference on Life Cycle Engineering und der Life Cycle Innovation Conference tätig. Seine Forschungsergebnisse wurden u.a. in wissenschaftlichen Zeitschriften wie dem Journal of Cleaner Production, Environmental Science & Technology, dem International Journal of Life Cycle Assessment, dem Journal of Energy Challenges and Mechanics, Building and Environment, Sustainability und Energies veröffentlicht.

Es gibt grundsätzlich zwei mögliche Vorgehen, der kritischen Prüfung einer Ökobilanz-Studie:

- a. kontinuierlich und parallel zur Entwicklung der Ökobilanz.
- b. separat nach Abschluss der Ökobilanz und getrennt von dieser.

Im vorliegenden Fall wurde die Vorgehensweise gemäss der ersten Variante (a) gewählt, indem die Prüfenden während der Ökobilanzerstellung beigezogen wurden.

Das kritische Review wurde in folgenden Arbeitspaketen (AP) durchgeführt und mit Meilensteinen (MS) abgeschlossen.

- AP 1: Begleitende Überprüfung der Phase zur Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens des Projektes (Goal and scope definition). Dies umfasste das Ziel der Studie, die beabsichtigte Anwendung und Zielgruppe, das Produktsystem, die Definition der funktionellen Einheit und der Systemgrenzen sowie die Festlegung der Systemerweiterung, der Allokation und die Auswahl der Methode zur Wirkungsabschätzung.
- MS 1: Die Phase mit der Überprüfung des Ziels und Untersuchungsrahmens inkl. der damit verbundenen Fragestellungen zu Allokation, Funktionelle Einheit und Bewertungsmethode wurde abgeschlossen (Phase 1 der Ökobilanzierung; AP1).
- AP 2: Begleitende Überprüfung der Datenerhebung und Modellierung von 70-80 Inventardatensätzen (Sachbilanz), einschliesslich Variationen je nach Systemerweiterung und ökonomischer Allokation unter Bezug der Systeme von entsprechenden Referenzprodukten.

- Die Datenqualität und die Anforderungen dafür, Annahmen, Einschränkungen usw. werden diskutiert.
- AP 3: Begleitende Überprüfung der Wirkungsabschätzung unter Einbezug der anderen Phasen der Ökobilanzierung: Die gewählten Wirkungskategorien, Indikatoren und Charakterisierungsmodelle müssen zur Modellierung der Inventardaten passen und die Anforderungen an vergleichende Ökobilanzen erfüllen. In der Auswertungsphase (Interpretation) wurden die Ergebnisse auf Konsistenz mit dem festgelegten Ziel und Untersuchungsrahmen geprüft. Eine Sensitivitätsanalyse wurde durchgeführt. Es wurde geprüft, ob die Empfehlungen den Schlussfolgerungen der Studie in angemessener Weise folgen.
- MS2: Überprüfung der Datenerhebung von 70-80 Datensätzen, der Bewertung der Ökoinventare mit der gewählten Methode zur Wirkungsabschätzung und der Auswertung sowie den damit verbundenen Vergleichen und Sensitivitätsanalysen ist abgeschlossen (Phasen 2, 3 und 4 der Ökobilanzierung; AP 2 & 3).
- AP4: Vollständigkeit der Dokumentation: Die Dokumentation wurde auf Vollständigkeit geprüft. Diese Prüfung beinhaltet die Beschreibung der erhobenen Datensätze, die enthaltenen erforderlichen Metainformationen, die Daten zu den Flüssen sowie die EcoSpold v1 Datensätze.
- AP5: Übereinstimmung mit den Qualitätsrichtlinien: Die Überprüfung der Inventardaten erfolgte nach den Grundsätzen und Allokationsregeln der Spezifikationen für die Durchführung einer kritischen Überprüfung einer Ökobilanz (Padey, 2023) und den DQRv2 der Datenbank der Bundesverwaltung (Frischknecht et al., 2023). Weiter wurde überprüft, ob die Unsicherheiten in den Datensätzen zweckmässig berücksichtigt sind.
- AP6: Plausibilitätsprüfung: Die Plausibilität von ausgewählten Input- und Output-Flüssen wurde geprüft. Auch die Überprüfung der Vollständigkeit der Flüsse basiert auf dem umweltrelevanten und technischen Wissen der Gutachtenden. Zur Überprüfung gehört auch eine systematische Analyse der Datensätze in SimaPro mit verschiedenen Methoden zur Wirkungsabschätzung.
- AP7: Überprüfung der Detailgenauigkeit und Struktur des Projekts bezüglich ihres Nutzens für die benötigte Abgrenzung. Weiter wurden die Berechnungen zu ausgewählten Inputs und Outputs auf ihre mathematische Korrektheit kontrolliert.
- MS3: Prüfung der Dokumentation auf Vollständigkeit, der Berücksichtigung der Unsicherheiten, der Input- und Output-Flüsse auf Plausibilität und Vollständigkeit und die systematische Analyse der Datensätze in SimaPro mit zusätzlichen Bewertungsmethoden ist erfolgt. Geprüft wurden stichprobenweise auch Berechnungen auf ihre mathematische Korrektheit (AP 4-7).
- AP8: Die Kommentare aus der kritischen Überprüfung wurden konsolidiert und in einem Validierungsbericht zusammengefasst.
- AP9: Sitzungen: In 5 Sitzungen mit Intep und zusätzlich einmal mit den Auftraggebenden des BAFU wurden die in den AP beschriebenen Überprüfungen besprochen. Die erste Sitzung diente der Einführung in das Projekt. In der zweiten Sitzung wurden über «das Ziel und den Untersuchungsrahmen» der Studie diskutiert. In der dritten Besprechung wurde über die Modellierung der Datensätze gesprochen und im Anschluss dazu fand eine zusätzliche Besprechung mit Beteiligung des BAFU statt. In der letzten Sitzung wurde über die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung und die Sensitivitätsanalysen gesprochen.
- MS4: Der Validierungsbericht ist fertiggestellt und in den Schlussbericht der Ökobilanzstudie integriert.

Resultat der kritischen Prüfung

In diesem Kapitel wird zuerst die Arbeit als Ganzes kritisch gewürdigt. Auf die Einzelheiten der Ökobilanzierung wird detailliert in den **Tabelle 1** bis **Tabelle 4** im Anhang eingegangen. Die Rückmeldungen im Kontext der Überprüfung nach den Kriterien des Datenbankprotokolls der BAFU Ökoinventardaten DQRv2.2 (Frischknecht et al., 2023) sind in **Tabelle 1** und **Tabelle 2** zusammengestellt.

In **Tabelle 3** finden sich die ISO-Konformitätskommentare und in **Tabelle 4** das Log des Austausches zwischen Studienautorinnen und Reviewenden mit Hinweisen zu den Umsetzungen. Diese zusammen bilden den kritischen Prüfbericht über die vorliegende Studie.

Der begleitende Reviewprozess fand in konstruktiver Zusammenarbeit mit den Studienautorinnen statt. Allfällige Fragen wurden stets sachlich und fundiert begründet beantwortet. Die Zusammenstellung der Daten erfolgte sorgfältig und mit grosser Sachkenntnis. Die Daten sind ausführlich und nachvollziehbar aufbereitet. Die Studie ist umfassend und trotz der hohen Komplexität gut verständlich dargestellt. Die Daten sind systematisch referenziert und die Unterscheidung zwischen erhobenen Primärdaten und Sekundärdaten ist in jedem Fall gewährleistet.

Die Verlässlichkeit der Resultate und den daraus folgenden Schlussfolgerungen wurden mittels plausibler Sensitivitätsanalysen und unter Verwendung von alternativen Bewertungsmethoden geprüft. Falls in einigen Jahren die Implementierung der Verarbeitungstechnologien und der Ausbau der entsprechenden Kapazitäten substanziell umgesetzt ist, empfehlen die Gutachtenden eine zukünftige Prüfung, ob eine Aktualisierung der wichtigsten Sachbilanz-Daten notwendig wird.

Ziele und Rahmenbedingungen

Die Fragestellungen der Studie und damit deren Ziele sind klar definiert. Der Bericht hat zum Ziel, den potenziellen ökologischen Nutzen verschiedener Verwertungs- und Valorisierungsmöglichkeiten von Nebenströmen zu quantifizieren und die Resultate als Grundlage für die Priorisierung der Verwertungen zu nutzen. In der Studie werden die 10 relevantesten Nebenströme, die in der Lebensmittelindustrie der Schweiz anfallen, untersucht. Die Auswahl erfolgt über eine plausible Quantifizierung.

Sachbilanz

Die Vordergrunddaten für diese Studie wurden in Zusammenarbeit mit der Lebensmittelindustrie erhoben. Daten, die erforderlich, aber als Primärquellen nicht erhältlich waren, wurden aus der Literatur erhoben. Beide wurden sachgemäss und detailliert referenziert. Die Sachbilanzdaten wurden systematisch nach dem jeweiligen Nebenstrom und den entsprechenden Verarbeitungswegen in Exceltabellen zusammengestellt.

Die Sachbilanzen zur Herstellung der Haupt- und Nebenprodukte wurden aus Datensätzen der international anerkannten Datenbank World Food Life Cycle Database (WFLDB) V3.1 (Nemecek, T. et al., 2019) und der BAFU:2024 die Hintergrunddatenbank übernommen. Es wurden schliesslich alle Datensätze in der BAFU:2024 DB nachmodelliert. Dabei wurden Datensätze gewählt, welche für die Prozesse in der Schweiz am repräsentativsten sind.

Wirkungsabschätzung

Als Wirkungsabschätzung wurde die Gesamtumweltbelastung gemäss der Methode der ökologischen Knappheit (FOEN, 2021) und das Treibhauspotenzial über 100 Jahre gemäss der Methode des IPCC (IPCC, 2021) berechnet. Diese beiden Beurteilungsmethoden wurden für die Verwendung der

Resultate als relevant eingestuft. Die Resultate werden im Kontext der Schweizer Umwelt- und Ressourcenpolitik verwendet. Entsprechend begrüßen es die Gutachtenden, dass die gesamttaggregierende Bewertungsmethode verwendet wurde, auch wenn dies nach der Norm ISO 14044 (ISO, 2006a) nicht vorgesehen ist. Die verwendeten Methoden sind aktuell und entsprechen dem heutigen Stand der Ökobilanzierung. U.a. wurden in der Sensitivitätsanalyse die Resultate mit der Anwendung der Methode EF3.1 (Andreas et al., 2023) auf ihre Robustheit überprüft.

Interpretation

Die Diskussion der Resultate erfolgte in dieser Studie ausführlich. Das entsprechende Kapitel ist unterteilt in «Einordnung der Resultate» und «Limitationen und Hinweise zur Interpretation». Insbesondere letzterer Abschnitt und die bedeutsam gewählten Sensitivitätsanalysen sind sehr wertvoll für das Verständnis der Ergebnisse. Die Autorinnen der Studie haben die Kommentare der Gutachtenden in Bezug auf diese Themen immer sehr ernsthaft umgesetzt.

Beurteilung

Durch Einhaltung des beschriebenen Prüfverfahrens und des iterativen Prozesses beim Erstellen der Studie sind die Prüfenden überzeugt, dass die vorliegende Studie den Anforderungen des Datenbankprotokolls der BAFU Ökoinventardaten DQRv2.2 (Frischknecht et al., 2023) entspricht.

Die Prüfenden bestätigen, dass die vorliegende Studie weitgehend den Anforderungen von ISO14040 (ISO, 2006a) und ISO14044 (ISO, 2006b) entspricht, mit folgenden Einschränkungen:

1. Wie von den Studienautorinnen transparent festgehalten ist die Verwendung von vollaggregierenden Methoden bei Veröffentlichung einer vergleichenden Ökobilanz nicht empfohlen durch ISO 14044 (ISO, 2006a). Aufgrund der Wirkungsabschätzung mit der vollaggregierenden Methode der ökologischen Knappheit (FOEN, 2021) und der vollaggregierenden Environmental Footprint 3.1 Methode (Andreas et al., 2023) unterscheidet sich die Studie in diesem Punkt von der ISO-Norm. Die Gutachtenden unterstützen jedoch die zusätzliche Anwendung dieser etablierten Wirkungsabschätzungsmethoden als Ergänzung zur Wirkungsabschätzung auf Midpoint-Ebene, da sie eine weitere umfassende Perspektive für Entscheidungstragenden bieten.
2. ISO erfordert eine Wirkungsabschätzung über verschiedene Wirkungskategorien ohne gewichtete Aggregation. In der vorliegenden Studie wurde lediglich die Klimawirksamkeit nach (IPCC, 2021) durchgeführt. Für eine vollständige ISO-Konformität müssten weitere Auswertungen erfolgen.
3. ISO beschreibt bei Veröffentlichung einer vergleichenden Ökobilanz eine kritische Prüfung durch einen Ausschuss mit mindestens 3 Mitgliedern aus interessierten Kreisen. Die vorliegende kritische Prüfung erfolgte jedoch durch zwei externe Sachverständige und nicht durch einen Ausschuss.
4. Ein zukünftiges Fortschreiten der Verarbeitungstechnologien und umgesetzten Mengen kann eine Aktualisierung der wichtigsten Sachbilanz-Daten erfordern.

Literatur

Andreas, B. S., Biganzoli, F., Ferrara, N., Amadei, A., Valente, A., Sala, S., & Ardente, F. (2023).

Updated characterisation and normalisation factors for the Environmental Footprint 3.1 method. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/798894>

- FOEN. (2021). *Swiss Eco-Factors 2021 according to the Ecological Scarcity Method. Methodological fundamentals and their application in Switzerland*. Federal Office for the Environment (FOEN).
- Frischknecht, R., Doka, G., Lasvaux, S., Margni, M., Oberschelp, C., & Zschokke, M. (2023). *Database protocol—FOEN LCI data DQRv2* (p. 105). treeze Ltd. commissioned by the Swiss Federal Office for the Environment (FOEN).
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- ISO. (2006a). *Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*. ISO 14040:2006; International Organization for Standardization (ISO).
- ISO. (2006b). *Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines*. ISO 14044:2006. International Organization for Standardization (ISO).
- Nemecek, T., Humbert, S., Bengoa, X., Faist-Emmenegger, M., Roesch, A., & Lansche, J. (2019). *Methodological Guidelines for the Life Cycle Inventory of Agricultural Products*. (Version 3.5). Quantis und Agroscope.
- Padey, P. (2023). *Spezifikationen für die Durchführung einer kritischen Überprüfung einer Ökobilanz* (p. 2). Swiss Federal Office for the Environment (FOEN).

Intep ist ein interdisziplinäres Beratungs- und Forschungsunternehmen für Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft. Wir arbeiten interdisziplinär in einer flexiblen standortübergreifenden Teamstruktur. Wir pflegen eine offene Kultur und den intensiven Wissensaustausch nach innen wie außen. Bei allen Aktivitäten steht intep für Innovationskraft, Vertrauenswürdigkeit und integrales Denken.

Intep
Integrale Planung GmbH
Tucholskystraße 13
10117 Berlin

Intep
Integrated Planning LLC
901 23rd Ave NE
55418, Minneapolis, USA

Intep
Integrale Planung GmbH
Wiesenhüttenplatz 25
60329 Frankfurt am Main

Intep
Integrated Planning LLC
Jinyuan Road Nr. 26
Huangcunzhen, Daxing District
102627 Beijing, China

Intep
Integrale Planung GmbH
Am Sandtorkai 39
20457 Hamburg

Intep
Integrated Planning LLC
Yintai Centre, No. 1199,
Tianfu Avenue North
61009 Chengdu, China

Intep
Integrale Planung GmbH
Innere Wiener Straße 11a
81667 München

Intep
Integrated Planning LLC
Mei'ao No. 3 Rd.
Jiangke Building, No.29
518049 Shenzhen, Guangdong, China

Intep
Integrale Planung GmbH
Spittelauer Lände 45
1090 Wien

Intep
Integrale Planung GmbH
Pfungstweidstraße 16
8005 Zürich

www.intep.com

