

IEA Industrielle Energietechnologien und Systeme (IETS) Task 11: Industrielle Bioraffinerien

Arbeitsperiode 2022 - 2024

Berichte aus Energie- und Umweltforschung 47/2026

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

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

Verantwortung und Koordination:

Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien

Leitung (interimistisch): DI (FH) Isabella Warisch

Kontakt zu „IEA Forschungsk Kooperation“: Mag.^a Sabine Mitter

Autorinnen und Autoren:

DI Dr. Bettina Muster-Slawitsch, DI Philipp Petermeier, PhD MSc (AEE – Institut für Nachhaltige Technologien)

DI (FH) Johannes Lindorfer (Energieinstitut an der Johannes Kepler Universität Linz)
Sebastian Serna-Loaiza, PhD, Univ.Prof. DI Dr.techn. Michael Harasek (Technische Universität Wien, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und technische Biowissenschaften)

Ein Projektbericht gefördert im Rahmen von



Wien, 2026. Stand: Februar 2025

Rückmeldungen: Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an iii3@bmimi.gv.at.

Disclaimer:

Dieser Ergebnisbericht wurde von der Fördernehmer:in erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit, Aktualität sowie die barrierefreie Gestaltung der Inhalte übernimmt das Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) keine Haftung.

Mit der Übermittlung der Projektbeschreibung bestätigt die Fördernehmer:in ausdrücklich, über sämtliche für die Nutzung erforderlichen Rechte – insbesondere Urheberrechte, Leistungsschutzrechte sowie etwaige Persönlichkeitsrechte abgebildeter Personen – am bereitgestellten Bildmaterial zu verfügen.

Die Fördernehmer:in räumt dem BMIMI ein unentgeltliches, nicht ausschließliches, zeitlich und örtlich unbeschränktes sowie unwiderrufliches Nutzungsrecht ein, das übermittelte Bildmaterial in allen derzeit bekannten sowie künftig bekannt werdenden Nutzungsarten für Zwecke der Berichterstattung, Dokumentation und Öffentlichkeitsarbeit im Zusammenhang mit der geförderten Maßnahme zu verwenden, insbesondere zur Veröffentlichung in Printmedien, digitalen Medien, Präsentationen und sozialen Netzwerken.

Für den Fall, dass Dritte Ansprüche wegen einer Verletzung von Rechten am übermittelten Bildmaterial gegen das BMIMI geltend machen, verpflichtet sich die Fördernehmer:in, das BMIMI vollständig schad- und klaglos zu halten. Dies umfasst insbesondere auch die Kosten einer angemessenen rechtlichen Vertretung sowie etwaige gerichtliche und außergerichtliche Aufwendungen.

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts im Rahmen der IEA Forschungsk Kooperation. Es wurde vom Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) initiiert, um österreichische Forschungsbeiträge zu den Kooperationsprojekten der Internationalen Energieagentur (IEA) zu unterstützen.

Die IEA Forschungsk Kooperationen umfassen eine breite Palette an Energiethemen mit dem Ziel Energiesysteme, Städte, Mobilitäts- und Industriesysteme fit für eine nachhaltige Zukunft bis 2050 zu machen. Auch Themen wie Gendergerechtigkeit oder Ressourcen- und Kreislaufwirtschaftsaspekte werden berücksichtigt.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements der beteiligten Forschungseinrichtungen und Unternehmen ist Österreich erfolgreich in der IEA verankert. Durch die vielen IEA-Projekte entstanden bereits wertvolle Inputs für europäische und nationale Energieinnovationen und neue internationale Standards. Auch in der Marktumsetzung konnten richtungsweisende Ergebnisse erzielt werden.

Ein wichtiges Anliegen ist es, die Projektergebnisse einer interessierten Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Daher werden alle Berichte nach dem Open Access Prinzip in der Schriftenreihe des BMIMI über die Plattform nachhaltigwirtschaften.at veröffentlicht.

Inhalt

1 Kurzfassung	8
2 Abstract	8
3 Ausgangslage	10
4 Projektinhalt	10
5 Ergebnisse	14
5.1 Industrielle Bioraffinerien	14
5.2 Emergierende Prozesstechnologien	17
5.2.1 Einsatz von oszillierenden Flow-Reaktoren	19
5.2.2 Membrandestillation zu Aufbereitung von Flüssiggärresten	23
5.2.3 Ausblick - Effekte der Einzeltechnologien für Bioraffineriekonzepte	23
5.2.4 Evaluierung von Bioraffineriekonzepten	24
5.3 Schritte zur Umsetzung	25
5.4 Instrumente zur Beurteilung von THG-Emissionen	27
5.5 Fallstudien am Weg zu Net Zero Bioraffinerien	28
6 Vernetzung und Ergebnistransfer	45
6.1 Zielgruppen und Einbindung in das Projekt	45
6.2 Kommunikation und Dissemination der Ergebnisse	46
6.3 Nationale und internationale Relevanz der Projektergebnisse	49
7 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen	50
7.1 Wichtige Erkenntnisse aus dem Projekt	50
7.2 Weiterführende Forschungsbedarfe	50
7.3 Empfehlungen für die FTI-Politik	52
Tabellenverzeichnis	53
Abbildungsverzeichnis	54
Literaturverzeichnis	55
Abkürzungen	57

1 Kurzfassung

IETS Task 11 „Industrial Biorefineries towards Sustainability“ beschäftigt sich mit der Frage, wie Bioraffinerien bestmöglich auf dem Weg zu technisch und wirtschaftlich robusten und nachhaltigen Technologie-, Prozess- und Systemkonzepten begleitet werden können. Im nationalen Beitrag zu den internationalen Aktivitäten steht hier vor allem der Subtask 2 „Technology Pathways towards Net-Zero / Negative Emission Biorefineries“ im Fokus. Hier geht es um die Frage, welche neuen Schlüsseltechnologien einen wesentlichen Beitrag zur Ressourcen- und Energieeffizienz leisten können und wie sich deren Umsetzung auf die Emissionsbilanz auswirkt. Darüber hinaus war eine wichtige Forschungsfrage der letzten Task-Periode, welche Werkzeuge benötigt werden, um Bioraffineriekonzepte im Hinblick auf Netto-Null-Emissionen bzw. negative Emissionen wissenschaftlich fundiert zu bewerten.

Im Rahmen der letzten Task-Periode konnten wertvolle Ergebnisse zu neuen Technologieentwicklungen in Bioraffinerien zusammengetragen werden. So hat sich an der AEE INTEC ein Schwerpunkt zur kaskadischen Verwertung von Lebensmittelreststoffen etabliert, in dem neue Schlüsseltechnologien (oszillierende Durchflussreaktoren und Membrandestillation) evaluiert werden: einerseits hinsichtlich ihres Einsatzpotenzials zur Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz und andererseits hinsichtlich ihrer emissionsmindernden Wirkung in den neuen Verwertungskonzepten. Dabei ist auch die Rückführung von biogenem Kohlenstoff in den Boden als ein Baustein für die Zukunft zu bewerten.

Es hat sich gezeigt, dass durch die Verankerung von Bioraffinerien im natürlichen Kohlenstoffkreislauf eine wissenschaftliche Bewertung der CO₂-Emissionen für ein Bioraffineriekonzept nur durch eine ganzheitliche Betrachtung des Lebenszyklus erfolgen kann. LCA Analysen stellen hier ein wertvolles Werkzeug für die Bewertung dar, mit umfassender Expertise bei den österreichischen Akteuren (TU Wien, E.ON).

Darüber hinaus sind belastbare Entscheidungen auf dem Weg zu Netto-Null bzw. negativen Emissionen erforderlich. Die Industrien stehen vor der Herausforderung, verschiedene Lösungswege einschlagen zu können (von der Rohstoffwahl über die Prozesstechnik, neue Verfahren, Integration von CO₂ als Rohstoff, Anbindung neuer CCU-Prozesse aus eigenen Emissionen, CCS, etc.) Aus diesem breiten Spektrum gilt es, robuste Lösungsszenarien für die Unternehmen zu entwickeln und die Risiken abzuschätzen.

In der nächsten Periode 2024-2026 wird die Task weitergeführt, weiterhin mit dem Fokus auf neu entstehende Prozesstechnologien, mit einem verstärkten Fokus auf CCU und CCS Konzepte für Bioraffinerien.

2 Abstract

IETS Task 11 "Industrial Biorefineries towards Sustainability" deals with the question of how biorefineries can best be supported on their way to technically and economically robust, sustainable technology, process and system concepts. In the national contribution to the international activities, the focus was on Subtask 2 'Technology Pathways towards Net-Zero / Negative Emission Biorefineries'. The aim is to find out which new key technologies can make a significant contribution to resource and energy efficiency and how their implementation affects the emissions balance. In addition, one of the most important research questions in the last task period was what tools are needed to scientifically assess biorefinery concepts with respect to net zero or negative emissions.

Valuable results on new technology developments in biorefineries were gathered during the last task period. For example, AEE INTEC has established a focus on the cascading utilization of food residues, in which new key technologies (oscillating flow reactors and membrane distillation) are evaluated with regard to their potential for increasing energy and resource efficiency on the one hand, and with regard to their emission reduction effect in the new utilization concepts on the other. The return of biogenic carbon to the soil will also be evaluated as a future component.

Due to the fact that biorefineries are embedded in the natural carbon cycle, it has become clear that a scientific assessment of CO₂ emissions for a biorefinery concept can only be achieved with a holistic view of the life cycle. LCA analyses are a valuable tool for this assessment, with extensive expertise from the Austrian stakeholders (TU Vienna, E.ON Energy Research Center).

In addition, robust decisions are needed on the path to net zero or negative emissions. Industries face the challenge of being able to adopt different solutions (from raw material choice to process technology, new processes, integration of CO₂ as a feedstock, integration of new CCU processes from their own emissions, CCS, etc.). Given this wide range, it is important to develop robust solution scenarios for companies and assess the risks.

The task will be continued in the next period 2024-2026, with a continued focus on emerging process technologies, including CCU and CCS concepts for biorefineries.

3 Ausgangslage

Industrielle Bioraffinerien, die eigenständig arbeiten oder in andere industrielle Prozesse integriert sind, liefern ein wachsendes Portfolio an biobasierten Produkten oder Bioenergie. Sie sind das Rückgrat einer wachsenden Bioökonomie, die das Ziel verfolgt, nachwachsende, aber begrenzt verfügbare biogene Rohstoffe einer maximalen Wertschöpfung zuzuführen. Dazu werden zunehmend integrierte Konzepte zur gekoppelten stofflichen und energetischen Nutzung entwickelt, erprobt und auch umgesetzt. Während sich die Forschung bisher auf optimale Produktionspfade für biobasierte Kraftstoffe, Materialien und Chemikalien konzentriert hat, wird es in Zukunft entscheidend sein, die Minimierung von Treibhausgasemissionen (THG) entlang der Bioraffineriepfade voranzutreiben. Damit kann nicht nur die Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen aufgelöst werden, sondern gleichzeitig können auch die Ziele des Pariser Abkommens erreicht und letztlich die Emissionen auf Netto-Null begrenzt werden.

Um diese Entwicklung zu unterstützen, bedarf es sowohl neuer, wettbewerbsfähiger Technologien für Bioraffinerieprozesse, innovativer Konzepte zur maßgeschneiderten Maximierung der Wertschöpfung für eine Vielzahl unterschiedlicher biogener Rohstoffe, als auch eines breiteren Bewusstseins für neue, befähigende Ansätze. Die Motivation für dieses Projekt liegt daher darin, dass in der internationalen Forschungslandschaft entstehende Wissen zu Bioraffinerie(prozessen) zu sammeln, aufzubereiten und zu verbreiten. Hierfür wird die Zusammenarbeit mit industrierelevanten Forschungsinstitutionen, die Vernetzung innerhalb von Industriesektoren und der Informationsaustausch mit einzelnen Expert*innen aus Industrie, Wissenschaft und Politik gesucht.

In der Vorperiode von Task 11 (2020-2022) zielte der nationale Beitrag darauf ab, eine Methodik zur Bewertung der kombinierten Ressourcen- und Energieeffizienz von Produkt- und Prozesskonzepten zu etablieren. Hierfür wurden spezielle *Key Performance Indicators* (KPIs) entwickelt, die eine Minimierung des Energiebedarfs auch für stoffliche biobasierte Nutzungspfade ermöglichen. Dieser Ansatz wurde anhand von vier Fallstudien validiert und die Ergebnisse in den internationalen Task eingebracht und verwertet.

Der nationale Fokus in der gegenständlichen Projektperiode (2022-2024) liegt auf der Erforschung von Technologiepfaden, die Bioraffinerien mit Ansätzen ausstatten, sich in Richtung Net Zero oder sogar negative Emissionen zu entwickeln. Auf österreichischer Ebene ist die Dekarbonisierung der Industrie und „Net Zero“ bereits seit Jahren ein wesentliches Thema verschiedenster Forschungsprogramme. Diese notwendige Schwerpunktsetzung wurde im nationalen Beitrag zu Task 11 speziell für Bioraffinerien als aufstrebenden Teil unserer Industrie aufgegriffen und weitergeführt. Die Projekthalte und die daraus resultierenden Ergebnisse werden in diesem Bericht dargestellt.

4 Projektinhalt

Der internationale Task 11 des Technology Collaboration Programme (TCP) für „Industrial Energy-related Technologies“ (IETS) der Internationalen Energieagentur (IEA) widmet sich der Entwicklung industrieller Bioraffinerien im Sinne einer wachsenden Bioökonomie. In der ursprünglichen Ausgestaltung des Tasks (2008) wurden vier Subtasks definiert und in den Folgejahren abgeschlossen. Diese fokussierten auf: (a) Status von Bioraffinerie-Technologien, (b) Bioraffinerie-Produkte einschließlich Bioenergie, Biokraftstoffe, Biochemikalien und neue Fasermaterialien, (c) Prozessintegration von Bioraffinerien mit Fokus auf Vergasung und (d) Nachhaltigkeit von integrierten Bioraffinerien. Diese Aktivitäten konzentrierten sich auf thermochemische und biologische Wege zur energieeffizienten Umwandlung von Biomasse und Abfällen in Biobrennstoffe und Biomaterialien.

Im Jahr 2016 wurde eine Neuausrichtung von Task 11 vorgenommen, die sich auf die Entwicklung von Lösungen zur Unterstützung von Umsetzungen im industriellen Maßstab konzentriert, um eine echte Dekarbonisierung verschiedener Industriesektoren voranzutreiben. Der gewählte Ansatz berücksichtigt die Bedürfnisse und Rahmenbedingungen der Industrie und kombiniert das Wissen über industrielle Technologien mit Energieeffizienz und Biomassekonversionsprozessen. Dazu wurden bisher drei neue Subtasks definiert:

Subtask 1: Decision Support Systems and *Ex-ante* Research (Taskleitung: Kanada)

Subtask 2: Technology Pathways towards Negative and/or Net-Zero Emission Biorefineries (Taskleitung: Österreich)

Subtask 3: Circular Bioeconomy and Biomass-Oriented Industrial Symbiosis (Taskleitung: Portugal)

Die Aktivitäten in Task 11 werden auf internationaler Ebene durch die Task-Mitglieder Kanada, Österreich, Portugal und Schweden ermöglicht und fokussieren auf die Entwicklung von Systemanalysen, Entscheidungsunterstützungssystemen und Bioraffineriekonzepten für die wirtschaftliche Realisierung von Bioraffinerien mit Net Zero oder sogar negativen Treibhausgasemissionen (THG). Die österreichische Beteiligung leitet Subtask 2 und verfolgt folgende Ziele

Ziel 1 Netzwerkaufbau und Kommunikation

Übergeordnetes Ziel ist die Netzwerktätigkeit innerhalb der österreichischen Bioraffinerie-Forschungslandschaft sowie mit Stakeholdern des internationalen Konsortiums. Dabei wird die strategische Vernetzung und der Know-How-Transfer zwischen relevanten Akteuren verfolgt.

Ziel 2 Erarbeitung des Stands der Forschung zu negativen u. Net Zero Emissionen in Bioraffinerien

Die hierfür verwendeten, komplementäre Ansätze lassen sich wie folgt zusammenfassen:

(a) Screening emergierender (Bioraffinerie-)Technologien

Die Entwicklung von neuartigen Verarbeitungsprozessen können erhebliche Auswirkungen auf Energie- und Prozesseffizienzen haben und dadurch neue Möglichkeiten für die

industrielle Dekarbonisierung eröffnen. Um einen systematischen Fortschritt zu ermöglichen, werden Bioraffinerie-Verarbeitungsrouten und Technologien gesammelt und deren Potenziale auf Systemebene aufgezeigt.

- (b) Sammlung von Instrumenten zur Evaluierung von Bioraffinerien
Sowohl zur ökologischen Bewertung als auch für strategische Geschäftsentscheidungen bedarf es verlässlicher Instrumente und Metriken. Hierfür werden verfügbare Werkzeuge sowie deren Eignung und Aussagekraft gesammelt.
- (c) Bioraffinerie-Leuchtturmprojekte
Aufbauend auf den fundamentalen Technologien und den Bewertungsmaßnahmen gilt es innovative Konzepte für effiziente Wertschöpfung in Bioraffinerien zu entwickeln und zu etablieren. Als Inspiration für Bioraffineriekonzepte, welche sich Net Zero oder negativen Emissionen annähern, werden Forschungs- und Demonstrationsbeispiele aus nationalen Projekten und von internationalen Partnern der Task 11 Initiative gesammelt und aufbereitet.
- (d) Erstellung eines Berichts: „Net Zero u. Negativemissionspfade für Bioraffinerien“
Um die erarbeiteten Ergebnisse des Subtask 2 aus der Projektperiode 2022-2024 gesammelt und gezielt zu verbreiten werden sie in einem in englischer Sprache verfassten Perspective Artikel („Pathways Towards Net-Zero and Negative Emission Biorefineries“) aufbereitet und publiziert.

Ziel 3 Dissemination von Erkenntnissen

Die Verbreitung der Ergebnisse der nationalen Beteiligung erfolgt über Publikationen in Branchenzeitschriften, Konferenzen, sowie über IEA Webseiten und nationalen Plattformen wie open4innovation.

Die Quellen für die Erhebung von Daten zu Technologien, Prozesskonzepten und Bewertungsmodellen umfassen ausschließlich wissenschaftlich anerkannte Verlage, verlässliche internationale Organisationen und Projektpartner sowie direkte Beiträge aus den Workshops und Meetings der in Task 11 engagierten Forscher*innen.

Der vom nationalen Team gewählte Ansatz der symbiotischen Vernetzung mit Akteuren der (inter-)nationalen Bioraffinerielandschaft zur konzertierten Sammlung von Einblicken in die technologische Entwicklung und zur Vermittlung zwischen voneinander profitierenden Stakeholdern hat sich als sehr produktiv erwiesen. In den Jahren 2023 und 2024 fanden jeweils vor einer internationalen Konferenz Task 11 Meetings mit Beiträgen aus der nationalen Arbeit statt, um die fachlichen Diskussionen im Rahmen von Konferenzbeiträgen fortzuführen:

- Task Meeting am 7. Mai 2023 im Vorfeld der internationalen IETS-Konferenz in Göteborg.
 - Präsentation der Projekte CircularFood und BioProfit im Rahmen des Task Meetings und der Konferenz
- Task Meeting am 8. April 2024 im Vorfeld der ISEC International Sustainable Energy Conference
 - Vortrag und Workshop zu Systemgrenzen bei der Betrachtung von Net Zero bzw. negativen Emissionen in Bioraffinerien.

Um das internationale Netzwerk auszubauen, wurden Task Meetings organisiert, bei denen sich sowohl akademische als auch industrielle Experten im Rahmen von Vortragsreihen und Podiumsdiskussionen zu aktuellen Themen der Task 11 Initiative austauschen und vernetzen konnten.

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse des Subtask 2 der letzten Projektperiode (2022-2024) vorgestellt.

5 Ergebnisse

Das primäre Ergebnis der österreichischen Beteiligung an der internationalen Task 11 durch die Leitung des Subtask 2 ist der veröffentlichte Bericht „Pathways Towards Net-Zero and Negative Emission Biorefineries“. Dieser adressiert die inhaltlichen Kernfragen zum Thema und bietet die dazugehörigen Perspektiven und Einschätzungen des Task 11 Expert*innen-Teams auf Basis des aktuellen Standes der Technik. Alle Inhalte des Berichts wurden während der aktuellen Projektlaufzeit (2022-2024) erarbeitet und in englischer Sprache publiziert und somit der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Die wichtigsten Punkte des referenzierten Berichts werden in diesem nationalen Ergebnisbericht in übersetzter Form dargestellt, wobei für weiterführende Informationen direkt auf den internationalen Bericht verwiesen wird.

5.1 Industrielle Bioraffinerien

Auf dem Weg zu einer wirtschaftlich und ökologisch widerstandsfähigen Zukunft sind zuverlässige und nachhaltige Systeme zur Versorgung mit Energie, Rohstoffen und Produkten essenziell. Die bestehenden Auswirkungen industrieller Aktivitäten auf die Umwelt und das Klima erfordern eine weitreichende Transformation von industriellen Prozessketten und damit einen Übergang zu einer zirkulären, biobasierten Wirtschaft, in der industrielle Bioraffinerien eine zentrale Rolle spielen. Dabei werden regional verfügbare, erneuerbare Ressourcen gegenüber fossilen Energieträgern priorisiert und moderne Prozesstechnologien benötigt, um Ressourcen- und Energieeffizienzen zu optimieren. Durch solche Maßnahmen werden sowohl Umweltprobleme in Angriff genommen als auch wirtschaftliches Wachstum gefördert.

In einer biobasierten Wirtschaft wandeln industrielle Bioraffinerien Biomasse im großen Maßstab in Biokraftstoffe, Biochemikalien, Strom und Wärme um. Ihre Aufgabe ist es, fossile Produkte schrittweise zu ersetzen und erneuerbare Energien und Energieträger für industrielle Prozesse, Verkehr und Fernwärmenetze bereitzustellen. Analog zu Erdölraffinerien müssen Bioraffinerien auf integrierte Prozesse setzen, um eine maximale Wertschöpfung aus den zur Verfügung stehenden Rohstoffen zu erzielen. Generation bezeichnet Biomasse aus Nahrungs- und Futterpflanzen (z.B. Zuckerrohr, Weizen); 2. Generation bezieht sich auf nicht essbare, lignozellulosehaltige Biomasse, die aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen oder speziellen Energiepflanzen besteht und aufgrund ihrer Verfügbarkeit, ihres nachhaltigen Wachstumspotenzials und der fehlenden Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion besonders vielversprechend ist; 3. Generation Biomasse umfasst Algen und biotechnologisch optimierte Organismen, die z.B. CO₂ binden, ohne Anbauflächen zu benötigen; und 4.

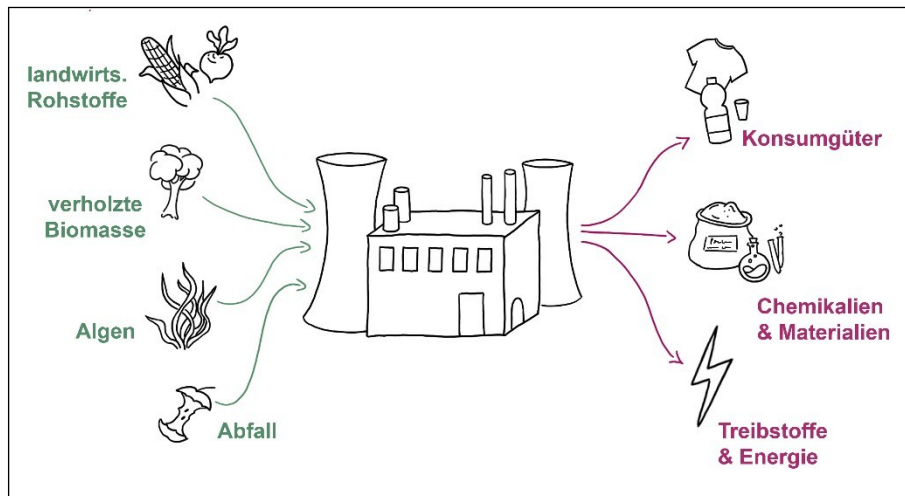


Abbildung 1. Rolle indust. Bioraffinerien in der Bioökonomie. Bildnachweis: AEE INTEC, Hanna Lanz.

Da dem Transport fester biogener Rohstoffe in der Regel wirtschaftliche Grenzen gesetzt sind, ist es notwendig, Bioraffinerien in der Nähe der Rohstoffquellen anzusiedeln. Dies fördert die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit des ländlichen Raumes und unterstützt die Infrastrukturentwicklung jenseits der klassischen urbanen Industriezentren.

Um die Transformation industrieller Systeme in Richtung Net Zero oder negative Emissionen gezielt voranzutreiben, ist ein gutes Verständnis des Kohlenstoffkreislaufs erforderlich, der die THG-Konzentrationen in der Atmosphäre bestimmt. Wie in Abbildung 2 dargestellt, können verschiedene Kohlenstoffquellen genutzt werden. Historisch bedingt sind dies sowohl biogene Materialien wie Holz oder Schilf als auch fossile Ressourcen wie Kohle, Erdöl oder Erdgas. Durch die Förderung von Initiativen zur Kreislaufwirtschaft steigt der Anteil von recycelten Produkten, die am Ende ihres Lebenszyklus wieder als Rohstoffe in die Produktion zurückgeführt werden. Ein Paradebeispiel ist die kommunale Abfallwirtschaft, wo die Recyclingquoten in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich gestiegen sind.¹ Besonders in der globalen Kunststoffproduktion wuchs das Volumen mechanisch und chemisch recycelter Endverbraucher-Kunststoffe zwischen 2018 und 2023 um 21 % von 30,1 Mt auf 36,5 Mt jährlich.² Solche Entwicklungen schließen Materialkreisläufe, maximieren die Ressourcennutzung und verringern die Abhängigkeit von Primärrohstoffen. Für Bioraffinerien sind Beispiele dafür die kaskadische Nutzung von Kohlenstoff, bis hin zur Nutzung als Biokohle im Boden. Zudem ermöglichen technologische Fortschritte und politische Anreize die direkte CO₂-Abscheidung (Direct Air Capture; DAC) in zunehmend größerem Maßstab. Diese Methode macht atmosphärisches CO₂ als potenziell klimaneutralen Rohstoff nutzbar.³ Im Gegensatz zu anderen Quellen liegt Kohlenstoff hier in vollständig oxidiert Form vor, was seine energetische Nutzung verhindert und seine stoffliche Nutzung durch die hohe Stabilität von CO₂ energetisch herausfordernd macht.

Ausgangsseitig ist anzumerken, dass kohlenstoffhaltige Produkte temporäre Speicher darstellen, deren Kohlenstoff entweder durch Nutzung oder im Anschluss an die Entsorgung durch Verbrennung oder biologischen Abbau wieder freigesetzt wird. Folglich sind Produktlebensdauer und Recyclierbarkeit für die Netto-Emissionen von Produkten bestimmend.

Neben gezielten Kreislaufstrategien für stoffliches Recycling oder den natürlichen Kohlenstoffsenken wie Wälder, Gewässer oder gesunde Böden bestehen auch moderne technologische Ansätze wie Carbon Capture and Storage (CCS) und Carbon Capture and Utilization (CCU), um die atmosphärische THG-Bilanz positiv zu beeinflussen. Grundsätzlich ist die technische CO₂-Abscheidung bei emissionsintensiven Punktquellen (z.B. Bioethanolanlagen) auf Grund der hohen CO₂-Konzentrationen im Abgasstrom besonders effizient.⁴ Bei CCS wird das abgeschiedene CO₂ in tiefliegenden geologischen Formationen gespeichert und somit dem Kohlenstoffkreislauf entzogen, während bei CCU das CO₂ einer stofflichen Verwertung zugeführt wird. Dies bedarf im Regelfall Reduktionsmittel (z.B. Wasserstoff) und Energie. Die Klimawirkung von CCU hängt jedenfalls von der CO₂-Quelle, dem Energieaufwand und der Lebensdauer des hergestellten Produktes ab.

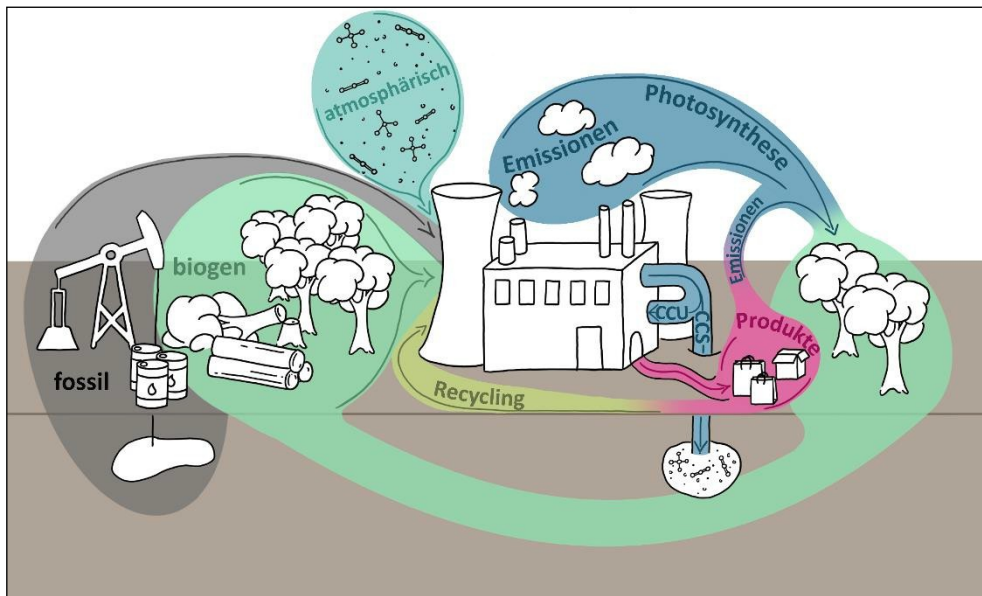


Abbildung 2. Kohlenstoffkreislauf und industrielle Tätigkeiten: Potenzielle Kohlenstoffquellen umfassen (a) atmosphärische, (b) fossile, (c) biogene und (d) recycelte Quellen, während Produkte (oder Energie) und Emissionen die Fabrikausgänge darstellen. Emissionen werden entweder direkt in die Atmosphäre abgegeben, zur Nutzung (CCU) oder zur Speicherung (CCS) abgeschieden. Am Ende der Produktlebensdauer kann es verbrannt, abgebaut oder recycelt werden, wodurch es auf unterschiedliche Weise zur Kohlenstoffbilanz beiträgt. Bildnachweis: AEE INTEC, Hanna Lanz.

Um die Emissionen systematisch zu erfassen, werden sie in Scope 1 (direkte Emissionen), Scope 2 (indirekte Emissionen durch die Energieversorgung) und Scope 3 (vor- und nachgelagerte Emissionen) unterteilt. Während Scope 1 und 2 eine Bewertung einzelner Prozesse ermöglichen, bietet eine ganzheitliche Lebenszyklusanalyse (LCA) mit einer umfassenden „cradle to cradle“-Betrachtung wissenschaftlich fundierte Einblicke in die absoluten Nettoemissionen. Solche Bewertungen sind oft umfassend und berücksichtigen die Herkunft der Biomasse, die Verarbeitung, die Produktnutzung bis hin zur endgültigen Kohlenstoffsenke.

Bioraffinerien bieten im Vergleich zu petrochemischen Raffinerien ein höheres Potenzial zur gezielten Beeinflussung der THG-Konzentration, da sie nachwachsende Rohstoffe nutzen. Allerdings ist eine Optimierung der Prozessketten erforderlich, um die Umweltvorteile zu realisieren. Eine Metastudie hat ergeben, dass biobasierte Produkte im Durchschnitt 45 % weniger Emissionen verursachen als fossile Alternativen, in Einzelfällen aber durch einen hohen Energiebedarf nachteilig sein können.⁵

Ein wesentlicher Vorteil von Bioraffinerien ist die Möglichkeit negativer Emissionen, z.B. durch die Kopplung von Bioenergie mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung (BECCS). Da Biomasse CO₂ bindet, kann dessen Abscheidung bei energetischer Nutzung zu einer Netto-Kohlenstoffsенke führen. Damit ist BECCS eine der wenigen skalierbaren Technologien zur Gestaltung klimapositiver Industrieprozesse.^{6,7}

Aufbauend auf diesen grundlegenden Aspekten der Wechselwirkungen zwischen industriellen Bioraffinerien, dem globalen Kohlenstoffkreislauf und den atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen wurden aufkommende Bioraffinerietechnologien und unterstützende Umsetzungsstrategien diskutiert.

5.2 Emergierende Prozesstechnologien

Biobasierte Rohstoffe sind zweifellos ein Schlüsselement für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft und zur Bekämpfung der Ressourcenknappheit. Insbesondere durch den Mehrproduktansatz von Bioraffinerien, der darauf abzielt, möglichst alle Teilströme zu nutzen. Entscheidend ist jedoch, dass die Verarbeitungsprozesse in Bioraffinerien energieeffizient gestaltet werden. Maßnahmen hierzu sind effizientere Prozesstechnologien, systemische Optimierungen oder die Integration erneuerbarer Energien. Letzteres ist insbesondere dann relevant, wenn Biomasse überwiegend stofflich genutzt wird.

Emergierende Technologien spielen als Wegbereiter für Konzepte mit Net-Zero/Negativ Emissionen in Bioraffinerien eine wesentliche Rolle. Neue technologische Lösungen können neue Prozessrouten ermöglichen und/oder deren Effizienz wesentlich steigern. Um wettbewerbsfähig zu bleiben, ist es entscheidend, die Effizienz bei der Nutzung von Ressourcen, Energie und Prozessen zu optimieren. Forschungsbemühungen sollten darauf abzielen, innovative Technologien zu entwickeln, die diese Effizienz steigern und gleichzeitig die Umweltauswirkungen minimieren. Besonders vielversprechend sind Ansätze, die den Einsatz nachhaltiger Energiequellen maximieren und die Prozessführung optimieren. Abbildung 3 zeigt unterschiedliche Technologiepfade bzw. technologische Ansätze, die an unterschiedlichen Stellen der Biomasseverarbeitung in Bioraffinerien zum Einsatz kommen können.

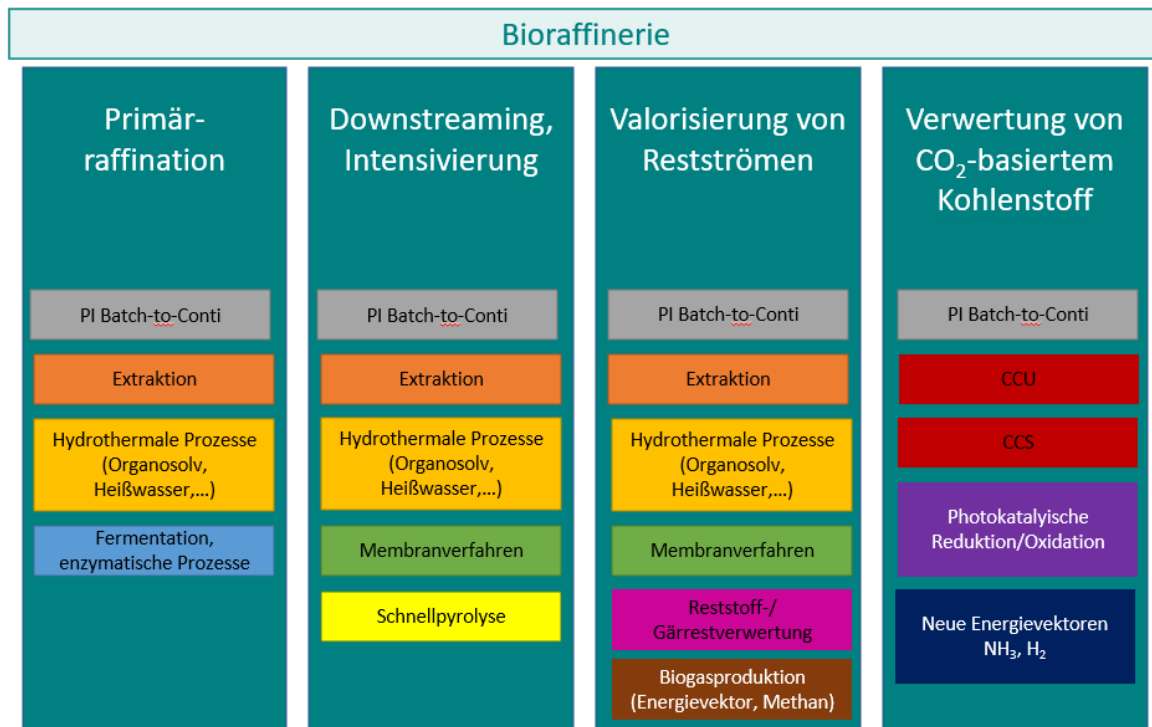


Abbildung 3: Technologiepfade in Bioraffinerien

In die Betrachtung emergierender Technologien in Bioraffinerien sind in der letzten Task-Periode insbesondere die folgenden österreichischen Projekte eingeflossen:

- BioProfit (ACR): Valorisation von Biogasgärresten durch CO₂-Speicherung und Nährstoffrückgewinnung (Einsatz von Membrandestillation zu Behandlung von Flüssiggärresten)
- HIPSTERS (Zukunftsfonds Stmk.): Reaktortechnologie zur kontinuierlichen Verwertung von Biomasse und Herstellung neuer Produkte
- COHORIS: Dissertationsprojekt Judith Buchmaier zu detaillierten Evaluierung von kontinuierlichen Oscillatory flow bioreactors für Zellulose- und Proteinhydrolyse
- CircularFood (FFG 907661): Kaskadische Verwertung von Lebensmittelreststoffen – Betrachtung von neuen Verfahren zu Proteinextraktion, Auswirkungen der Proteinextraktion auf Biogasanlagen, sowie neue Verwertungskonzepte von Gärresten durch Fest/Flüssig-Trennung und Aufbereitung in Torfersatz sowie Flüssigdünger. Die Flüssigphase wird dabei mittels Membrandestillation aufbereitet.

Die nationalen Arbeiten zu neu entstehenden Schlüsseltechnologien konzentrierten sich unter anderem auf oszillierende Strömungsreaktoren und den Einsatz der Membrandestillation zur Aufbereitung flüssiger Gärreste.

5.2.1 Einsatz von oszillierenden Flow-Reaktoren

Oszillierende Flow Reaktoren sind Rohrreaktoren, die insbesondere geeignet sind dickflüssige Suspensionen kontinuierlich zu prozessieren. Oszillierende Flow Reaktoren bringen das Fluid in langsame Oszillationsschwingungen während des Transports durch den stationären Reaktor, der mit einer dünnen Helix an der Reaktorinnenwand ausgestattet ist. Im Reaktor entsteht ein durch die Oszillation initiiertes Swirl Flow des Mediums, dh. eine sehr gute Durchmischung trotz langsamem Nettodurchfluss durch den Reaktor. Damit wird die Partikelgeschwindigkeit (verlinkt mit der Oszillation) von der Verweilzeit (verlinkt mit dem Nettodurchfluss) entkoppelt. Dadurch sind oszillierende Flow Reaktoren insbesondere eine Anwendung für biobasierte Prozesse mit langsamer Prozesskinetik. Die Eigenschaft dickflüssige Suspensionen langsam und gleichzeitig gut durchmischt zu fördern, erhöht den Massentransfer und ermöglicht gleichzeitig Feedströme ohne Vorbehandlung möglichst unverdünnt zu prozessieren. Dadurch werden Prozesse effizienter, erreichen eine höhere Produktausbeute und eine höhere Produktendkonzentration, die im DownStream Processing Vorteile bringt.

Der Einsatz von oszillierenden Flow Reaktoren (Continuous oscillatory flow bioreactors – COFB) wurde bisher für zwei Bioraffinerie-Anwendungsfälle detailliert betrachtet:

1) Proteinhydrolyse von Biertreber

Treber kann aufgrund seines hohen Biogaspotenzial zur thermischen Energieversorgung von Brauereien beitragen. Neben der praktischen Demonstration seit einigen Jahren in Göss, Österreich, befasst sich eine Reihe von Studien mit diesem Potenzial^{8–11}. In den letzten Jahren wurde jedoch ein breiterer Ansatz verfolgt, um nicht nur auf das Energiepotenzial von Biertreber zu konzentrieren, sondern ihn, neben der klassischen Route als Tierfutter auch als Ressource für die Gewinnung von spezifischen Lebens- und Futtermittelzutaten zu nutzen^{8,12–15}.

Der Einsatz eines COFB als Schlüsseltechnologie für die Proteinextraktion von Biertreber wurde eingehend untersucht. Abbildung 4 zeigt den Integrationspunkt im Prozessschema der Brauerei.

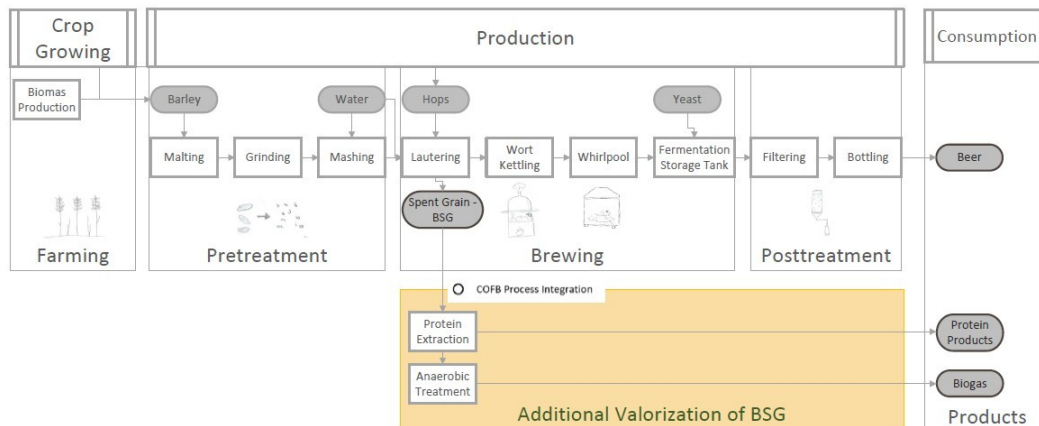


Abbildung 4: Prozessschema einer Brauerei und Integrationspunkt des oszillierenden Reaktors für die Proteinextraktion aus Biertreber

Für die Proteinhydrolyse von Biertreber zeigte sich, dass Biertreber bis zu einem TS von 15% im COFB prozessiert werden können mit hohen Proteinhydrolysat-Ausbeuten (siehe Abbildung 5). Der Energiebedarf liegt < 0.4 Wh/kg für den kontinuierlichen Extraktionsprozess¹⁶.

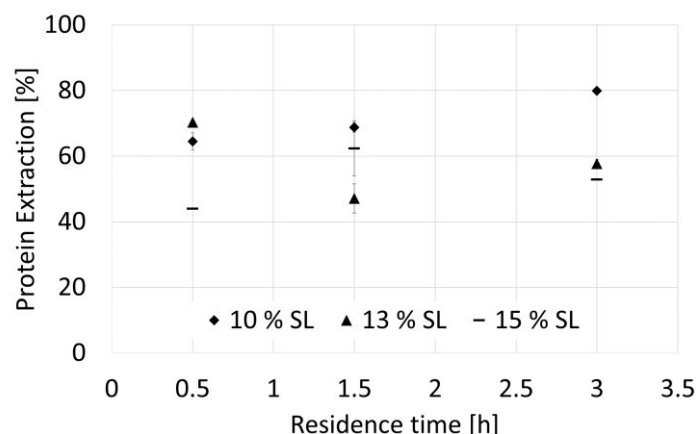


Abbildung 5: Proteinhydrolyse im COFB bei unterschiedlichen Verweilzeiten und Feststoffbeladungen (200 mM NaOH, $T=50^{\circ}\text{C}$)¹⁷

2) Zellulosehydrolyse

Die Hydrolyse von Zellulosen (auch Hemizellulosen) stellt einen essentiellen Schritt in Bioraffinerien dar, um Glukose als Zwischenprodukt für eine Vielzahl von möglichen Produkten zu erhalten. Ein essentieller Aspekt dabei sind hohe Produktkonzentrationen, um die Folgeverarbeitung so effizient wie möglich gestalten zu können.

Für Zellulosehydrolyse konnte gezeigt werden, dass der COFB die Verarbeitung von dickflüssigen Zellulosesuspensionen bis $> 20\%$ Zellulose. Diese hohen Feststoff-Konzentrationen ergeben Glukose-Konzentrationen im Hydrolysat von bis zu 40 g/l.

In dieser Studie wurde neben der Prozessierbarkeit von dickflüssigen Suspensionen, die in-Situ Glukosentnahme entlang des kontinuierlichen COFB Prozesses zur Minimierung der Produktinhi-

bierung untersucht. Es konnte eindrucksvoll gezeigt werden, dass die Glukoseproduktion signifikant ansteigt durch die in-Situ Glukoseentnahme, die entlang des kontinuierlichen COFB Set-Ups möglich ist. Die spezifische Glukoseproduktion konnte zwischen 33% (bei einer Feststoffkonzentration von 17%) und 40% (bei einer Feststoffkonzentration von 23%) gesteigert werden^{18,19}. Diese Studie demonstriert die Möglichkeiten emergierender Technologien Prozesslimitierungen zu umgehen um höhere Produktivitätsraten zu erreichen. Höhere Produktivitätsraten führen unweigerlich zu Effizienzsteigerungen und können ein wichtiger Baustein sein den spezifischen Prozessenergiebedarf zu verringern und stellen damit einen essentiellen Schritt in Richtung Energie- und Emissionsoptimierung dar.

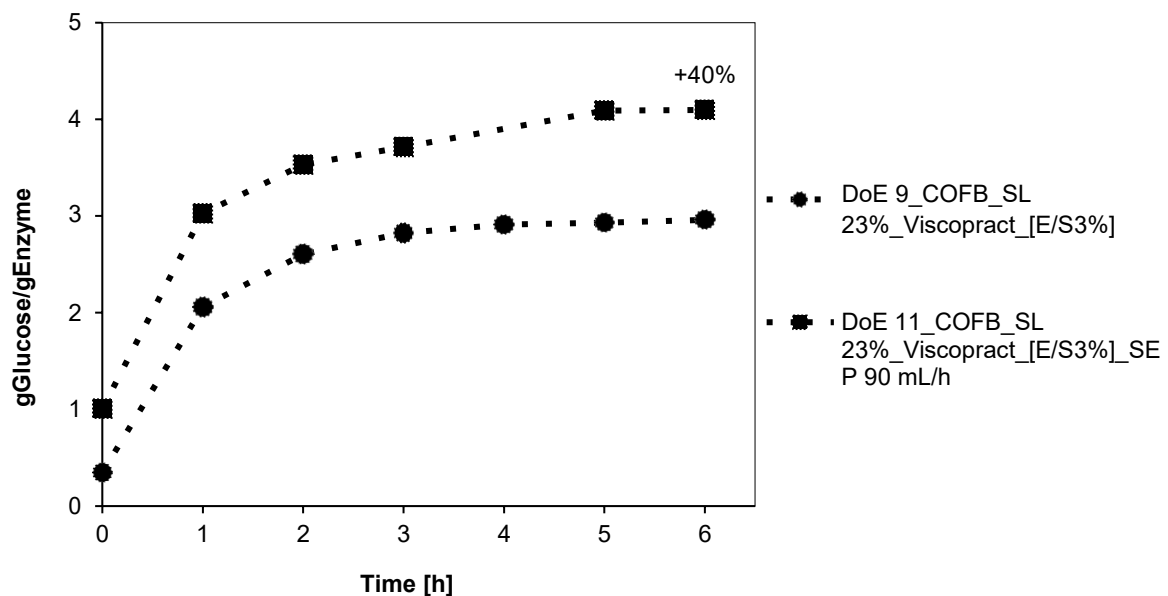


Abbildung 6: Einfluss der in-Situ Glukose-Entnahme auf die Glukoseproduktion über die Versuchszeit (0-90ml/h Glukoseentnahme) (Plesch, 2025)

In den betrachteten Prozessen ergaben sich wie gezeigt große Potentiale durch den COFB als emergierende Prozesstechnologie Bioraffinerieprozesse zu intensivieren. Die Intensivierungspotentiale sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst^{16,19}:

Tabelle 1: Intensivierungspotentiale des oszillierenden Flow Reaktors in Bioraffinerieprozessen (Buchmaier and Muster-Slawitsch, 2024)

Process Intensification Factor (PIF)	Description	Relevance +++ highly significant ++ significant + less significant
Increase of Volumetric Productivity Scenario: Enzymatic hydrolysis of ligno-cellulosic biomass at same conditions in various operating modes (Shaker, batch (BOFB) and conti (COFB)) Batch: (Shaker vs. BOFB) Increase of volumetric productivity =1.6 Conti: (BOFB vs. COFB) Increase of volumetric productivity =1.5	Volumetric productivity (q) describes the amount of product formed (P) per volume (V) of reactor and time (t). $q = \frac{P}{V \cdot t}$ The respective PIF is calculated as follows: $PIF, \text{ Increase of volumetric productivity} = \frac{g/Lh}{g/Lh_{ref.}}$	+++
Decrease of Residence Time Scenario: Enzymatic hydrolysis of ligno-cellulosic biomass under same conditions in shaken and continuous mode of operation. Decrease of residence time = 1.7 x times less time to achieve concentration goal.	The residence time (τ) is defined as the average time of a particle spent in a respective location. $\tau = \frac{V}{Q}$ V=Volume of the reactor Q= volumetric rate of fluid entering the reactor	++
Plant simplification COFB protein extraction in a future brewery scenario with standard protein valorisation achieves a Plant simplification = 0.7 of more simplicity in unit operations (as the two units “transport” of BSG and “pre-treatment” can be excluded by COFB process at place.	The simplicity of the overall process refers to the individual steps of the process with a specific function. (Number of unit operations (No)) $\text{Plant simplification} = \frac{\text{No. of Unit operations}}{\text{No. of UO reference}}$ 6 Steps considered reference: 1) BSB transport to usage (animal feed) or further treatment 2) Pre-treatment of biomass 3) Protein Hydrolysis 4) Solid/Liquid separation 5) Biogas production from solids 6) Protein hydrolysate Down Stream processing (purification, isolation etc.)	++

5.2.2 Membrandestillation zu Aufbereitung von Flüssiggärresten

In den derzeitigen Biogasanlagen fallen große Mengen an Gärresten an, die derzeit üblicherweise als Düngemittel auf landwirtschaftlichen Flächen eingesetzt werden. Die direkte Ausbringung von Düngemitteln mit herkömmlichen Geräten wirft jedoch Probleme auf, insbesondere aufgrund von Nährstoffverlusten. Für Industriestandorte ist die Beseitigung von Gärresten kritisch und hängt von den örtlichen landwirtschaftlichen Flächen und der Möglichkeit der lokalen Nutzung ab. Darüber hinaus kann die Logistik, um die Gärreste zu den Feldern zu bringen, hohe Kosten für die Industrieanlagen verursachen. Daher wird nach neuen Möglichkeiten gesucht, um den Nährwert der Gärreste besser zu nutzen. In industriellen Biogasanlagen sind die Gärreste in ihrer Zusammensetzung sehr homogen und gleichmäßig und bieten ein hohes Potenzial für hochwertige Produkte.

Im österreichischen Projekt „Bioprofit“ (ACR-Projekt) wurde ein Konzept zur Verwertung von Gärresten durch Fest-Flüssig-Trennung und getrennte Verwertungswege für die Flüssig- und Feststofffraktion entwickelt. Die Ergebnisse wurden einerseits in den IEA IETS Task 17 eingebracht, stellen aber auch für den IEA IETS Task 11 einen wertvollen Beitrag dar. Während im Task 17 der Fokus auf der Entwicklung des Membranverfahrens liegt, sind die Effekte des Technologieeinsatzes zur Entwicklung von Net-Zero Konzepten von Bedeutung. Im Ansatz des Projektes Bioprofit wurden die Feststoffe des Gärrestes als hochwertiges organisches Material untersucht, das als Torfersatz verwendet werden könnte, während die Flüssigfraktion mit einer Membrandestillation in einer Container-Pilotanlage über mehrere Wochen behandelt wurde.

Die detaillierten Ergebnisse sind im Projektendbericht bzw. im IEA IETS Task 17 Endbericht der Periode 2022-2024 zu finden. Es konnte gezeigt werden, dass die Membrandestillation ein robustes im Niedertemperaturbereich betriebenes Verfahren ist, um N-NH₄ aus Gärresten zu entfernen. Die so möglich gemachte Stickstoffentfernung ohne intensiven Chemikalien- und Energieaufwand kann ein Schlüssel für die Valorisierung von Gärresten sein. Wenn nach einer Fest-Flüssig-Trennung des Gärrestes die Feststofffraktion als Torfersatzstoff genutzt werden soll, muss die verbleibende Flüssigkeit (~90% der Menge) entsorgt werden. Durch den Einsatz der Membrandestillation kann die Flüssigkeit einerseits behandelt werden, um den Stickstoffgehalt zu reduzieren und sie damit einleitfähig zu machen, oder um die gesamte Flüssigkeit aufzukonzentrieren.^{20,21}

5.2.3 Ausblick - Effekte der Einzeltechnologien für Bioraffineriekonzepte

Die Ergebnisse des Einsatzes emergierender Einzeltechnologien zeigen, dass einzelne neue Technologieentwicklungen einen wichtigen Beitrag zur Energieeffizienz des Prozessschrittes, aber auch darüber hinaus des gesamten Prozesskonzeptes leisten können. Emergente Prozesstechnologien sind jedoch nur ein Baustein auf dem Weg von Bioraffinerien in Richtung Net-Zero. Wesentliche Fragen sind auch die Herkunft der Rohstoffe, die gesamte Prozesskette, die entstehenden CO₂-Emissionen und deren Behandlung. In der letzten Task-Periode konnte das nationale Projekt circularFood initiiert werden, das den Einsatz der oben genannten Prozesstechnologien in einer gesamten Prozesskette - der kaskadischen Nutzung von Lebensmittelreststoffen - evaluieren wird. Eine wesentliche Forschungsfrage des Projektes ist, ob der kaskadische Wertschöpfungsansatz mit

emergenten Technologien letztendlich zu Net-Zero bzw. negativen Emissionskonzepten für Unternehmen führen kann.

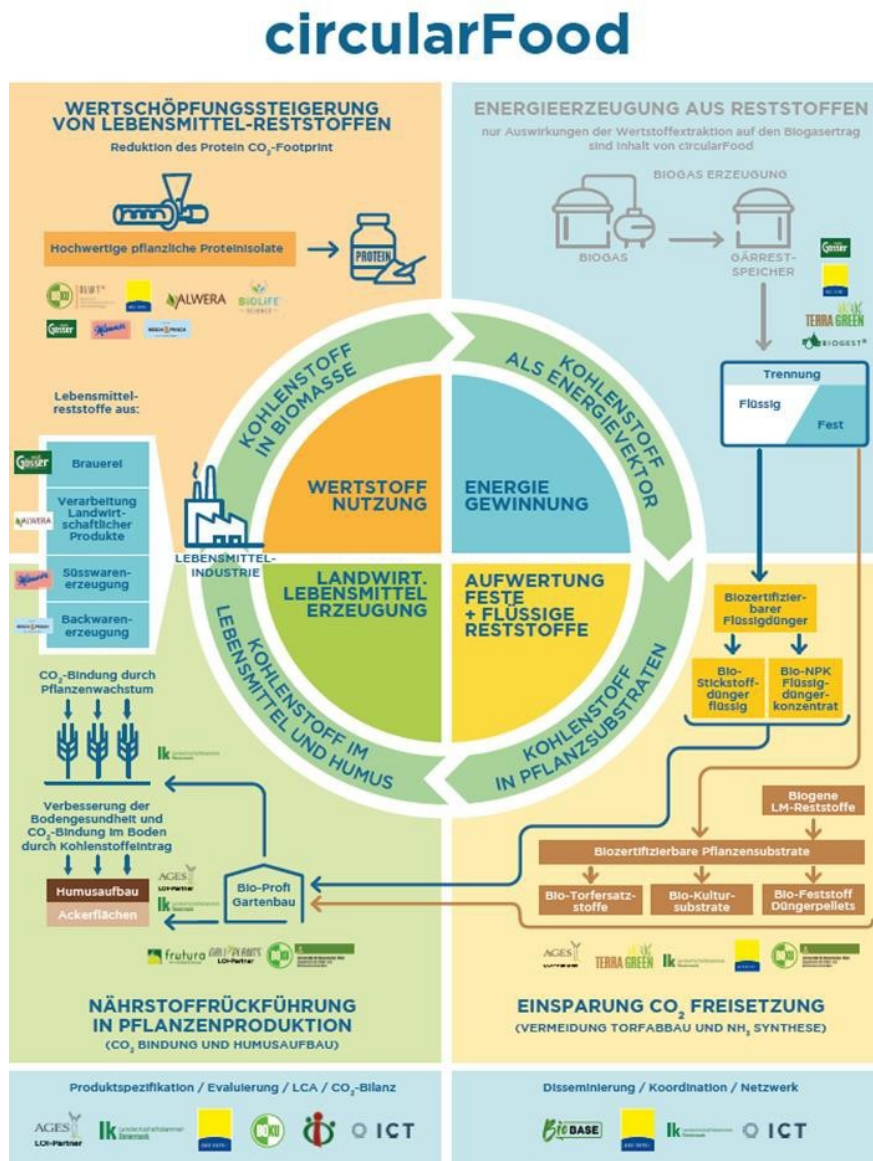


Abbildung 7: Das Projektkonzept von circularFood - Steigerung der Wertschöpfung von Lebensmittelreststoffen durch kaskadische Nutzungswege

5.2.4 Evaluierung von Bioraffineriekonzepten

In der vergangenen Task 11 Periode stand die Bewertung von Bioraffineriekonzepten im Mittelpunkt der internationalen Diskussion.

Hierzu wurde neben spezifischen Subtask-Meetings ein gemeinsamer Workshop im April 2024 durchgeführt, der sich zum einen intensiv mit iBioref, einem Berechnungs- und Bewertungstool der kanadischen Taskleitung, auseinandersetzte und zum anderen die Frage nach den notwendigen Systemgrenzen für die Bewertung aufwarf.

Die Agenda des Workshops ist im Folgenden dargestellt.

Agenda

Time	Session	Session Lead
9:00 am – 9:30 am CET 3:00 am – 3:30 am EST	Welcome, in-person and on-line roundtable introductions, meeting objectives, review of workshop agenda, how the interactive sessions will work	Paul Stuart Polytechnique Montréal & EnVertis Consulting (CAN)
9:30 am – 9:45 am CET 3:30 am – 3:45 am EST	IETS news and updates	Thore Berntsson IETS (SE)
9:45 am – 10:30 am CET 3:45 am – 4:30 am EST	Overview of I-BIOREF as an example of a biorefinery strategy decision-making platform	Marzouk Benali NRCan/CanmetENERGY (CAN)
10:30 am – 11:00 am CET 4:30 am – 5:00 am EST	Health Break	
11:00 am – 12:00 am CET 5:00 am – 6:00 am EST	Decision-making challenges related to Sub-Task on <i>Decision support systems and ex-ante research for assessing biorefineries</i>	Paul Stuart Polytechnique Montréal & EnVertis Consulting (CAN)
12:00 am – 1:00 pm CET 6:00 am – 7:00 am EST	Lunch	
1:00 pm – 2:00 pm CET 7:00 am – 8:00 am EST	Decision-making challenges related to Sub-Task on <i>Technology pathways towards net-zero/negative emission biorefineries</i>	Bettina Muster Institut für Nachhaltige Technologien - AEE (AU)
2:00 pm – 3:00 pm CET 8:00 am – 9:00 am EST	Decision-making challenges related to Sub-Task on <i>The circular bioeconomy and biomass-oriented industrial symbiosis</i>	Jorge Costa Instituto Superior de Educação e Ciências - ISEC (PT)
3:00 pm – 3:30 pm CET 9:00 am – 9:30 am EST	Health Break	
3:30 pm – 4:30 pm CET 9:30 am – 10:30 am EST	Addressing the key issues using a decision-making platform	Marzouk Benali NRCan/CanmetENERGY (CAN)
4:30 pm – 5:00 pm CET 10:30 am – 11:00 am EST	Facilitated wrap-up discussion	Thore Berntsson, Marzouk Benali, Paul Stuart...
5:00 pm CET 11:00 am EST	Meeting adjourned	

Abbildung 8: Agenda des internationalen Workshops zu Entscheidungsfindung für neue Bioraffinerie- wege

Aus der Diskussion ergaben sich 3 wesentliche Schlussfolgerungen:

Entscheidungen können nicht auf der Basis eines einzelnen Indikators getroffen werden, dafür sind die Zusammenhänge (technisch, ökonomisch, sozioökonomisch) zu komplex. Es muss ein **Kriterienset** betrachtet werden, das neben den CO₂-Emissionen auch Auswirkungen auf Wasser und Chemikalien beinhalten sollte.

Zur Bewertung von Net-zero-Konzepten muss **der gesamte Lebenszyklus betrachtet** werden. Für eine wissenschaftlich fundierte Aussage zu Net-zero oder Negativ-Emissionskonzepten ist es daher notwendig, eine Ökobilanz durchzuführen (siehe auch Kapitel 5.4) und es sollten keine engen Systemgrenzen gezogen werden.

Die Einflüsse auf industrielle Entscheidungen werden immer komplexer und volatiler. Daher ist es wichtig, die Industrie dabei zu unterstützen, die **robusteste Entscheidung für die Zukunft** zu treffen und die Risiken zu analysieren.

Die Schritte zur Unterstützung der Industrie bei der Entscheidungsfindung und die relevanten Risiken werden im Folgenden dargestellt.

5.3 Schritte zur Umsetzung

Viele Unternehmen haben sich zum Ziel gesetzt, bis 2050 klimaneutral zu werden. Die Umsetzung dieser Pläne ist jedoch mit erheblichen Unsicherheiten verbunden, z.B. hinsichtlich des technologischen Fortschritts, der Marktakzeptanz und der regulatorischen Rahmenbedingungen. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, ist eine schrittweise Umsetzung der identifizierten Maßnahmen erforderlich, die flexibel an neue Entwicklungen angepasst werden kann. Dazu gehören sowohl einfache Modernisierungen zur Steigerung der Energieeffizienz oder die Nutzung erneuerbarer Energiequellen als auch innovative Strategien zur Nutzung von Treibhausgasen wie CCU und CCS. Darüber hinaus spielt der Übergang von fossilen zu biogenen Rohstoffen als Basis für moderne Werkstoffe und Alltagsprodukte eine zentrale Rolle. Zur Navigation der vielfältigen Optionen und Unsicherheiten, die mit dieser kostenintensiven Transformation einhergehen, wird eine klassische Gestaltungsmethodik eingesetzt. Diese wurde speziell an die Dynamik unsicherer Rahmenbedingungen und die stetige Weiterentwicklung von Net-Zero-Technologien angepasst und ist in Abbildung 3 dargestellt.

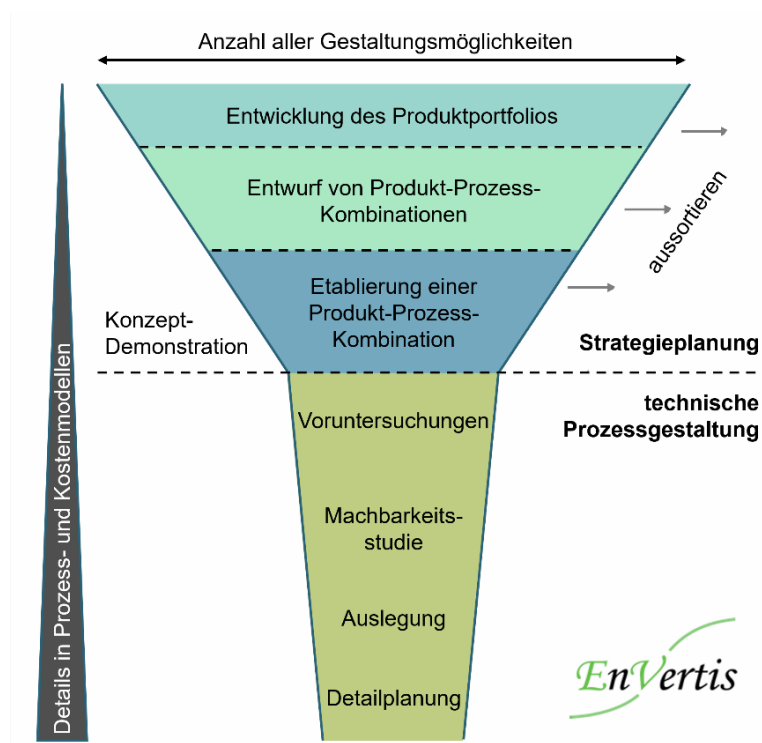


Abbildung 9. Pfad für die Implementierung von Net Zero Strategien. In der Phase der Strategieplanung wird mit sehr frühen Entwurfsstadien und hohen Unsicherheiten gearbeitet. Für die strategische Entscheidungsfindung werden langfristige Bewertungskennzahlen herbeigezogen, welche eine nachhaltige Unternehmensentwicklung sicherstellen sollen. In der Phase der technischen Prozessgestaltung liegt der Fokus auf der Maximierung von ROI oder IRR.²³

Bei der Umsetzung von Net-Zero-Strategien müssen Unternehmen eine Reihe von Risiken berücksichtigen:

- Technologische Risiken: Herausforderungen bei der Skalierung neuer Technologien, Wirtschaftlichkeit verschiedener Entwicklungsstufen und das Risiko, dass getätigte Investitionen durch fortschrittlichere Technologien überholt werden.
- Marktrisiken: Akzeptanz biobasierter Produkte, Erzielung von Skaleneffekten in der Produktion und Wettbewerb mit bereits etablierten Produkten.

- Politische Risiken: Stabilität und Entwicklung regulatorischer Vorgaben zur Dekarbonisierung und Defossilisierung in unterschiedlichen Rechtsräumen.

Die Zusammenarbeit mit Unternehmen und die Workshops der IEA IETS Task 11 haben gezeigt, dass die Umsetzung von Net Zero Strategien einen dynamischen Ansatz erfordert. Nur so können kurz- und langfristige Risiken und Erträge ausbalanciert und ein Wandel, der sich in die übergeordnete Unternehmensstrategie einfügt, schrittweise umgesetzt werden. Nur so können Unternehmen im Wettbewerb erfolgreich in Richtung Klimaneutralität steuern.

5.4 Instrumente zur Beurteilung von THG-Emissionen

Wie bereits erwähnt, kann nur eine umfassende „Cradle to Cradle“-Betrachtung im Rahmen einer Ökobilanz ein vollständiges Bild des ökologischen Fußabdrucks von Systemkomponenten wie einzelnen Produkten und Unternehmen oder ganzen Regionen und Ländern liefern. Da bei der systematischen Bewertung von Umweltwirkungen jede gewählte kleine Systemgrenze nur einen Ausschnitt des Gesamtbildes beschreibt, kann ihr nur eine untergeordnete - bestenfalls unterstützende - Bedeutung beigemessen werden. Nichtsdestotrotz werden einfachere, spezifische Kenngrößen aufgrund ihrer Praktikabilität gerne verwendet, um ausgewählte Aspekte von Prozessketten oder Einzeltechnologien miteinander zu vergleichen. Dies gilt insbesondere in der Phase des Prozessdesigns, in der noch viele Unsicherheiten bestehen. Letztlich ist für eine fundierte Aussage jedoch immer eine LCA erforderlich, weshalb diese auch international anerkannt und in der EU als Standardmethode nach den Normen ISO 14040 und ISO 14044 etabliert ist. Grundsätzlich umfasst die Ökobilanz vier Phasen

1. **Ziel- und Systemdefinition** – Festlegung: Zweck, Systemgrenzen und relevanten Parametern.
2. **Sachbilanz (LCI)** – Erfassung aller Material- und Energieflüsse sowie Emissionen und Abfälle.
3. **Wirkungsabschätzung (LCIA)** – Bewertung der Umweltwirkungen, z. B. hinsichtlich Klimawandel, Ressourcenverbrauch oder Ökotoxizität.
4. **Interpretation** – Ableitung von Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen.

LCA spielt eine zentrale Rolle bei der Bewertung neuer Technologien zur Erreichung von Netto-Null-Emissionen. Der Wandel bis zur Mitte des Jahrhunderts erfordert tiefgreifende Transformationen in Energie, Verkehr, Industrie und Bauwesen. LCA bietet wertvolle Einblicke in die Umweltperformance dieser Technologien und zeigt Optimierungspotenziale auf.

- **Identifikation von Umwelt-Hotspots**
LCA hilft, Lebenszyklusphasen mit besonders hohen Emissionen zu erkennen, z. B. den Anbau von Biomasse oder energieintensive chemische Prozesse in Bioraffinerien. Durch Prozessoptimierung oder erneuerbare Energien lassen sich diese Hotspots entschärfen. Bei Solarmodulen oder Windturbinen fallen die meisten Emissionen oft bei der Materialgewinnung und Herstellung an – hier können Materialinnovationen den Fußabdruck reduzieren.
- **Technologieentwicklung und Optimierung**
Durch frühzeitige Integration von LCA in den Entwicklungsprozess können umweltfreundlichere Technologien priorisiert werden. Beispielsweise unterstützt LCA die Auswahl nachhaltiger Biomasse-Rohstoffe oder effizienter Konversionsverfahren in der Bioenergieproduktion. Auch der Vergleich von Biokraftstoffpfaden, wie Ethanol aus Fermentation versus Algen-basiertem Biodiesel, hilft, emissionsärmere Alternativen zu identifizieren.

- **Unterstützung der Kreislaufwirtschaft**
LCA bewertet Potenziale von Recycling, Wiederverwendung und Nebenproduktnutzung. In der Bioökonomie zeigt LCA z. B. die Vorteile der Nutzung von Agrarreststoffen oder ligninreicher Biomasse für Biokunststoffe auf – eine Möglichkeit, fossile Ressourcen zu ersetzen und Abfälle zu minimieren.
- **Vergleich alternativer Technologien**
LCA ermöglicht die Bewertung unterschiedlicher Wege zur Emissionsreduktion, etwa bei Carbon Capture and Utilization (CCU) gegenüber Carbon Capture and Storage (CCS). Solche Analysen decken Zielkonflikte in Energieverbrauch, Emissionen und Ressourcennutzung auf und helfen, nachhaltigere Entscheidungen zu treffen.
- **Nachverfolgung von Netto-Null-Fortschritten**
LCA dient als Messinstrument zur Überprüfung der Emissionsreduktion in verschiedenen Technologiebereichen, z. B. Bioenergie, Wasserstoffproduktion oder Kohlenstoffabscheidung. So können Fortschritte dokumentiert und mit Klimazielen abgeglichen werden.
- **Vermeidung von Problemverlagerungen**
Emissionsreduktionen in einem Bereich dürfen keine neuen Umweltbelastungen an anderer Stelle verursachen. LCA deckt solche Wechselwirkungen auf, etwa beim Wechsel von fossilen zu biobasierten Kunststoffen, wo Landnutzungsänderungen oder erhöhter Wasserverbrauch berücksichtigt werden müssen.
- **Unterstützung von Politik und Standards**
LCA bildet die Basis für umweltpolitische Rahmenwerke wie den EU Product Environmental Footprint (PEF) oder die Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED III). Durch die Integration von LCA-Ergebnissen in regulatorische Vorgaben wird die Transformation hin zu Netto-Null-Emissionen beschleunigt.

LCA ist ein unverzichtbares Werkzeug für die nachhaltige Entwicklung und Bewertung neuer Technologien. Durch die Identifikation von Umwelt-Hotspots, Optimierung von Prozessen und Vergleich alternativer Pfade unterstützt LCA fundierte Entscheidungen und verhindert Problemverlagerungen. Die enge Verzahnung von LCA mit Innovationsprozessen und politischen Strategien ist entscheidend für eine klimafreundliche Transformation der Wirtschaft.

5.5 Fallstudien am Weg zu Net Zero Bioraffinerien

Die Analyse von Fallstudien liefert wertvolle Einblicke in das Design, die Umsetzung und den Erfolg von Bioraffinerien in verschiedenen Anwendungsbereichen. Daher wurden in der letzten Projektperiode vielfältige Fallstudien gesammelt und strukturiert aufbereitet, um zentrale Aspekte wie Rohstoffauswahl, Verwertungspfade, Umweltauswirkungen, wirtschaftliche Tragfähigkeit und politische Rahmenbedingungen aufzuzeigen. Dies soll als Inspiration dienen und das Verständnis für die bestehenden Herausforderungen und Chancen im Bioraffinerie-Sektor schärfen. Die folgenden Fallstudien beleuchten spezifische Strategien zur Integration fortschrittlicher Konversionstechnologien, zur Optimierung der Ressourceneffizienz und zur Reduktion von Treibhausgasemissionen - unter Berücksichtigung von Marktanwendungen und regulatorischen Anforderungen. Diese Praxisbeispiele stellen wichtige Schritte auf dem Weg zu Net Zero bzw. Zero Emission Bioraffinerien dar.

Fallstudie 1
A) Allgemeine Informationen

Name der Bioraffinerie:	<i>Brauerei (anonym)</i>
Standort:	<i>Österreich</i>
Kernziel:	<i>Bierherstellung</i>
B) Rohstoffe	
Ausgangsmaterialien:	<i>Hauptsächlich Malz und Wasser; Treber als Verarbeitungsrückstand, der derzeit auf weitere Verwendungsmöglichkeiten untersucht wird</i>
Verarbeitungskapazität:	<i>Trebermengen von >15.000 t/a</i>
C) Technologie and Prozesse	
Verwendete Kerntechnologien:	<i>Proteinextraktion aus Biertreber durch kontinuierliche Strömungsrohrreaktoren; Biertreberfermentation (bereits seit 2017 im Einsatz); Gärrestverwertung zu Biodünger durch innovative Membrandestillation und Erzeugung von Torfersatzmaterialien für Gartenbau und Landwirtschaft.</i>
Integration:	<i>Die Brauerei ist aktuell in einen Wärmeverbund mit dem benachbarten Biomassekraftwerk eingebunden, Anschlüsse an das örtliche Abwassernetz sind hergestellt, eine Anbindung an die örtlichen Gasnetze ist geplant.</i>
D) Produkte und Ergebnisse	
Hauptprodukt:	<i>Bier</i>
Nebenprodukte:	<i>Proteinextrakte (Forschung), Biogas, Biodünger und landwirtschaftliche Produkte (Forschung)</i>
E) Umwelt- und Nachhaltigkeitskennzahlen	
Lebenszyklusanalyse (LCA):	<i>bevorstehend</i>
Verwendung von erneuerbaren Energien:	<i>100%</i>

Abfallwirtschaft:	<i>Strategien für Wasserrecycling sind vorhanden; Vision ist die vollständige Verwertung von Nebenprodukten</i>
H) Herausforderungen und Chancen	
Technische Herausforderungen:	<i>Neue Verarbeitungswege werden noch erforscht; technische Herausforderung: einfache und energieeffiziente Verfahren zu realisieren, die vor Ort leicht umgesetzt werden können; Herausforderung hinsichtlich des großen Bedarfs an Gärrestenlagerung</i>
Marktherausforderungen:	<i>Niedrige aktuelle Produktionskosten von Düngemitteln</i>
Chancen:	<i>Hohe Nachfrage nach bio-veganen Proteinprodukten; keine lokalen flüssigen Biodünger verfügbar, sehr hohe Qualität der festen Fraktion des Trebers nach der Fermentation (ähnlich wie Weißstorf)</i>
I) Highlights	
Wichtigste Erfolge:	<i>Demonstration der technischen Machbarkeit für die Trennung von Gärresten in feste und flüssige Fraktionen im großen Maßstab; Anwendung von Feststoffen in ersten Pflanzenanbauversuchen; technische Machbarkeit von kontinuierlichen Schwingströmungsreaktoren für die Proteinextraktion aus Biertreber mit einem Feststoffgehalt von bis zu 15 % nachgewiesen.</i>
Weitere Pläne:	<i>Weitere Erforschung der ganzheitlichen Möglichkeiten der Treberverwertung</i>
J) Verweise & Referenzen	
Links:	<i>Muster-Slawitsch B., Buchmaier J, Platzer C., Brunner C., Werner A., Breweries and their potential for sustainable circular economy concepts. Proceedings of the 34th VH Yeast Conference 2023. Buchmaier, J.; Krampfl, S.; Eibinger, M.; Kaira, G.S.; Nidetzky, B.; Muster -Slawitsch, B. Continuous Oscillatory Flow as Process Intensification Strategy in Protein Extraction from Brewer's Spent Grain. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification 2024, 200, 109772, doi:10.1016/j.cep.2024.109772.</i>

Platzer, C. Valorisation of Biogas Digestate through Nutrient Recovery by Means of Membrane Distillation - The "BioProfit" Project. Presented at the Progress in Manure & Digestate 2024, International Online Conference, 2024.

Kontakt:

Bettina Muster-Slawitsch, AEE INTEC (Forschungsinstitut).

Fallstudie 2	
A) Allgemeine Informationen	
Name der Bioraffinerie:	<i>TUW Organosolv Pilot Plant</i>
Standort:	<i>Österreich</i>
Eigentümer:	<i>Technische Universität Wien</i>
Kernziel:	<i>Demonstrationszwecke</i>
B) Rohstoffe	
Ausgangsmaterialien:	<i>Weizenstroh, Sägewerksrückstände aus Hart- und Weichholz, Schnittrückstände aus Weinbergen.</i>
Verarbeitungskapazitäten:	<i>The volume of feedstock the facility can process annually is not determined as it is operated as demonstration plant.</i>
C) Technologie und Prozesse	
Verwendete Kerntechnologien:	<i>Die Bioraffinerie nutzt flüssiges Heißwasser (LHW), Organosolv, Lösungsmittelrückgewinnung mittels Membranfiltration und Destillation sowie Niederschlagstechniken zur Herstellung von Nanoligninpartikeln.</i>
Verarbeitungspfad:	<i>Vorbehandlung von Weizenstroh mittels Organosolv-Extraktion und anschließender Fällung zur Bildung von Nanoligninpartikeln.</i>
Integration:	<i>Die Energieintegration mittels Pinch-Technologie (theoretisch, nach Hochskalierung auf eine Produktionskapazität von 12 t/h) führte zu einer Exergieeffizienz von 92 %.</i>
D) Produkte und Ergebnisse	
Hauptprodukt:	<i>Schwefelfreie Nanoligninpartikel mit einer Größe von etwa 100 nm und einer Niederschlagsausbeute von über 65 % (m/m)</i>
Nebenprodukt:	<i>Nutzung von Zellulose- und Mischzuckerströmen zur Herstellung hochwertiger Produkte</i>

Marktanwendungen:	<i>Ligninbasierte Materialien und Biokunststoffe.</i> <i>Zelluloseanwendungen in der Papier- und Bioindustrie.</i> <i>Zucker für die Produktion von Biochemikalien und Biokraftstoffen.</i>
E) Umwelt- und Nachhaltigkeitskennzahlen	
Lebenszyklusanalyse (LCA):	<i>Wichtige Auswirkungswerte (pro kg verarbeitetem nassem Weizenstroh)</i> <i>Treibhauspotenzial (GWP):</i> <i>ohne biogenem Kohlenstoff: 0.50 to 0.68 kg CO₂ eq.</i> <i>mit biogenem Kohlenstoff: –1.06 to –0.88 kg CO₂ eq.</i> <i>Wasserverbrauch: 90-143 kg</i> <i>Wasserverbrauch primär getrieben durch:</i> <i>Ethanolrückgewinnung</i> <i>Waschschritte</i> <i>Membranfiltration und -reinigung</i> <i>Landnutzungsänderung</i> <i>1.89 to 2.46 annual cropeq.</i> <i>Landnutzung primär getrieben durch:</i> <i>Biomasseanbau für Weizenstrohrohstoff</i> <i>Bioethanolproduktion</i> <i>Energiebedarf für die Lösemittelrückgewinnung und die Prozesswärme</i> <i>Nebenströme, für die eine stoffliche Nutzung wirtschaftlich nicht möglich ist, werden für die Energieerzeugung vorgesehen. Das sekundäre Ziel besteht darin, Nährstoffe zu konservieren, die den Landwirten als Düngemittel zurückgegeben werden können, wodurch der Kreislauf geschlossen wird.</i>
Abfallwirtschaft:	
F) Wirtschaftliche Aspekte (based on process simulation and estimations)	
Produktionskosten:	<i>etwa 45 % der Kosten entfallen auf Rohstoffe und Lösemittel; die Nebenkosten durch Betriebsmittel belaufen sich auf 34 %.</i>
Wirtschaftlichkeit:	<i>Ökonomische Analysen zeigen, dass Nanolignin einen erheblichen Beitrag zum Umsatz leistet, mit einem Anteil von etwa 50 % bis 80 % bei Hartholz bzw. Weichholz und 34 % bis 65 % bei Weizen- und Maisstroh. Amortisationszeit: 4–11 Jahre, mit ROIs zwischen 21–182 %</i>

Maßstab:	<i>Pilotanlage.</i>
H) Herausforderungen und Chancen	
Technische Herausforderungen:	<i>Bedarf an weiterer Optimierung der Lösemittelrückgewinnung.</i> <i>Variabilität im Lignozellulose-Rohstoff beeinträchtigt die Prozesseffizienz.</i>
Marktherausforderungen:	<i>Die kommerzielle Einführung ligninbasierter Produkte befindet sich noch in der Entwicklung.</i> <i>Die wirtschaftliche Machbarkeit hängt von der Nachfrage ab.</i>
Chancen:	<i>Die sequenzielle LHW-OS-Vorbehandlung verbessert die wirtschaftliche und ökologische Leistung.</i> <i>Mögliche Ausweitung auf andere lignozellulosehaltige Rohstoffe.</i>
I) Highlights	
Wichtigste Erfolge:	<i>Verbesserte Effizienz durch optimierte Prozessabfolge.</i> <i>Die Wirtschaftlichkeit hängt maßgeblich von der Reduzierung des Energie- und Lösungsmittelbedarfs ab.</i>
Weitere Pläne:	<i>Weitere Optimierung der Prozessintegration.</i> <i>Skalierung vom Konzeptentwurf auf Pilot- und Industrieebene.</i>
J) Verweise & Referenzen	
Links:	<i>Miltner, A., Miltner, M., Beisl, S., Wukovits, W., Harasek, M., Koch, D., Mihalyi, B., Friedl, A., 2018. Development of an Organosolv Biorefinery Based on Nanolignin as Main Product 94, 15–26.</i> <i>Serna-Loaiza, S., Emeder, P., Molaro, N., Daza-Serna, L., Köck, B., Mihalyi-Schneider, B., Friedl, A., 2024. Combinatorial liquid hot water and organosolv pretreatment of wheat straw: Techno-economic and environmental assessment.</i> <i>Weinwurm, F., Drlo, A., Waldmüller, W., Fiala, B., Niedermayer, J., Friedl, A., Lignin concentration and fractionation</i>

from ethanol organosolv liquors by ultra- and nanofiltration, J. Cleaner Production, 2016. 136: p. 62-71.

Koch, D., Paul, M., Beisl, S., Friedl, A., Mihalyi, B., 2020. Life cycle assessment of a lignin nanoparticle biorefinery: Decision support for its process development. Journal of Cleaner Production 245. 118760. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118760>

Kontakt:

Michael Harasek, TU Wien.

Fallstudie 3	
A) Allgemeine Informationen	
Name der Bioraffinerie:	<i>mehrere Beispiele wie etwa LIGNOFLAG,²⁴ POET-DSM Pro- ject LIBERTY,²⁵ GranBio,²⁶ Raízen,²⁷ Beta Renewables²⁸</i>
Standorte:	<i>USA, Brasilien, Deutschland, Italien, China</i>
Gründungsdatum:	<i>2010er – heute</i>
Eigentümer und Partner:	<i>Firmen wie Clariant, POET-DSM, Raízen, GranBio, DuPont, Beta Renewables, Regierungen und private Investoren</i>
Kernziel:	<i>Großproduktion von Bioethanol der zweiten Generation soll die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen verringern.</i>
B) Rohstoffe	
Ausgangsmaterialien:	<i>Landwirtschaftliche Rückstände (Maisstängel, Weizenstroh, Zuckerrohrbagasse), Forstabfälle, Siedlungsabfälle, Energie- pflanzen (Miscanthus, Rutenhirse).</i>
Verfügbarkeit und Lieferkette:	<i>Aus lokaler Produktion; die Logistik umfasst Sammel-, Trans- port- und Lagerungsvereinbarungen mit Landwirten, Forst- wirtschaft und Abfallwirtschaft.</i>
Verarbeitungskapazitäten:	<i>200.000 – 750.000 Tonnen jährlich, je nach Anlage.</i>
C) Technologie und Prozesse	
Verwendete Kerntechnologien:	<i>Enzymatische Hydrolyse, Dampfexplosion, Fermentation (Hefe- und Bakterienstämme), Vergasung (zur Synthese- gasumwandlung).</i>
Verarbeitungspfad:	<i>Vorbehandlung (Trocknung, Zerkleinerung, Verdichtung), en- zymatische Hydrolyse, Fermentation, Ethanolreinigung.</i>
Integration:	<i>Am selben Standort wie Ethanolanlagen der 1. Generation, Zellstoff- und Papierindustrie, Zuckerfabriken, Chemieanla- gen.</i>
D) Produkte und Ergebnisse	

Hauptprodukt:	<i>Bioethanol der zweiten Generation (Kraftstoffqualität).</i>
Nebenprodukt:	<i>Lignin-rich residues (bio-based materials, energy generation), biogas, animal feed protein fractions.</i>
Marktanwendungen:	<i>Kraftstoffe für den Transport, Biokraftstoffe für die Luftfahrt, Rohstoffe für die chemische Industrie.</i>
E) Umwelt- und Nachhaltigkeitskennzahlen	
Lebenszyklusanalyse (LCA):	<i>50-90 % weniger THG-Emissionen im Vergleich zu fossilen Brennstoffen.</i>
Verwendung von erneuerbaren Energien:	<i>in manchen Einrichtungen bis zu 100% erneuerbare Energie.</i>
Abfallwirtschaft:	<i>Wasserrecycling und Aufwertung von Nebenprodukten zur Abfallreduzierung.</i>
F) Wirtschaftliche Aspekte	
Produktionskosten:	<i>\$0.80 - \$1.50 pro Liter Ethanol.</i>
Wirtschaftlichkeit:	<i>subventioniert durch staatliche Anreize, Cellulose-RIN-Gutschriften (USA), EU-Förderung, brasilianische RenovaBio Carbon Credits.</i>
Geschaffene Arbeitsplätze:	<i>100-500 pro Einrichtung.</i>
Maßstab:	<i>von Demonstration bis zum kommerziellen Maßstab.</i>
G) Politischer und regulatorischer Kontext	
Einhaltung gesetzlicher Vorschriften:	<i>EU RED II, US Renewable Fuel Standard (RFS), Brazil RenovaBio</i>
Anreize und Subventionen:	<i>Horizon 2020 (EU), US Cellulosic Waiver Credits, Steueranreize in Brasilien und China</i>
H) Herausforderungen und Chancen	
Technische Herausforderungen:	<i>Hohe Enzymkosten, Rohstofflogistik, Prozesseffizienz.</i>

Marktherausforderungen:	<i>Hohe Investitionsausgaben, Preisvolatilität bei fossilen Brennstoffen, politische Unsicherheit.</i>
Chancen:	<i>Wachstum bei Biokraftstoffen für die Luftfahrt und CO₂-neutralen Kraftstoffen; Aufwertung durch Co-produktion.</i>
I) Highlights	
Wichtigste Erfolge:	<i>Zellulose-Ethanol-Anlagen im kommerziellen Maßstab in Betrieb (GranBio, POET-DSM, Raízen).</i>
Erkenntnisse:	<i>Bedarf an langfristiger politischer Unterstützung und Optimierung der Lieferkette.</i>
Weitere Pläne:	<i>Ausweitung auf Siedlungsabfälle, alternative Rohstoffe, Verbesserung der Prozesseffizienz.</i>
J) Verweise & Referenzen	
Links:	<i>Berichte von IEA Bioenergy,²⁹ EU Horizon 2020,³⁰ US DOE Bioenergy Technologies Office.³¹</i>
Kontakt:	<i>Branchenführer (Clariant, POET-DSM, Raízen, GranBio) und Bioenergie-Forschungseinrichtungen.</i>

Fallstudie 4	
A) Allgemeine Informationen	
Name der Bioraffinerie:	<i>mehrere Beispiele wie etwa Fulcrum BioEnergy,³² Neste,³³ Gevo,³⁴ Velocys,³⁵ LanzaJet³⁶</i>
Standorte:	<i>USA, Finnland, Großbritannien, Singapur, Brasilien</i>
Gründungsdatum:	<i>2010er – heute</i>
Eigentümer und Partner:	<i>Firmen wie Neste, Fulcrum BioEnergy, Gevo, Velocys, LanzaJet, Airbus, Boeing, Regierungen und private Investoren</i>
Kernziel:	<i>Großserienproduktion nachhaltiger Flugkraftstoffe (SAF) zur Dekarbonisierung des Flugverkehrs.</i>
B) Rohstoffe	
Ausgangsmaterialien:	<i>kommunale Siedlungsabfälle, landwirtschaftliche Rückstände, Forstabfälle, Altspeiseöl, Algen und CO₂-basierte Synthesewege.</i>
Verfügbarkeit und Lieferkette:	<i>von Abfallwirtschaftsunternehmen, der Land- und Forstwirtschaft sowie der industriellen CO₂-Abscheidung.</i>
Verarbeitungskapazitäten:	<i>100.000 – 1.000.000 Tonnen jährlich, je nach Anlage.</i>
C) Technologien und Prozesse	
Verwendete Kerntechnologien:	<i>Fischer-Tropsch Synthese, Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA), Alcohol-to-Jet (ATJ), Power-to-Liquid (PtL), Gasification</i>
Verarbeitungspfad:	<i>Rohstoffvorbehandlung, chemische Umwandlung (Hydroprocessing, Vergasung, Fermentation), Brennstoffaufbereitung</i>
Integration:	<i>Often co-located with refineries, waste processing plants, and carbon capture facilities</i>
D) Produkte und Ergebnisse	

Hauptprodukt:	<i>nachhaltiger Flugkraftstoff (Sustainable Aviation Fuel, SAF), erneuerbarer Diesel.</i>
Nebenprodukt:	<i>Naphtha, erneuerbare Gase, Biokohle.</i>
Marktanwendungen:	<i>Kommerzielle Luftfahrt, Militärluftfahrt, Treibstoff für Firmenflugzeuge.</i>
E) Umwelt- und Nachhaltigkeitskennzahlen	
Lebenszyklusanalyse (LCA):	<i>50-80 % weniger Treibhausgasemissionen im Vergleich zu fossilem Kerosin.</i>
Verwendung von erneuerbaren Energien:	<i>in manchen Einrichtungen bis zu 100% erneuerbare Energie.</i>
Abfallwirtschaft:	<i>Verwertung nicht wiederverwertbarer Abfälle, Aufwertung von Nebenprodukten.</i>
F) Wirtschaftliche Aspekte	
Produktionskosten:	<i>\$1.20 - \$3.00 pro Liter SAF.</i>
Wirtschaftlichkeit:	<i>Unterstützt durch Carbon Credits, Vorschriften für Flugbenzin und staatliche Anreize.</i>
Geschaffene Arbeitsplätze:	<i>200-1000 pro Einrichtung.</i>
Maßstab:	<i>vom Pilot- bis zum kommerziellen Maßstab.</i>
G) Politischer und regulatorischer Kontext	
Einhaltung gesetzlicher Vorschriften:	<i>CORSIA, EU RED II, US SAF Grand Challenge</i>
Anreize und Subventionen:	<i>Blender's tax credits, EU Horizon Finanzierung, US Low Carbon Fuel Standards (LCFS).</i>
H) Herausforderungen und Chancen	
Technische Herausforderungen:	<i>Rohstoffverfügbarkeit, kosteneffiziente Skalierung synthetischer Kraftstoffpfade.</i>

Marktherausforderungen:	<i>Hohe Investitionskosten, Preiswettbewerb mit fossilen Treibstoffen.</i>
Chancen:	<i>steigende Nachfrage nach SAF, technologische Fortschritte bei PtL und CO2-basierten Kraftstoffen.</i>
I) Highlights	
Wichtigste Erfolge:	<i>Erste kommerzielle SAF-Flüge, Partnerschaften mit Fluggesellschaften und Flugzeugherstellern.</i>
Erkenntnisse:	<i>Bedeutung politischer Unterstützung und Innovation bei der Rohstoffdiversifizierung.</i>
Weitere Pläne:	<i>Ausbau des Bereichs synthetischer E-Fuels, Erhöhung der Produktionskapazität, Integration in die Wasserstoffwirtschaft.</i>
J) Verweise & Referenzen	
Links:	<i>Berichte von ICAO,³⁷ IATA,³⁸ US DOE,³¹ European SAF Policy Framework.³⁹</i>
Kontakt:	<i>Branchenführer (Neste, Gevo, Velocys, LanzaJet) und Luftfahrtaufsichtsbehörden.</i>

Fallstudie 5	
A) Allgemeine Informationen	
Name der Bioraffinerie:	<i>Mehrere Beispiele wie HIF Global,⁴⁰ Air Liquide,⁴¹ Ørsted,⁴² Sunfire,⁴³ Shell REFHYNE⁴⁴</i>
Standorte:	<i>USA, Chile, Deutschland, Australien, Vereinigte Arabische Emirate, Japan, China</i>
Gründungsdatum:	<i>2010er – heute</i>
Eigentümer und Partner:	<i>Firmen wie Air Liquide, Ørsted, Shell, Sunfire, Siemens Energy, HIF Global, Regierungen und private Investoren</i>
Kernziele:	<i>Großskalige Produktion von grünem Wasserstoff und synthetischen E-Kraftstoffen für Verkehr und Industrie.</i>
B) Rohstoffe	
Ausgangsmaterialien:	<i>Wasser (für die Elektrolyse), abgeschiedenes CO₂ (plus erneuerbarer Strom aus Sonne, Wind und Wasser).</i>
Verfügbarkeit und Lieferkette:	<i>verfügbar aus industrieller CO₂-Abscheidung und Direct Air Capture (DAC); Energie wird aus erneuerbaren Energienetzen bezogen.</i>
Verarbeitungskapazitäten:	<i>Die Leistung der Elektrolyseure reicht von 10 MW (Pilotanlagen) bis 2 GW (Großanlagen).</i>
C) Technologie und Prozesse	
Verwendete Kerntechnologien:	<i>Elektrolyse (PEM, alkalisch, SOEC), Fischer-Tropsch-Synthese, Methanol-to-Jet, Reverse Water-Gas Shift.</i>
Verarbeitungspfad:	<i>CO₂-Abscheidung, Wasserstoffproduktion durch Elektrolyse, synthetische Kraftstoffraffination.</i>
Integration:	<i>oft am selben Standort wie Wind-/Solarparks und industrielle CO₂-Abscheideanlagen.</i>
D) Produkte und Ergebnisse	

Hauptprodukt:	<i>Grüner Wasserstoff (H₂), E-Methanol, synthetisches SAF, E-Diesel, E-Benzin.</i>
Nebenprodukt:	<i>Sauerstoff (aus Elektrolyse), Wasser, Wärme (für Fernwärme genutzt).</i>
Marktanwendungen:	<i>Luftfahrt, Schifffahrt, Schwerlasttransporte, Industriechemie, Energieerzeugug.</i>
E) Umwelt- und Nachhaltigkeitskennzahlen	
Lebenszyklusanalyse (LCA):	<i>90-100 % CO₂-Reduktion verglichen zu fossilen Brennstoffen.</i>
Verwendung von erneuerbaren Energien:	<i>100 % erneuerbarer Strom (Wind, Sonne, Wasser).</i>
Abfallwirtschaft:	<i>Wasserrecycling, Abwärmenutzung.</i>
F) Wirtschaftliche Aspekte	
Produktionskosten:	<i>Grüner Wasserstoff: \$3 – \$7 pro kg H₂, Synthetische Treibstoffe: \$1.5 – \$4 pro Liter</i>
Wirtschaftlichkeit:	<i>unterstützt durch EU Green Deal, US Inflation Reduction Act, nationale Wasserstoffstrategien.</i>
Geschaffene Arbeitsplätze:	<i>300-2000 pro Einrichtung.</i>
Maßstab:	<i>vom Pilotprojekt bis zum kommerziellen Maßstab (>1 GW Elektrolyse).</i>
G) Politischer und regulatorischer Kontext	
Einhaltung gesetzlicher Vorschriften:	<i>EU Fit for 55, US IRA (Hydrogen Production Tax Credit), Japan Green Hydrogen Roadmap.</i>
Anreize und Subventionen:	<i>Carbon contracts for difference (CCfD), Wasserstoffsubventionen (EU, US, Australia, Japan, UAE).</i>
H) Herausforderungen und Chancen	

Technische Herausforderungen:	<i>Kostensenkung bei Elektrolyseuren, CO₂-Abscheidungseffizienz, Brennstoffskalierbarkeit.</i>
Marktherausforderungen:	<i>Hohe Investitionsausgaben, Preisvolatilität bei fossilen Brennstoffen, Infrastrukturentwicklung.</i>
Chancen:	<i>Wachstum im wasserstoffbetriebenen Verkehr, Dekarbonisierung der Industrie, Ausbau von PtL-Kraftstoffen.</i>
I) Highlights	
Wichtigste Erfolge:	<i>erste großtechnische E-Fuel-Anlagen (HIF Global, Sunfire, Ørsted, Shell) in Betrieb.</i>
Erkenntnisse:	<i>Bedeutung langfristiger politischer Unterstützung, Skalierung der Elektrolyseure und Logistik zur CO₂-Abscheidung.</i>
Weitere Pläne:	<i>Ausbau zu Wasserstoff-Hubs, PtL-Kraftstoffe für Luft- und Schifffahrt, Weiterentwicklung der Wasserstoffspeicherung.</i>
J) Verweise & Referenzen	
Links:	<i>Berichte: IEA Hydrogen Report,⁴⁵ EU Hydrogen Strategy,⁴⁶ US DOE Hydrogen Roadmap.⁴⁷</i>
Kontakt:	<i>Branchenführer (HIF Global, Sunfire, Air Liquide, Ørsted, Shell) und Wasserstoff-Regulierungsbehörden.</i>

6 Vernetzung und Ergebnistransfer

6.1 Zielgruppen und Einbindung in das Projekt

Das Forschungsprojekt wurde mit einer Vielzahl relevanter Akteure vernetzt, um sowohl nationale als auch internationale Synergien zu nutzen. Folgende Zielgruppen wurden in das Projekt eingebunden:

Industriepartner: Unternehmen aus den Bereichen Bioenergie, Chemie und Materialwissenschaften, die an der Entwicklung und Skalierung neuer Bioraffineriekonzepte interessiert sind.

Akademische Institutionen: Universitäten und Forschungszentren, die neue Technologien entwickeln und wissenschaftliche Erkenntnisse bereitstellen. Besonders aktiv waren hier die Wissenschaftler*innen von AEE INTEC, der Technischen Universität Wien, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und technische Biowissenschaften und das Energieinstitut an der JKU, die zentrale wissenschaftliche Beiträge lieferten.

Politische Entscheidungsträger: Ministerien und Regierungsbehörden, die an der strategischen Umsetzung von Bioraffineriekonzepten beteiligt sind.

Zivilgesellschaftliche Akteure: NGOs, Umweltorganisationen und interessierte Bevölkerungsgruppen, die sich mit nachhaltiger Ressourcennutzung befassen.

Die Einbindung erfolgte durch Workshops, eine Fachkonferenz und bilaterale Gespräche mit den relevanten Stakeholdern. Wichtige Vernetzungsaktivitäten in den Jahren 2022 bis 2024 umfassten die Teilnahme an IEA Task 11 Meetings, Kooperationen mit internationalen Forschungsnetzwerken sowie themenspezifische Workshops organisiert durch, AEE INTEC die TU Wien und dem Energieinstitut.

Die folgenden Workshops sind aus der letzten Periode hervorzuheben:

- Task 11 internationales Meeting, 8. Mai 2023. Vorstellung von über 20 Projekten der internationalen Task 11 Community.
- Internationale IETS Konferenz in Göteborg, Mai, 2023 inkl. Vortrag zu den österreichischen Task 11 Aktivitäten und Projekten.
- Workshop (Subtask 2), Biorefineries towards net-zero emissions, 7th November 2023.

- Fall Working Meeting (Subtask 1) of IEA-IETS Task XI Sub-Task on: Decision Support Systems (DSS) and Ex-ante Research, 28th November 2023.
- Webinar (Subtask 3), Knowledge Sharing on Practices and Methodologies for Circular Bioeconomy and Industrial Symbiosis, 14th February, 2024.
- Task 11 Internationaler Workshop, 8. April, 2024 in Graz zum Thema Entscheidungsfindungen für neue Bioraffineriewege – Chancen und Herausforderungen.
- Monatliche Abstimmungen des Steering Committees zur Task-Entwicklungen.

Die Zusammenarbeit innerhalb dieses Konsortiums wird in der Periode 2024–2026 fortgesetzt, wodurch eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Konzepte und Technologien gewährleistet wird.

6.2 Kommunikation und Dissemination der Ergebnisse

Die Projektergebnisse wurden über verschiedene Kanäle disseminiert:

Wissenschaftliche Publikationen: Peer-Review-Artikel in internationalen Fachzeitschriften sowie Konferenzbeiträge. Relevante Veröffentlichungen umfassen Arbeiten von AEE INTEC zur energetischen Integration in Bioraffinerien, Studien des Energieinstituts an der JKU zur Lebenszyklusanalyse (LCA) sowie Veröffentlichungen der TU Wien zur CO₂-Nutzung in biobasierten Prozessen.

Fachveranstaltungen und Konferenzen: Präsentationen auf internationalen Tagungen der IEA und europäischer Forschungsinitiativen, darunter die IEA Bioenergy Konferenz 2023 sowie das IETS Task 11 Meeting 2024.

Online-Plattformen und Open Access: Veröffentlichung des Abschlussberichts auf www.nachhaltigwirtschaften.at sowie Beiträge auf thematisch relevanten Webseiten.

Direkte Stakeholder-Einbindung: Durch Policy Briefs, strategische Meetings mit politischen Entscheidungsträgern sowie Kooperation mit Industriepartnern zur Markteinbindung.

Liste von Publikationen/Posters/Vorträge durchgeführt im Rahmen dieses Projekt bzw. der einfließenden Projekte:

- 1) Fabian Schipfer, Judith Buchmaier, Bettina Muster-Slawitsch, Sebastian Serna-Loaiza, Michael Harasek, Pralhad Burli, Damon Hartley, Biljana Kulišić, Christiane Hennig, Karin Pettersson, Elisabeth Wetterlund. Synergies for bioenergy supply chains in bioeconomy networks. Bioeconomy Synergies (BioSyn) Initiative 2022-2024. IEA Bioenergy: Task 40. https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2025/03/IEA_Bioenergy-Task-40_Report_Synergies-for-bioenergy-supply-chains-in-bioeconomy-networks-1.pdf.
- Vernetzung mit IEA IETS Task 40 (Deployment of Biobased Value Chains).
- 2) Fabian Schipfer, Pralhad Burli, Uwe Fritsche, Christiane Hennig, Fabian Stricker, Maria Wirth, Svetlana Proskurina, Sebastian Serna-Loaiza. The circular bioeconomy: a driver for

system integration. *Energy, Sustainability and Society* 14, 34.

<https://doi.org/10.1186/s13705-024-00461-4>

- Vernetzung mit IEA IETS Task 40 (Deployment of Biobased Value Chains).

- 3) Serna-Loaiza, S., Emeder, P., Molaro, N., Daza-Serna, L., Köck, B., Mihalyi-Schneider, B., Friedl, A., 2024. Combinatorial liquid hot water and organosolv pretreatment of wheat straw: Techno-economic and environmental assessment.
- 4) Serna Loaiza, S., Schipfer, F., Friedl, A., Mihalyi-Schneider, B., Wukovits, W., & Harasek, M. (2024, April 18). Concept for a net-zero wheat straw product-driven biorefinery [Poster Presentation]. WIRE's MC Meeting & 5th Working Groups Workshop, Istanbul, Turkey.
 - Vernetzung mit COST Action "WIRE – CA20127 – Waste biorefinery technologies for accelerating sustainable energy processes".
- 5) Serna Loaiza, S., Friedl, A., & Harasek, M. (2023). Concept for a net-zero energy self-supply biorefinery: wheat straw study case. In A. Mudrovčić & M. Ban (Eds.), *Book of Abstract: 18th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES), Dubrovnik 2023* (pp. 265–265).
- 6) Bianca Köck, Anton Friedl, Sebastián Serna Loaiza, Walter Wukovits, Bettina Mihalyi-Schneider. Automation of life cycle assessment—A critical review of developments in the field of life cycle inventory analysis. *Sustainability MDPI* 15, 5531.
<https://doi.org/10.3390/su15065531>.
- 7) Sebastián Serna-Loaiza, Johannes Adamcyk, Stefan Beisl, Martin Miltner, Anton Friedl. Sequential pretreatment of wheat straw: liquid hot water followed by organosolv for the production of hemicellulosic sugars, lignin, and a cellulose-enriched pulp. *Waste and Biomass Valorization* 13, 4771-4784. <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01824-8>
- 8) Koch, D., Paul, M., Beisl, S., Friedl, A., Mihalyi, B., 2020. Life cycle assessment of a lignin nanoparticle biorefinery: Decision support for its process development. *Journal of Cleaner Production* 245, 118760. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118760>
- 9) Bhatta Sandip, 2024. A Comprehensive Analysis of Mass, Energy and Environmental Implications of Continuous Protein Extraction from Brewer's Spent Grains. Master Thesis.
- 10) Buchmaier J., Eibinger M., Muster-Slawitsch B., 2023. Continuous Protein Extraction in Oscillatory Flow as a part of a Biorefining Concept. Presented at the European Biomass Conference, Bologna.
- 11) Buchmaier, J., Krampl, S., Eibinger, M., Kaira, G.S., Nidetzky, B., Muster -Slawitsch, B., 2024. Continuous oscillatory flow as process intensification strategy in protein extraction from brewer's spent grain. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification* 200, 109772. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2024.109772>
- 12) Buchmaier J., Muster-Slawitsch B., 2024. Continuous enzymatic hydrolysis in oscillatory flow rheology as process intensification strategy for biorefineries (Final Report). AEE INTEC.
- 13) Buchmaier J., Plesch T., Petermeier P., Muster-Slawitsch B., 2025. In-line Product Separation in a Continuous Oscillatory Flow Bioreactor as Process Intensification and Product Inhibition Mitigation Strategy. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification* under submission.

- 14) Christoph Hoefer, Christian Platzer, Mauricio Miguel Fragali Pane, Miguel Aguilar Moreno, Manfred Nachtnebel, Hartmuth Schröttner, Julian Drausinger, Bettina Muster-Slawitsch, 2023. Potentials and limitations of direct contact membrane distillation for ammonium recovery from brewers spent grain digestate at laboratory and pilot plant scale. Presented at the 3rd International Workshop on Membrane Distillation and Innovating Membrane Operations in Desalination and Water Reuse, Sorrento.
- 15) Judith Buchmaier, Manuel Eibinger, Bettina Muster-Slawitsch, 2023. Oscillatory flow reactor for protein hydrolysis from food waste. Presented at the European Process Intensification Conference, Warsaw.
- 16) Lanz Hannah, 2025. Technology pathways to achieve negative and/or net zero emissions in biorefineries. Bachelor Thesis, in progress.
- 17) Muster-Slawitsch, B., 2024. Process Intensification for Circular Economy. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification 110095.
<https://doi.org/10.1016/j.cep.2024.110095>
- 18) Muster-Slawitsch B., Platzer C., Buchmaier J., Brunner Christoph, Andreas Werner, 2023. Breweries and their potential for sustainable circular economy concepts, in: Zero Waste and Circular (Yeast) Production. Presented at the 34th VH Yeast Conference 2023, Vienna.
- 19) Muster-Slawitsch Bettina, Lindorfer Johannes, 2024. Bioraffinerien in Österreich - Herausforderungen und Chancen. Interview in der BMK Broschüre „Bioraffinerien in Österreich“.
- 20) Muster-Slawitsch Bettina, Platzer, Christian, Buchmaier Judith, 2024. Schlüsseltechnologien für die Kreislaufwirtschaft: Beispiel Proteingewinnung aus Lebensmittelreststoffen. 2. Agrar-und Forstwirtschaftliche Konferenz “Vom Feld zur Zukunft“, KeyNote Vortrag, Vienna.
- 21) Platzer, C., 2024. Valorisation of biogas digestate through nutrient recovery by means of membrane distillation - The “BioProfit” project. Presented at the International Conference on Progress in Manure & Digestate 2024.
- 22) Plesch, T., 2025. Enzymatic hydrolysis of cellulosic material in an Oscillatory Flow Bioreactor (OFB) at High Solid Loadings (Master thesis). Graz University of Technology.
- 23) Rodin, V., Böhm, H., Lindorfer, J., Paulik, C. (2023) Techno-economic evaluation of the electrochemical production of renewable ethylene oxide from fluctuating power sources and CO₂, Journal of CO₂ Utilization, Volume 75, 102554,
<https://doi.org/10.1016/j.jcou.2023.102554>.
- 24) Nathaniel J. Berger, J.N., Masri, M., Brück, T., Garbe, D., Pfeifer, C., Lindorfer, J. (2023) Utilizing a CHP Power Plant’s Energy and CO₂ Emissions for the Manufacture of Affordable and Carbon Neutral Algae Bioplastic for Re-Useable Packaging, Industrial & Engineering Chemistry Research, 62 (18), 7275-7296, <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c00590>
- 25) Puschnigg, S., Fazeni-Fraisl, K., Lindorfer, J., Kienberger, T. (2023) Biorefinery development for the conversion of softwood residues into sustainable aviation fuel: Implications from life cycle assessment and energetic-exergetic analyses, Journal of Cleaner production, Volume 386, 135815, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135815>

- 26) Fazeni-Fraisl, K., Lindorfer, J. (2022), Comparative life cycle assessment of first- and second-generation bio-isobutene as a drop-in substitute for fossil isobutene. Biofuels, Bioprod. Bioref, <https://doi.org/10.1002/bbb.2444>
- 27) Rodin, V., Zeilerbauer, L., Lindorfer, J., Paulik, C. and Finger, D. (2022) Life cycle assessment of a novel electrocatalytic process for the production of bulk chemical ethylene oxide from biogenic CO₂, Front. Sustain. 3:799389. doi: 10.3389/frsus.2022.799389
- 28) Berger, N. J., Lindorfer, J., Fazeni, K., Pfeifer, C. (2022) The techno-economic feasibility and carbon footprint of recycling and electrolysing CO₂ emissions into ethanol and syngas in an isobutene biorefinery, Sustainable Production and Consumption, Vol. 32, pages 619-637, <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.05.014>

6.3 Nationale und internationale Relevanz der Projektergebnisse

Die Projektergebnisse sind sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene relevant. Auf nationaler Ebene sind die Ergebnisse in Strategieprozesse des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) eingeflossen. Auf internationaler Ebene sind die Ergebnisse in den IEA Task 11 Prozess eingeflossen und dienen als Grundlage für weiterführende europäische Forschungsinitiativen zur industriellen Bioökonomie. Insbesondere die Zusammenarbeit mit IEA IETS Task 11 hat dazu beigetragen, die Ergebnisse der österreichischen Forschungseinrichtungen international zu verankern.

Darüber hinaus wird in der kommenden Periode 2024-2026 eine verstärkte Anbindung an IEA IETS Task 21 erfolgen, wobei insbesondere das Energieinstitut der JKU eine Schlüsselrolle bei der Analyse und Bewertung neuer technologischer Ansätze zur Dekarbonisierung industrieller Prozesse einnehmen wird.

7 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen

7.1 Wichtige Erkenntnisse aus dem Projekt

Das Forschungsprojekt lieferte entscheidende Erkenntnisse für die Weiterentwicklung von Bioraffinerien im industriellen Maßstab. Dazu gehören

- Die Notwendigkeit der Integration neuer biochemischer und thermochemischer Verfahren zur Optimierung der Ressourceneffizienz. Hier wurden an der TU Wien neue Konzepte zur Organosolv-Fraktionierung und Membrantechnologie zur Gewinnung hochwertiger Fraktionen entwickelt. An der AEE INTEC wurden Studien zum Einsatz des oszillierenden Bioreaktors und der Membrandestillation als Schlüsseltechnologien für Bioraffinerien fortgesetzt und intensiviert.
- Die Bedeutung der CO₂-Abtrennung und -Nutzung (CCU) sowie der Bioenergie mit CO₂-Abtrennung und -Speicherung (BECCS) für das Erreichen von Netto-Null-Emissionen. AEE INTEC hat dazu erste Analysen durchgeführt, um die Auswirkungen neuer Verwertungspfade für biogene Nebenprodukte auf die CO₂-Bilanz zu untersuchen.
- Die Rolle von Lebenszyklusanalysen (LCA) zur Bewertung der Nachhaltigkeit neuer Bioraffineriekonzepte. Es wurde deutlich, dass für die Bewertung von Net-Zero bzw. Negativ-Emissions-Konzepten eine Betrachtung des gesamten Lebenszyklus (cradle to grave und cradle to cradle) notwendig ist. Das Energieinstitut an der JKU hat dazu detaillierte LCA-Modelle entwickelt und Szenarien zur Optimierung der Kohlenstoffbilanz analysiert.
- Entscheidungen für Industrie oder Bioraffinerien werden immer komplexer. Es wird notwendig sein, die Industrien zu fundierten Entscheidungen zu begleiten und Zukunftstrends bestmöglich abzuschätzen.

7.2 Weiterführende Forschungsbedarfe

Basierend auf den Projektergebnissen wurden folgende Forschungsfragen als prioritär identifiziert:

- Optimierung bestehender und neuer Bioraffineriekonzepte in Bezug auf Energieeffizienz und Ressourceneffizienz, mit speziellem Fokus auf die Integration emergierender Technologien und erneuerbarer Energie und Bewertung dieser Konzepte im Hinblick auf Net-Zero bzw. Negativemissionen (AEE INTEC, TU Wien, EIT-JKU).
- Entwicklung innovativer Verfahren zur stofflichen Nutzung von Nebenströmen aus Bioraffinerien, insbesondere durch katalytische und enzymatische Verfahren (TU Wien, AEE INTEC).

- Betrachtungen von CCU Prozessen und ihren Beiträgen zu Net-Zero Konzepten in Bioraffinerien, einerseits Nutzung des CO₂ aus biogenen Punktquellen, andererseits durch Nutzung von (biogenen und/oder fossilen) CO₂ als Rohstoff für Bioraffinerien.
- Weiterentwicklung von Modellen zur Integration erneuerbarer Energien in industrielle Prozesse sowie neue Methoden zur Bewertung von CO₂-Nutzung in biobasierten Kreisläufen (Energieinstitut an der JKU).
- Bewertung regulatorischer Rahmenbedingungen für die Markteinbindung neuer Bioökonomie-Produkte, basierend auf wirtschaftlichen und ökologischen Anreizen.
- Herausforderungen der Lebenszyklusanalyse (LCA) zur Bewertung von Net-Zero Technologien:
 - Systemgrenzen und Umfangsdefinition: Net-Zero-Technologien haben oft komplexe Lieferketten, sodass eine sorgfältige Auswahl der Systemgrenzen erforderlich ist. Indirekte Emissionen (z. B. aus Lieferketten oder Infrastrukturentwicklung) sind schwer zu erfassen.
 - Datenverfügbarkeit und -qualität: Zu neuen Technologien gibt es oft nur wenige verlässliche und aktuelle Daten. Unterschiede in den Datensätzen können zu Inkonsistenzen und Unsicherheiten in den LCA-Ergebnissen führen.
 - Integration von CO₂-Entnahme und Kompensation: Die genaue Modellierung von CO₂-Abscheidung, -Speicherung und -Kompensation innerhalb von LCA-Rahmenwerken ist komplex. Es fehlen standardisierte Methoden zur Berücksichtigung negativer Emissionen.
 - Dynamische vs. statische Bewertungen: Konventionelle LCA-Modelle sind oft statisch, während Net-Zero-Technologien eine dynamische Modellierung erfordern, um zeitabhängige Effekte (z. B. Integration erneuerbarer Energien) abzubilden.
 - Regionale und zeitliche Variabilität: Der CO₂-Fußabdruck einer Technologie kann je nach geografischem Standort und Energiemix erheblich variieren. Veränderungen im Laufe der Zeit, wie die Dekarbonisierung des Stromnetzes, sind schwer vorhersehbar, beeinflussen aber die Ergebnisse.
 - Definition der funktionellen Einheit und Vergleichbarkeit: Netto-Null-Technologien haben oft unterschiedliche funktionelle Outputs (z.B. Energiespeicherung vs. direkte Emissionsreduktion), was Vergleiche erschwert. Die Wahl geeigneter funktioneller Einheiten, die die tatsächliche Leistung widerspiegeln, ist entscheidend.
 - EU-Initiativen wie Product Environmental Footprint (PEF) und Environmental Product Declarations (EPD) mit ihren entsprechenden Produktkategorieregeln sind für die Gewährleistung der Vergleichbarkeit von großer Bedeutung. Ähnliche Ansätze sollten auch für die Entwicklung von Technologien in Betracht gezogen werden.
 - Indirekte Auswirkungen und systemische Effekte berücksichtigen: Netto-Null-Technologien können Rebound-Effekte haben (z.B. steigender Energieverbrauch durch Wahrnehmung als „saubere“ Energie). Systemische Veränderungen, wie z.B. Änderungen in der Landnutzung oder in den Stoffkreisläufen, werden in traditionellen LCA-Ansätzen oft nicht vollständig erfasst.
 - Integration sozialer und ökonomischer Aspekte: Konventionelle Ökobilanzen konzentrieren sich auf Umweltaspekte, aber Netto-Null-Technologien erfordern auch die Berücksichtigung sozialer und wirtschaftlicher Faktoren. Die Integration der Lebenszyklus-Nachhaltigkeitsbewertung (Life Cycle Sustainability Assessment, LCSA) in die LCA befindet sich noch in der Entwicklung.

- Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen: Neue Technologien haben hohe Unsicherheiten aufgrund sich entwickelnder Effizienzen, Materialverfügbarkeit und regulatorischer Änderungen. Sensitivitätsanalysen sind notwendig, um belastbare Ergebnisse zu gewährleisten, erhöhen aber die Komplexität.
- Standardisierung und Konsistenz: Es gibt keine weltweit anerkannten Standards zur Bewertung von Net-Zero-Pfaden. Unterschiedliche Annahmen und Methoden führen zu Inkonsistenzen zwischen Studien.
- Die Angleichung an Initiativen wie die PEF-Initiative der EU ist von entscheidender Bedeutung für die Harmonisierung von Ökobilanzen, da sie eine einheitliche Methodik für die vergleichbare und zuverlässige Bewertung von Umweltauswirkungen schafft.

Die zukünftige Arbeit wird im selben Konsortium fortgeführt, um die Entwicklungen aus dieser Projektphase weiterzuführen und neue Erkenntnisse systematisch in die Praxis zu überführen.

7.3 Empfehlungen für die FTI-Politik

Um die Innovationskraft und Wettbewerbsfähigkeit im Bereich industrieller Bioraffinerien zu stärken, werden folgende Empfehlungen für die Forschung, Technologie und Innovationspolitik (FTI) abgeleitet:

Förderung interdisziplinärer Forschung zur Stärkung der Zusammenarbeit zwischen Chemie-, Energie- und Umweltwissenschaften. Dies umfasst Programme zur technologieübergreifenden Forschung.

Unterstützung von Pilot- und Demonstrationsprojekten zur Skalierung innovativer Bioraffineriekonzepte.

Schaffung klarer regulatorischer Rahmenbedingungen zur Integration von Bioenergie und biobasierten Produkten in bestehende Wertschöpfungsketten, um Marktzugänge zu erleichtern.

Stärkung der internationalen Kooperation innerhalb der IEA, der EU-Forschungsprogramme sowie bilateraler Forschungsinitiativen, um die technologische Führungsposition Österreichs im Bereich der industriellen Bioraffinerien weiter auszubauen. Besonders die Zusammenarbeit mit IEA IETS Task 21 wird künftig eine größere Rolle spielen.

Diese Empfehlungen sollen dazu beitragen, die Transformation hin zu einer nachhaltigen Bioökonomie weiter voranzutreiben und industrielle Bioraffinerien als zentralen Bestandteil der Kreislaufwirtschaft zu etablieren.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Intensivierungspotentiale des oszillierenden Flow Reaktors in Bioraffinerieprozessen (Buchmaier and Muster-Slawitsch, 2024)	22
---	----

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Rolle indust. Bioraffinerien in der Bioökonomie	14
Abbildung 2. Kohlenstoffkreislauf und industrielle Tätigkeiten	16
Abbildung 3: Technologiepfade in Bioraffinerien	18
Abbildung 4: Prozessschema einer Brauerei und Integrationspunkt des oszillierenden Reaktors für die Proteinextraktion aus Biertreber	20
Abbildung 5: Proteinhydrolyse im COFB bei unterschiedlichen Verweilzeiten und Feststoffbeladungen (200 mM NaOH, T=50°C) ¹⁷	20
Abbildung 6: Einfluss der in-Situ Glukose-Entnahme auf die Glukoseproduktion über die Versuchszeit (0-90ml/h Glukoseentnahme) (Plesch, 2025)	21
Abbildung 7: Das Projektkonzept von circularFood - Steigerung der Wertschöpfung von Lebensmittelreststoffen durch kaskadische Nutzungswege.....	24
Abbildung 8: Agenda des internationalen Workshops zu Entscheidungsfindung für neue Bioraffineriewege	25
Abbildung 9. Pfad für die Implementierung von Net Zero Strategien	26

Literaturverzeichnis

- (1) *Waste Recycling in Europe*; European Environment Agency, 2024. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/waste-recycling-in-europe> (accessed 2025-01-22).
- (2) *Plastics - the Fast Facts 2024*; Plastics Europe, 2024. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2024/> (accessed 2025-01-22).
- (3) International Energy Agency. *Direct Air Capture: A Key Technology for Net Zero*; IEA, 2022. <https://doi.org/10.1787/bbd20707-en>.
- (4) National Energy Technology Laboratory. *Point Source Carbon Capture Program*; Factsheet Program 160; U.S. Department of Energy, 2023; pp 1–4.
- (5) Zuiderveen, E. A. R.; Kuipers, K. J. J.; Caldeira, C.; Hanssen, S. V.; Van Der Hulst, M. K.; De Jonge, M. M. J.; Vlysidis, A.; Van Zelm, R.; Sala, S.; Huijbregts, M. A. J. The Potential of Emerging Bio-Based Products to Reduce Environmental Impacts. *Nat. Commun.* **2023**, *14* (1), 8521. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43797-9>.
- (6) Hossain, T.; Burli, P.; Pin, J.; Jones, D.; Hartley, D.; Hess, R. *Deployment of BECCUS Value Chains in the United States*; Report; IEA Bioenergy, 2023; pp 1–23.
- (7) International Renewable Energy Agency. *Recycle: Bioenergy*; Guide to the Circular Carbon Economy; Report; KAPSARC, 2020; pp 1–76.
- (8) Buffington, J. The Economic Potential of Brewer's Spent Grain (BSG) as a Biomass Feedstock. *Adv. Chem. Eng. Sci.* **2014**, *04* (03), 308–318. <https://doi.org/10.4236/aces.2014.43034>.
- (9) Sežun, M.; Grilc, V.; Zupančič, G. D.; Marinšek-Logar, R. Anaerobic Digestion of Brewery Spent Grain in a Semi-Continuous Bioreactor: Inhibition by Phenolic Degradation Products. *Acta Chim Slov* **2011**, *58* (1), 158–166.
- (10) Emmanuel, J. K.; Nganyira, P. D.; Shao, G. N. Evaluating the Potential Applications of Brewers' Spent Grain in Biogas Generation, Food and Biotechnology Industry: A Review. *Heliyon* **2022**, *8* (10), e11140. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11140>.
- (11) Głowacki, S.; Salamon, A.; Sojak, M.; Tulej, W.; Bryś, A.; Hutsol, T.; Salamon, M.; Kukharets, S.; Janaszek-Marćkowska, M. The Use of Brewer's Spent Grain after Beer Production for Energy Purposes. *Materials* **2022**, *15* (10), 3703. <https://doi.org/10.3390/ma15103703>.
- (12) Chettrariu, A.; Dabija, A. Brewer's Spent Grains: Possibilities of Valorization, a Review. *Appl. Sci.* **2020**, *10* (16), 5619. <https://doi.org/10.3390/app10165619>.
- (13) Jackowski, M.; Niedźwiecki, Ł.; Jagiełło, K.; Uchańska, O.; Trusek, A. Brewer's Spent Grains—Valuable Beer Industry By-Product. *Biomolecules* **2020**, *10* (12), 1669. <https://doi.org/10.3390/biom10121669>.
- (14) Zeko-Pivač, A.; Tišma, M.; Žnidaršič-Plazl, P.; Kulisić, B.; Sakellaris, G.; Hao, J.; Planinić, M. The Potential of Brewer's Spent Grain in the Circular Bioeconomy: State of the Art and Future Perspectives. *Front. Bioeng. Biotechnol.* **2022**, *10*.
- (15) Wahlström, R.; Rommi, K.; Willberg-Keyriläinen, P.; Ercili-Cura, D.; Holopainen-Mantila, U.; Hiltunen, J.; Mäkinen, O.; Nygren, H.; Mikkelsen, A.; Kuutti, L. High Yield Protein Extraction from Brewer's Spent Grain with Novel Carboxylate Salt - Urea Aqueous Deep Eutectic Solvents. *ChemistrySelect* **2017**, *2* (29), 9355–9363. <https://doi.org/10.1002/slct.201701492>.
- (16) Buchmaier J., Muster-Slawitsch B. *Continuous Enzymatic Hydrolysis in Oscillatory Flow Rheology as Process Intensification Strategy for Biorefineries*; Final Report; AEE INTEC, 2024.
- (17) Buchmaier, J.; Krampl, S.; Eibinger, M.; Kaira, G. S.; 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. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2024.109772>.
- (18) Plesch, T. *Enzymatic Hydrolysis of Cellulosic Material in an Oscillatory Flow Bioreactor (OFB) at High Solid Loadings*; Master thesis; Graz University of Technology, 2025; p 100.

- (19) Buchmaier J.; Plesch T.; Petermeier P.; Muster-Slawitsch B. In-Line Product Separation in a Continuous Oscillatory Flow Bioreactor as Process Intensification and Product Inhibition Mitigation Strategy. *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.* **2025**, under submission.
- (20) Platzer, C. Valorisation of Biogas Digestate through Nutrient Recovery by Means of Membrane Distillation - The "BioProfit" Project, 2024.
- (21) Paar, Klaus; Platzer, Christian; Drausinger, Julian; Kaufmann, Alexander; Zweiler, Richard; Muster-Slawitsch, Bettina. BioProfit - Profitable Valorisation von Biogasgärresten Durch CO₂-Speicherung Und Nährstoffrückgewinnung, 2024.
- (22) Paar, K.; Drausinger, J.; Kaufmann, A.; Zweiler, R.; Muster-Slawitsch, B. *BioProfit - Profitable Valorisation von Biogasgärresten Durch CO₂-Speicherung Und Nährstoffrückgewinnung*; ACR final report; AEE INTEC, Gleisdorf.
- (23) Stuart, P.R. Biorefinery Transformation 101: Tutorial on Designing the Biorefinery, Session 1: The Basics. In *PaperWeek-BIOFOR Conference*; 2022.
- (24) *Circular Bio-based Europe Joint Undertaking (CBE JU)*. LIGNOFLAG. <https://www.cbe.europa.eu/projects/lignoflag> (accessed 2025-02-10).
- (25) Bioenergy Technologies Office. *POET-DSM: Project Liberty*. U.S. Department of Energy. <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/poet-dsm-project-liberty> (accessed 2025-02-10).
- (26) GranBio. *GranBio's 2G Ethanol Plant*. <https://www.granbio.com.br/en/> (accessed 2025-02-10).
- (27) Raízen. *Raízen's Cellulosic Ethanol Plant*. <https://www.raizen.com.br/en/> (accessed 2025-02-10).
- (28) Beta Renewables S.p.A. *PROESA™ / What is it?* <http://betarenewables.st.e-one.it/en/proesa/what-is-it> (accessed 2025-02-25).
- (29) Bennett, P.; Rossi, A. *IEA Bioenergy - Annual Report 2022*; Annual Report; International Energy Agency. <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2023/05/Annual-Report-2022.pdf> (accessed 2025-02-10).
- (30) European Commission. *Horizon 2020: The EU Framework Programme for Research and Innovation*. <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en> (accessed 2025-02-10).
- (31) U.S. Department of Energy. *Bioenergy Technologies Office*. <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/bioenergy-technologies-office> (accessed 2025-02-10).
- (32) Fulcrum BioEnergy. *About Us*. <https://fulcrum-bioenergy.com/about/> (accessed 2025-02-10).
- (33) Neste. *Sustainable Aviation Fuel (SAF)*. <https://www.neste.com/products-and-innovation/sustainable-aviation/sustainable-aviation-fuel> (accessed 2025-02-25).
- (34) Gevo, Inc. *Sustainable Aviation Fuel*. <https://gevo.com/product/sustainable-aviation-fuel/> (accessed 2025-02-10).
- (35) Velocys. *Sustainable Aviation Fuel*. <https://velocys.com/projects/> (accessed 2025-02-25).
- (36) LanzaJet. *About*. <https://www.lanzajet.com/about> (accessed 2025-02-25).
- (37) International Civil Aviation Organization. *Sustainable Aviation Fuels (SAF)*; ICAO. <https://www.icao.int/environmental-protection/pages/SAF.aspx> (accessed 2025-02-10).
- (38) International Air Transport Association. *Developing Sustainable Aviation Fuel (SAF)*; IATA. <https://www.iata.org/en/programs/sustainability/sustainable-aviation-fuels/> (accessed 2025-02-10).
- (39) European Commission. *ReFuelEU Aviation*. https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/environment/refueleu-aviation_en (accessed 2025-02-25).
- (40) HIF Global. *Fueling Our World with Renewable Energy*; 2023. https://hifglobal.com/docs/default-source/default-document-library/rs_hif_2023_24.pdf (accessed 2025-02-25).
- (41) Air Liquide S.A. *Air Liquide in Brief*. <https://www.airliquide.com/group/air-liquide-brief> (accessed 2025-02-25).
- (42) Ørsted A/S. *Who we are*. <https://orsted.com/en/who-we-are> (accessed 2025-02-25).
- (43) Sunfire AG. *About Sunfire - The Electrolysis Specialist*. <https://sunfire.de/en/about/> (accessed 2025-02-25).

- (44) Shell plc. *Shell takes final investment decision on 100MW German green hydrogen project to supply its own refinery*. <https://www.hydrogeninsight.com/industrial/shell-takes-final-investment-decision-on-100mw-german-green-hydrogen-project-to-supply-its-own-refinery/2-1-1682841> (accessed 2025-02-10).
- (45) Andrean, G.; Bennett, S.; Blanco, H.; Budinis, S.; Chae, J.; Connelly, E.; Delmastro, C.; Evangelopoulou, S.; Fajardy, M.; Gouy, A.; Martinez Gordon, R.; McDonagh, S.; Kotani, M.; Pavan, F.; Pizarro, A.; Simon, R.; Ugur, D. *Global Hydrogen Review 2024*; Remme, U., Bermudez Menendez, J. M., Series Eds.; Revised version, October 2024; International Energy Agency, 2024. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/89c1e382-dc59-46ca-aa47-9f7d41531ab5/GlobalHydrogenReview2024.pdf> (accessed 2025-02-25).
- (46) European Commission. *A Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe*; Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions; 2020. https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-07/hydrogen_strategy_0.pdf (accessed 2025-02-10).
- (47) Satyapal, S.; Rustagi, N.; Green, T.; Melaina, M.; Koleva, M. *DOE National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap*; U.S. Department of Energy, 2022. <https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/clean-hydrogen-strategy-roadmap.pdf?Status=Master> (accessed 2025-02-10).

Abkürzungen

ATJ	Alcohol-to-Jet
BECCS	Bioenergy with Carbon Capture and Storage (Bioenergie mit CO ₂ -Abscheidung und Speicherung)
CCS	Carbon Capture and Storage (CO ₂ Abscheidung und Speicherung)
CCU	Carbon Capture and Utilization (CO ₂ Abscheidung und Nutzung)
DAC	Direct Air Capture (Direkte Luft-CO ₂ -Abscheidung)
GWP	Global Warming Potential (Treibhauspotenzial)
HEFA	Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (hydroprozessierte Ester und Fettsäuren)
IEA	International Energy Agency (Internationale Energieagentur)
KPI	Key Performance Indicator (Leistungskennzahl)

LCA	Life-Cycle-Assessment (Lebenszyklusanalyse)
LCIA	Life-Cycle-Impact Assessment (Wirkungsabschätzung)
LCI	Life-Cycle-Inventory (Sachbilanz)
LHW	Liquid Hot Water (flüssiges Heißwasser)
OS	Organosolv
PtL	Power-to-Liquid
SAF	Sustainable Aviation Fuel (nachhaltiger Flugkraftstoff)
TCP	Technology Collaboration Programme
THG	Treibhausgas

