

Analyse und Bewertung innovativer Wertschöpfungsketten für Reststoffe der Lebensmittel- produktion

S. Siegl, T. Timmel,
B. Windsperger

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

19/2025

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:

Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien

Leitung: DI (FH) Volker Schaffler, MA

Kontakt zum FTI Schwerpunkt Kreislaufwirtschaft und Produktionstechnologien:

Ing. René Albert, BSc und DI Dr. techn. Ingo Hegny

Autorinnen und Autoren: Sonja Siegl, Thomas Timmel, Bernhard Windsperger (BioBASE GmbH)

Dieser Bericht gibt Einblick in die Ergebnisse eines Forschungsprojekts, das vom BMK gefördert wurde. Die inhaltliche Verantwortung für Vollständigkeit und Richtigkeit liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Wien, 2025

Analyse und Bewertung innovativer Wertschöpfungsketten für Reststoffe der Lebensmittelproduktion

Synopsis:

Das Projekt untersucht die sinnvolle Nutzung von Reststoffen d. Lebensmittelindustrie in Bioraffinerien. Ziel war die Identifizierung innovativer Wertschöpfungsketten für die Herstellung v. chemischen Grundstoffen, Nährstoffen u. Energie aus Getreidemühlen- u. Molkereireststoffen. Durch qualitative und quantitative Analysen wurden vielversprechende Konzepte bewertet. Die Ergebnisse sollen den Dialog mit Branchenvertretern fördern, um das Potenzial dieser Reststoffe möglichst effizient zu nutzen.

Dr. Sonja Siegl
BioBASE GmbH

DI (FH) Thomas Timmel
BioBASE GmbH

Dr. Bernhard Windsperger
BioBASE GmbH

Wien, Oktober 2024

Im Auftrag des Bundesministeriums für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI)

Vorbemerkung

In einer kreislauforientierten Wirtschaft werden Rohstoffe und Güter möglichst ressourcenschonend hergestellt, die Lebensdauer der Erzeugnisse verlängert sowie deren Nutzung intensiviert, um Energie- und Ressourcenverbrauch, Abfallaufkommen und Schadstoffausstoß zu minimieren. Erst wenn Produkte nicht mehr anderweitige Verwendung finden, werden diese dem Abfallstrom zugeführt, um daraus durch Recycling Sekundärrohstoffe zu gewinnen. Jene Abfälle, die sich – z.B. aufgrund ihres Schadstoffgehalts – nicht zur stofflichen Verwertung eignen, können unter anderem energetisch genutzt werden. All dies fällt unter den Begriff Kreislaufwirtschaft.

Für eine Transformation unseres linearen Wirtschaftssystems hin zur Kreislaufwirtschaft sind sowohl neue technologische Ansätze, innovative Geschäftsmodelle und systemisches interdisziplinäres Denken, als auch eine enge Vernetzung der Akteurinnen und Akteure notwendig. Daher fördert das Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) gezielt angewandte Forschungs- und Entwicklungsvorhaben für die Kreislaufwirtschaft und kreislauforientierte Produktion – mit dem Ziel, Innovationen anzustoßen und die Wettbewerbsfähigkeit des österreichischen Wirtschaftsstandorts zu stärken.

Inhalt

Vorbemerkung	5
1 Kurzfassung	9
2 Abstract	11
3 Ausgangslage	13
3.1 Motivation für das Projekt	13
3.2 Ziel des Projektes	13
3.3 Stand des Wissens.....	13
3.3.1 Übersicht zu zukünftig themenrelevanten Förderungen durch CBE JU.....	14
4 Projektinhalt	16
4.1 Anfall, Eigenschaften und Charakteristika von unvermeidbaren Reststoffen der Lebensmittelindustrie	16
4.2 Eingrenzung auf ausgewählte Reststoffe.....	16
4.3 Identifikation und Analyse innovativer Verwertungswege inkl. Technologiescreening.....	17
4.3.1 Literatur Recherche.....	17
4.3.2 Qualitative Bewertung	17
4.4 Ökologische und techno-ökonomische Bewertung (quantitative Bewertung)	18
4.4.1 Systemgrenzen und Referenzsysteme	19
4.4.2 Ökobilanz.....	20
4.4.3 Techno-ökonomische Bewertung	20
5 Ergebnisse	21
5.1 Eigenschaften und Charakterisierung der Reststoffe	21
5.2 Eingrenzung auf ausgewählte Reststoffe.....	24
5.2.1 Reststoffe aus der Getreideverarbeitung.....	26
5.2.2 Molkereireststoffe.....	27
5.3 Identifikation und Analyse innovativer Verwertungswege inkl. Technologiescreening.....	28
5.3.1 Literatur Recherche.....	28
5.3.2 Qualitative Bewertung	31
5.4 Ökologische und techno-ökonomische Bewertung (quantitative Bewertung)	37
6 Schlussfolgerungen	40
7 Ausblick und Empfehlungen	42
Methodisch:	42
Inhaltlich:.....	42
Tabellenverzeichnis	43
Abbildungsverzeichnis	44
Literaturverzeichnis	45
Abkürzungen	49

Anhang	50
Qualitative Bewertung: Bewertungskriterien	50
Techno-ökonomische Bewertung: Angenommene Kosten	54
Systemgrenzen und Referenzsysteme der innovativen Wertschöpfungsketten.....	56
Ergebnisse der ökologischen Bewertung der innovativen Wertschöpfungsketten.....	59

1 Kurzfassung

Das vorliegende Projekt befasst sich mit der Frage, wie unvermeidbare Reststoffe aus der Lebensmittelindustrie ökologisch und ökonomisch sinnvoll in Bioraffinerie-Konzepten genutzt werden können. Ausgangspunkt war die Beobachtung, dass viele dieser Reststoffe derzeit entweder entsorgt werden müssen oder nur unzureichend (d.h. entweder energetisch oder stofflich, aber nicht kaskadisch) genutzt werden. Gleichzeitig weisen bestehende Bioraffinerie-Konzepte oft noch einen niedrigen technologischen Reifegrad auf (TRL 3-4), weshalb sich eine fundierte ökologische und techno-ökonomische Bewertung der Gesamtkonzepte aufgrund fehlender Daten schwierig gestaltet.

Ziel des Projekts war es daher, innovative Wertschöpfungsketten für die Verwertung von Reststoffen aus der Lebensmittelindustrie zu identifizieren und ihr ökologisches und ökonomisches Potenzial zur Produktion von Biokunststoffen, chemischen Grundstoffen, Nährstoffen, Futtermitteln und Energie zu bewerten. Die Vielfalt an möglichen Reststoffen wurde im Zuge eines Expert*Innen Workshops auf jene aus Getreidemühlen und Molkereien eingeschränkt.

Die methodische Vorgehensweise bestand in einer Kombination aus qualitativer und quantitativer Bewertung. Im ersten Schritt wurden alle identifizierten innovativen Wertschöpfungsketten qualitativ bezüglich Datenverfügbarkeit sowie anhand von allgemeinen, ökologischen und ökonomischen Bewertungskriterien analysiert. Verwertungswege, die besonders gut bewertet wurden und für die vollständige Massen- und Energiebilanzen bzw. ein Gesamtkonzept zur kaskadischen Nutzung der Inhaltsstoffe vorlagen, wurden anschließend einer detaillierten Bewertung ihrer ökologischen (z.B. Treibhausgasemissionen, Landnutzung, Energieverbrauch) und ökonomischen Performance (Investitionskosten, Betriebs- und Produktionskosten) unterzogen.

Die Ergebnisse zeigten, dass belastbare Aussagen zum ökologischen und ökonomischen Abschneiden der innovativen Wertschöpfungsketten im Vergleich zu (herkömmlichen) Referenzsystemen nur durch die detaillierten, quantitativen Bewertungen getroffen werden können. Die Tendenz der qualitativen Analyse konnte dabei nicht immer bestätigt werden. Besonders der Einsatz erneuerbarer Energien und die optimierte Energieeffizienz der Konzepte, sowie die Größenordnung der Anlage (economy of scale) zeigten einen deutlichen Einfluss auf die Ergebnisse der ökologischen und techno-ökonomischen Bewertung. Unter diesen Voraussetzungen lieferten die Konzepte zur Herstellung von FDCA & 1,5-PDO & Aktivkohle aus Getreidereststoffen sowie von protein-basierten Kunststoffen aus Molkereireststoffen in beiden Bereichen vielversprechende Ergebnisse. Die gewonnenen Erkenntnisse bieten einerseits eine solide Basis für betriebliche und politische Entscheidungen im Bereich der Bioraffinerien. Andererseits können durch die frühzeitige Berücksichtigung ökologischer und ökonomischer Kriterien vielversprechende Konzepte schon in der Planungsphase optimiert werden und so das große Potenzial dieser Reststoffe in einer wachsenden Bioökonomie besonders effizient genutzt werden.

Ein wesentlicher nächster Schritt besteht nun darin, den Dialog mit Branchenvertretern aus der Molkerei-, Mühlen- und Chemieindustrie zu intensivieren. Diese Gespräche, die bis Ende 2024 abgeschlossen sein sollen, zielen darauf ab, die Ergebnisse des Projekts zu diskutieren und zu prüfen, ob ein Interesse an der weiteren Umsetzung und Vertiefung der Analyse der beschriebenen Wertschöpfungsketten besteht.

2 Abstract

This project addresses the question of how unavoidable residues from the food industry can be utilized in biorefinery concepts to achieve both ecological and economic benefits. Currently many of these residues either have to be disposed of or are only inadequately utilized (i.e. either energetically or materially, but not cascaded). Additionally, existing biorefinery concepts are often at a low Technology Readiness Level (TRL 3-4), which is why a well-founded ecological and techno-economic evaluation of the overall concepts is difficult due to a lack of data.

The main objective of the project was therefore to identify innovative value chains for the utilization of residues from the food industry and to evaluate their ecological and economic potential for the production of bioplastics, chemical base materials, animal feed and energy. The variety of possible residues was narrowed down to those from cereal mills and dairies in the course of an expert workshop.

The methodological approach consisted of a combination of qualitative and quantitative evaluation. In the first step, all identified innovative value chains were analyzed qualitatively regarding data availability and on the basis of general, ecological and economic evaluation criteria. Biorefinery concepts that were particularly well evaluated and for which complete mass and energy balances and an overall concept for the cascading use of all components were available were then subject to a detailed evaluation of their ecological (e.g. greenhouse gas emissions, land use, cumulative energy demand) and economic performance (investment costs, operating and production costs).

The results showed that reliable statements on the ecological and economic performance of the innovative value chains in comparison to (conventional) reference systems can only be made through detailed, quantitative assessments. The tendency of the qualitative analysis could not always be confirmed. In particular, the use of renewable energies and the optimized energy efficiency of the concepts, as well as the scale of the system (economy of scale) had a significant influence on the results of the ecological and techno-economic evaluation. Under these premises, the concepts to produce FDCA & 1,5-PDO & activated carbon from cereal residues as well as protein-based plastics from dairy residues delivered promising results in both areas. On the one hand, these findings provide a solid basis for operational and political decisions in the field of biorefineries. On the other hand, by taking ecological and economic criteria into account at an early stage, promising concepts can already be optimized in the planning phase and thus the great potential of these residues in a growing bioeconomy can be used particularly efficiently.

An important next step is to intensify the dialog with industry representatives from the dairy, milling and chemical industries. These talks, which should be completed by the end of 2024, are aimed

at discussing the results of the project and examining whether there is interest in further implementing and deepening the analysis of the value chains described.

3 Ausgangslage

3.1 Motivation für das Projekt

Die gezielte Verwertung von Reststoffen in der Lebensmittelproduktion ist ein wichtiger Schritt zur Förderung einer nachhaltigeren und ressourceneffizienten Lebensmittelindustrie. Durch das Schließen von Kreisläufen und die Entwicklung neuer Verwertungswege können sowohl Nachhaltigkeitsziele als auch wirtschaftliche Ziele erreicht werden, was zu einer positiven Entwicklung der gesamten Wertschöpfungskette führt und zur Reduktion des ökologischen Fußabdrucks der Lebensmittelproduktion beiträgt.

3.2 Ziel des Projektes

Ziel des Projekts ist die Identifikation, Analyse und Bewertung von vielversprechenden Wertschöpfungsketten ausgehend von unvermeidbaren Abfällen und Reststoffen entlang der Lebensmittel-Wertschöpfungskette.

3.3 Stand des Wissens

Ausgangspunkt für die Projektarbeit sind daher Daten über den Anfall, die Verfügbarkeit und die Zusammensetzung von Reststoffen aus der Lebensmittelproduktion. Tabelle 1 gibt einen Überblick über Studien und / oder Projekte zum Thema „Reststoffe / Abfälle aus der Lebensmittelproduktion“ in Österreich.

Tabelle 1: Überblick themenrelevante Projekte /Studien in Österreich

Projekt / Studie	Autoren / Jahr	Institution / Förderstelle
Rückstände aus der Nahrungs- und Genussmittelproduktion Materialien zur Abfallwirtschaft.	Reisinger, H., Domenig, M., Thaler, P., & Lampert, C. (2012)	Umweltbundesamt.
BioBasis. Biogene Reststoffe zur Herstellung von Grundchemikalien	Neureiter, M., Ortner, M., Schellander, S., Sturm, T., Windsperger, A., & Windsperger, B. (2013)	FFG-Programm: Intelligente Produktion
Abfallvermeidung in der österreichischen Lebensmittelproduktion.	Pladerer, C., & Hietler, P. (2019)	Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 71(5–6), 238–245.
Austrian Biocycles. Biobasierte Industrie als Bestandteil der Kreislaufwirtschaft	Reinberg, V., Kisser, J., Biebl, A., Kantauer, I., Edlinger, J., Müller, M., Gronalt, M., Niederwieser, J., Ganglberger, E., Thaler, J., & Steffl, T. (2020)	BMK (Berichte aus Energie- und Umweltforschung)
Lebensmittelverluste und -abfallaufkommen in Österreich.	Obersteiner, G., & Stoifl, B. (2024)	Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 11.

3.3.1 Übersicht zu zukünftig themenrelevanten Förderungen durch CBE JU

Circular Bio-based Europe (CBE JU) ist eine mit 2 Milliarden Euro ausgestattete Partnerschaft zwischen der Europäischen Union und dem Bio-based Industries Consortium (BIC), die Projekte zur Förderung wettbewerbsfähiger biobasierter Kreislaufwirtschaft in Europa finanziert.

Die für Reststoffe aus der Lebensmittelproduktion themenrelevanten Projektförderungen aus dem Arbeitsprogramm 2024 werden nachfolgend aufgelistet.

Tabelle 2: Themenrelevante Projektförderungen für Reststoffe aus der Lebensmittelproduktion aus dem Arbeitsprogramm von CBE JU.

Titel der Förderung	Art der Förderung
Biobasierte dedizierte Plattform Chemikalien durch kostengünstige, nachhaltige und ressourceneffiziente Umwandlung von Biomasse	Innovationsmaßnahmen - Flaggschiff
Biobasierte Wertschöpfungsketten für die Valorisierung von nachhaltigen Naturfaserrohstoffen	Innovationsmaßnahmen - Flaggschiff
Biotechnologische Wege zur Gewinnung biobasierter Chemikalien/Materialien auf biologischer Basis, die tierische Stoffe ersetzen	Forschungs- und Innovationsmaßnahmen
Innovative biobasierte Lebens-/Futtermittel Inhaltsstoffe	Forschungs- und Innovationsmaßnahmen
Biobasierte Materialien und Produkte für biologisch abbaubare Anwendungen im Boden	Innovationspolitische Maßnahmen
Selektive und nachhaltige (Ko)-Produktion von aus Lignin gewonnenen Aromaten	Innovationspolitische Maßnahmen

4 Projektinhalt

4.1 Anfall, Eigenschaften und Charakteristika von unvermeidbaren Reststoffen der Lebensmittelindustrie

Aufbauend auf der Studie „Austrian Biocycles“ (Reinberg et al. 2020) und unter Berücksichtigung aktueller Daten zur Lebensmittelproduktion aus der Statistik Austria¹ bzw. von Branchenverbänden (Brauereien², AMA³) werden die relevanten Reststoff-Potenziale für 13 Reststoff-Klassen abgeschätzt.

Die Zusammensetzung der Reststoffe wird dem „Grünen Buch“ der Schweizer Forschung für Landwirtschaft, Ernährung und Umwelt (Agroscope 2017) entnommen.

4.2 Eingrenzung auf ausgewählte Reststoffe

Für die 13 Lebensmittel-Reststoff-Klassen erfolgt in einer ersten Grob-Analyse eine Recherche der bereits in der Literatur beschriebenen, innovativen Wertschöpfungsketten. Dafür werden vorwiegend folgende Quellen genutzt: (Reisinger et al. 2013, Apprich et al. 2014, Lappa et al. 2019, Asunis et al. 2020, Caldeira et al. 2020, Reinberg et al. 2020, Skendi et al. 2020, Zandona et al. 2021, Buchanan et al. 2023). Die bekannten Wertschöpfungswege werden nach dem Schema „Reststoff – Inhaltsstoff – Plattform – Building Blocks bzw. (Zwischen-) Produkte – Anwendungen“ für alle Reststoff-Klassen übersichtlich in einer Grafik dargestellt. Für jede Reststoffklasse wird außerdem das Aufkommen in Österreich, der Wassergehalt, die Anzahl der beschriebenen innovativen Verwertungswege, der „technological readiness level“ (TRL) sowie die zeitliche Verfügbarkeit während des Jahres in einer Tabelle zusammengestellt.

¹ <https://www.statistik.at/statistiken/land-und-forstwirtschaft/tiere-tierische-erzeugung/schlachtungen>; <https://www.statistik.at/statistiken/land-und-forstwirtschaft/pflanzenbau/wein/wein-ernte-und-weinbestand> (abgerufen am 16. Februar 2024; 12:12)

² Statistische Daten über die österreichische Brauwirtschaft. 1980-2022. Verband der Brauereien Österreichs 2023; (abgerufen am 15. Februar 2024; 15:26)

³ <https://www.ama.at/marktinformationen/getreide-und-olsaaten/aktuelle-informationen/2023/getreidevermahlung-2021-2022-insgesamt-ruecklaeufig;-biovermahlung-auf-rekordniveau>; (abgerufen am 15. Februar 2024; 15:40)

Auf Basis dieser Informationen werden im Rahmen eines ExpertInnen Workshops 2 Reststoff-Klassen ausgewählt, für die in weiterer Folge innovative Verwertungswege im Detail ökologisch und techno-ökonomisch bewertet werden.

4.3 Identifikation und Analyse innovativer Verwertungswege inkl. Technologiescreening

4.3.1 Literatur Recherche

Für die Identifikation innovativer Verwertungswege wird eine umfassende Literatur Recherche durchgeführt. Berücksichtigt werden Publikationen in wissenschaftlichen Fachzeitschriften, Konferenzbeiträge sowie Forschungsberichte zu Kombinationen aus folgenden Stichwörtern: „Molke“, „Abfälle der Milchindustrie“, „Molkereiabfälle“, „Kleie“, „Spelze“, „Getreidereste“, „Getreideabfälle“, „Reststoffe der Lebensmittelindustrie“, „Bioraffinerie“, „Verwertung“, „Valorisierung“, „Wertschöpfung“, „Wertschöpfungskette“, etc. .

Für die zwei ausgewählten Reststoff-Klassen werden jeweils die bekannten, möglichen Verwertungswege im Detail gegliedert nach „vorgelagerten Prozessen (upstream / Vorbehandlung) – Haupt-Prozessen – nachgelagerten Prozessen (downstream / Nachbehandlung) - (Zwischen-) Produkten“ übersichtlich grafisch dargestellt.

4.3.2 Qualitative Bewertung

Da die Datenlage für die meisten Verwertungswege nicht ausreichend für eine detaillierte quantitative Bewertung (Ökobilanz / techno-ökonomische Analyse) ist, wird für eine erste Einschätzung des Potenzials zur ökologischen bzw. ökonomischen Produktion von Biomaterialien / -energie eine qualitative Bewertung auf Basis einer Multikriterien-Analyse durchgeführt.

Dabei werden 3 Kriterien zur Datenverfügbarkeit (Prozess, Ökologie, Ökonomie), sowie 8 Kriterien zu verschiedenen technologischen, ökologischen und ökonomischen Aspekten der Verwertungswege qualitativ bewertet (siehe Tabelle 3), wobei jeder Antwortmöglichkeit eine Bewertung zwischen 0% und 100% zugeordnet wird (100% entspricht der besten Bewertung des jeweiligen Kriteriums). Bei der Auswahl der Bewertungskriterien wird besonders darauf geachtet, dass diese auf Basis der verfügbaren Informationen bewertet werden können.

Eines der technologischen Bewertungskriterien stellt der Bioraffinerie Komplexitätsindex nach Jungmeier im Verhältnis zu einer „einfachen“ Bioraffinerie (1-Plattform (Öl) aus Ölsaaten zur Produktion von Biodiesel, Glycerin und Tierfutter) dar, wie auch von Jungmeier für den Vergleich empfohlen (Jungmeier 2014).

Tabelle 3: Bewertungskriterien für die qualitative Bewertung der innovativen Wertschöpfungsketten für Lebensmittel-Reststoffe.

Bewertungskriterien
<i>Datenverfügbarkeit Prozess</i>
<i>Datenverfügbarkeit Ökologie</i>
<i>Datenverfügbarkeit Ökonomie</i>
TRL
Komplexitätsindex im Verhältnis zur Referenz
Temperaturniveau
Anforderungen an Komponenten
Betriebsmittel - Umweltbelastung
Verhältnis Produktpreis/Referenzproduktpreis
Marktvolumen
Größe (bez. auf Reststoffverfügbarkeit in AT)

Die Ergebnisse der qualitativen Bewertung werden pro Verwertungsweg in Form eines Spinnennetzdiagrammes dargestellt, wobei die Datenverfügbarkeit farblich dargestellt wird (grün: gut Datenverfügbarkeit bis rot: schlechte Datenverfügbarkeit) und die Ergebnisse der weiteren 8 Kriterien auf einer Skala von 0-100% im Diagramm selbst dargestellt werden.

4.4 Ökologische und techno-ökonomische Bewertung (quantitative Bewertung)

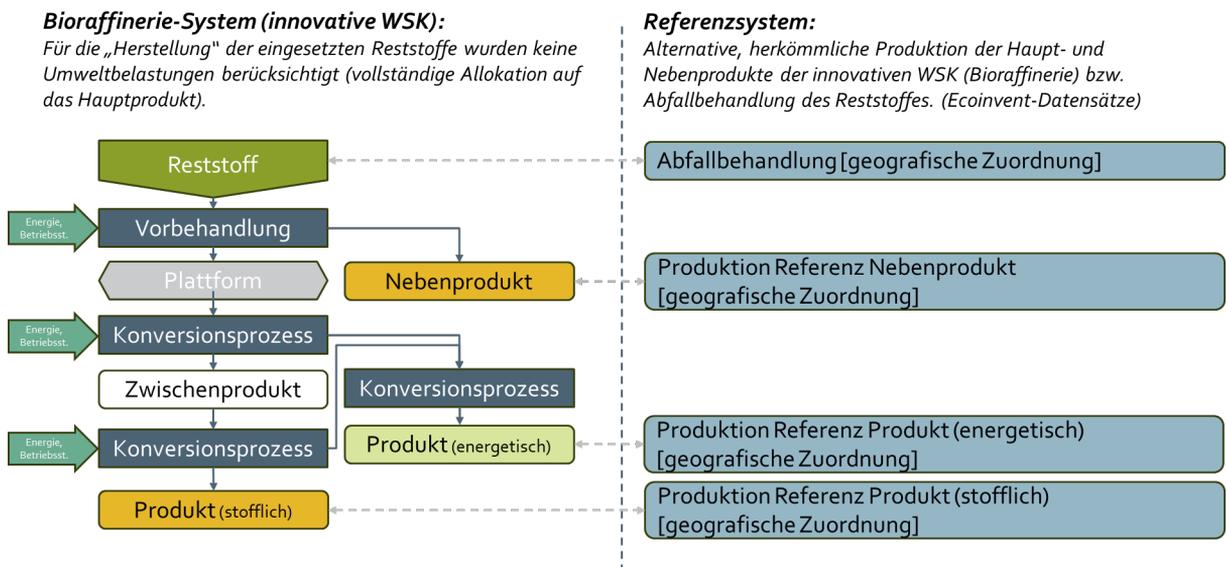
Die Auswahl der innovativen Wertschöpfungsketten (Verwertungswege) für die weitere ökologische sowie techno-ökonomische Bewertung erfolgt nach folgenden Kriterien:

- Vorhandensein eines Gesamtkonzeptes (und nicht nur einzelner Prozessschritte) zur (kaskadischen) Nutzung des Reststoffes.
- Verfügbarkeit von quantitativen Daten zu Material- (Reststoffe, Betriebsstoffe, Brennstoffe, Abfälle) und Energie- (Strom, Wärme, Dampf) Flüssen und/oder;
- Verfügbarkeit von quantitativen Daten zur Wirtschaftlichkeitsbewertung (Kosten für Investition, Errichtung, Betriebsstoffe & Hilfsmittel, Energie, Transport, Personal, etc.).

4.4.1 Systemgrenzen und Referenzsysteme

Die Systemgrenze des Bioraffinerie Systems umfasst die Herstellung der Hilfs- und Betriebsstoffe sowie der benötigten Energie, die für alle Prozessschritte des Gesamtsystems zur Herstellung stofflicher und energetischer Produkte, sowie von Nebenprodukten benötigt werden. Emissionen aus der Herstellung der Anlagen wurden nicht berücksichtigt. Ebenso werden für die „Herstellung“ der eingesetzten Reststoffe keine Umweltbelastungen berücksichtigt (vollständige Allokation auf das Hauptprodukt des Prozesses, in dem der Reststoff anfällt). Als „funktionelle Einheit“ wird der Betrieb der Bioraffinerie während eines Jahres definiert, daher erfolgte keine Allokation der Umweltwirkungen auf Haupt- und / oder Nebenprodukte. Für einen Vergleich sowohl für die ökologische als auch für die ökonomische Betrachtung wird dem Bioraffineriesystem ein Referenzsystem gegenübergestellt. Dieses umfasst die Umweltwirkungen / Kosten der herkömmlichen (fossilen) Herstellung der Haupt- und Nebenprodukte der innovativen Wertschöpfungsketten bzw. der Abfallbehandlung des Reststoffes. Abbildung 1 zeigt die Systemgrenzen des Bioraffinerie-Systems sowie den Aufbau des Referenzsystems der im Rahmen dieser Studie für die quantitative Bewertung herangezogen wird. (Die Prozess-Schemata für alle im Detail untersuchten Wertschöpfungsketten finden sich im Anhang).

Abbildung 1: Systemgrenzen und berücksichtigte Prozesse des Bioraffinerie-Systems sowie des Referenzsystems für die ökologische und techno-ökonomische Bewertung.



4.4.2 Ökobilanz

Die ökologische Bewertung erfolgt nach dem LCA-Prinzip: Auf Basis der Massen- und Energiebilanzen und mit Hilfe von Datenbank-Werten (ecoinvent) für Hilfs- & Betriebsstoffe, Brennstoffe, Abfälle, Strom, Wärme, Dampf, etc. werden die Umweltwirkungen berechnet. Dabei wird das Treibhausgaspotenzial (GWP 100, IPCC 2021), der kumulierte Energieaufwand – nicht erneuerbar (CED) sowie die Landnutzung (land occupation) bewertet.

4.4.3 Techno-ökonomische Bewertung

Für die techno-ökonomische Bewertung werden die Produktionskosten (basierend auf Kosten für Investment & Instandhaltung, Betriebskosten (Rohstoffe, Hilfs- & Betriebsmittel, Energie, Abfall, Transport) und Personalkosten) sowie die Marktpreise der Produkte berücksichtigt.

Für alle ausgewählten Wertschöpfungsketten werden die gleichen Annahmen für Kosten für Rohstoffe, Hilfs- & Betriebsstoffe, Energie, Abfall und Produkte getroffen. (siehe Tabellen im Anhang) z.B. Reststoffe aus Getreidemühlen: 0.18 EUR/kg; Molkereireststoffe: 0.00 EUR/kg.

Für alle Investitionen wird eine Laufzeit von 20 Jahren und ein Zinssatz von 5% angenommen.

5 Ergebnisse

5.1 Eigenschaften und Charakterisierung der Reststoffe

Insgesamt ergibt sich für unvermeidbare Reststoffe aus der Lebensmittelindustrie in Österreich ein relevantes Potenzial von rund 1.590.000 Tonnen Frischmasse bzw. 560.000 Tonnen Trockenmasse. Abbildung 2 gibt einen Überblick über die relevanten Potenziale (bezogen auf die Trockenmasse).

Abbildung 2: Anfall unvermeidbarer Lebensmittel Reststoffe in Österreich in Tonnen Trockenmasse pro Jahr (gesamt: 562.140 t TM).



Die Zusammensetzung dieser Reststoffe nach (Agroscope 2017) ist in Abbildung 3 dargestellt.

Abbildung 3: Zusammensetzung von Lebensmittel Reststoffen nach Agroscope 2017.

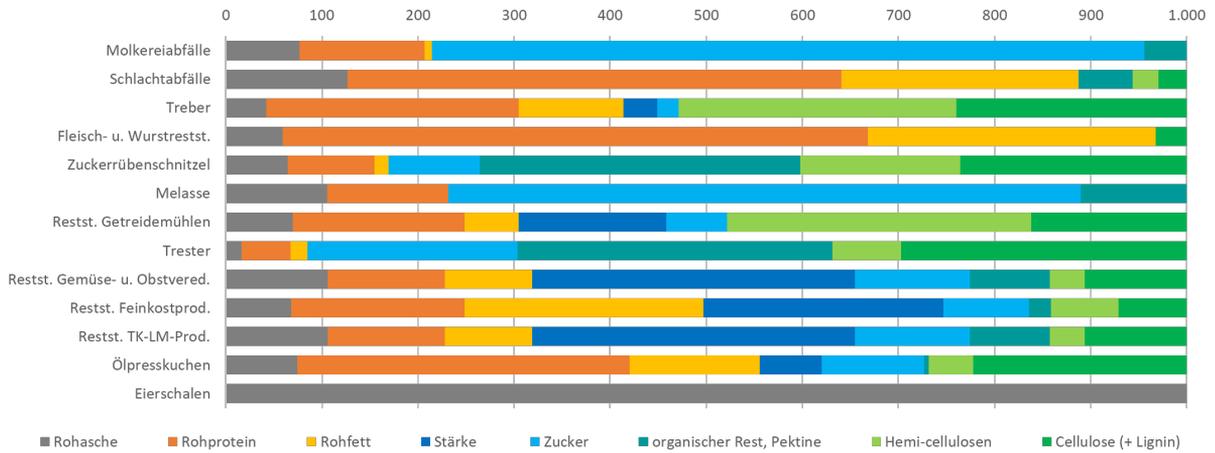


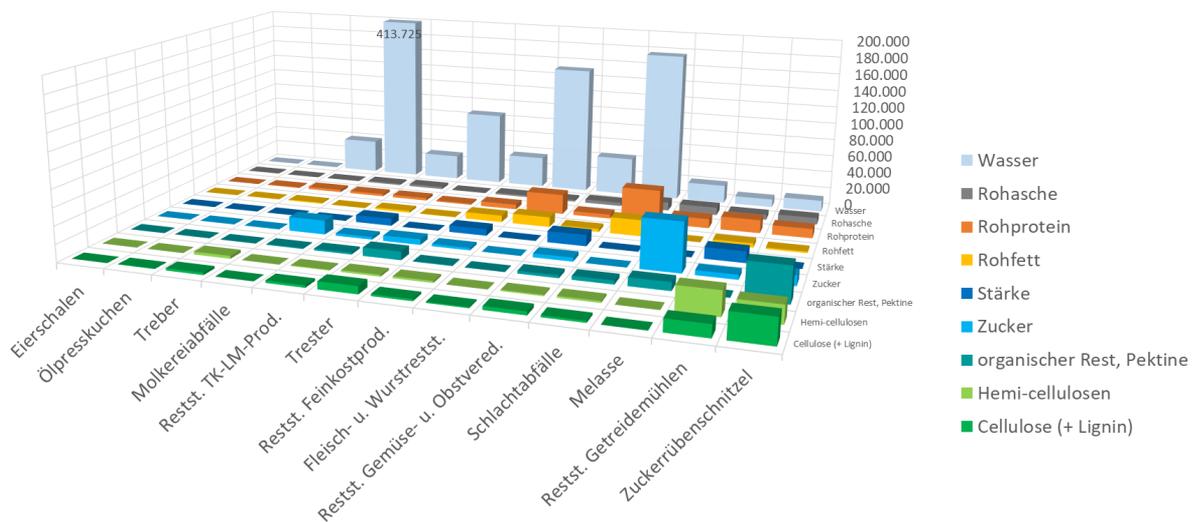
Tabelle 4 und Abbildung 4 zeigen das relevante Potenzial und die Zusammensetzung der in Österreich anfallenden, unvermeidbaren Lebensmittel Reststoffe im Detail.

Tabelle 4: Anfall und Zusammensetzung unvermeidbarer Lebensmittel Reststoffe in Österreich in Tonnen pro Jahr.

Reststoff [Tonnen/Jahr]			Rohasche	Rohprotein	Rohfett	Stärke	Zucker	organischer Rest, Pektine	Hemi- cellulosen	Cellulose (+ Lignin)
	FM	TM								
Zuckerrüben- schnitzel	132.500	119.250	7.718	10.755	1.704	0	11.352	39.787	19.839	28.095
Restst. Getreide- möhlen	94.462	85.016	5.926	15.205	4.804	13.010	5.421	0	26.861	13.790
Melasse	106.000	84.800	8.973	10.687	0	0	55.796	9.344	0	0
Schlachtabfälle	252.000	75.600	9.555	38.860	18.681	0	0	4.248	2.019	2.237
Restst. Gemüse- u. Obstverede- lung	82.900	38.134	4.041	4.651	3.463	12.813	4.548	3.173	1.394	4.051
Fleisch- u. Wurstreststoffe	189.700	37.940	2.238	23.103	11.371	0	0	0	0	1.228
Restst. Feinkost- produktion	67.800	31.188	2.119	5.629	7.760	7.786	2.765	715	2.205	2.210

Reststoff [Tonnen/Jahr]										
	FM	TM	Rohasche	Rohprotein	Rohfett	Stärke	Zucker	organischer Rest, Pektine	Hemi-cellulosen	Cellulose (+ Lignin)
Trester	115.919	28.980	480	1.477	501	0	6.334	9.501	2.073	8.612
Restst. TK-LM-Produktion	54.600	25.116	2.661	3.064	2.280	8.439	2.995	2.090	918	2.668
Molkereiabfälle	435.500	21.775	1.677	2.823	174	0	16.137	965	0	0
Treber	50.880	11.194	471	2.943	1.220	389	253	0	3.232	2.687
Ölpreszkuchen	3.000	2.700	202	933	364	175	287	13	125	600
Eierschalen	560	448	448	0	0	0	0	0	0	0

Abbildung 4: Reststoffmengen in Österreich nach Haupt-Inhaltsstoffen in Tonnen pro Jahr (relevantes Potenzial).



5.2 Eingrenzung auf ausgewählte Reststoffe

Für die 13 Lebensmittel-Reststoff-Klassen erfolgte in einer ersten Grob-Analyse eine Recherche der bereits in der Literatur beschriebenen, innovativen Wertschöpfungsketten. (siehe Abbildung 5)

Abbildung 5: In der Literatur beschriebene innovative Wertschöpfungsketten für die in Österreich anfallenden 13 Lebensmittel-Reststoff-Klassen.

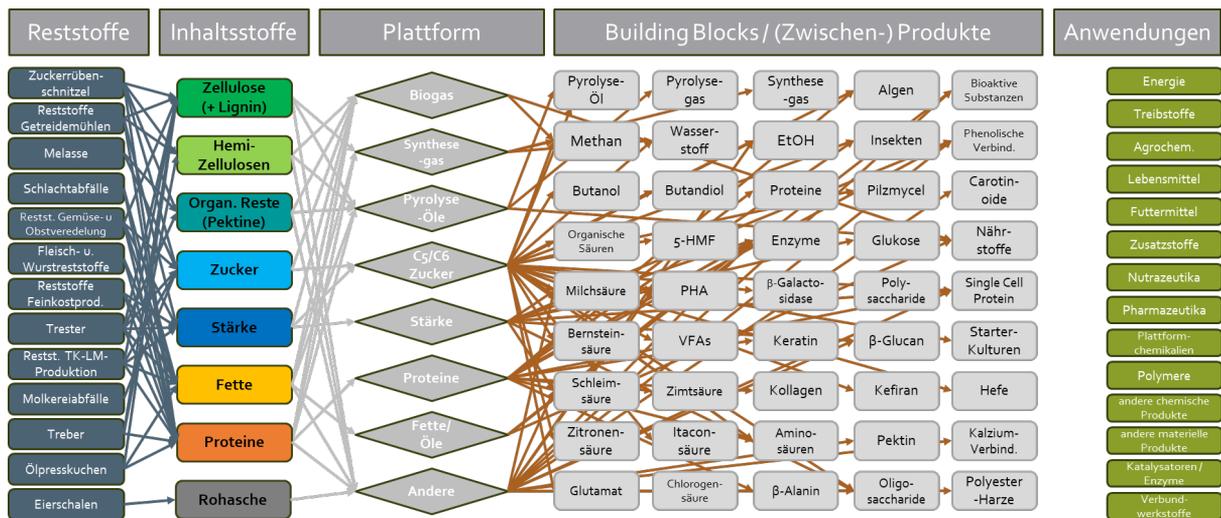


Tabelle 5 zeigt eine Zusammenfassung der Charakteristika der in Österreich anfallenden, unvermeidbaren Lebensmittel-Reststoffe. Neben dem Anfall an Trockenmasse werden der Wassergehalt (je geringer, desto besser für die potenzielle Nutzung in einer Bio Raffinerie), die Anzahl der in der Grobanalyse recherchierten Technologien zur Weiterverarbeitung (je mehr, desto besser), der „technology readiness level“ (TRL) dieser Technologien (je höher, desto besser) sowie die zeitliche Verfügbarkeit über das Jahr (je höher, desto besser) dargestellt. Eine grobe Bewertung erfolgt durch eine Ampel-Einstufung jedes Kriteriums für jede Reststoff-Klasse im direkten Vergleich (Rang 1-4 = grün; Rang 5-9 = gelb; Rang 10-13 = rot).

Tabelle 5: Zusammenfassung der Charakteristika der in Österreich anfallenden Lebensmittel-Reststoff-Klassen in Bezug auf die Nutzung in innovativen Wertschöpfungsketten (Bioraffinerien).

Reststoff [Tonnen/Jahr]	Trockenmasse ges. [t/a]	Wassergehalt [%]		Technologien zur Weiterverarbeitung [Anzahl]	TRL Technologien [-]	Verfügbarkeit zeitl. [%]	# GESAMT				
		# TM	# Wassergehalt				# Technologien	# zeitl. Verf.			
Zuckerrübenschnitzel	119 300	1	10%	1	≤5	10	4 - 9	1	29%	12	4
Restst. Getreidemöhlen	85 000	2	10%	1	≥10	2	4 - 5	7	100%	1	1
Melasse	84 800	3	20%	4	≥10	3	4 - 9	1	83%	8	2
Schlachtabfälle	75 600	4	70%	9	≥10	3	3 - 8	6	100%	1	3
Restst. Gemüse- u. Obstveredelung	38 100	5	54%	6	5-10	5	4 - 6	7	67%	9	7
Fleisch- u. Wurstreststoffe	37 900	6	80%	12	5-10	7	3 - 4	13	100%	1	9
Restst. Feinkostproduktion	31 200	7	54%	6	≤5	13	4 - 9	1	100%	1	5
Trester	29 000	8	75%	10	5-10	5	4 - 6	7	33%	10	11
Restst. TK-LM-Produktion	25 100	9	54%	6	5-10	7	4 - 6	7	33%	10	9
Molkereiabfälle	21 800	10	95%	13	≥10	1	3 - 9	5	100%	1	6
Treber	11 200	11	78%	11	≤5	10	4 - 4	11	100%	1	13
Ölpressekuchen	2 700	12	10%	1	5-10	9	4 - 9	1	25%	13	8
Eierschalen	400	13	20%	4	≤5	12	4 - 4	12	100%	1	12

Auf Basis dieser Informationen wurden im Rahmen eines ExpertInnen Workshops 2 Reststoff-Klassen ausgewählt, für die in weiterer Folge innovative Verwertungswege im Detail ökologisch und techno-ökonomisch bewertet werden sollten. Der Workshop fand im März 2024 statt⁴.

Folgende allgemeine Aspekte zur Nutzung von Lebensmittel-Reststoffen in Bioraffinerien wurden bei diesem Workshop diskutiert:

- Für die Betrachtung innovativer Wertschöpfungsketten auf Basis von Bioraffinerien wurde übergeordnet auf die Hierarchie der Produkte nach dem Prinzip: Teller → Trog → Tank hingewiesen.
- Um die Gesamt-Wertschöpfung dieser Konzepte zu steigern ist es wesentlich möglichst alle Schienen kaskadisch zu nutzen.
- Bei der Produktion von Wertstoffen (im Vergleich zu Bulkchemikalien) ist die Aufreinigung der essenzielle Verfahrensschritt.
- Eine wesentliche Hürde für die Umsetzung von Bioraffinerie Projekten ist aktuell die rechtliche Klassifikation der Reststoffe als Abfall. Dies hat sowohl Konsequenzen für die Anlagenbewilligungen (Abfallbehandlungsanlagen – gewerbliche Anlagen – landwirtschaftliche Anlagen), als auch für die weitere Verwendung der daraus gewonnen Produkte (Landwirtschaft: Futtermittel, Dünger, etc.). Ebenfalls erschwerend kommen die unterschiedlichen Ausrichtungen und Zuständigkeiten zwischen Bund und Land hinzu. Die Kreislaufwirtschaftsstrategie auf Bundesebene findet sich noch nicht in der Abfallwirtschaftsgesetzgebung auf Bundes- und Landesebene wieder, was für die Umsetzung von konkreten Bioraffinerieprojekten nachteilig ist.

Nach der Diskussion der Vor- und Nachteile der einzelnen Reststoff-Klassen wurden für die weitere Bearbeitung in diesem Projekt **Reststoffe aus Getreidemühlen** und aus **Molkereien** ausgewählt.

5.2.1 Reststoffe aus der Getreideverarbeitung

- + Der Reststoff ist kontinuierlich verfügbar und fällt in kaum schwankender Qualität in vergleichsweise großen Strukturen an (Verfügbarkeit).
- + In Zukunft wird tendenziell mit einer Steigerung der verfügbaren Mengen gerechnet (Trend vegetarische / vegane Ernährung)
- + Die Herstellung von pflanzlichen Proteinen bietet eine interessante Möglichkeit die Wertschöpfung zu erhöhen.
- - Kleie weist aktuell einen Preis von ca. 180 EUR/Tonne auf (Wirtschaftlichkeit).

⁴ TeilnehmerInnen: Theodor Zillner (BMK), Teresa Matousek (BMK), Maria Bürgermeister-Mähr (FFG), Michael Mandl (tbw research), Bettina Muster-Slawitsch (AEE INTEC), Veronika Reinberg (ÖGUT), Gernot Zwegg (FH Wiener Neustadt)

- - Derzeit muss der Reststoff nicht entsorgt werden (kein Problem).

Treber: Sollten die identifizierten innovativen Wertschöpfungsketten, die Reststoffe aus der Getreideverarbeitung als Rohstoff verwenden, aufgrund der ähnlichen chemischen Zusammensetzung auch mit Trebern betrieben werden können, so wird dieser Reststoff mitbetrachtet.

5.2.2 Molkereireststoffe

- + Derzeit können für diesen Reststoff Entsorgungsgebühren anfallen (Wirtschaftlichkeit).
- + Molken gelten als Lebensmittel (rechtlicher Aspekt).
- + Durch Änderungen in der traditionellen Entsorgungsschiene (Schweinemast → optimierte Fütterung) könnte es zu Absatzproblem kommen (Problem).
- + Der Reststoff ist kontinuierlich verfügbar und fällt in kaum schwankender Qualität in vergleichsweise großen Strukturen an (Verfügbarkeit).
- + Eine kaskadische Nutzung von Wertstoffen vor einer energetischen Nutzung (aktuelle Nutzungsschiene nur Biogasproduktion) kann die Wertschöpfung erhöhen.
- - Der Reststoff hat einen hohen Wassergehalt. (Die Verwertung ist nur interessant, wenn das Wasser am Standort abtrennbar und einleitbar oder als aufbereitetes Wasser nutzbar ist).
- - Eine Aufkonzentration auf 18-20% Trockenmasse ist durch diverse Verfahren möglich, muss sich jedoch durch die gewonnenen Wertstoffe wirtschaftlich rentieren.

5.3 Identifikation und Analyse innovativer Verwertungswege inkl. Technologiescreening

5.3.1 Literatur Recherche

Für die Identifikation innovativer Verwertungswege wurde eine umfassende Literatur Recherche durchgeführt. Diese umfasst folgende Publikationen zu den ausgewählten Reststoff-Klassen.

Tabelle 6: Auflistung der für die Identifikation innovativer Verwertungswege berücksichtigten Quellen.

Allgemein	Reststoffe aus Getreidemöhlen	Reststoffe aus Molkereien
(Caldeira et al. 2020)	(Alonso 2018)	(Amaro et al. 2019)
(Lindorfer et al. 2019)	(Apprich et al. 2014)	(Asunis et al. 2020)
(Pladerer and Hietler 2019)	(Baladrán-Quintana et al. 2015)	(Asunis et al. 2021)
(Reinberg et al. 2020)	(Buchmaier et al. 2024)	(Bacenetti et al. 2018)
	(Buranov and Mazza 2009)	(Banger et al. 2021)
	(Danciu et al. 2023)	(Barile et al. 2009)
	(Du et al. 2008)	(Buchanan et al. 2023)
	(ElMekawy et al. 2013)	(Carvalho et al. 2021)
	(Favaro et al. 2013)	(Chalermthai et al. 2020, 2021)
	(Hagman et al. 2020)	(Chandra et al. 2018)
	(IEA Bioenergy Task 42 2020)	(Conde Mejía and Conde Báez 2022)
	(Katileviciute et al. 2019)	(Gabardo et al. 2016)
	(Kim et al. 2020)	(Lappa et al. 2019)
	(Kwan et al. 2018)	(Liu et al. 2018)
	(Lam et al. 2014)	(Longanesi et al. 2018)
	(Lam et al. 2018)	(Martins et al. 2019)

Allgemein	Reststoffe aus Getreidemühlen	Reststoffe aus Molkereien
	(Leung et al. 2012)	(Nayeem et al. 2017)
	(Liu et al. 2016)	(Omwene et al. 2020)
	(Madhukumar and Muralikrishna 2012)	(Rocha and Guerra 2020)
	(Nemes et al. 2022)	(Sebastián-Nicolás et al. 2020)
	(Ohkouchi and Inoue 2006)	(Szczerba et al. 2020)
	(Onipe et al. 2021)	(Vera et al. 2022)
	(Patsioura et al. 2011)	(Zandona et al. 2021)
	(Prückler et al. 2014)	
	(Reisinger et al. 2013)	
	(Rudjito 2022)	
	(Safaripour et al. 2021)	
	(Samanta et al. 2015)	

Abbildung 6 und Abbildung 7 geben einen Überblick über die bekannten, möglichen Verwertungswege für Reststoffe aus Getreidemühlen, sowie Reststoffe aus Molkereien gegliedert nach: vorgelegerten Prozessen (upstream / Vorbehandlung) – Haupt-Prozessen – nachgelagerten Prozessen (downstream / Nachbehandlung) - (Zwischen-) Produkten.

Abbildung 6: innovative Wertschöpfungsketten für Reststoffe aus Getreidemühlen

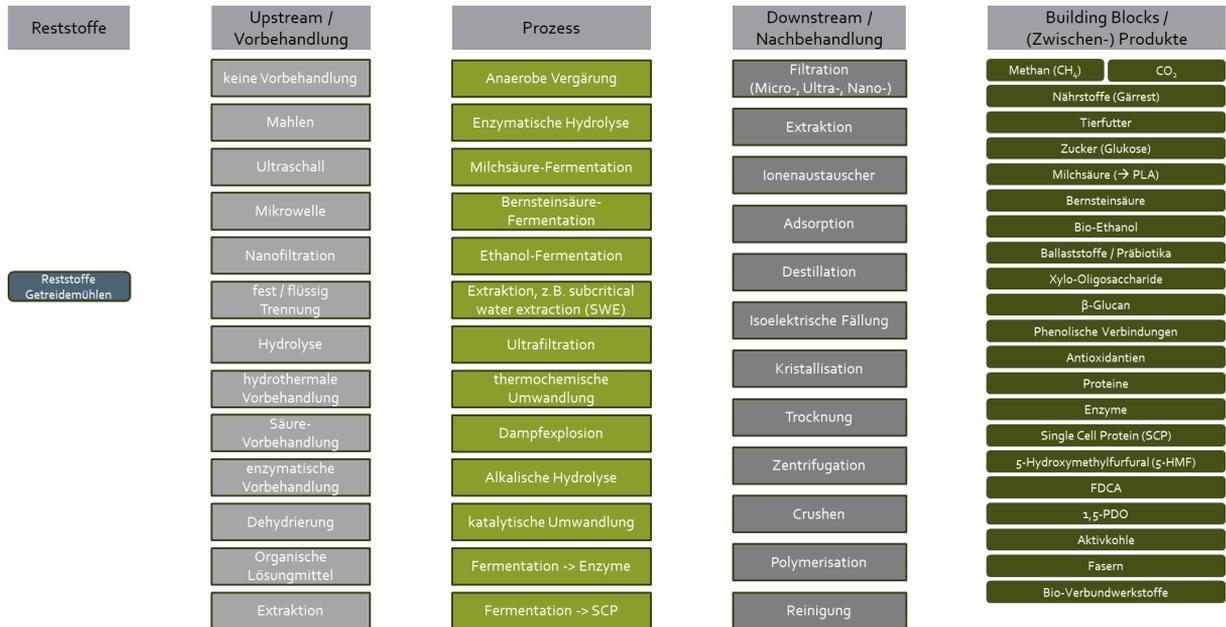
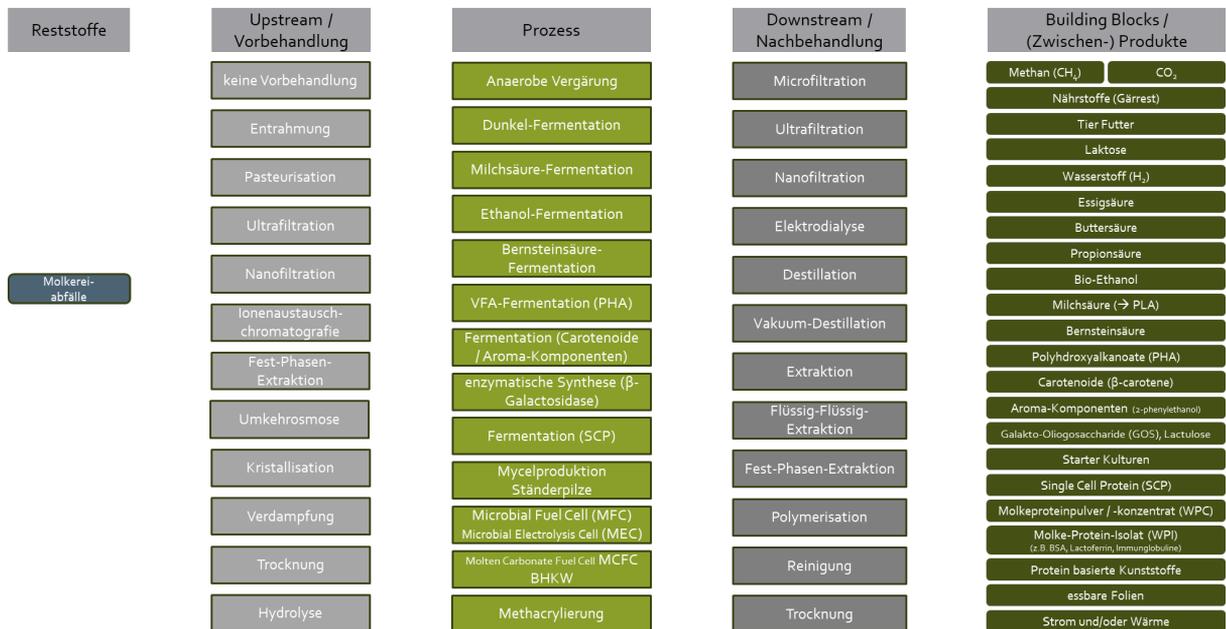


Abbildung 7: innovative Wertschöpfungsketten für Reststoffe aus Molkereien



5.3.2 Qualitative Bewertung

Die Ergebnisse der qualitativen Bewertung sind für Reststoffe aus Getreidemühlen in Tabelle 7 und Tabelle 8

Tabelle 8 zusammengefasst und in Abbildung 8 grafisch dargestellt. Tabelle 9 und Tabelle 10 zeigen die Ergebnisse für Reststoffe aus Molkereien, diese sind in Abbildung 9 grafisch dargestellt.

In Bezug auf die Datenverfügbarkeit zeigt sich, dass in den wenigsten Fällen bereits ökologische oder ökonomische Bewertungen vorliegen, sondern für die meisten Verwertungswege nur qualitative Beschreibungen einzelner Prozessschritte und eventuell Massenbilanzen für diese Schritte, aber nur sehr selten vollständige Massen- und Energiebilanzen für das Gesamtkonzept, welche eine Voraussetzung für eine detaillierte ökologische (Ökobilanz) und techno-ökonomische Bewertung wären.

Tabelle 7: Qualitative Bewertung der iWSK für Reststoffe aus Getreidemühlen (I)

Produkt	Zucker (Glukose)	Milchsäure	PLA & Tierfutter	Bernsteinsäure & Tierfutter	Ethanol	Ballaststoffe (Arabinoxylane, β -Glucane)	Xylo-Oligosaccharide (Ballastst., Präbiotika)	β -Glucan (Ballaststoffe, Präbiotika)
Datenverfügbarkeit Prozess	50%	75%	100%	100%	50%	50%	50%	50%
Datenverfügbarkeit Ökologie	0%	0%	75%	0%	0%	0%	0%	0%
Datenverfügbarkeit Ökonomie	0%	0%	100%	100%	0%	0%	0%	0%
TRL	50%	50%	75%	75%	75%	50%	50%	50%
Komplexitätsindex	75%	75%	50%	50%	75%	75%	50%	50%
Temperaturniveau	25%	75%	75%	50%	75%	50%	75%	100%
LM-Anforderung / Sterilität	50%	50%	100%	100%	50%	50%	50%	50%
Betriebsmittel - Umweltbelastung	100%	100%	50%	100%	100%	50%	50%	100%
Verh. Prod.preis/Ref.prod.preis	75%	75%	50%	75%	75%	k.A.	k.A.	k.A.
Marktvolumen	100%	66%	66%	66%	100%	33%	33%	33%
Größe	k.A.	k.A.	50%	75%	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

Tabelle 8: Qualitative Bewertung der iWSK für Reststoffe aus Getreidemöhlen (II)

Produkt	phenolische Verbindungen	Proteine	Enzyme	Single Cell Protein	5-Hydroxymethylfural (5-HMF)	FDCA & 1,5-PDO & Aktivkohle	Bio-Verbundwerkstoff
Datenverfügbarkeit Prozess	50%	75%	0%	50%	50%	100%	100%
Datenverfügbarkeit Ökologie	0%	0%	0%	0%	50%	100%	100%
Datenverfügbarkeit Ökonomie	0%	0%	0%	0%	50%	100%	0%
TRL	75%	50%	50%	75%	50%	50%	75%
Komplexitätsindex	100%	75%	75%	100%	100%	25%	100%
Temperaturniveau	25%	75%	75%	75%	25%	25%	75%
LM-Anforderung / Sterilität	50%	50%	50%	50%	100%	100%	100%
Betriebsmittel - Umweltbelastung	75%	100%	100%	100%	50%	50%	75%
Verh. Prod.preis/Ref.prod.preis	k.A.	75%	k.A.	75%	75%	75%	k.A.
Marktvolumen	33%	66%	33%	66%	66%	66%	66%
Größe	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0%	75%

Die qualitative Analyse zeigt für Reststoffe aus Getreidemöhlen ein hohes Potenzial (Mittelwert der Bewertungen >70%) für die Herstellung von Bernsteinsäure und Tierfutter, Ethanol, Single Cell Protein und Bio-Verbundwerkstoffen. Da für zwei andere Verwertungswege (PLA und Tierfutter, FDCA & 1,5-PDO & Aktivkohle) jedoch deutlich bessere Daten verfügbar sind, wurden diese, sowie Bernsteinsäure für die detaillierte Bewertung ausgewählt.

Abbildung 8: Qualitative Bewertung der iWSK für Reststoffe aus Getreidemöhlen – grafische Darstellung (Die Farbe der Fläche stellt die Datenverfügbarkeit dar: grün: sehr gut Verfügbarkeit für Prozess / Ökologie / Ökonomie; rot: keine detaillierten Daten verfügbar).



Tabelle 9: Qualitative Bewertung der iWSK für Reststoffe aus Molkereien (I)

Produkt	Biogas & Dünger	Laktose	Wasserstoff (& VFAs: Essigsäure, Buttersäure, Propionsäure)	Ethanol	Milchsäure	Bernsteinsäure	Polyhydroxyalkanoate (PHA) & Tierfutter	Carotenoide / Aroma-Komponenten
Datenverfügbarkeit Prozess	100%	75%	50%	100%	50%	50%	100%	25%
Datenverfügbarkeit Ökologie	100%	0%	0%	100%	0%	0%	100%	0%
Datenverfügbarkeit Ökonomie	100%	50%	0%	100%	0%	0%	50%	0%
TRL	75%	75%	50%	75%	50%	50%	50%	75%
Komplexitätsindex	100%	100%	50%	100%	50%	50%	25%	50%
Temperaturniveau	75%	50%	75%	75%	75%	75%	75%	50%
LM-Anforderung / Sterilität	100%	50%	50%	50%	50%	50%	100%	50%
Betriebsmittel - Umweltbelastung	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	50%
Verh. Prod.preis/Ref.prod.preis	75%	75%	75%	75%	75%	75%	50%	75%
Marktvolumen	100%	66%	100%	100%	66%	66%	66%	33%
Größe	75%	k.A.	k.A.	50%	k.A.	k.A.	75%	75%

Tabelle 10: Qualitative Bewertung der iWSK für Reststoffe aus Molkereien (II)

Produkt	Galakto-Oligosaccharide und/oder Lactulose	Starter-Kulturen	Single Cell Protein (SCP)	Molkeproteinpulver / Molkeproteinkonzentrat	Molke-Protein-Isolat (WPI) (z.B. Lactoferrin)	protein-basierte Kunststoffe	essbare Folien und Hydrogele	Strom
Datenverfügbarkeit Prozess	50%	25%	25%	75%	50%	100%	25%	25%
Datenverfügbarkeit Ökologie	0%	0%	0%	50%	0%	100%	0%	0%
Datenverfügbarkeit Ökonomie	0%	0%	0%	50%	0%	100%	0%	0%
TRL	50%	50%	75%	75%	50%	50%	50%	75%
Komplexitätsindex	75%	75%	100%	100%	0%	50%	75%	100%
Temperaturniveau	75%	75%	50%	50%	75%	50%	50%	75%
LM-Anforderung / Sterilität	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	100%
Betriebsmittel - Umweltbelastung	100%	100%	100%	100%	100%	50%	50%	50%
Verh. Prod.preis/Ref.prod.preis	75%	75%	75%	75%	75%	25%	k.A.	100%
Marktvolumen	33%	33%	66%	66%	33%	66%	33%	100%
Größe	k.A.	k.A.	k.A.	50%	k.A.	100%	k.A.	k.A.

Bei den Reststoffen aus Molkereien schneiden innovative Wertschöpfungsketten zur Herstellung von Biogas und Dünger, Wasserstoff, Ethanol, Single Cell Protein, Molkeproteinpulver sowie Strom in der Gesamtwertung besonders gut ab. Die Herstellung von Biogas und Ethanol ist aktuell schon in einigen industriellen Anwendungen etabliert und wurde daher im Zuge dieser Studie nicht mehr im Detail betrachtet. Aufgrund der fehlenden Datenverfügbarkeit wurden jedoch nicht die weiteren genannten Verwertungswege, sondern die Herstellung von PHA & Tierfutter sowie von proteinbasierten Kunststoffen in weiterer Folge im Detail bewertet.

Abbildung 9: Qualitative Bewertung der iWSK für Reststoffe aus Molkereien – grafische Darstellung (Die Farbe der Fläche stellt die Datenverfügbarkeit dar: grün: sehr gut Verfügbarkeit für Prozess / Ökologie / Ökonomie; rot: keine detaillierten Daten verfügbar).



5.4 Ökologische und techno-ökonomische Bewertung (quantitative Bewertung)

Durch die Anwendung der Auswahlkriterien (Gesamtconcept, quantitative Daten zu Material- und Energie-Flüssen und/oder quantitative Daten zur Wirtschaftlichkeitsbewertung) wurde die Vielzahl an theoretisch möglichen Verwertungswegen auf 5 eingeschränkt⁵.

- G (Getreidereststoffe) – PLA & Tierfutter
- G (Getreidereststoffe) – Bernsteinsäure & Tierfutter
- G (Getreidereststoffe) – FDCA & 1,5-PDO & Aktivkohle
- M (Reststoffe aus Molkereien) – PHA & Energie & Nährstoffe (Gärrest)
- M (Reststoffe aus Molkereien) – protein-basierte Kunststoffe

Die Prozess-Schemata, Systemgrenzen und Referenzsysteme für diese Verwertungswege finden sich im Anhang (Abbildung 10 bis Abbildung 14).

Tabelle 11 fasst die Ergebnisse der quantitativen Bewertung zusammen. Vorab ist hervorzuheben, dass die Größe, der in der Literatur beschrieben und in dieser Studie untersuchten Bioraffinerien sehr unterschiedlich ausfällt. Während das Konzept zur Herstellung von Bernsteinsäure & Tierfutter aus Getreidereststoffen mit 312 t/a Reststoffinput weniger als 1% der in Österreich anfallenden Menge verarbeiten würde, liegen die 2 Konzepte zur Verwertung von Molke im Bereich von 4-14% der anfallenden Menge (15980 t/a bzw. 58800 t/a). Das Konzept zur Herstellung von PLA & Tierfutter aus Getreidereststoffen hingegen weist eine deutlich größere Verarbeitungskapazität von ca. 90% der anfallenden Menge auf (83000 t/a) wohingegen das Konzept zur Herstellung von FDCA & 1,5-PDO & Aktivkohle aus Getreidereststoffen eine Größenordnung aufweist, die die in Österreich anfallende Menge weit übersteigen würde (700% bzw. 660000 t/a). Im ursprünglichen Konzept wurde zudem auch die Verwertung von weiterer lignozellulosischer Biomasse wie etwa Waldhackgut beschrieben, wodurch sich auch das in Österreich, neben Reststoffen aus der Lebensmittelproduktion, vorhandene Potenzial vergrößert.

Die detaillierten Ergebnisse der ökologischen Bewertung finden sich im Anhang (Abbildung 15 bis Abbildung 19).

Die Herstellung von PLA & Tierfutter bzw. Bernsteinsäure & Tierfutter aus Getreidereststoffen schneiden in allen 3 Umweltwirkungen (THG, KEA, LU) schlechter als das jeweilige Referenzsystem ab. Dies liegt jedoch hauptsächlich am Verbrauch an fossilen Energieträgern – eine Verbesserung

⁵ Für Reststoffe aus Getreidemöhlen, konnte nach diesen Kriterien kein Verwertungsweg identifiziert werden. Daher wurden für diesen Reststoff Verwertungswege ausgewählt, die einen in der chemischen Zusammensetzung ähnlichen Reststoff verwenden.

des Energiekonzeptes bzw. eine Umstellung auf erneuerbare Energien würde das Ergebnis maßgeblich zu Gunsten der Bioraffinerie-Systeme verändern. Die Herstellung von PHA & Energie & Nährstoffen aus Molke schneidet nur bei der Landnutzung schlechter als das Referenzsystem ab und die Herstellung von FDCA & 1,5-PDO & Aktivkohle aus Getreidereststoffen bzw. von proteinbasierten Kunststoffen aus Molke schneidet in allen Umweltwirkungen besser als das jeweilige Referenzsystem ab.

Bezüglich der ökonomischen Bewertung übersteigen bei der Herstellung von PLA & Tierfutter aus Getreidereststoffen die Produktionskosten die Einnahmen, bei der Herstellung von PHA & Energie & Nährstoffen aus Molke sind sie in etwa gleich, während bei der Herstellung von Bernsteinsäure & Tierfutter bzw. FDCA & 1,5-PDO & Aktivkohle aus Getreidereststoffen sowie der Herstellung von proteinbasierten Kunststoffen aus Molke die Einnahmen die Produktionskosten übersteigen. Vor allem bei der Interpretation der ökonomischen Bewertung sind die unterschiedlichen Größenordnungen der untersuchten Konzepte zu berücksichtigen, da aufgrund der „economy of scale“ größere Anlagen tendenziell wirtschaftlich besser abschneiden.

Tabelle 11: Ergebnisse der quantitativen Bewertung der ökologischen und techno-ökonomischen Aspekte der innovativen Wertschöpfungsketten sowie Vergleich zur qualitativen Bewertung. (HP ... Hauptprodukt; NP ... Nebenprodukt)

Wertschöpfungskette:	G PLA & Tier- futter	G Bernstein- säure & Tierfutter	G FDCA & 1,5- PDO & Ak- tivkohle	M PHA & Ener- gie & Nähr- stoffe	M proteinba- sierte Kunststoffe
Rohstoff / Reststoff	LM-Restst. pulverf.	LM-Restst. (Brot)	Restst. Ge- treidem.	Molke	Molke
Reststoff-Input [kg/a]	83,000,000	312,000	659,966,000	15,980,000	58,800,000
Anteil am Aufkommen in AT	87.83%	0.33%	698.38%	3.67%	13.50%
Ökologische Bewertung					
THG Bioraf. : Ref.-sys.	497%	293%	45%	83%	75%
KEAf Bioraf. : Ref.-sys.	289%	439%	44%	53%	49%
LU Bioraf. : Ref.-sys.	701%	148%	66%	411%	48%
Techno-ökonomische Bewertung					
Investitionskosten [EUR]	114,900,000	1,100,000	717,400,000	7,500,000	39,800,000

Wertschöpfungskette:	G	G	G	M	M
	PLA & Tier- futter	Bernstein- säure & Tierfutter	FDCA & 1,5- PDO & Ak- tivkohle	PHA & Ener- gie & Nähr- stoffe	proteinba- sierte Kunststoffe
Produktionskosten / Einnahmen	1.10	0.70	0.60	1.00	0.90
Produktionskosten HP [EUR/kg]	11.80	24.00	3.10	4.50	6.20
Produktionskosten HP ab- zügl. Erlöse NP [EUR/kg]	4.98	13.32	neg.	3.94	6.18
Annahme Marktpreis HP [EUR/kg]	3.31	25.00	1.58	4.00	7.00
Marktpreis Referenz-HP [EUR/kg]	1.00 - 1.50	25.00	0.80 - 1.60	0.90 - 1.25	1.00 - 1.50
Referenz-HP	PP	Bernstein- säure	Terephthal- säure	PET	PP
Qualitative Bewertung (Mittelwert aller Kriterien)	65%	74%	52%	68%	55%

6 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse des Projekts zeigen deutlich, dass die nachhaltige Verwertung von Reststoffen aus der Lebensmittelproduktion ein erhebliches Potenzial bietet, zur Kreislaufwirtschaft und Bioökonomie beizutragen. Besonders in Hinblick auf die angestrebte Reduktion von Treibhausgasemissionen und den ressourcenschonenden Umgang mit Rohstoffen ist die Integration von Bioraffinerietechnologien und innovativen Verwertungswegen ein vielversprechender Ansatz. Zentral für den Erfolg solcher Konzepte sind die ökologische und techno-ökonomische Bewertung, die es ermöglicht, vielversprechende Wertschöpfungsketten zu identifizieren und weiterzuentwickeln. Die Analyse der fünf untersuchten Verwertungsketten – basierend auf Reststoffen aus der Getreideverarbeitung und Molkereiwirtschaft – zeigte dabei Unterschiede in ökologischer und wirtschaftlicher Effizienz auf.

Einige Verwertungsketten, wie die Herstellung von PLA und Tierfutter aus Getreidereststoffen, schneiden in der ökologischen Bewertung schlechter ab als das jeweilige Referenzsystem, dies lässt sich vor allem auf den hohen Verbrauch an fossilen Energieträgern zurückführen. Eine Umstellung auf erneuerbare Energiequellen könnte diese Bilanz deutlich verbessern. Positiv hervorzuheben ist jedoch, dass die Herstellung von FDCA, 1,5-PDO und Aktivkohle aus Getreidereststoffen sowie die Verwertung von Molke zu proteinbasierten Kunststoffen in allen bewerteten Umweltkategorien besser abschneiden als die Referenzsysteme. Dies verdeutlicht das Potenzial, durch innovative Verwertungswege die Umweltbelastung zu verringern und Ressourcen effizienter zu nutzen.

Auch wirtschaftlich konnten einige der untersuchten Verwertungsketten überzeugen. Besonders die Konzepte zur Herstellung von Bernsteinsäure und FDCA aus Getreidereststoffen sowie die Verwertung von Molke zu proteinbasierten Kunststoffen erwiesen sich als wirtschaftlich tragfähig, da die Einnahmen die Produktionskosten übersteigen. Allerdings zeigt sich auch, dass die Wirtschaftlichkeit stark von der Skalierung der Anlagen abhängt, was darauf hindeutet, dass größere Anlagen aufgrund von Skaleneffekten tendenziell bessere wirtschaftliche Ergebnisse liefern.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die untersuchten innovativen Bioraffinerie-Systeme das Potenzial haben, nicht nur zur Reduktion von Abfällen und Emissionen beizutragen, sondern auch neue, wirtschaftlich rentable Verwertungspfade zu eröffnen. Eine zentrale Herausforderung bleibt jedoch die Verbesserung der Energieeffizienz und die Umstellung auf erneuerbare Energiequellen, um die ökologischen Vorteile voll ausschöpfen zu können. Zudem ist die rechtliche Einordnung von Reststoffen als Abfall eine wesentliche Hürde, die den Zugang zu neuen Märkten und die Nutzung dieser Reststoffe erschwert. Für eine erfolgreiche Umsetzung dieser Konzepte sind daher neben technologischen Innovationen auch politische Anpassungen notwendig, um rechtliche und wirtschaftliche Rahmenbedingungen zu verbessern.

Die Ergebnisse sind insbesondere für verschiedene Stakeholder in der Lebensmittel- und Chemieindustrie sowie für politische Entscheidungsträger und Forschungsinstitutionen von großer Relevanz.

- **Industrieunternehmen** aus den Bereichen Lebensmittelproduktion, Bioraffinerien und bio-basierte Materialien können von den technologischen Innovationen profitieren, indem sie neue Verwertungsketten für Reststoffe integrieren und ihre Produktionsprozesse optimieren.
- **Politische Entscheidungsträger** und **Förderinstitutionen** können die Ergebnisse als Grundlage für zukünftige Gesetzgebungen, Förderprogramme und Richtlinien für die Bioökonomie nutzen, da diese Konzepte zur Erreichung von Nachhaltigkeits- und Klimazielen beitragen können.
- **Forschungsinstitute und Universitäten** können auf den Ergebnissen aufbauen, um weiterführende wissenschaftliche Untersuchungen durchzuführen, insbesondere zur Optimierung der ökologischen und wirtschaftlichen Bilanzierung der Systeme.
- **Große Landwirtschaftliche Betriebe** könnten ebenfalls Interesse haben, da einige Konzepte (wie die Verwertung von Getreidereststoffen) direkt an die landwirtschaftliche Produktion gekoppelt sind und eine zusätzliche Einkommensquelle bieten könnten.

Allgemein kann festgehalten werden, dass die techno-ökonomische Analyse ein vielversprechendes Tool ist, um Innovationen früh auf deren industrielle Umsetzbarkeit zu prüfen. Kombiniert mit einer Ökobilanzierung lassen sich auch ökologische Herausforderungen früh erkennen.

Der Aufwand für die Erstellung der erforderlichen Informationen ist zwar hoch, aber die techno-ökonomische Analyse ermöglicht es früh, auf besonders wertvolle Innovationspfade zu setzen.

Erst eine quantitative Bewertung (techno-ökonomisch und ökologisch) liefert jedoch eine robuste Datengrundlage für die betriebliche / politische / fördertechnische Entscheidungsfindung. Sie liefert Antworten auf die Frage wie die innovative Wertschöpfungskette ökologisch und techno-ökonomisch gegenüber dem Referenzsystem abschneidet. Die frühe quantitative Bewertung ermöglicht außerdem die Identifikation und / oder Umsetzung von Verbesserungspotenzialen schon in der Planungsphase (einzelne Betriebsmittel, Energiekonzept, etc.).

7 Ausblick und Empfehlungen

Methodisch:

Die techno-ökonomische Analyse bietet ein hervorragendes Werkzeug, um Innovationen frühzeitig auf deren industrielle Umsetzbarkeit zu prüfen. Wohlwissend, dass diese Methode nicht die einzige Herangehensweise sein darf, anhand derer über die Fortführung von Forschungstätigkeiten entschieden wird, sollte die Datenlage im Rahmen von Forschungsprojekten hinsichtlich der wirtschaftlichen Machbarkeit frühzeitig erfasst bzw. erarbeitet werden. Dafür könnten Anforderungen in Ausschreibungen der Forschungsförderung aufgenommen werden, die die Datenlage oder zumindest eine quantitative Bewertung durch die Forschungsgruppen im Endbericht eines Projekts enthält.

Inhaltlich:

Das Marktpotenzial für die entwickelten Konzepte ist vielversprechend, da der Bedarf an nachhaltigen Materialien und Energiequellen weiterwächst. Bioraffinerie-Konzepte, die sowohl ökologische als auch wirtschaftliche Vorteile bieten, könnten eine wichtige Rolle in der Zukunft der Bioökonomie spielen. Besonders die Herstellung von biobasierten Kunststoffen und chemischen Vorprodukten, die fossile Alternativen ersetzen, hat großes Marktpotenzial, insbesondere in der Verpackungs- und Bauindustrie. Der Einsatz von Getreidereststoffen und Molkereiprodukten könnte den Herstellern helfen, ihre Abfallströme zu reduzieren und gleichzeitig wertvolle neue Produkte zu erzeugen.

Im Rahmen der nächsten Projektphase werden wir gezielt den Dialog mit relevanten Branchenvertretern aus der Molkerei-, Mühlen- und Chemieindustrie suchen. Ziel dieser Gespräche ist es, die Ergebnisse des Projekts umfassend zu präsentieren und deren Interpretation gemeinsam mit den Stakeholdern zu erörtern. In diesen Austauschformaten wollen wir herausfinden, inwiefern die gewonnenen Erkenntnisse für die Praxis von Interesse sind und ob weiterführende, vertiefende Aktivitäten, etwa zur Optimierung der untersuchten Wertschöpfungsketten, in diesen Industrien Anklang finden.

Besonders relevant sind hierbei mögliche Innovations- und Kooperationspotenziale, die in diesen Bereichen identifiziert werden könnten. Der Austausch mit den Branchenvertretern wird zudem dazu beitragen, Hemmnisse oder Herausforderungen, beispielsweise auf rechtlicher oder technischer Ebene, frühzeitig zu erkennen und gezielt anzugehen. Die Gespräche sollen bis Dezember 2024 abgeschlossen sein, um die Weichen für mögliche nächste Schritte und gemeinsame Projekte frühzeitig zu stellen und die Dissemination der Projektergebnisse weiter voranzutreiben.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick themenrelevante Projekte /Studien in Österreich.....	14
Tabelle 2: Themenrelevante Projektförderungen für Reststoffe aus der Lebensmittelproduktion aus dem Arbeitsprogramm von CBE JU.....	15
Tabelle 3: Bewertungskriterien für die qualitative Bewertung der innovativen Wertschöpfungsketten für Lebensmittel-Reststoffe.	18
Tabelle 4: Anfall und Zusammensetzung unvermeidbarer Lebensmittel Reststoffe in Österreich in Tonnen pro Jahr.	22
Tabelle 5: Zusammenfassung der Charakteristika der in Österreich anfallenden Lebensmittel-Reststoff-Klassen in Bezug auf die Nutzung in innovativen Wertschöpfungsketten (Bioraffinerien).	25
Tabelle 6: Auflistung der für die Identifikation innovativer Verwertungswege berücksichtigten Quellen.	28
Tabelle 7: Qualitative Bewertung der iWSK für Reststoffe aus Getreidemühlen (I).....	31
Tabelle 8: Qualitative Bewertung der iWSK für Reststoffe aus Getreidemühlen (II).....	32
Tabelle 9: Qualitative Bewertung der iWSK für Reststoffe aus Molkereien (I).....	34
Tabelle 10: Qualitative Bewertung der iWSK für Reststoffe aus Molkereien (II).....	35
Tabelle 11: Ergebnisse der quantitativen Bewertung der ökologischen und techno-ökonomischen Aspekte der innovativen Wertschöpfungsketten sowie Vergleich zur qualitativen Bewertung. (HP ... Hauptprodukt; NP ... Nebenprodukt).....	38
Tabelle 12: Datenverfügbarkeit Prozess: Auswahlmöglichkeiten und deren Bewertung.....	50
Tabelle 13: Datenverfügbarkeit Ökologie: Auswahlmöglichkeiten und deren Bewertung	50
Tabelle 14: Datenverfügbarkeit Ökonomie: Auswahlmöglichkeiten und deren Bewertung.....	51
Tabelle 15: TRL: Auswahlmöglichkeiten und deren Bewertung	51
Tabelle 16: Komplexitätsindex: Auswahlmöglichkeiten und deren Bewertung	51
Tabelle 17: Temperaturniveau: Auswahlmöglichkeiten und deren Bewertung	52
Tabelle 18: Anforderungen an Komponenten: Auswahlmöglichkeiten und deren Bewertung.....	52
Tabelle 19: Betriebsmittel - Umweltbelastung: Auswahlmöglichkeiten und deren Bewertung	52
Tabelle 20: Verh. Produktpreis/ Referenzproduktpreis: Auswahlmöglichkeiten und deren Bewertung	53
Tabelle 21: Marktvolumen: Auswahlmöglichkeiten und deren Bewertung	53
Tabelle 22: Größe: Auswahlmöglichkeiten und deren Bewertung	53
Tabelle 23: Angenommene Kosten für Hilfs- & Betriebsstoffe.	54
Tabelle 24: Angenommene Kosten Rohstoffe und biobasierte Produkte & Nebenprodukte.	55
Tabelle 25: Angenommene Kosten für Energie.....	55

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Systemgrenzen und berücksichtigte Prozesse des Bioraffinerie-Systems sowie des Referenzsystems für die ökologische und techno-ökonomische Bewertung.....	19
Abbildung 2: Anfall unvermeidbarer Lebensmittel Reststoffe in Österreich in Tonnen Trockenmasse pro Jahr (gesamt: 562.140 t TM).....	21
Abbildung 3: Zusammensetzung von Lebensmittel Reststoffen nach Agroscope 2017.....	22
Abbildung 4: Reststoffmengen in Österreich nach Haupt-Inhaltsstoffen in Tonnen pro Jahr (relevantes Potenzial).....	23
Abbildung 5: In der Literatur beschriebene innovative Wertschöpfungsketten für die in Österreich anfallenden 13 Lebensmittel-Reststoff-Klassen.....	24
Abbildung 6: innovative Wertschöpfungsketten für Reststoffe aus Getreidemühlen.....	30
Abbildung 7: innovative Wertschöpfungsketten für Reststoffe aus Molkereien	30
Abbildung 8: Qualitative Bewertung der iWSK für Reststoffe aus Getreidemühlen – grafische Darstellung (Die Farbe der Fläche stellt die Datenverfügbarkeit dar: grün: sehr gut Verfügbarkeit für Prozess / Ökologie / Ökonomie; rot: keine detaillierten Daten verfügbar).	33
Abbildung 9: Qualitative Bewertung der iWSK für Reststoffe aus Molkereien – grafische Darstellung (Die Farbe der Fläche stellt die Datenverfügbarkeit dar: grün: sehr gut Verfügbarkeit für Prozess / Ökologie / Ökonomie; rot: keine detaillierten Daten verfügbar).	36
Abbildung 10: Systemgrenzen und Referenzsysteme: Getreidereststoffe – PLA & Tierfutter	56
Abbildung 11: Systemgrenzen und Referenzsysteme: Getreidereststoffe – Bernsteinsäure & Tierfutter	56
Abbildung 12: Systemgrenzen und Referenzsysteme: Getreidereststoffe – FDCA & 1,5-PDO & Aktivkohle.....	57
Abbildung 13: Systemgrenzen und Referenzsysteme: Reststoffe aus Molkereien – PHA & Energie & Nährstoffe (Gärrest).....	58
Abbildung 14: Systemgrenzen und Referenzsysteme: Reststoffe aus Molkereien – protein-basierte Kunststoffe	58
Abbildung 15: Ökologische Bewertung des Bioraffinerie- und Referenz-Systems: Getreidereststoffe – PLA & Tierfutter.....	59
Abbildung 16: Ökologische Bewertung des Bioraffinerie- und Referenz-Systems: Getreidereststoffe – Bernsteinsäure & Tierfutter	60
Abbildung 17: Ökologische Bewertung des Bioraffinerie- und Referenz-Systems: Getreidereststoffe – FDCA & 1,5-PDO & Aktivkohle.....	60
Abbildung 18: Ökologische Bewertung des Bioraffinerie- und Referenz-Systems: Reststoffe aus Molkereien – PHA & Energie & Nährstoffe (Gärrest).....	61
Abbildung 19: Ökologische Bewertung des Bioraffinerie- und Referenz-Systems: Reststoffe aus Molkereien – protein-basierte Kunststoffe.....	61

Literaturverzeichnis

- Agroscope. Fütterungsempfehlungen für Wiederkäuer (Grünes Buch). Posieux, Schweiz; 2017.
- Alonso E. The role of supercritical fluids in the fractionation pretreatments of a wheat bran-based biorefinery. *J Supercrit Fluids*. 2018;133:603–14.
- Amaro TMMM, Rosa D, Comi G, Iacumin L. Prospects for the Use of Whey for Polyhydroxyalkanoate (PHA) Production. *Front Microbiol*. 2019;10:992.
- Apprich S, Tirpanalan Ö, Hell J, Reisinger M, Böhmendorfer S, Siebenhandl-Ehn S, Novalin S, Kneifel W. Wheat bran-based biorefinery 2: Valorization of products. *LWT - Food Sci Technol*. 2014;56(2):222–31.
- Asunis F, De Gioannis G, Dessì P, Ispato M, Lens PNL, Muntoni A, Poletti A, Pomi R, Rossi A, Spiga D. The dairy biorefinery: Integrating treatment processes for cheese whey valorisation. *J Environ Manage*. 2020;276:111240.
- Asunis F, De Gioannis G, Francini G, Lombardi L, Muntoni A, Poletti A, Pomi R, Rossi A, Spiga D. Environmental life cycle assessment of polyhydroxyalkanoates production from cheese whey. *Waste Manag*. 2021;132:31–43.
- Bacenetti J, Bava L, Schievano A, Zucali M. Whey protein concentrate (WPC) production: Environmental impact assessment. *J Food Eng*. 2018;224:139–47.
- Balandrán-Quintana RR, Mercado-Ruiz JN, Mendoza-Wilson AM. Wheat Bran Proteins: A Review of Their Uses and Potential. *Food Rev Int*. 2015;31(3):279–93.
- Banger G, Kaya K, Omwene P, Shakoory S, Karagündüz A, Keskinler B, Nikerel E. Delactosed Whey Permeate as Substrate for Succinic Acid Fermentation by *Actinobacillus succinogenes*. *Waste Biomass Valorization*. 2021;12(10):5481–9.
- Barile D, Tao N, Lebrilla CB, Coisson J-D, Arlorio M, German JB. Permeate from cheese whey ultrafiltration is a source of milk oligosaccharides. *Int Dairy J*. 2009;19(9):524–30.
- Buchanan D, Martindale W, Romeih E, Hebishy E. Recent advances in whey processing and valorisation: Technological and environmental perspectives. *Int J Dairy Technol*. 2023;76(2):291–312.
- Buchmaier J, Krampfl S, Eibinger M, Kaira GS, Nidetzky B, Muster-Slawitsch B. Continuous oscillatory flow as process intensification strategy in protein extraction from brewer's spent grain. *Chem Eng Process - Process Intensif*. 2024;200:109772.
- Buranov AU, Mazza G. Extraction and purification of ferulic acid from flax shives, wheat and corn bran by alkaline hydrolysis and pressurised solvents. *Food Chem*. 2009;115(4):1542–8.
- Caldeira C, Vlysidis A, Fiore G, De Laurentiis V, Vignali G, Sala S. Sustainability of food waste biorefinery: A review on valorisation pathways, techno-economic constraints, and environmental assessment. *Bioresour Technol*. 2020;312:123575.
- Carvalho P, Costa CE, Baptista SL, Domingues L. Yeast cell factories for sustainable whey-to-ethanol valorisation towards a circular economy. *Biofuel Res J*. 2021;8(4):1529–49.

- Chalermthai B, Ashraf MT, Bastidas-Oyanedel J-R, Olsen BD, Schmidt JE, Taher H. Techno-Economic Assessment of Whey Protein-Based Plastic Production from a Co-Polymerization Process. *Polymers*. 2020;12(4):847.
- Chalermthai B, Giwa A, Schmidt JE, Taher H. Life cycle assessment of bioplastic production from whey protein obtained from dairy residues. *Bioresour Technol Rep*. 2021;15:100695.
- Chandra R, Castillo-Zacarias C, Delgado P, Parra-Saldívar R. A biorefinery approach for dairy wastewater treatment and product recovery towards establishing a biorefinery complexity index. *J Clean Prod*. 2018;183:1184–96.
- Conde Mejía C, Conde Báez L. Biorefinery, an integrated concept: Analysis of bioethanol and aromas production from whey. *Biofuels Biorefining*. Elsevier; 2022. p. 447–71.
- Danciu C-A, Tulbure A, Stanciu M-A, Antonie I, Capatana C, Zerbeş MV, Giurea R, Rada EC. Overview of the Sustainable Valorization of Using Waste and By-Products in Grain Processing. *Foods*. 2023;12(20):3770.
- Du C, Lin SKC, Koutinas A, Wang R, Dorado P, Webb C. A wheat biorefining strategy based on solid-state fermentation for fermentative production of succinic acid. *Bioresour Technol*. 2008;99(17):8310–5.
- ElMekawy A, Diels L, De Wever H, Pant D. Valorization of Cereal Based Biorefinery Byproducts: Reality and Expectations. *Environ Sci Technol*. 2013;47(16):9014–27.
- Favaro L, Basaglia M, Van Zyl WH, Casella S. Using an efficient fermenting yeast enhances ethanol production from unfiltered wheat bran hydrolysates. *Appl Energy*. 2013;102:170–8.
- Gabardo S, Pereira GF, Klein MP, Rech R, Hertz PF, Ayub MAZ. Dynamics of yeast immobilized-cell fluidized-bed bioreactors systems in ethanol fermentation from lactose-hydrolyzed whey and whey permeate. *Bioprocess Biosyst Eng*. 2016;39(1):141–50.
- Hagman L, Eklund M, Svensson N. Assessment of By-product Valorisation in a Swedish Wheat-Based Biorefinery. *Waste Biomass Valorization*. 2020;11(7):3567–77.
- IEA Bioenergy Task 42. Factsheet: 2-platform (C6 sugar, lipids) biorefinery to produce the biopolymer PLA & animal feed from food waste. 2020.
- Jungmeier G. The Biorefinery Complexity Index. JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH; 2014 p. 36.
- Katileviciute A, Plakys G, Budreviciute A, Onder K, Damiati S, Kodzius R. A Sight to Wheat Bran: High Value-Added Products. *Biomolecules*. 2019;9(12):887.
- Kim H, Lee S, Ahn Y, Lee J, Won W. Sustainable Production of Bioplastics from Lignocellulosic Biomass: Technoeconomic Analysis and Life-Cycle Assessment. *ACS Sustain Chem Eng*. 2020;8(33):12419–29.
- Kwan TH, Hu Y, Lin CSK. Techno-economic analysis of a food waste valorisation process for lactic acid, lactide and poly(lactic acid) production. *J Clean Prod*. 2018;181:72–87.

- Lam C-M, Yu IKM, Hsu S-C, Tsang DCW. Life-cycle assessment on food waste valorisation to value-added products. *J Clean Prod.* 2018;199:840–8.
- Lam KF, Leung CCJ, Lei HM, Lin CSK. Economic feasibility of a pilot-scale fermentative succinic acid production from bakery wastes. *Food Bioprod Process.* 2014;92(3):282–90.
- Lappa I, Papadaki A, Kachrimanidou V, Terpou A, Koulougliotis D, Eriotou E, Kopsahelis N. Cheese Whey Processing: Integrated Biorefinery Concepts and Emerging Food Applications. *Foods.* 2019;8(8):347.
- Leung CCJ, Cheung ASY, Zhang AY-Z, Lam KF, Lin CSK. Utilisation of waste bread for fermentative succinic acid production. *Biochem Eng J.* 2012;65:10–5.
- Lindorfer J, Lettner M, Fazeni K, Rosenfeld D, Annevelink B, Mandl M. Technical, Economic and Environmental Assessment of Biorefinery Concepts. *IEA Bioenergy: Task 42;* 2019.
- Liu L, Zhao M, Liu X, Zhong K, Tong L, Zhou X, Zhou S. Effect of steam explosion-assisted extraction on phenolic acid profiles and antioxidant properties of wheat bran. *J Sci Food Agric.* 2016;96(10):3484–91.
- Liu P, Zheng Z, Xu Q, Qian Z, Liu J, Ouyang J. Valorization of dairy waste for enhanced D-lactic acid production at low cost. *Process Biochem.* 2018;71:18–22.
- Longanesi L, Frascari D, Spagni C, DeWever H, Pinelli D. Succinic acid production from cheese whey by biofilms of *Actinobacillus succinogenes* : packed bed bioreactor tests. *J Chem Technol Biotechnol.* 2018;93(1):246–56.
- Madhukumar MS, Muralikrishna G. Fermentation of xylo-oligosaccharides obtained from wheat bran and Bengal gram husk by lactic acid bacteria and bifidobacteria. *J Food Sci Technol.* 2012;49(6):745–52.
- Martins GN, Ureta MM, Tymczyszyn EE, Castilho PC, Gomez-Zavaglia A. Technological Aspects of the Production of Fructo and Galacto-Oligosaccharides. *Enzymatic Synthesis and Hydrolysis.* *Front Nutr.* 2019;6:78.
- Nayeem M, Chauhan K, Khan S, Rattu G, Dhaka RK, Sidduqui H. Optimization of low-cost substrate for the production of single cell protein using *Kluyveromyces marxianus*. *Pharma Innov J.* 2017;6(8):22–5.
- Nemes SA, Călinoiu LF, Dulf FV, Fărcas AC, Vodnar DC. Integrated Technology for Cereal Bran Valorization: Perspectives for a Sustainable Industrial Approach. *Antioxidants.* 2022;11(11):2159.
- Ohkouchi Y, Inoue Y. Direct production of l(+)-lactic acid from starch and food wastes using *Lactobacillus manihotivorans* LMG18011. *Bioresour Technol.* 2006;97(13):1554–62.
- Omwene PI, Yagcioglu M, Ocal Sarihan ZB, Karagunduz A, Keskinler B. Recovery of succinic acid from whey fermentation broth by reactive extraction coupled with multistage processes. *J Environ Chem Eng.* 2020;8(5):104216.
- Onipe OO, Ramashia SE, Jideani AIO. Wheat Bran Modifications for Enhanced Nutrition and Functionality in Selected Food Products. *Molecules.* 2021;26(13):3918.

- Patsioura A, Galanakis CM, Gekas V. Ultrafiltration optimization for the recovery of β -glucan from oat mill waste. *J Membr Sci.* 2011;373(1–2):53–63.
- Pladerer C, Hietler P. Abfallvermeidung in der österreichischen Lebensmittelproduktion. *Österr Wasser- Abfallwirtsch.* 2019;71(5–6):238–45.
- Prückler M, Siebenhandl-Ehn S, Apprich S, Höltinger S, Haas C, Schmid E, Kneifel W. Wheat bran-based biorefinery 1: Composition of wheat bran and strategies of functionalization. *LWT - Food Sci Technol.* 2014;56(2):211–21.
- Reinberg V, Kisser J, Biebl A, Kantauer I, Edlinger J, Müller M, Gronalt M, Niederwieser J, Ganglberger E, Thaler J, Steffl T. Austrian Biocycles. Biobasierte Industrie als Bestandteil der Kreislaufwirtschaft. BMK; 2020.
- Reisinger M, Tirpanalan Ö, Prückler M, Huber F, Kneifel W, Novalin S. Wheat bran biorefinery – A detailed investigation on hydrothermal and enzymatic treatment. *Bioresour Technol.* 2013;144:179–85.
- Rocha JM, Guerra A. On the valorization of lactose and its derivatives from cheese whey as a dairy industry by-product: an overview. *Eur Food Res Technol.* 2020;246(11):2161–74.
- Rudjito RC. Valorisation of cereal by-products: a biorefinery approach. [Stockholm, Sweden]: KTH Royal Institute of Technology; 2022.
- Safaripour M, Hossain KG, Ulven CA, Pourhashem G. Environmental impact tradeoff considerations for wheat bran-based biocomposite. *Sci Total Environ.* 2021;781:146588.
- Samanta AK, Jayapal N, Kolte AP, Senani S, Sridhar M, Dhali A, Suresh KP, Jayaram C, Prasad CS. Process for Enzymatic Production of Xylooligosaccharides from the Xylan of Corn Cobs: Xylooligosaccharides from Corn Cobs. *J Food Process Preserv.* 2015;39(6):729–36.
- Sebastián-Nicolás JL, González-Olivares LG, Vázquez-Rodríguez GA, Lucho-Constantino CA, Castañeda-Ovando A, Cruz-Guerrero AE. Valorization of whey using a biorefinery. *Biofuels Bioprod Biorefining.* 2020;14(5):1010–27.
- Skendi A, Zinoviadou KG, Papageorgiou M, Rocha JM. Advances on the Valorisation and Functionalization of By-Products and Wastes from Cereal-Based Processing Industry. *Foods.* 2020;9(9):1243.
- Szczerba H, Komoń-Janczara E, Dudziak K, Waśko A, Targoński Z. A novel biocatalyst, *Enterobacter aerogenes* LU2, for efficient production of succinic acid using whey permeate as a cost-effective carbon source. *Biotechnol Biofuels.* 2020;13(1):96.
- Vera C, Guerrero C, Illanes A. Trends in lactose-derived bioactives: synthesis and purification. *Syst Microbiol Biomanufacturing.* 2022;2(3):393–412.
- Zandona E, Blažić M, Režek Jambrak A. Whey Utilisation: Sustainable Uses and Environmental Approach. *Food Technol Biotechnol.* 2021;59(2):147–61.

Abkürzungen

BHKW	Blockheizkraftwerk
CED	Culimated Energy Demand (kumulierter Energieaufwand)
5-HMF	5-Hydroxymethylfurfural
FDCA	Furandicarboxysäure
GOS	Galaktooligosaccharide
GWP	Global Warming Potential (Treibhausgaspotenzial)
1,5-PDO	1,5-Pentandiol
PLA	Poly lactide
PHA	Polyhydroxyalkanoate
SCP	single cell protein
WPC	whey protein concentrate (Molkeproteinkonzentrat)
WPI	whey protein isolate (Molkeproteinisolat)
BIC	Bio-based Industries Consortium
CBE JU	Circular Bio-based Europe
TRL	technology readiness level

Anhang

Qualitative Bewertung: Bewertungskriterien

Tabelle 12: Datenverfügbarkeit Prozess: Auswahlmöglichkeiten und deren Bewertung

Datenverfügbarkeit Prozess	Bewertung
qualitative Beschreibung 1 Prozessschritt	0%
qualitative Beschreibung Gesamtkonzept	25%
Massen- ODER Energiebilanz einzelner Prozessschritte	50%
Massen- ODER Energiebilanz Gesamtkonzept	75%
det. Beschr. Anlagenanforderungen bzw. Dimensionierung	75%
vollständige Energie- und Massenbilanz Gesamtkonzept	100%

Tabelle 13: Datenverfügbarkeit Ökologie: Auswahlmöglichkeiten und deren Bewertung

Datenverfügbarkeit Ökologie	Bewertung
keine LCA	0%
LCA 1 Prozess in einer Wirkungskategorie	25%
LCA 1 Prozess mehrere Wirkungskategorien	50%
LCA aller Prozesse in einer Wirkungskategorie	75%
LCA aller Prozesse mehrere Wirkungskategorien	100%

Tabelle 14: Datenverfügbarkeit Ökonomie: Auswahlmöglichkeiten und deren Bewertung

Datenverfügbarkeit Ökonomie	Bewertung
keine Kostenbetrachtung	0%
Investitionskostenabschätzung	50%
Techno-ökonomische Bewertung	100%

Tabelle 15: TRL: Auswahlmöglichkeiten und deren Bewertung

TRL	Bewertung
1 bis <3	0%
3 bis <5	25%
5 bis <7	50%
7 bis <9	75%
9	100%

Tabelle 16: Komplexitätsindex: Auswahlmöglichkeiten und deren Bewertung

Komplexitätsindex	Bewertung
Bioraf. zu Ref. = 1	100%
Bioraf. zu Ref. = 2	75%
Bioraf. zu Ref. = 3	50%
Bioraf. zu Ref. = 4	25%
Bioraf. zu Ref. = 5	0%

Tabelle 17: Temperaturniveau: Auswahlmöglichkeiten und deren Bewertung

Temperaturniveau	Bewertung
Umgebungstemperatur	100%
30-50°C	75%
>50-100°C	50%
>100-500°C	25%
>500°C	0%

Tabelle 18: Anforderungen an Komponenten: Auswahlmöglichkeiten und deren Bewertung

Anforderungen an Komponenten	Bewertung
Anforderung: LM-Qualität	50%
Sterilität	50%
keine bes. Anforderungen	100%

Tabelle 19: Betriebsmittel - Umweltbelastung: Auswahlmöglichkeiten und deren Bewertung

Betriebsmittel - Umweltbelastung	Bewertung
keine umweltbelastenden BM	100%
relevante Mengen an Säuren / Basen	75%
relevante Mengen an umweltbelastenden BM	50%
Extraktionsmittel - biobasiert	75%
Extraktionsmittel - umweltbelastend	25%
Katalysatoren - Edelmetalle	25%
Katalysatoren - organische Substanzen	50%

Tabelle 20: Verh. Produktpreis/ Referenzproduktpreis: Auswahlmöglichkeiten und deren Bewertung

Verh. Produktpreis/ Referenzproduktpreis	Bewertung
0 bis 1	100%
>1 bis 2	75%
>2 bis 5	50%
>5 bis 10	25%
>10	0%

Tabelle 21: Marktvolumen: Auswahlmöglichkeiten und deren Bewertung

Marktvolumen	Bewertung
niedrig	33%
mittel	66%
hoch	100%

Tabelle 22: Größe: Auswahlmöglichkeiten und deren Bewertung

Größe	Bewertung
Anteil an Aufkommen in AT 0%	75%
Anteil an Aufkommen in AT 10%	100%
Anteil an Aufkommen in AT 20%	75%
Anteil an Aufkommen in AT 50%	50%
Anteil an Aufkommen in AT 100%	0%

Techno-ökonomische Bewertung: Angenommene Kosten

Tabelle 23: Angenommene Kosten für Hilfs- & Betriebsstoffe.

Hilfs- & Betriebsstoffe	EUR/kg
HCl	0.755
Magnesium Carbonat	0.066
NaOH	0.400
Ca(OH) ₂	0.342
H ₂ SO ₄	0.170
NaCl	0.281
C ₂ H ₆ O	1.075
Ammonium Persulfat (APS)	0.992
Ethylendiamin	6.947
Methacrylic Anhydrid	13.233
Polyethylene glycol methyl ether methacrylate (PEGMA)	4.967
THF	2.363
γ-Valerolactone (GVL)	1.543
Thermoöl	0.011
Pt/C Katalysator	300.000
Enzyme	1.638

Tabelle 24: Angenommene Kosten Rohstoffe und biobasierte Produkte & Nebenprodukte.

Rohstoffe / biobasierte Produkte & Nebenprodukte	EUR/kg
Reststoffe aus Getreidemühlen	0.180
Molkereiabfälle	0.000
PLA	3.312
Bernsteinsäure	25.000
Furandicarboxysäure (FDCA)	1.584
1,5-Pentandiol (1,5-PDO)	3.400
PHA	4.000
protein basierte Kunststoffe	7.000
Lipide	0.645
Tierfutter	1.000
Aktivkohle	1.844
N (Reinnährstoffkosten)	1.710
P (Reinnährstoffkosten)	0.760
K (Reinnährstoffkosten)	1.030
Enzyme	1.638

Tabelle 25: Angenommene Kosten für Energie.

Energie	EUR/Einheit
Strom [kWh]	0.109
Wärme (Erdgas) [kWh]	0.108
Dampf [t]	61.263

Systemgrenzen und Referenzsysteme der innovativen Wertschöpfungsketten

Abbildung 10: Systemgrenzen und Referenzsysteme: Getreidereststoffe – PLA & Tierfutter

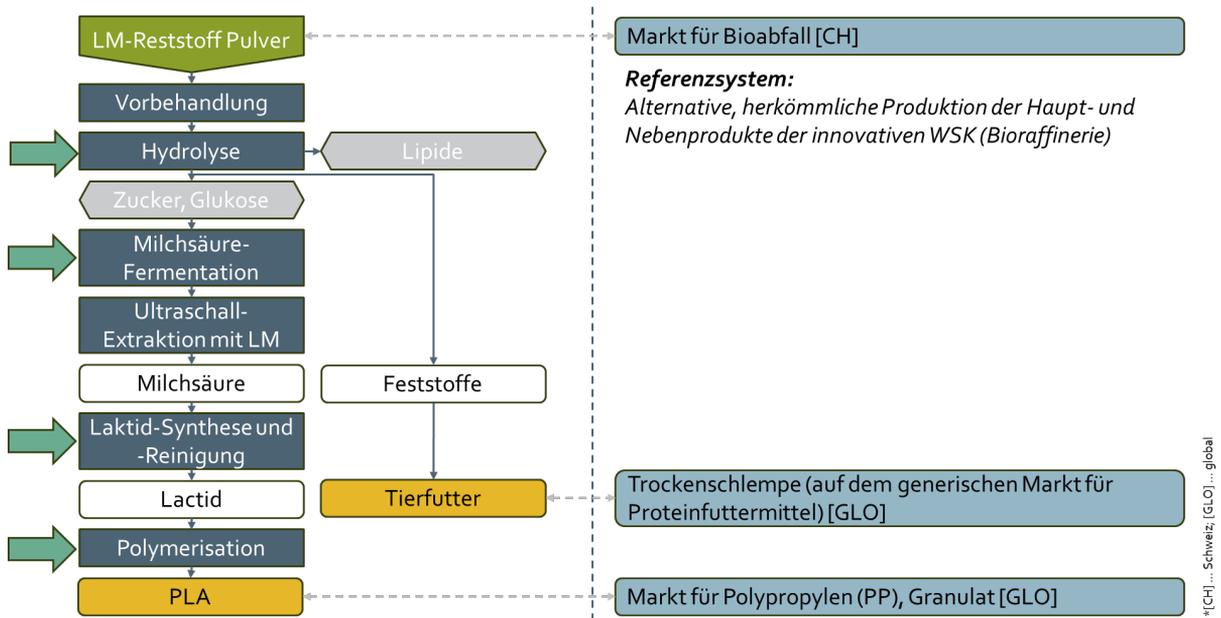


Abbildung 11: Systemgrenzen und Referenzsysteme: Getreidereststoffe – Bernsteinsäure & Tierfutter

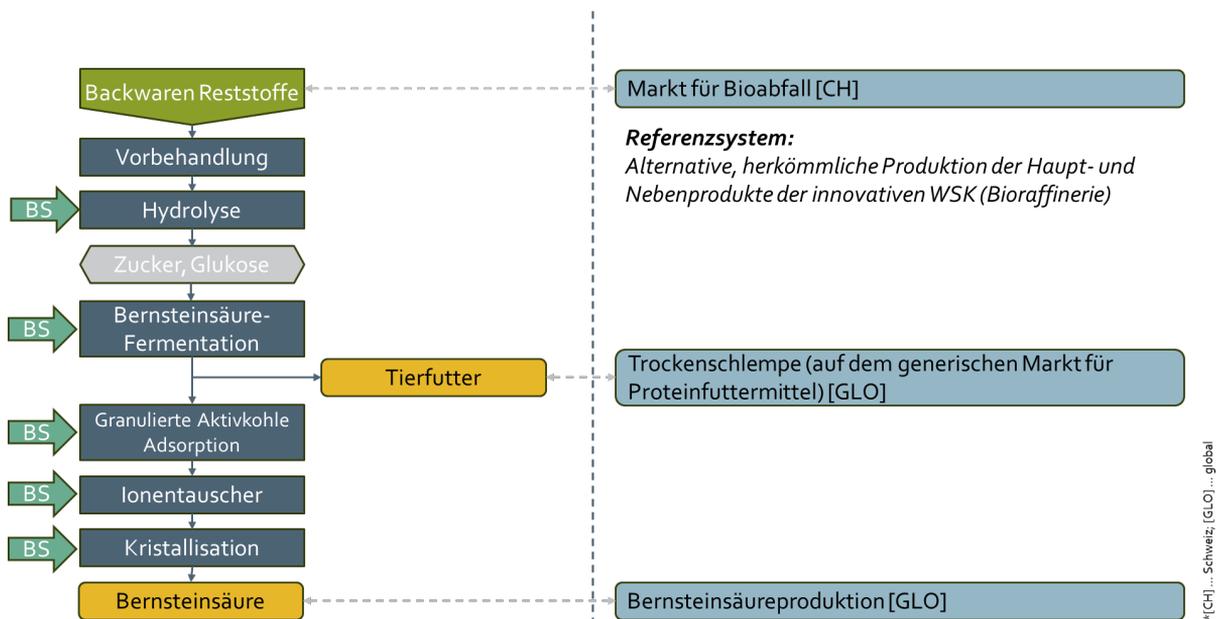


Abbildung 12: Systemgrenzen und Referenzsysteme: Getreidereststoffe – FDCA & 1,5-PDO & Aktivkohle

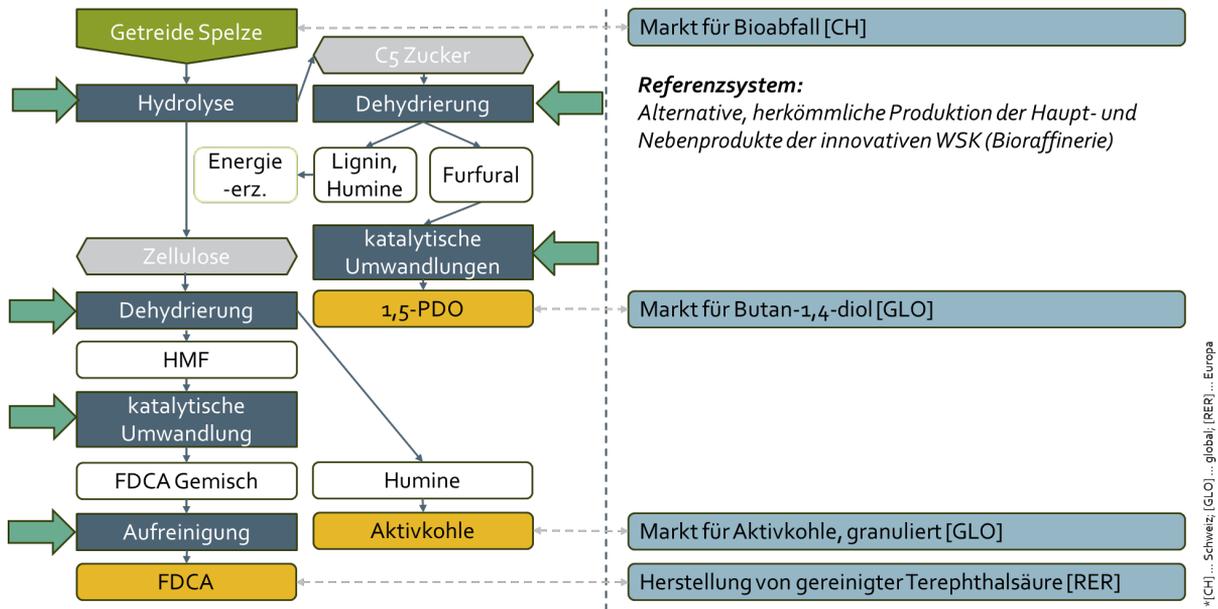


Abbildung 13: Systemgrenzen und Referenzsysteme: Reststoffe aus Molkereien – PHA & Energie & Nährstoffe (Gärrest)

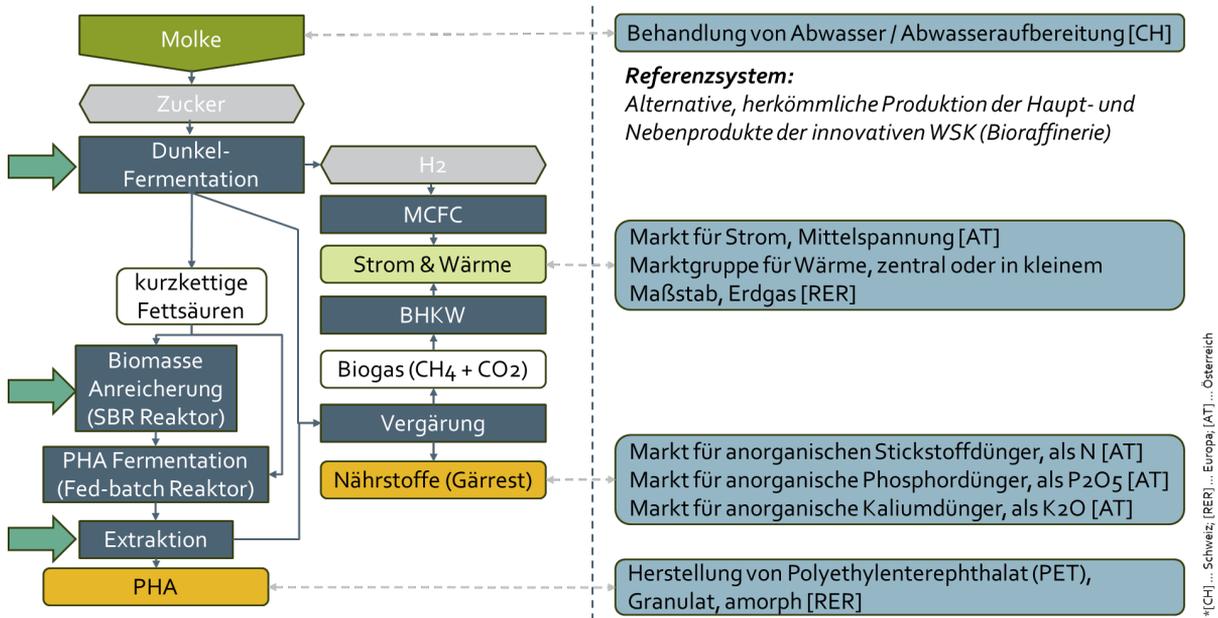
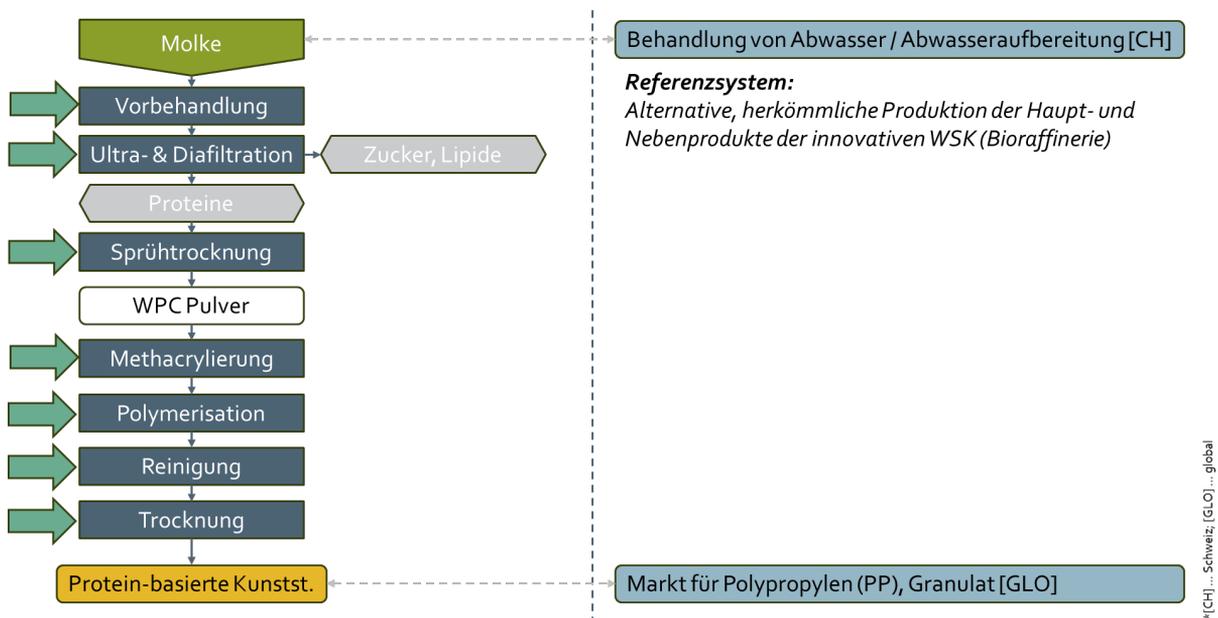


Abbildung 14: Systemgrenzen und Referenzsysteme: Reststoffe aus Molkereien – protein-basierte Kunststoffe



Ergebnisse der ökologischen Bewertung der innovativen Wertschöpfungsketten

Abbildung 15: Ökologische Bewertung des Bioaffinerie- und Referenz-Systems: Getreidereststoffe – PLA & Tierfutter

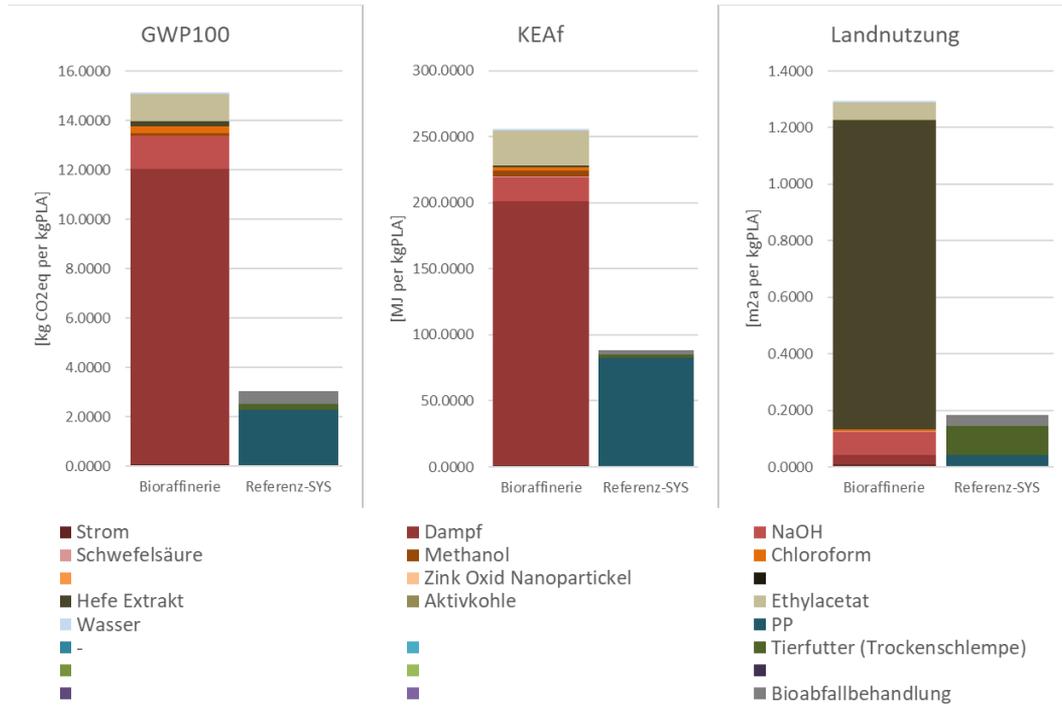


Abbildung 16: Ökologische Bewertung des Bioraffinerie- und Referenz-Systems: Getreidereststoffe – Bernsteinsäure & Tierfutter

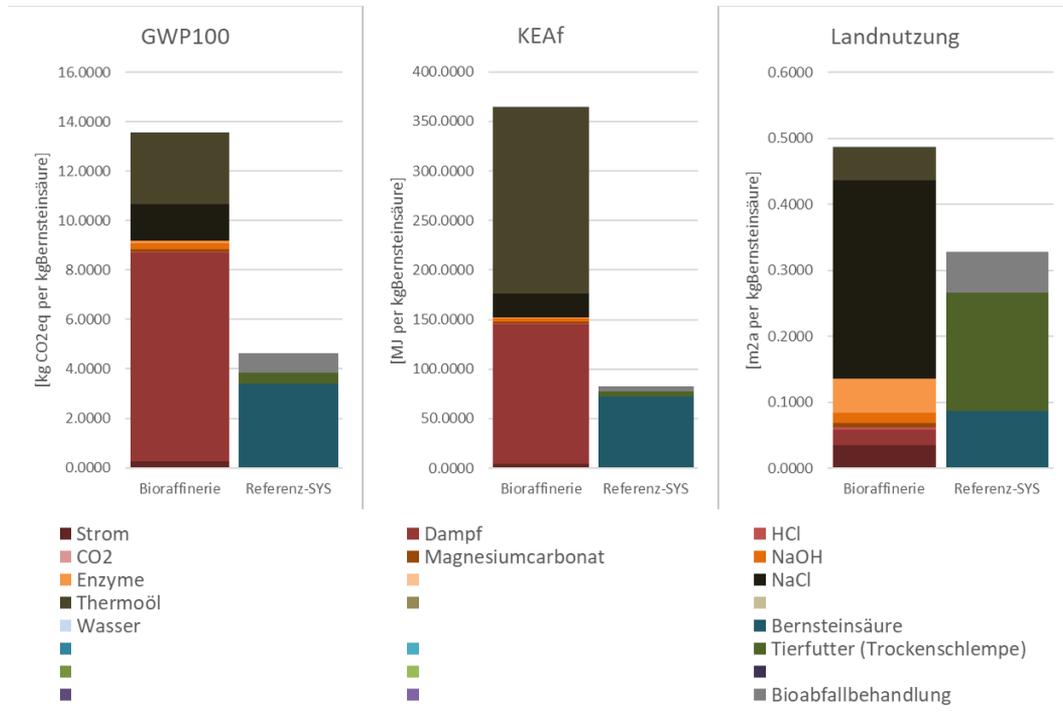


Abbildung 17: Ökologische Bewertung des Bioraffinerie- und Referenz-Systems: Getreidereststoffe – FDCA & 1,5-PDO & Aktivkohle

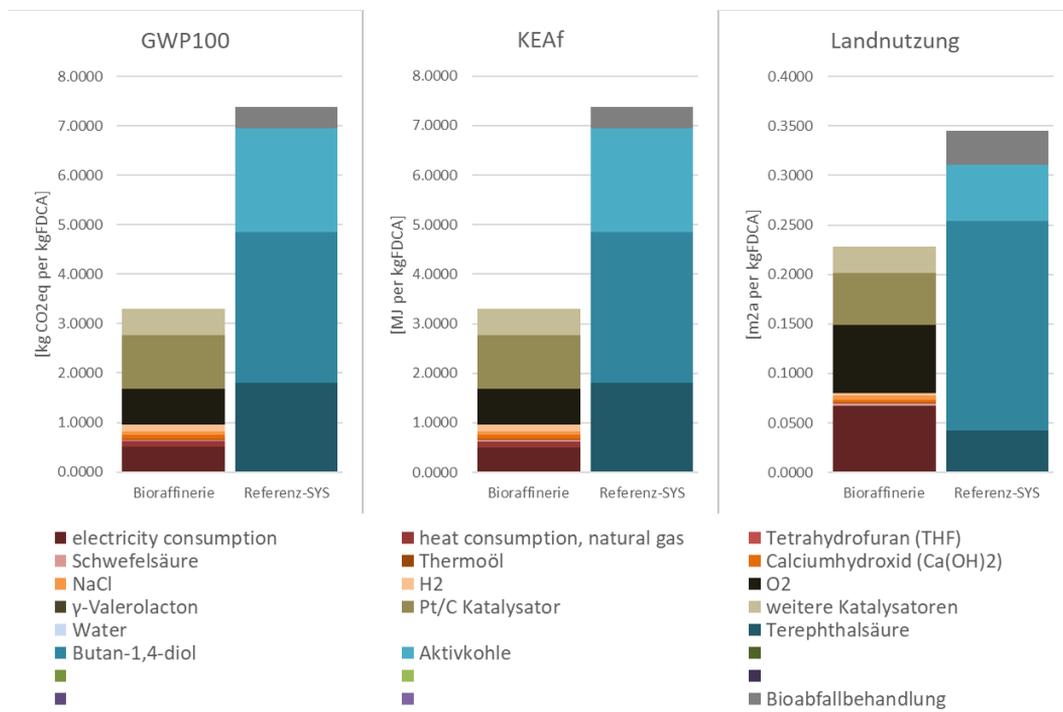


Abbildung 18: Ökologische Bewertung des Bioraffinerie- und Referenz-Systems: Reststoffe aus Molkereien – PHA & Energie & Nährstoffe (Gärrest)

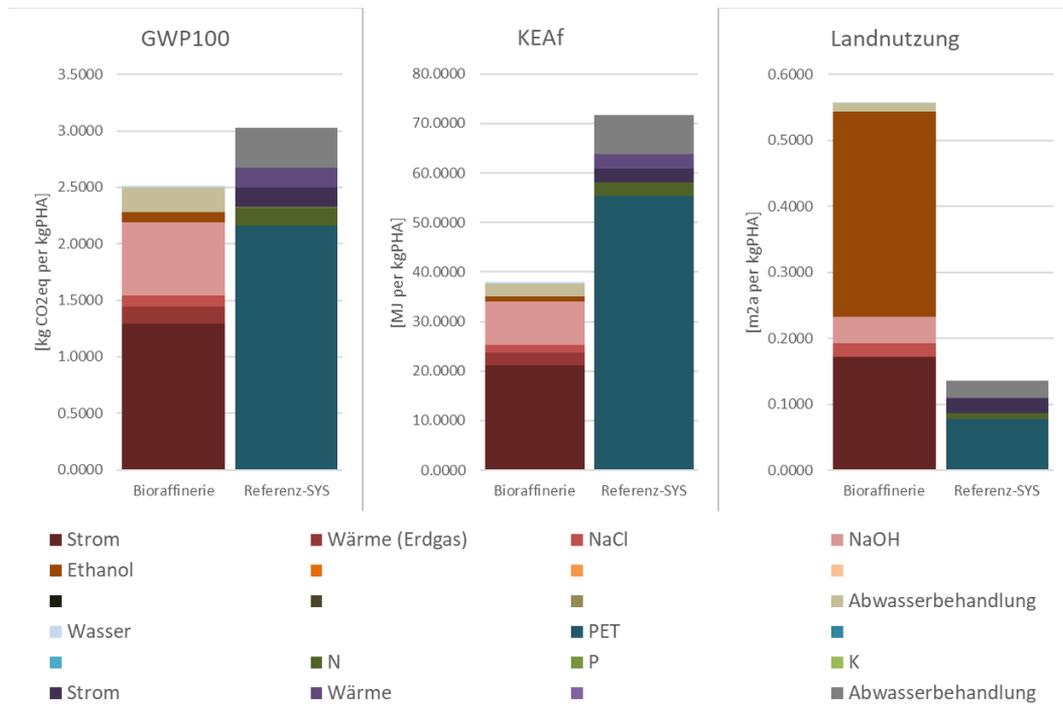
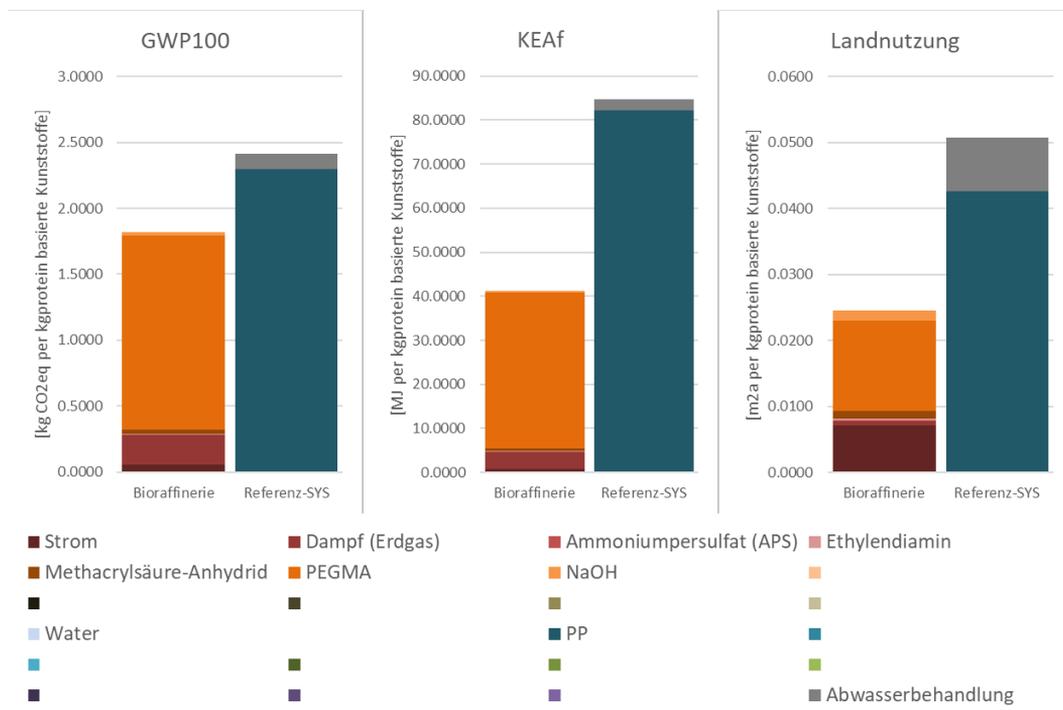


Abbildung 19: Ökologische Bewertung des Bioraffinerie- und Referenz-Systems: Reststoffe aus Molkereien – protein-basierte Kunststoffe



Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

+43 800 21 53 59

servicebuero@bmimi.gv.at

bmimi.gv.at