

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

Arbeitsperiode 2020 - 2022

S. Meitz, B. Muster-Slawitsch,
J. Lindorfer

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

75/2023

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:

Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

Autorinnen und Autoren:

DI Sarah Meitz, DI Dr. Bettina Muster-Slawitsch (AEE – Institut für Nachhaltige Technologien)
DI (FH) Johannes Lindorfer (Energieinstitut an der Johannes Kepler Universität Linz)

Wien, 2023

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

Arbeitsperiode 2020 - 2022

DI Sarah Meitz, DI Dr. Bettina Muster-Slawitsch
AEE – Institut für Nachhaltige Technologien

DI (FH) Johannes Lindorfer
Energieinstitut an der Johannes Kepler Universität Linz

Gleisdorf, März 2023

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Programm FORSCHUNGSKOOPERATION INTERNATIONALE ENERGIEAGENTUR. Es wurde vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) initiiert, um Österreichische Forschungsbeiträge zu den Projekten der Internationalen Energieagentur (IEA) zu finanzieren.

Seit dem Beitritt Österreichs zur IEA im Jahre 1975 beteiligt sich Österreich aktiv mit Forschungsbeiträgen zu verschiedenen Themen in den Bereichen erneuerbare Energieträger, Endverbrauchstechnologien und fossile Energieträger. Für die Österreichische Energieforschung ergeben sich durch die Beteiligung an den Forschungsaktivitäten der IEA viele Vorteile: Viele Entwicklungen können durch internationale Kooperationen effizienter bearbeitet werden, neue Arbeitsbereiche können mit internationaler Unterstützung aufgebaut sowie internationale Entwicklungen rascher und besser wahrgenommen werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements der beteiligten Forschungseinrichtungen ist Österreich erfolgreich in der IEA verankert. Durch viele IEA Projekte entstanden bereits wertvolle Inputs für europäische und nationale Energieinnovationen und auch in der Marktumsetzung konnten bereits richtungsweisende Ergebnisse erzielt werden.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist es, die Projektergebnisse einer interessierten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen, was durch die Publikationsreihe und die entsprechende Homepage www.nachhaltigwirtschaften.at gewährleistet wird.

DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM
Leiter der Abt. Energie und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	8
2	Abstract	9
3	Ausgangslage	10
4	Projekthalt	12
4.1.	Darstellung des IEA IETS Task 11.....	12
4.2.	Methodische Vorgehensweise.....	13
4.2.1.	Literaturrecherche.....	13
4.2.2.	Fallstudien- und Zieldefinition	13
4.2.3.	Erfassung Status Quo: Fließbild, Bilanzierung	13
4.2.4.	Technologie- und Systemoptimierung: Energie, Ressourcen.....	15
4.2.5.	Technical, Economical and Environmental (TEE) - Bewertung.....	15
(1)	Ökonomische Bewertung	17
(2)	Ökologische Bewertung.....	17
4.2.6.	Sozioökonomische Bewertung	18
4.2.7.	Methodendefinition für kombinierte Energie- und Ressourceneffizienz und Anwendung	19
4.2.8.	Digitalisierungsmethoden.....	20
4.2.9.	Kommunikation, Dissemination	20
5	Ergebnisse	21
5.1.	Entwickelte Methodik zur kombinierten Betrachtung von Energie- und Ressourceneffizienz 21	
5.1.1.	Fallstudien- und Zieldefinition	21
5.1.2.	Datenerfassung und Bilanzierung.....	22
5.1.3.	Technologie- und Systemoptimierung	22
5.1.4.	Bewertung der kombinierte Energie- und Ressourceneffizienz mittels Key Performance Indikatoren (KPIs).....	22
5.2.	TEE-Assessment am Beispiel der Lignozellulose Bioraffinerie (Fallstudie 3).....	23
5.2.1.	Beschreibung der Fallstudie	23
5.2.2.	Massenbilanz	25
5.2.3.	Ökonomische Bewertung	26
5.2.4.	Ökologische Bewertung der Wertschöpfungskette	27
5.3.	Sozioökonomische Bewertung am Beispiel der Lignozellulose Bioraffinerie (Fallstudie 3) ..	30
5.3.1.	Modul 1 - Definition des Anwendungsbereichs und der Systemgrenzen	30
5.3.2.	Modul 2 - Stakeholder-Analyse	31
5.3.3.	Modul 3 - STEEP-Analyse	37
5.3.4.	Modul 4: Umfassende Ergebnisanalyse.....	40
5.3.5.	SWOT-Analyse	40

(1) Stärken.....	40
(2) Schwächen.....	41
(3) Chancen.....	41
(4) Risiken.....	42
5.3.6. SAMBA-Matrix.....	43
5.4. Entwickelte KPIs zur kombinierten Betrachtung von Energie- und Ressourceneffizienz.....	46
5.4.1. Grundlagen für die Erstellung für KPIs.....	46
5.4.2. Definition der KPIs.....	47
5.5. Anwendung der Methodik am Beispiel der Kläranlage als Bioraffinerie (Fallstudie 1).....	50
5.5.1. Referenzszenario (RS 1).....	51
5.5.2. Beschreibung der Optimierungsszenarien (OS 1).....	53
5.5.3. Energie- und Massenbilanzen zu Bewertung der Optimierungsszenarien.....	56
5.5.1. Ergebnisse aus der Bewertung der Optimierungsszenarien mittels KPIs.....	58
5.6. Digitalisierungsmethoden.....	60
6 Vernetzung und Ergebnistransfer.....	62
6.1. Zielgruppen des IEA IETS Task 11.....	62
6.2. Relevanz und Nutzen der Projektergebnisse auf nationaler und internationaler Ebene.....	63
7 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen.....	64
8 Anhang.....	74
8.1. Teilnehmende Institutionen/Länder des Subtask 6.....	74
8.1. Parameter und Werte für die wirtschaftliche Bewertung von Bioraffinerien.....	75

1 Kurzfassung

Ausgangssituation: Mit dem steigenden Marktanteil biobasierter Produkte sind die Konzepte der Kreislaufwirtschaft für die Industrie von hoher Relevanz. Dabei haben sich Bioraffinerien als explizit integratives, multi-funktionelles Gesamtkonzept und wesentliche Drehscheibe in der Nutzung von Biomasse als Rohstoffquelle für die nachhaltige Erzeugung unterschiedlicher (Zwischen-) Produkte (Chemikalien, Wertstoffe, Energieträger) etabliert.

Inhalte und Zielsetzung: Der IEA IETS Task (früher Annex) 11 zielt auf Lösungen im industriellen Maßstab ab, die eine weitreichende Dekarbonisierung durch integrierte Bioraffinerien erreichen. Entscheidungswerkzeuge sollen die Industrie bestmöglich in der Entwicklung nachhaltiger Bioökonomiestrategien unterstützen und die Reduktion von Treibhausgas-Emissionen, die Zirkularität, sowie die Nutzung von Digitalisierungsmethoden zur Wettbewerbssteigerung fördern. Die österreichischen Aktivitäten in der Arbeitsperiode 2020 – 2022 bezogen sich im speziellen auf (1) die Entwicklung von Prozess- und Systemkonzepten sowie Valorisierungsfaden für industrielle Bioraffinerien mit maximaler Ressourceneffizienz und minimaler Energieintensität sowie (2) die sozioökonomische Bewertung von industriellen Bioökonomie-Strategien.

Methodische Vorgehensweise: Anhand von realen Fallstudien wurden (Prozess- und System-) Konzepte und Valorisierungspfade für industrielle Bioraffinerien entwickelt mit speziellem Fokus auf die holistische Betrachtung von Ressourcen und Energieeffizienz. Dabei wurde die gesamte Wertschöpfungskette betrachtet (Produkte, Nebenprodukte, Abfallströme und deren Valorisierung/Recycling/Endnutzungspfade im Sinne der Kreislaufwirtschaft) und ökologisch, techno-ökonomisch, sowie sozioökonomisch bewertet.

Die Methoden zur Bewertung von Ressourcen- und Energieeffizienz (AEE INTEC), sowie sozioökonomischen Aspekten (EI-JKU) wurden in einem Bausatz von Werkzeugen und Methoden integriert, der international vorhandene Bewertungstools bestmöglich mit den nationalen Beiträgen ergänzt. Die Bewertung von, anhand realer Fallstudien, entwickelten Konzepten für industrielle Bioraffinerien führte zu einem entscheidendem Mehrgewinn durch die Verknüpfung nationaler und internationaler Aktivitäten. Zudem konnten im Rahmen einer Recherche (Literatur, aktuelle Projekte) Digitalisierungsmethoden gesammelt werden.

Ergebnisse: Folgende Ergebnisse stehen am Ende des Projektes zur Verfügung:

- Prozess- und Systemkonzepte mit kombinierter Ressourcen- und Energieeffizienz
- Methodik zur Bewertung von maximierter Ressourceneffizienz und minimierter Energieintensität von Bioökonomie-Strategien
- Methodik zur sozioökonomischen Bewertung industrieller Bioökonomie-Strategien
- Übersicht an Digitalisierungsmethoden in industriellen Bioraffinerien

Zusammenfassung und Ausblick: Mit der Entwicklung und Bewertung von Produkt- und Verfahrenskonzepten, die auch für stoffliche biobasierte Nutzungspfade die Minimierung des nötigen Energiebedarfs bzw. die Integration von erneuerbarer Energie ermöglichen (kombinierte Ressourcen- und Energieeffizienz) wurde eine wissenschaftliche Basis für den genehmigten Subtask „Technology Pathways towards Negative and/or Net-Zero Emission Biorefineries“ (Leitung Österreich, AEE INTEC) geschaffen.

2 Abstract

Initial situation: With the increasing market share of bio-based products, the concepts of the circular economy are highly relevant for industry. In this context, biorefineries have established themselves as an explicitly integrative, multi-functional overall concept and essential hub in the use of biomass as a raw material for the sustainable production of various (intermediate) products (chemicals, valuable materials, energy carriers).

Content and objective: The IEA IETS Task (formerly Annex) 11 aims at industrial scale solutions that achieve large scale decarbonization through integrated biorefineries. Decision-making tools should support industry in developing sustainable bioeconomy strategies and promote greenhouse gas emissions reduction, circularity, and the use of digitization methods to increase their competitiveness. The Austrian activities in the work period 2020 - 2022 were specifically related to (1) the development of process and system concepts as well as valorization pathways for industrial biorefineries with maximum resource efficiency and minimum energy intensity and (2) the socio-economic assessment of industrial bioeconomy strategies.

Methodological approach: Based on real case studies, (process and system) concepts and valorization pathways for industrial biorefineries were developed with a special focus on the holistic consideration of resources and energy efficiency. The entire value chain was considered (products, by-products, waste streams and their valorization/recycling/end-use pathways in terms of circular economy) and evaluated ecologically, techno-economically, as well as socio-economically.

The methods for the assessment of resource and energy efficiency (AEE INTEC), as well as socio-economic aspects (EI-JKU) were integrated in a kit of tools and methods, which complements internationally existing assessment tools with the national contributions in the best possible way. The evaluation of concepts for industrial biorefineries, developed based on real case studies, led to a decisive added value by linking national and international activities. In addition, digitization methods could be collected in the context of a research (literature, current projects).

Results: The following results are available at the end of the project:

- Process and system concepts with combined resource and energy efficiency.
- Methodology for the evaluation of maximized resource efficiency and minimized energy intensity of bioeconomy strategies.
- Methodology for socio-economic assessment of industrial bioeconomy strategies
- Overview of digitization methods in industrial biorefineries

Summary and outlook: With the development and evaluation of product and process concepts that enable the minimization of the necessary energy demand or the integration of renewable energy (combined resource and energy efficiency) also for material biobased utilization pathways, a scientific basis was created for the approved development Subtask "Technology Pathways towards Negative and/or Net-Zero Emission Biorefineries" (lead Austria, AEE INTEC).

3 Ausgangslage

Bioraffinerien (eigenständig oder in industrielle Prozesse integriert), die ein Portfolio von biobasierten Produkten oder Bioenergie produzieren, sind das Rückgrat der wachsenden Bioökonomie. Sie haben sich als explizit integratives, multi-funktionelles Gesamtkonzept und wesentliche Drehscheibe in der Nutzung von Biomasse als Rohstoffquelle für die nachhaltige Erzeugung unterschiedlicher (Zwischen-) Produkte (Chemikalien, Wertstoffen, Energieträgern) etabliert. Bioraffinerien unterscheiden sich von konventionellen Raffinerien im Einsatz der Rohstoffe. So ist der Einsatz von fossilen Rohstoffen (z.B. Erdöl und Erdgas) klassisch für konventionelle Raffinerien. Die Ausgangsmaterialien in Bioraffinerien hingegen sind vielfältiger, sodass unterschiedliche Rohstoffe eingeschlossen werden können, nach denen sich Bioraffinerie-Konzepte auch unterteilen lassen. Diese schließen Lignocellulose [1] (Holz für Papierindustrie), Ganzpflanzen (Mais, Roggen für Kraftstoffe) und Grüne Bioraffinerien [2] (Gras für Basis- und Spezialchemikalien) ein. Neben den erwähnten, gewinnen auch Reststoffbioraffinerien insbesondere durch den verstärkten Fokus auf Zirkularität an Bedeutung.

Im Zuge einer Studie, durchgeführt vom nova-Institut in Hürth im Auftrag des Bio-based Industries Consortium (BIC) im Jahr 2017, konnten rund 224 europäische Bioraffinerie-Standorte erhoben werden. Mit der Veröffentlichung der Bioökonomie-Strategie [3] hat sich Österreich 2019 auch klar zur Forcierung von Bioraffinerie-Konzepten ausgesprochen. Österreich baut dabei vor allem auf Stärken hinsichtlich seiner natürlichen Ressourcen, seiner innovativen Betriebe sowie renommierten Forschungseinrichtungen auf. In der Rohstoffgewinnung für die Bioökonomie sollen Rohstoffpotentiale aus Holz, Landwirtschaft sowie Wasserwirtschaft, Abfälle und Reststoffe genutzt werden.

Betrachtet man dabei jene Bioraffinerien, die im Sinne einer kaskadischen Nutzung das eingesetzte Rohmaterial in hochwertige Produkte (chemische Bausteine, biobasierte Chemikalien und Materialien) umsetzen und sich dabei weniger auf die Energieerzeugung konzentrieren, stehen vor allem sie vor der Herausforderung geschlossene Kreisläufe in Bezug auf Ressourcen (Prozesswasser, Chemikalien) mit dem Energiebedarf in Einklang zu bringen. In der klassischen Holz-basierten Bioraffinerie beispielsweise, spielte die Verfügbarkeit an Energie (thermisch und elektrisch) bisher keine wesentliche Rolle. Reststoffe aus einzelnen Prozessschritten werden über Verbrennung/Kraft-Wärme-Kopplung (z.B. Dicklaug aus Papier- und Zellstoffindustrie [4]) zu nutzbarer Energie umgewandelt, die für diverse Prozessschritte zur Verfügung steht. Neue Bioraffineriekonzepte und -strategien streben danach, Stoffströme in hochwertige, vermarktbar Produkte umzuwandeln bzw. zusätzliche Nutzungspfade (z.B. zusätzliche Produkte aus Hemizellulose und/oder Lignin) zu etablieren. Durch die immer stärker in den Vordergrund rückende stoffliche Nutzung von Biomasse wird die Energieeffizienz von Prozessen bedeutend wichtiger, da das Potential der energetischen Nutzung reduziert wird. Durch diese Entwicklung von produktorientierten Verfahrenskonzepten stehen Bioraffinerien vor der bedeutsamen Herausforderung eine Kreislaufschließung aller Prozessströme sowie eine gekoppelte Ressourcen- und Energieeffizienz anzustreben. In einer Reihe von Forschungsarbeiten [5]–[9] konnte gezeigt werden, dass die Auswahl von Produkt- und Verfahrenskonzepten mit neuen emergierenden Technologien einen entscheidenden Einfluss auf die Ressourceneffizienz, aber auch die Energieintensität und der möglichen Energieversorgung mit erneuerbarer Energie hat. Emergierende Technologien umfassen hier neue Ansätze der

Fraktionierung (e.g. Ozonolyse [10], DES-Extraktionen [11], organosolv-Prozess [12]) zur Gewinnung hochwertiger Fraktionen (Zellulose, Hemizellulose, Lignin), sowie die Einbindung von neuen Prozessen und Verfahrenskonzepten in der weiteren Verarbeitung (Hydrolyse [13], [14], [15], [16], [17], [18], Fermentation [19]–[23], katalytische Umwandlung etc.) der Fraktionen in Produkte.

Für eine erweiterte Betrachtung der stofflichen Valorisierung, auch bei agrar- und reststoffbasierten Bioraffinerien, ist eine methodische Herangehensweise zur kombinierten Bewertung der Ressourceneffizienz und Energieeffizienz von Bioökonomie-Konzepten wichtig. Eine derartige kombinierte Bewertung von Ressourcen- und Energieeffizienz wurde bereits im Decision Support Tool (DEST – Tool¹) im Rahmen des Projektes „AR-HES-B“ an der AEE INTEC für Abwasserkläranlagen entwickelt. Dabei werden Optimierungs- und Bewertungsmethoden der Energieeffizienz mit Stoffbilanzen von Nährstoffen kombiniert, um die Effizienz der Ressourcennutzung darstellen zu können, sowie entstehende Reststoffströme im Sinne der Zirkularität betrachtet. Für Energieeffizienz-Optimierung und Entwicklung von low-exergy Konzepten gibt es eine Reihe methodischer Ansätze, die auch für Bioraffinerien angewandt wurden bzw. angewandt werden können (Pinch Analyse, im speziellen das Tool SOCO [24] (AEE INTEC) relevant durch viele Batch-Prozesse in der biobasierten Industrie).

Mit diesem Hintergrund hat sich der IEA IETS Task 11 (früher Annex XI) das Ziel gesetzt, durch den Einsatz integrierter Bioraffinerien eine weitreichende Dekarbonisierung zu erreichen und dabei gezielt auf die kombinierte Betrachtung von maximaler Ressourceneffizienz und minimaler Energieintensität gesetzt. Dazu werden Entscheidungswerkzeuge erarbeitet, um die Industrie bestmöglich in der Entwicklung nachhaltiger Bioökonomiestrategien unterstützen zu können und der zukünftige Fokus auf die Reduktion von THG-Emissionen, die Berücksichtigung der Zirkularität, sowie die Nutzung von Digitalisierung zur Wettbewerbssteigerung gelegt. In diesem Kontext wurde von 2020 – 2022 im internationalen Steering Committee des Task 11 neue Subtasks entwickelt. Einer dieser neuen Subtasks unter dem Titel „Technology Pathways towards Net-zero/negative emission Biorefineries“ wird von der AEE INTEC koordiniert.

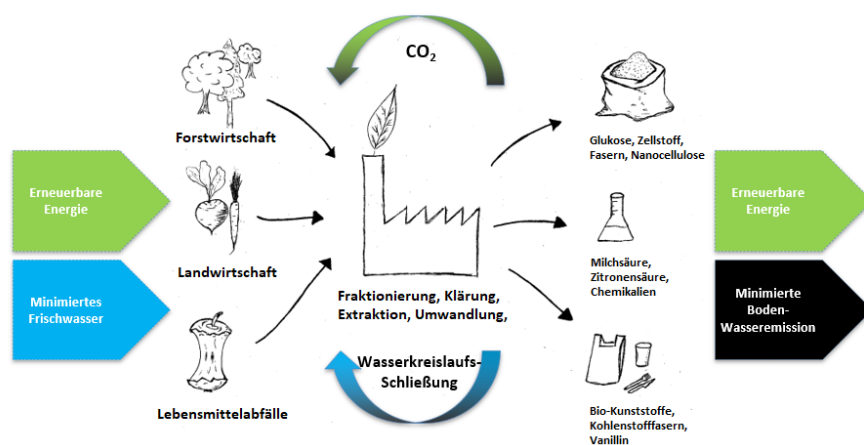


Abbildung 1: Konzept einer integrierten Bioraffinerie (AEE INTEC)

¹ Download unter <https://www.aee-intec.at/download-11>

4 Projektinhalt

4.1. Darstellung des IEA IETS Task 11

Strategische Zielsetzung

Eingebettet in den TCP IETS wurde 2008 der Task 11 (früher Annex XI) initiiert und mit dem Ziel entwickelt, Wissensaustausch sowie forschungsbasierte Studien und Projekte durchzuführen, um holistische Systemanalysen von Industrie-basierten Bioraffinerien zu stärken. Die bisherigen 4 Subtasks, *nun abgeschlossen*, haben sich hauptsächlich mit thermochemischen und biologischen Wegen der Umwandlung von Biomasse und Abfallmaterialien in Biobrennstoffe und Biomaterialien auf energieeffiziente Weise für integrierte Industrieanlagen befasst.

Die im Jahr 2016 initiierte Neuausrichtung des Task 11 hat die Zielrichtung weiterhin bestärkt, den Fokus auf die Entwicklung von Lösungen im industriellen Maßstab zu legen, mit dem Ziel weitreichende Dekarbonisierung durch integrierte Bioraffinerien zu erreichen. Der Ansatz basiert auf den Bedürfnissen und Anwendungen der Industrie und kombiniert das Wissen über industrielle Technologien mit Energieeffizienzmaßnahmen und Biomasse-Umwandlungsprozessen. Betrachtete Bioraffinerien im IEA IETS Task 11 umfassen einerseits komplexe Bioraffineriesysteme mit unterschiedlichen stofflichen und energetischen Produkten, sowie "integrierte" Bioraffinerien, bei welchen Bioraffineriepfade (z.B. Bio-H₂ Erzeugung) angekoppelt an bestehende Industriezweige betrachtet werden, um gesamtheitliche Net-Zero Konzepte zu ermöglichen. Dazu wurden zwei neue Subtasks genehmigt:

- SUBTASK 5: Decision Support Systems and Exante Research (Subtask Manager: Paul Stuart, Polytechnique Montréal; Marzouk Benali, Natural Resources Canada, CanmetENERGY)
- SUBTASK 6: Technology Pathways towards Negative and/or NetZero Emission Biorefineries (Subtask Manager: Bettina Muster- Slawitsch; AEE INTEC, Austria).

In Tabelle 1 sind die internationalen Vertreter des IEA IETS Task 11 gelistet. Im Anhang - Tabelle 11 – sind die Teilnehmer (Länder, Institutionen) des Subtask 6 angeführt.

Österreichische Beteiligung

Der Fokus des nationalen Beitrags zum IEA IETS Task 11 im Zeitraum 11/2020 – 10/2022 lag im internationalen Subtask 5 – Decision Support Systems and Ex-Ante Research. Folgende Ergebnisse aus der österreichischen Beteiligung konnten erarbeitet werden:

- **Wertschöpfungsketten und Verfahrenskonzepte** zu identifizieren, die hohe Produktwert-schöpfung ermöglichen, zu einer Realisierung der Kreislaufwirtschaftsziele führen und THG-Emissionen bei der Herstellung von biobasierten Produkten minimieren
- **Methodenentwicklung** zum Aufbau effizienter produktorientierter Verfahrenskonzepte zur kombinierten Betrachtung von **maximaler Ressourceneffizienz und minimaler Energieintensität** industrieller Bioraffinerien (kaskadische Nutzung, Zirkularität und Minimierung von THG-Emissionen)
- **Sozioökonomische Bewertung** von industriellen Bioökonomie-Strategien.

- **Überblick über vorhandene Werkzeuge** (DSS, Softwareprogramme und -tools) zur Entscheidungsfindung und Szenario-basierter Analyse von Bioraffineriestrategien
- Identifikation relevanter **Digitalisierungs-Methoden** in industriellen Bioraffinerien
- Einbringung von wesentlichen Aspekten der österreichischen Bioraffinerielandschaft (Schwerpunkte, Strukturen, etc.) in den internationalen Kontext durch die **Entwicklung eines neuen Subtasks 6** - Technology Pathways towards Negative and/or NetZero Emission Biorefineries

Tabelle 1: internationale Vertreter des IEA IETS Task 11

Länder	Institutionen
Kanada	<ul style="list-style-type: none"> • Politechnique Montreal – <i>Task Management & Leader of Steering Committee</i> • CanmetENERGY of Natural Resources Canada – <i>Task Co-Manager & Member of Steering Committee</i>
Schweden	<ul style="list-style-type: none"> • Chalmers University of Technology; Department of Space, Earth and Environment, Energy Technology - <i>Member of Steering Committee</i>
Österreich	<ul style="list-style-type: none"> • AEE – Institute for Sustainable Technologies – <i>Leader of Subtask 6 & Member of Steering Committee</i>
Portugal	<ul style="list-style-type: none"> • Directorate-General of Energy and Geology, Ministry of Economic Affairs – <i>Former Task Manager & Member of Steering Committee</i>

4.2. Methodische Vorgehensweise

4.2.1. Literaturrecherche

Im Rahmen der Literaturrecherche wurde eine technische und wirtschaftliche Analyse verschiedener Bioraffineriekonzepte und deren Konversionstechniken durchgeführt und im Anschluss die Bewertbarkeit solcher Systeme untersucht.

4.2.2. Fallstudien definition und Datensammlung

Zur Entwicklung von Prozess- und Systemkonzepten wurden vier unterschiedliche Fallstudien ausgewählt. Die nötigen Daten dafür wurden zum einen aus dem internationalen Konsortium sowie aus den laufenden Projekten (z.B. IEA IETS Task 17 – Daten zu Bioraffinerien, IEA Bioenergy Task 42 – Joint Task Project on TEE-Assessment) generiert. Zur Auswahl der Bioraffinerien wurde, die im IEA Bioenergy Task 42 unter österreichischer Federführung entwickelte und angewandte Methode zur Klassifizierung und Charakterisierung von Bioraffinerien, angewandt bzw. adaptiert.

4.2.3. Erfassung Status Quo: Fließbild, Bilanzierung

Für diese Fallstudien wurden Bioökonomiestrategien entlang der gesamten Wertschöpfungskette entwickelt (Produkte, Nebenprodukte, Abfallströme und deren Valorisierung/ Recycling/ Endnutzungspfade im Sinne der Kreislaufwirtschaft). Die Entwicklung der Konzepte basierte auf den

laufenden bzw. in Entwicklung befindlichen Forschungsansätzen aus EU BBI Projekten (Zusammenarbeit mit nationalen/internationalen forstbasierten und Reststoff-Bioraffinerien), sowie (inter-)nationalen Projekten (IEA IETS Task 17; IEA Bioenergy Task 42, etc.) und Industriezusammenarbeit.

Die Prozessübersicht und Fließbilder der (teilweise komplexen) Fallstudien wurden in Anlehnung an die geschlossene Methodik des International Energy Agency (IEA) Task 42 „Biorefining“ durchgeführt. Dieser hat sich zur Aufgabe gemacht, eine Basis für ein Klassifizierungsschema für Bioraffinerien zu schaffen. Aus diesem Task entstand eine polyhierarchische Klassifikationssystematik mit einem formalen Vokabular (VDI 2016), das in nachstehender Abbildung 2 als prinzipielle Darstellungsweise eines Bioraffineriekonzeptes abgebildet wird.

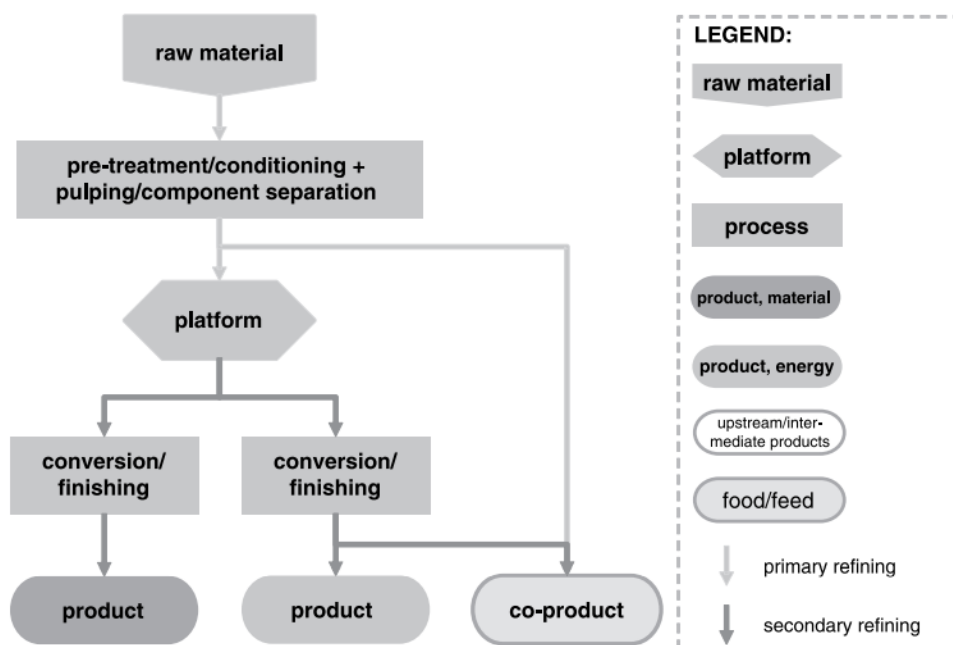


Abbildung 2: Schematische Darstellung einer Bioraffinerie-Klassifizierung mit den entsprechenden Elementen [25]

In dieser Systematisierung kommen folgende Strukturelemente zur Anwendung:

- der Rohstoff (z.B. Holz, Stroh, Gräser)
- die Zwischenprodukte (z.B. Biogas, Syngas, Lignin, Hemicellulose, Cellulose)
- der Prozess (z.B. chemisch, thermochemisch oder biochemisch) oder
- die Produkte (z.B. Chemikalien, Werkstoffe, Kraftstoffe)

Im Zentrum dieser Systematik steht die Plattform der Bioraffinerie, die aus der Primärraffination entsteht und eine Basis für die Sekundärraffination schafft. Somit kann man sagen, dass unter Plattform wichtige im Mittelpunkt stehende Zwischenprodukte einer Bioraffineriestruktur definiert werden. Die Plattform steht im direkten Zusammenhang mit dem untergeordneten Rohstoff und mit den übergeordneten Produkten. Die Verbindungselemente, welche Rohstoff, Plattform und Produkt miteinander verbinden, sind die Prozesse. [25]

Um eine beliebige Bioraffinerie nach der entwickelten Klassifizierung einem Schema zuzuweisen, ist nach der folgenden Methode vorzugehen: [25]

1. Alle relevanten eingesetzten Stoffströme (Rohstoffe) erfassen
2. Alle beteiligten Prozesse erfassen
3. Alle internen Stoffströme (Zwischenprodukte) erfassen
4. Definition der ergebnen Plattform(en)
5. Alle resultierenden Stoffströme (Produkte) erfassen
6. Entsprechendes Schaubild generieren

Angelehnt an die Methodik der VDI 2016 wurden Daten für die Fallstudien erhoben sowie Produktionsfließbilder erstellt. Basierend auf dem Status Quo in Bezug auf Massen- und Energiebilanzen wurden Produkt- und Verfahrenskonzepte für Bioraffinerien entwickelt.

4.2.4. Technologie- und Systemoptimierung: Energie, Ressourcen

In der Verfahrensoptimierung wurde anhand der bestehenden Optimierungsmethodik im Bereich Energieeffizienz und Erneuerbare Energie mit den Schritten (1) Bilanzierung, (2) Technologie- und (3) Systemoptimierung vorgegangen, wobei analog zur Energieeffizienz die Ressourceneffizienz, über Stoffgruppenbilanzen und Nährstoffbilanzen bzw. Restströme und Endnutzungspfade betrachtet wurde. In der Technologieoptimierung (2) wurden emergierende Technologien integriert. Deren methodische Auswahl ist grundsätzlich aufgrund der verfahrenstechnischen „bottlenecks“ getrieben, um Wärme- und/oder Massentransfer mit neuen technologischen Ansätzen zu verbessern bzw. die Prozesseffizienz durch Reduktion der Prozessvolumina (erhöhter Feststoffgehalt) zu steigern. Für die Auswahl emergierender Technologien im Hinblick auf Energieeffizienz des gesamten Produktionssystems und spätere Möglichkeit zu Integration erneuerbarer Energie wurde bereits eine methodische Vorgehensweise entwickelt [6]. In einer Reihe von Forschungsarbeiten [5], [8], [9], [26], [27] konnte gezeigt werden, dass die Auswahl von Produkt- und Verfahrenskonzepten mit neuen emergierenden Technologien einen entscheidenden Einfluss auf die Ressourceneffizienz, aber auch die Energieintensität und der möglichen Energieversorgung mit erneuerbarer Energie hat. Auch für Bioraffinerien, und insbesondere bei Fokus auf stofflicher Nutzung der Biomasse, ist es wesentlich welche technologischen Ansätze gewählt werden, da dieser „Kern“ der Prozesse, die nachfolgenden Möglichkeiten der Prozessintegration, Recycling von Nebenströmen, Ressourceneffizienz und Energieeffizienz maßgeblich beeinflusst. Verstärkter Fokus wird auf die Massenbilanzen einzelner Stoffgruppen (Proteine, Zucker, Aminosäuren, Phenole, hochwertige Fasern, Nährstoffe) gelegt, um die Ressourceneffizienz in den Fallstudien bestmöglich abzubilden. Die adaptierten neuen Fließschemata, sowie geänderte Massen- und Energiebilanzen aufgrund der Produkt- und Verfahrensoptimierung wurden in einer Systemoptimierung (3) energetisch und exergetisch evaluiert, über bestehende etablierte Methodik der Pinch-Analyse [24], [28] und Integration von erneuerbarer Energie. Zusätzlich wurden vorhandene Tools (z.B. Decision Support Tool – DEST - für Kläranalgen) verwendet.

4.2.5. Technical, Economical and Environmental (TEE) - Bewertung

Österreich hat zur Bewertung von Bioraffinerien innerhalb des IEA Bioenergy Task 42 federführend, eine Technical, Economical and Environmental (TEE) Methode entwickelt, die von einem

allgemeingültigen Ansatz ausgeht und eine quantitative Bewertung ökologischer und ökonomischer Effekte ermöglicht. Im Rahmen des IEA IETS Task 11 wurden die Fallstudien mittels TEE-Bewertung in ihrer Nachhaltigkeit bewertet: Zum einen wurden hier die bereits vorhandenen Technologien und Bioraffineriekonzepte beleuchtet, zum anderen aber auch in Entwicklung befindliche Systeme gemeinsam mit relevanten Akteuren charakterisiert, da schlussendlich ein Vergleich der Systeme vorliegen soll. Die Ergebnisse wurden in einer tabellarisch und graphisch aufbereiteten Gegenüberstellung der Technologien zusammengefasst. Im Rahmen der Erhebung der Energieeffizienz wurde im Speziellen auf die Umwandlungsverluste und den Prozessenergieeinsatz eingegangen. Neben der erzielbaren Einsparung an THG-Emissionen, wurden auch andere Umweltwirkungskategorien berücksichtigt und in Kombination mit der Quantifizierung von Produktgestehungskosten aus wirtschaftlichen Eckdaten wird eine umfassende Performancebewertung ermöglicht. Die Bewertungsmethodik ist eine zum Datenbeschaffungsprozess parallellaufender Vorgang, der den gesamten Weg zu einer effizienteren Bioraffinerie begleitet. Sie fängt an bei der Definition der Fallstudien und zieht sich durch bis zur Definition und Anwendung der auf Energie- und Ressourceneffizienz spezifizierten Kennzahlen zur Bewertung der stofflichen und energetischen Veränderung der definierten Bioraffinerien.

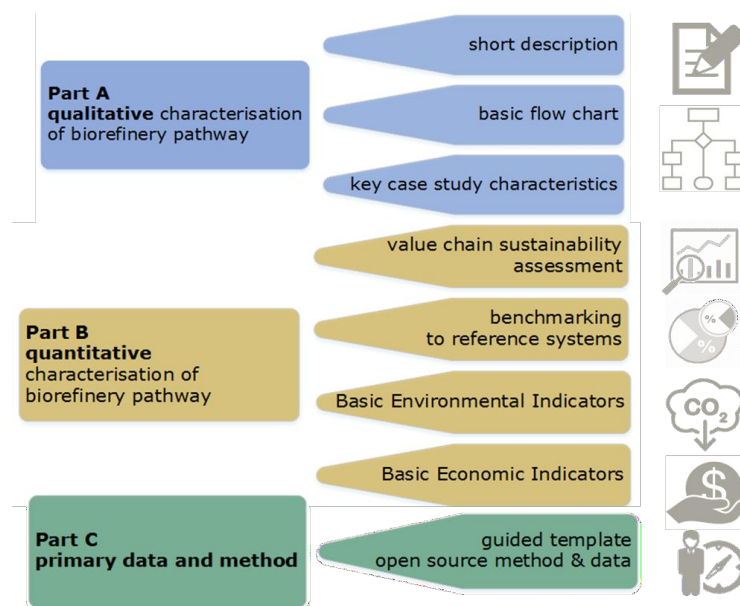


Abbildung 3: Grafische Darstellung des TEE-Assessment Ansatz des IEA Bioenergy Task 42

Wie in Abbildung 3 dargestellt, besteht die TEE-Methode aus einer qualitativen und quantitativen Charakterisierung und einem Datenteil. Die Ergebnisse werden in einer Standardform präsentiert. Herausforderungen bei der Methodenentwicklung und bei der Anwendung waren die Reifegrade unterschiedlicher Bioraffineriekonzepte, die Vertraulichkeit von Informationen, Interessenskonflikte und in besonderem Maß der Zugang zu Daten.

Im Rahmen der IEA IETS Task 11 Forschungskooperation wird diese TEE-Methode als Bewertungsansatz eingebracht und anhand einer Fallstudie (Fallstudie 3) angewandt, um einen Vergleich zu anderen Ansätzen zu ermöglichen. Zudem wird die Methode erstmals um eine sozioökonomische Bewertung erweitert.

(1) Ökonomische Bewertung

Die wirtschaftliche Bewertung ist ein wichtiges Kriterium für die Beurteilung der Qualität der Bioraffineriesysteme. Sie hilft, vielversprechende Prozesse zu identifizieren, Investitionsprojekte zu bewerten und die Finanzierung zu sichern. (Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 2016). Parameter und Werte für die wirtschaftliche Bewertung von Bioraffinerien inkludieren Investitionen und Investitionskosten, Material- und Energiekosten, Arbeitskosten, Gemeinkosten, Gesamtkosten und sonstige Kosten zusammen. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Parameter finden Sie in der VDI 6310. [25] bzw. Tabelle 12 im Anhang.

Wenn möglich (d.h. je nach Datenverfügbarkeit) wird die Barwertmethode angewendet, um zeitlich variierende Werte zu berücksichtigen. Alle Kosten und Erlöse werden dann mit einem zum Entscheidungszeitpunkt festgelegten Diskontsatz nach oben oder unten abgezinst. Eine Investition kann als vorteilhaft angesehen werden, wenn der Nettobarwert positiv ist. Die Berechnungsmethode des Barwerts für Bioraffineriesysteme ist in der VDI 6310 zu finden. Eine Tabelle mit den Parametern und Werten für die wirtschaftliche Bewertung von Bioraffinerien befindet sich im Anhang. Methoden und Instrumente zur dynamischen Bewertung von Investitionsgütern und Anlagen können der VDI 6025 entnommen werden.

Für eine detaillierte Bewertung werden die Produktionskostenfaktoren für jeden Teil des Systems ideal bereitgestellt, z.B. Rohstoffbeschaffung, Vorbehandlung/Konditionierung und Umstellung der Bioraffinerie auf Mehrproduktproduktion. Wenn aufgrund von Vertraulichkeitsbeschränkungen und Datenverfügbarkeit eine detaillierte Bewertung nicht möglich ist, können aggregierte Werte in Bezug auf die relevanten physikalischen Inputs und Outputs der Bioraffinerie verwendet werden, um eine Bewertung mit geringerer Granularität zu ermöglichen.

(2) Ökologische Bewertung

Die Nachhaltigkeitsbewertung im Kontext von Bioraffinerien und ihren vielfältigen Leistungen ist nicht einfach. [29] Dennoch sind die Bioraffinerien für eine Reihe von direkten und indirekten Umweltauswirkungen verantwortlich und erfordern eine systematische Bewertung der Auswirkungen. (Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 2016) Bei der durchgeführten Umweltbewertung stehen die Treibhausgasemissionen (THG) und der kumulierte Energiebedarf (CED) als Schlüsselindikatoren im Vordergrund. Andere Umweltwirkungskategorien wie Eutrophierung, Versauerung, Ozonabbaupotenzial usw. sind derzeit aufgrund der großen Vielfalt der Charakterisierungsmodelle und fehlender internationaler Harmonisierung in der Bewertung ausgeschlossen.

Die Methode der Wahl für die Ableitung von Umweltindikatoren für Bioraffinerien ist die Ökobilanz (LCA) auf der Grundlage der ISO 14040-Methodik, die die vier Schritte umfasst: Ziel- und Umfangsdefinition, Bestandsanalyse, Folgenabschätzung sowie Interpretation. Dieser Vorgang ist nicht streng aufeinander folgend. Zwischen den einzelnen Schritten bestehen Zusammenhänge. Das bedeutet, dass jeder Schritt von den anderen mitbestimmt wird. Dementsprechend handelt es sich um einen iterativen Prozess. Können im Rahmen der Sachbilanz aus Mangel an validen Daten nicht alle notwendigen Ein- und Ausgangsströme erfasst werden, kann dies zu einer rückwirkenden Neudefinition der Systemgrenzen führen. Die Sensitivitätsanalyse kann auch die Notwendigkeit aufzeigen, die Systemgrenzen zu verfeinern. Andererseits kann im Rahmen der Bewertung und

Interpretation festgestellt werden, dass zusätzliche Daten generiert werden müssen, um zu repräsentativen Ergebnissen zu gelangen. Daher sind die für die Sachbilanz erforderlichen Daten innerhalb der Ökobilanz von besonderer Bedeutung. Wie bereits erwähnt, muss die Repräsentativität von Daten und Faktordaten für jede Bewertung des Bioraffinerieweges auf fallbezogene Weise überprüft werden.

4.2.6. Sozioökonomische Bewertung

Als Methode zur sozioökonomischen Bewertung industrieller Bioraffinerien und Bioökonomie-Strategien wurde das Modell SAMBA angewendet bzw. im Rahmen der Task 11 Aktivitäten hinsichtlich seiner Eignung evaluiert. Das Modell SAMBA („Socio- and Multicriteria Model for reducing Barriers Analysis“) ist ein am Energieinstitut an der Johannes Kepler Universität Linz entwickeltes Instrument zur qualitativen sozio-technischen Bewertung. Es bietet eine qualitative, empirisch basierte Analyse, um mehr über die Auswirkungen von neuen Technologien, Prozessen, Produkten oder Dienstleistungen herauszufinden. SAMBA kombiniert zwei bestehende und anerkannte Methoden: die Stakeholder-Analyse und die qualitative Bewertung der soziologischen, technologischen, ökologischen, ökonomischen und politischen Dimensionen (STEEP-Analyse). Das übergeordnete Ziel besteht darin, Empfehlungen abzuleiten, wie sich Hindernisse für neu entstehende Technologien/Prozesse/Produkte/Dienstleistungen vermeiden lassen und ihre erfolgreiche Einführung erleichtert werden kann. Andere vergleichbare Modelle oder Studien kombinieren ebenfalls die Stakeholder-Analyse und die qualitative Bewertung verschiedener Dimensionen, da der Einfluss der relevanten Stakeholder auf die entwickelten Indikatoren als strategisch wichtig angesehen werden kann.

Wie in Abbildung 4 dargestellt, besteht das SAMBA-Modell aus vier verschiedenen Modulen: Modul 1 - Ausgangspunkt, Modul 2 - Stakeholder-Analyse, Modul 3 - STEEP-Analyse und Modul 4 - Umfassende Analyse. Die Module 2 bis 4 bestehen wiederum aus Untermodulen, die die Arbeitsschritte innerhalb der Module detaillierter aufgliedern.

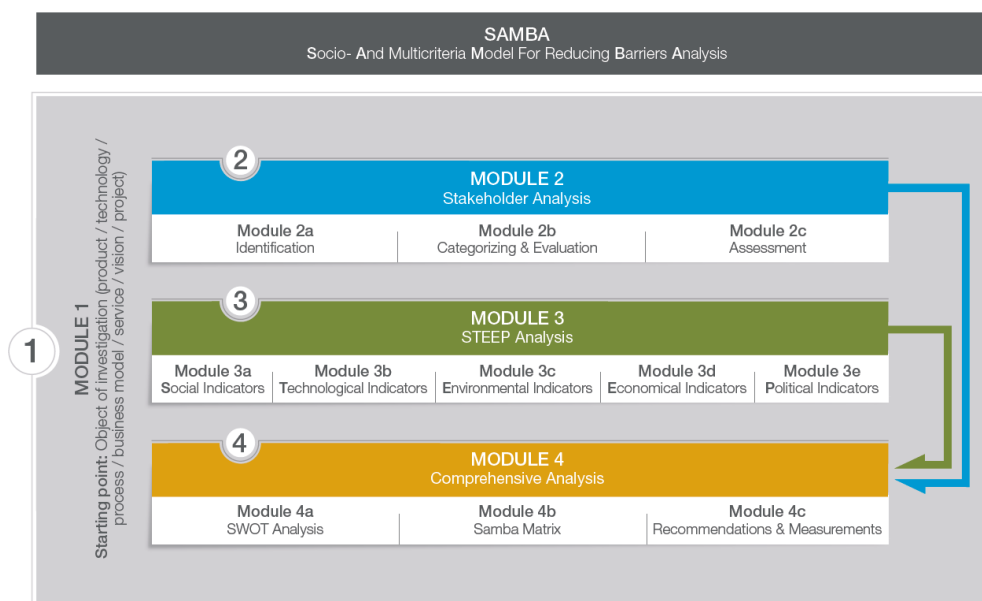


Abbildung 4: SAMBA-Modell. Quelle: Energieinstitut an der JKU Linz

4.2.7. Methodendefinition für kombinierte Energie- und Ressourceneffizienz und Anwendung

Anhand der Konzepterarbeitung der Fallstudien, wurde eine methodische Vorgehensweise speziell für die Entwicklung von Bioraffineriekonzepten mit kombinierter Ressourcen- und Energieeffizienz definiert. Die Erarbeitung der Fallstudien und detaillierte Auseinandersetzung mit der integrativen Betrachtung von Ressourcen- und Energieeffizienz, wurde in zwei Bewertungsmethoden aufgearbeitet:

- 1) anhand einer erweiterten Methodik zur kombinierten Bewertung von Energieeffizienz und Ressourceneffizienz (aufbauend auf den vorhandenen DEST-Methoden und Methoden zur Bewertung der industriellen Energieeffizienz – IEA SHC Task 49, IEA IETS Task 17, EUREM Auditmethodik), sowie
- 2) anhand der im IEA Bioenergy Task 42 – biorefining in a future bioeconomy weiterentwickelten Bewertungssystematik zur Klassifizierung und Charakterisierung (LCA/LCC/soziale Aspekte qualitativ) von Bioraffinerien.

Ad 1): Um eine Bewertungsmethodik für kombinierte Ressourcen- und Energieeffizienz als österreichischen Beitrag zu den DSS-Systemen (Subtask 5) im IEA IETS Task 11 zu entwickeln, wurde aufbauend auf den zuvor entwickelten Produkt- und Verfahrenskonzepte für 4 unterschiedliche Bioraffinerien eine Methodik abgeleitet, um die kombinierte Ressourcen- und Energieeffizienz anhand von Kennzahlen – Key Performance Indikatoren - bestmöglich bewerten zu können.

Methodisch konnte dabei auf dem DEST-Tool des AR-HES-B Projektes aufgebaut werden, in welchem neben Energieeffizienz-Kennzahlen, auch Nährstoffeffizienz und Recycling betrachtet wurden. In Hinblick auf Methoden zu Energieeffizienz wurde zudem auf bestehende Optimierungsmethoden zurückgegriffen. Zur Analyse und Evaluierung von ausgewählten Bioraffinerieprozessen wurden vorhandene Softwaretools sowie Methodiken zur Durchführung von Energieaudits für produzierende Betriebe, die in ihrem Aufbau Eingang in die Standardisierung von Audits EN 16247 (JWG und CEN/CENELEC CWA) gefunden hat, angewandt. Methodische Berechnungsbasis stellten Energiebilanzen dar sowie Methodiken zur Evaluierung des Wärmerückgewinnungspotentials (Pinch-Analyse) sowie des Potentials zur Einbindung erneuerbarer Energieträger.

Aspekte der Ressourceneffizienz wurden erweitert um Bilanzierungen einzelner Stoffgruppen (Proteine, Phenole bzw. Bilanzierung der Umwandlungswege und Intermediär Produkte aus den Fraktionen Zellulose, Hemizellulose und Lignin) und Nährstoffe. Wichtiges Augenmerk lag auf Aspekten der Zirkularität sowie Berücksichtigung der Endnutzungspfade.

Ad 2): Die im IEA Bioenergy Task 42 – biorefining in a future bioeconomy weiterentwickelte Bewertungssystematik stellt keine umfassende Prozessbewertung von technischen Verfahrensentwicklungen mittels z.B. eines Life Cycle Assessments dar, sondern ein vereinfachender Ansatz, der die ökologischen Vorteile und Basischarakteristika von Bioraffinerien zusammenfasst. Eine Entscheidung über den Einsatz von Prozessoptionen basiert jedoch nicht nur auf ökologischen Wirkungen, sondern auch auf ökonomischen und gesellschaftlichen Aspekten. Daher arbeitet das Energieinstitut an der methodischen Weiterentwicklung zur Charakterisierung von Bioraffinerie-Konzepten auf internationaler Ebene. Eine frühzeitige Anwendung von ökonomischen und ökologischen Bewertungsmethoden bei der Entwicklung neuer Konzepte trägt zu einem Portfolio für

eine umfassende Prozessbewertung bei. Innovative Lösungen, die Rentabilität und ökologische Verträglichkeit kombinieren, sind entscheidend für den Erfolg zukunftsfähiger Bioraffineriekonzepte. Die angewendete ökonomische/ökologische Bewertung wurde zu dem Zweck entwickelt, aus verschiedenen Verfahrensalternativen die Vorteilhafteste – d.h. im Idealfall diejenige mit den geringsten Kosten und den größten Wirkungen - herauszufiltern. Die Kosten-Wirksamkeit-Analyse stellt die Kosten einer Alternative in Form von Geldeinheiten deren Umweltwirkungen gegenüber. Damit nimmt diese Bewertung methodisch gesehen eine Mittelstellung zwischen rein „physischen“ (z.B. Ökobilanzen) und rein monetären Bewertungsinstrumenten (z.B. Kosten-Nutzen-Analysen) ein.

Die technische, ökologische & ökonomische Bewertung wurde im Rahmen einer Fallstudie demonstriert und noch um eine sozioökonomische Bewertung erweitert im Rahmen der Task 11 Aktivitäten, um allen Dimensionen der Nachhaltigkeit betreffend industrieller Bioraffinerien methodisch Rechnung zu tragen.

Mit der Entwicklung und Bewertung von Produkt- und Verfahrenskonzepten, die auch für stofflich biobasierte Nutzungspfade die Minimierung des nötigen Energiebedarfs bzw. die Integration von erneuerbarer Energie ermöglichen (kombinierte Ressourcen- und Energieeffizienz) wurde eine wissenschaftliche Basis geschaffen für den Subtask „THG-Emissionsreduktion in industriellen Bioraffinerien“, der im Jahr 2022 bestätigt wurde.

4.2.8. Digitalisierungsmethoden

Vorausschauend auf den geplanten Task „Anwendung von künstlicher Intelligenz und Digitalisierung, um die Wettbewerbsfähigkeit von Bioraffinerien zu steigern“, wurde in den österreichischen Aktivitäten auch Augenmerk auf die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von Bioraffinerien durch den Einsatz von Methoden der Digitalisierung wie Digitaler Zwilling, Demand- und Supply Side Management, Data driven modeling and Machine learning gelegt. Dazu wurden eine Recherche und Beschreibung von vorhandenen Methoden aus dem ExpertInnen-Netzwerk sowie aktuell laufenden Projekten herangezogen.

4.2.9. Kommunikation, Dissemination

Die Ergebnisse aus oben genannten Schritten, wurden über die Netzwerke der nationalen und internationalen Partner, das Netzwerk der IEA IETS Kooperation, Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und Vorträgen auf nationalen Konferenzen verbreitet.

Um die Dissemination im nationalen Kontext zu stärken, wurde zudem ein Nationaler Stakeholder-Workshop organisiert, um wesentliche Stakeholder aus Industrie und Forschung zusammenzuführen. Der Austausch im nationalen und internationalen Konsortium wurde zudem über regelmäßige online Meetings sowie Workshops initiiert.

Ein wesentlicher Aspekt in der Kommunikation des IEA IETS Task 11 ist der monatliche Austausch in Steering Committee Meetings, bei welchem mit Thore Berntsson auch der ExCo-Vorsitzende des IETS vertreten ist. In dieser Plattform werden Schwerpunkte des Task 11 diskutiert und neue Subtasks entwickelt.

5 Ergebnisse

5.1. Entwickelte Methodik zur kombinierten Betrachtung von Energie- und Ressourceneffizienz

Als zentraler Bestandteil der Ergebnisse des IEA IETS Task 11 wurde (in Anlehnung an den IEA Bioenergy Task 42) eine Methodik angewandt bzw. adaptiert, die es erlaubt, Energie- und Ressourceneffizienz von industriellen Bioraffinerien zu bewerten. Die Methodik besteht aus 4 zentralen Schritten: (1) Fallstudien- und Zieldefinition, (2) Datenerfassung, Bilanzierung, (3) Technologie- und Systemoptimierung und (4) Bewertung mittels KPIs, die in Abbildung 5 dargestellt sind. Die einzelnen Schritte werden in weiterer Folge näher beschrieben.

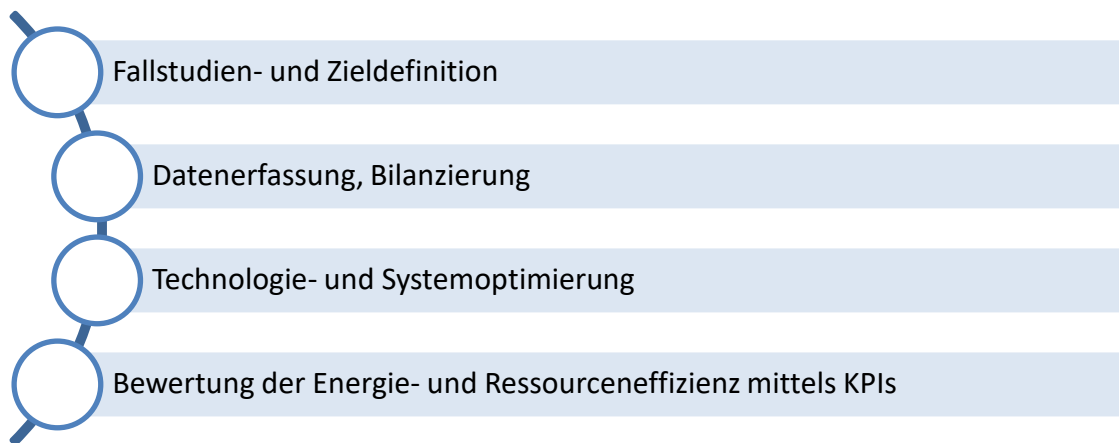


Abbildung 5: Übersicht über die Methodik

5.1.1. Fallstudien- und Zieldefinition

Zur Bearbeitung der Fallstudien ist es zunächst notwendig, die spezifischen Prozessabläufe zu analysieren. Dazu gehören die bearbeiteten Rohstoffe, die Prozessschritte und deren Abfolge, erzeugte Produkte und Abfallprodukte, der Energiebedarf, eingesetzte Energieträger sowie Energieversorgungsanlagen. Eine Darstellung in einem Fließbild zur Erfassung des Status Quo ist dabei vorteilhaft. Des Weiteren müssen Optimierungsziele (z.B. Reduktion von Emissionen, Abfällen oder Energiebedarf, Steigerung der Produktanzahl und Menge), die für die einzelne Fallstudie erreicht werden sollen, definiert werden.

Im Rahmen der Arbeiten des IEA IETS Task 11 wurden hier konkret 4 Fallstudien ausgewählt:

- *Fallstudie 1: Kläranlage als Bioraffinerie*
- *Fallstudie 2: Lignozellulose Bioraffinerie*
- *Fallstudie 3: 2-Plattform-Bioraffinerie (C5&C6-Zucker, Lignin) zur Herstellung von Bioethanol, Strom und Wärme aus Maisstroh*
- *Fallstudie 4: Biogasanlage als Bioraffinerie*

5.1.2. Datenerfassung und Bilanzierung

Nach Definition der Fallstudie sowie des Optimierungsziels ist es notwendig eine Datengrundlage für die nachfolgende Bilanzierung zu erheben. Die erhobenen Informationen dient der Erstellung der stofflichen und energetischen Referenzsysteme, um damit eine methodische Grundlage für die Stoff- und Energiestromanalyse zu schaffen. Neben der Erhebung von realen Daten (z.B. aus Betriebsdatenerfassung), kann die Datenerhebung durch eine fundierte Literaturrecherche (z.B. BAT – Best Available Technology – Dokumente für konkrete Sektoren) unterstützt werden. Des Weiteren bietet sich die Darstellung von Energie- und Stoffströmen in Sankey-Diagrammen an.

Im Rahmen der Arbeiten den IEA IETS Task 11 wurde dieser Methodikschritt für alle 4 Fallstudien durchgeführt.

5.1.3. Technologie- und Systemoptimierung

Schritt 3 in der Methodik dient der Untersuchung von Möglichkeiten zur Optimierung der Energie- und Ressourceneffizienz der betrachteten Fallstudie. Diese Optimierung soll einerseits durch die Verbesserung der angewandten Technologien und Versorgungsanlagen und andererseits durch Überarbeitung des gesamten Referenzsystems realisiert werden. Basierend auf betrachteten Technologie- und Systemoptimierung sollen auch die Energie- und Massenbilanzen angepasst werden, um in der weiteren Folge auch die Optimierung bewerten zu können. Dazu Methodiken die dazu eingesetzt werden können inkludieren:

- Anwendung von vorhandenen Softwaretools zur Massen- und Energiebilanzierung (z.B. DEST Tool², klimaaktiv Pinch-Tool)
- Anwendung der Energieaudit-Methodik (EN 16247)
- Massen- und Energiebilanzierung
- Pinch-Analyse
- Ökologische Datensammlung (Emissionsfaktoren für Inputs/-Outputs)
- Ökonomische Abschätzung (vereinfachte Einnahmen/Ausgaben Schätzung basierend auf Referenzanlagen)
- Etc.

Im Rahmen der Arbeiten für den IEA IETS Task 11 wurde dieser Methodikschritt für 4 Fallstudien durchgeführt

5.1.4. Bewertung der kombinierte Energie- und Ressourceneffizienz mittels Key Performance Indikatoren (KPIs)

Die Bewertungsmethodik ist eine zum Datenbeschaffungsprozess parallelaufender Vorgang, der den gesamten Weg zu einer effizienteren Bioraffinerie begleitet. Sie fängt an bei der Definition der Fallstudien und zieht sich durch bis zur Anwendung der auf Energie- und Ressourceneffizienz spezifizierten Kennzahlen (Key Performance Indikatoren, KPIs) zur Bewertung der stofflichen und energetischen Veränderung der definierten Bioraffinerien. Die Identifikation von Schlüsselparametern und Definition von KPIs lehnt sich methodisch an die VDI 6310 Richtlinie und

² <https://www.aee-intec.at/0uploads/dateien1277.pdf>

wird durch andere Forschungsarbeiten, die speziell zur Bewertung der Energie- und Ressourceneffizienz veröffentlicht wurden, gestärkt.

Im Rahmen der Arbeiten für den IEA IETS Task 11 wurde dieser Methodikschritt für Fallstudie 1, 2 und 4 durchgeführt.

5.2. TEE-Assessment am Beispiel der Lignozellulose Bioraffinerie (Fallstudie 3)

5.2.1. Beschreibung der Fallstudie

Diese Fallstudie charakterisiert eine Lignozellulose-Bioraffinerie, die Maisstroh zur Herstellung von Ethanol als Ersatz für fossile Brennstoffe (oder alternativ zur Materialsynthese) nutzt. Die Energieerzeugung erfolgt vor Ort durch Ligninverbrennung in einem Kessel und die Stromerzeugung mit Dampf aus der Brennkammer. Zusätzlich wird vor Ort durch die anaerobe Vergärung von Abwasser Biogas erzeugt. Es wird keine externe Energieversorgung benötigt, je nach Betriebsart wird überschüssiger Strom erzeugt. Die Lignozellulose-Bioraffinerie verfügt über eine eigene Cellulase-Enzymproduktion. Die Fallstudie ist literaturbasiert, aber sehr relevant auf der Grundlage der internationalen Förderung von Biokraftstoffen aus landwirtschaftlichen Ernterückständen. Die angewandte Systemgrenze für das Bioraffineriesystem wird als "Cradle-to-Gate" bezeichnet.

Der als Fallstudie herangezogene Bioraffinerieprozess (Fallstudie 3) ist für eine Kapazität von ca. 104 t_{TM}/h Maisstroh bei einem 24-Stunden-Betrieb an 6 Tagen in der Woche ausgelegt. Dies entspricht ca. 7.500 Anlagenbetriebsstunden pro Jahr. Die Ethanol-Produktionskapazität der Bioraffinerie beträgt rund 164.000 t/a. [30] bietet eine valide und transparente Datenbasis für die technisch-ökonomische Analyse einer Lignozellulose-Bioraffinerie im kommerziellen Maßstab [30]. Die Daten aus der techno-ökonomischen Analyse sind eine Simulation, die alle CAPEX und OPEX im Detail auflistet und öffentlich zugänglich ist. Daher wurde diese Arbeit als Grundlage für das diese Fallstudie gewählt, da sie ein realistisches, technisch und wirtschaftlich machbares Prozessmodell darstellt.

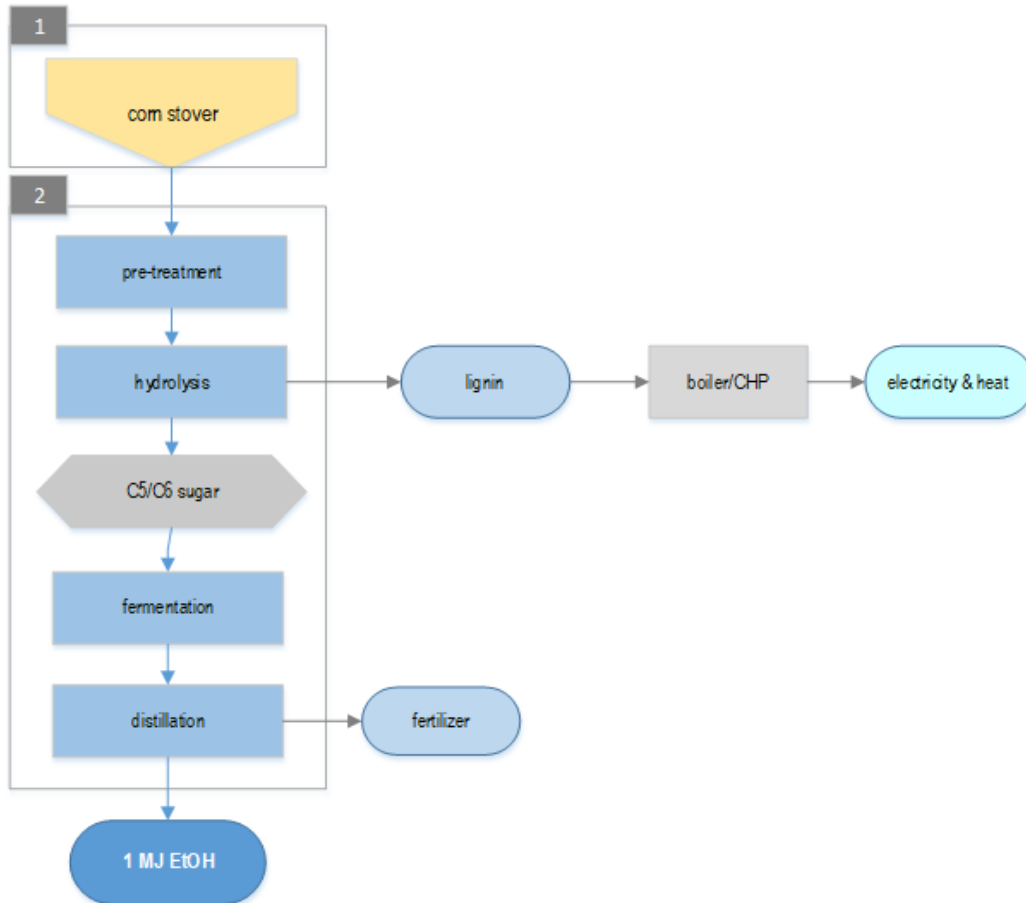


Abbildung 6: Lignocellulose-Ethanol-Bioraffinerie Fallstudie

Das gemahlene Maisstroh wird in einem Vorbehandlungsprozess mit verdünnter Säure (18 mgH₂SO₄/gTBM) vorbehandelt. Durch enzymatische Hydrolyse wird die Hemicellulose und Cellulose in monomere C5- und C6-Zucker und Lignin aufgespalten, die die Plattform in der beschriebenen 2nd Generation Ethanol-Bioraffinerie bilden. Die Cellulase wird vor Ort produziert. Die C5- und C6-Zucker werden in Gärtanks eingebracht. Die Fermentation erfolgt mit metabolisch veränderten Stämmen von *Saccharomyces cerevisiae* Mikroorganismen, die in der Lage sind, Xylose und Glukose zu Ethanol co-fermentiert, während ein separater Hydrolyse- und Fermentationsprozess (SHF-Prozess) angewendet wird. Abschließend wird die Fermentationsbrühe einem Destillationsprozess zugeführt. Destillationskolonnen und Molekularsiebe werden zur Herstellung von 99,5 % Ethanol eingesetzt. In diesem Bioraffineriekonzept gibt es zwei Hauptnebenprodukte: Lignin zur Energieerzeugung und Schlempe zur Energieerzeugung durch anaerobe Vergärung und als Düngemittel. Das Lignin wird in ein Heizkraftwerk eingespeist, um thermische Energie und Strom zu erzeugen, der als Prozessenergie für den Bioraffinerieprozess genutzt wird. Zusätzlich wird das Schlempe-Nebenprodukt aus dem Destillationsprozess als landwirtschaftlicher Dünger verwendet. Wird die Schlempe getrocknet, kann sie auch als Energieträger verwendet werden. Die landwirtschaftliche Vorkette des Rohstoffs wurde für den ökologischen Teil der Fallstudie berücksichtigt, wobei drei verschiedene Allokationsansätze gewählt werden (energetische Allokation, wirtschaftliche Allokation und keine Allokation an Maisstroh, da es sich um Reststoffbiomasse handelt). Der grundlegende Prozessablauf ist in Abbildung 6 dargestellt. Darüber hinaus fasst Tabelle 2 die wichtigsten Merkmale der betrachteten Fallstudie zusammen.

Tabelle 2: Wichtigste Merkmale der Lignocellulose-Ethanol-Bioraffinerie Fallstudie

2-Plattform-Bioraffinerie (C5&C6-Zucker, Lignin) zur Herstellung von Bioethanol,

Strom und Wärme aus Maisstroh

Stand der Technik	kommerziell / konzeptionell
Land	USA, EU 27
Hauptdatenquelle	Literatur (Fachbericht [30])

Produkte

Ethanol	4,400	TJ/a
Elektrizität	387	TJ/a

Hilfsstoffe

Wärme	3,273	TJ
Chemikalienerträge	87,727	t/a

Ausgangsmaterial

Maisstroh	1,535 (764)	TJ/a (kt/a)
-----------	-------------	-------------

Kosten

Investitionskosten	422	Mio. €
Rohstoffkosten	48	Mio. €/a
Hilfsstoffe	26	Mio. €/a
Sonstiges (Arbeit, Versicherung,..)	3	Mio. €/a

Umwandlungsraten

Stroh zu Ethanol	0.35	MJ/MJ _{EtOH}
Nebenprodukte zur KWK Wärme/Strom	0.46	MJ/MJ _{EtOH}

5.2.2. Massenbilanz

Die Massenbilanz (Abbildung 7) für den betrachteten Prozessweg veranschaulicht die Rohstoffintensität der lignocellulosischen Bioraffinerie. Im Feld kommen verschiedene Vorbehandlungsverfahren zum Einsatz. Typisch für alle biochemischen Umwandlungswege ist der hohe Wasserumsatz in diesen Prozessen, der besondere Aufmerksamkeit und ein optimales Design verdient. Basierend auf dem Ausgangsmaterial variiert der Anteil von Lignin und seine Verwendung ist ein wichtiger Aspekt, der die Umweltleistung der Wertschöpfungskette beeinflusst.

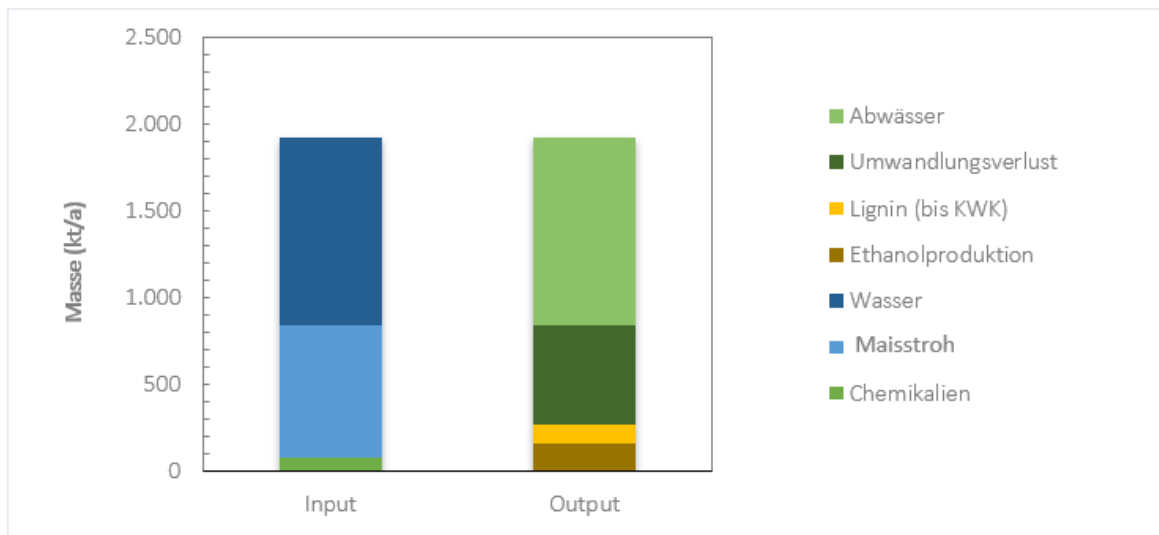


Abbildung 7: Massenbilanz Fallstudie Lignocellulose-Ethanol-Bioraffineriepfad

5.2.3. Ökonomische Bewertung

Die Daten zur Prozessökonomie basieren ebenfalls auf [30]. Die in Tabelle 2 dargestellten CAPEX und OPEX spiegeln die aggregierte Prozessökonomie für den Prozessweg und die Anlagenkapazität der Fallstudie wider. Um die wirtschaftliche Machbarkeit der Bioraffinerie im Rahmen der TEE-Bewertung zu analysieren, wurden detailliertere ökonomische Daten wie Tabelle 2 dargestellt verwendet. Mit diesen Daten war es möglich, die fixen und variablen Produktionskosten der Ethanol-Bioraffinerie der zweiten Generation zu berechnen. Basierend auf dieser Auswertung bieten die variablen Kosten einen höheren Anteil an den Gesamtkosten als die Fixkosten. Dieser Effekt entsteht durch den hohen Masseninput der Rohstoffversorgung, die für den Prozess benötigt wird. Die Rohstoffversorgungskosten haben einen signifikanten Einfluss auf die techno-ökonomische Analyse und deren Ergebnisse.

Die Ergebnisse der wirtschaftlichen Analyse als Verteilung der jährlichen Gesamtkosten sind in Abbildung 8 dargestellt. Es zeigt sich, dass die variablen Kosten (Rohstoffversorgung, Hilfs- und Betriebsstoffe, Entsorgungskosten und Wasserversorgungskosten) einen höheren Anteil an den Gesamtkosten haben als die Fixkosten (Abschreibungen, kalkulatorische Zinsen, Instandhaltung und Versicherung). Dieser Effekt entsteht durch die hohe Rohstoffversorgung, die für den Prozess benötigt wird. Die Kostenstruktur der Rohstofflieferketten, die sich in den geografischen Regionen nach den Rohstoffversorgungskosten stark unterscheidet, hat einen wesentlichen Einfluss auf die technoökonomische Performance einer lignocellulosischen Bioraffinerie. Weitere wesentliche Kostentreiber in dieser Fallstudie sind Hilfs- und Betriebsstoffe sowie kalkulatorische Zinsen, die auf den erheblichen Investitionsbedarf basieren. Diese Interpretation wird durch die durchgeführte Sensitivitätsanalyse in Abbildung 9 bestätigt - mit bis zu 200% produktspezifischen Kostenschwankungen basierend auf der Variation der Rohstoffeinsatzkosten, gefolgt von den gesamten Investitionskosten - mit bis zu 100% Kostenschwankungen. Bitte beachten Sie, dass die Kosten für Energie, andere und Verwaltung eine Abweichung von 0% aufweisen. Die autarke Energieversorgung der Bioraffinerie über die Nebenprodukte bringt Vorteile für die ökologische und wirtschaftliche Perspektive.

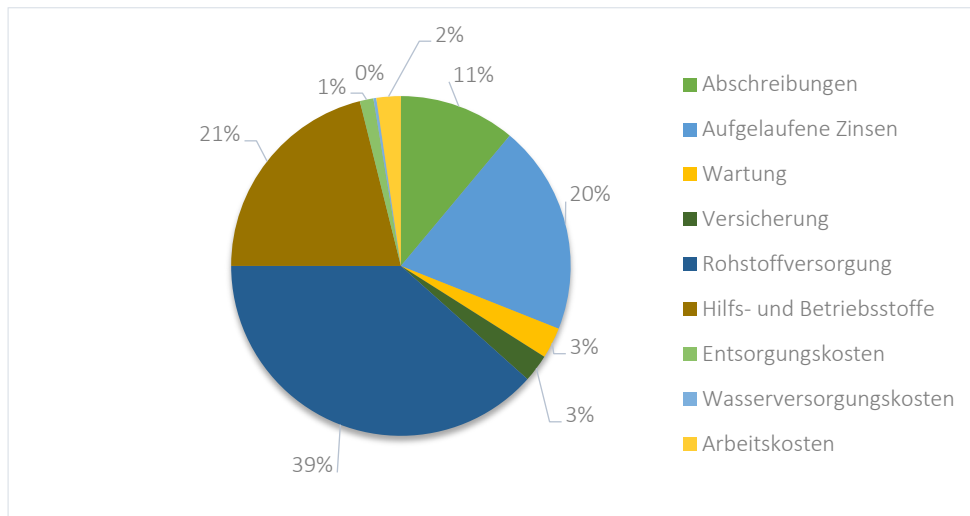


Abbildung 8: Kostenanalyse Fallstudie Lignocellulose-Ethanol-Bioraffineriepfad

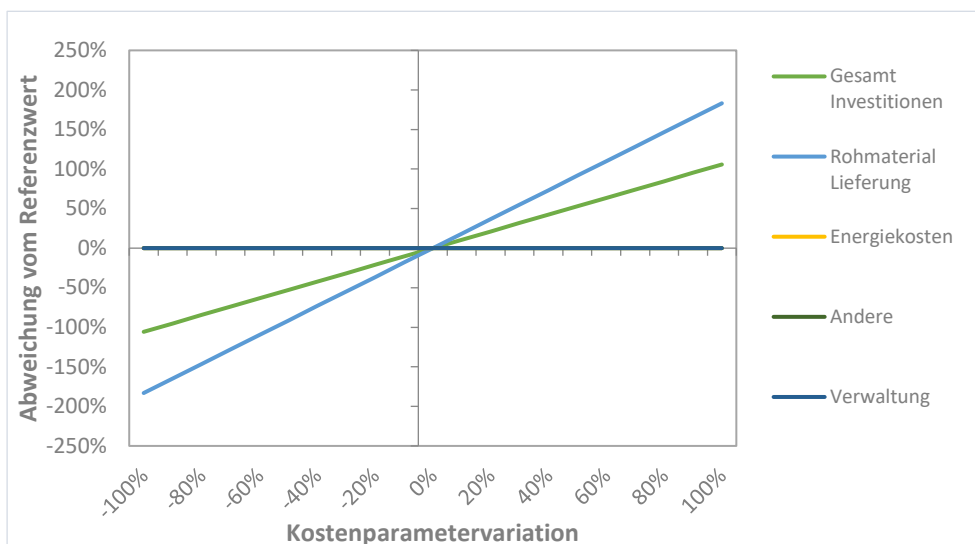


Abbildung 9: Sensitivitätsanalyse der Kostenstruktur Fallstudie Lignocellulose-Ethanol-Bioraffineriepfad

5.2.4. Ökologische Bewertung der Wertschöpfungskette

Die Umweltauswirkungen der Ethanol-Biokraftstoffproduktion der zweiten Generation werden in der Literatur umfassend untersucht. Die meisten Studien wenden einen Ökobilanzansatz an [31]–[37]. Derzeit wird die LCA-Methode in unterschiedlicher Form zur Bewertung der Umweltauswirkungen der Biokraftstoffproduktion eingesetzt. Insbesondere in einem europäischen Kontext ist die in der RED III definierte Methodik hervorzuheben, die auf eine einheitliche lebenszyklusbasierte Berechnung der Treibhausgaseinsparungen von Biokraftstoffen im Vergleich zu ihren fossilen Referenzsystemen abzielt [38] und auch in diesem Vergleich der Lignocellulose-Bioraffinerie mit dem fossilen Referenzproduktionssystem angewendet wird. Die Systeme werden basierend auf der Systemgrenze Cradle-to-Gate (auch Well-to-Tank genannt) und der Funktionseinheit des erzeugten MJ-Kraftstoffs analysiert (Abbildung 10).

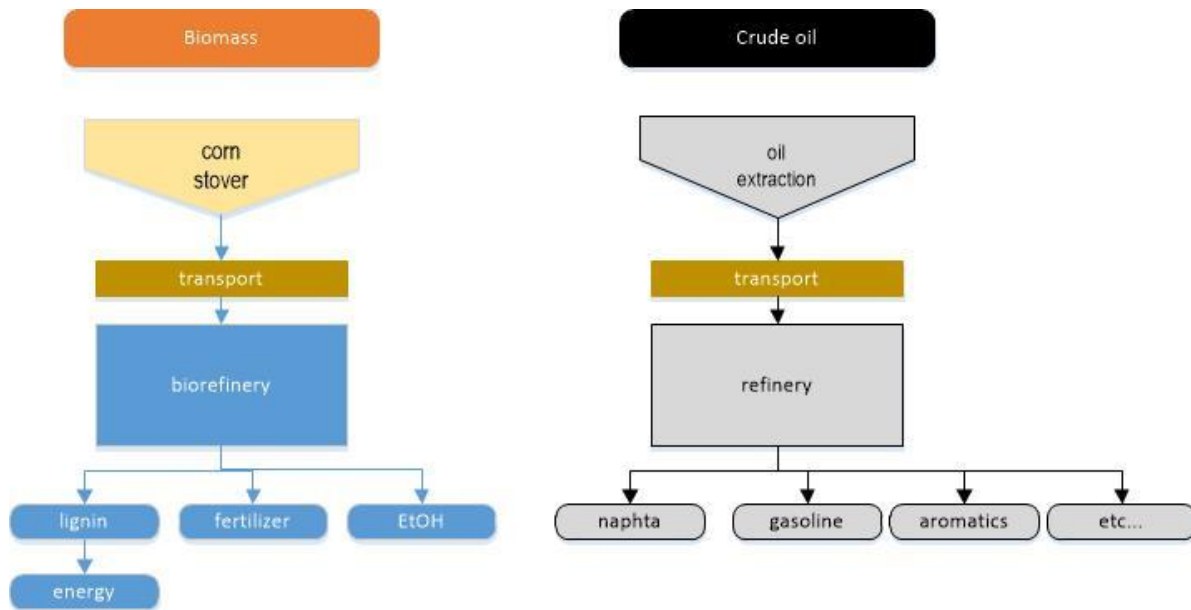


Abbildung 10: Bioaffinerie und Referenzsystem - Wertschöpfungskette Fallstudie Lignocellulose-Ethanol-Bioaffineriepfad (Cradle-to-Gate)

Tabelle 3 fasst die wichtigsten Ergebnisse der TEE-Bewertung zusammen. Wenn der Rohstoff Maisstroh als landwirtschaftliches Restnebenprodukt ohne Zuteilung von THG-Emissionen aus großen landwirtschaftlichen Betrieben definiert ist, dann haben die Umwandlungsprozesse in der Bioaffinerie den größten Einfluss auf die Ergebnisse. Wenn Gutschriften für überschüssige Energie in anderen Produktsystemen verwendet werden, können die THG-Emissionen aus dem Betrieb von Bioaffinerien kompensiert werden, und der CO₂-Fußabdruck des Produktsystems nimmt stark ab; die starken Vorteile der Implementierung eines Bioaffinerieansatzes treten in Kraft. Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen den Vergleich von THG-Emissionen und den kumulierten Energieaufwand mit fossilen Referenzsystemen der Fallstudie Lignocellulose-Ethanol-Bioaffineriepfad.

Tabelle 3: TEE-Bewertungsergebnisse der Fallstudie Lignocellulose-Ethanol-Bioaffineriepfad

Treibhausgasemissionen

Rohstoffbeschaffung (Maisstroh)	2,651	t CO _{2,eq}
Bioaffinerie	35,017	t CO _{2,eq}
Referenzsystem	368,751	t CO _{2,eq}
Einsparungen	331,083	t CO _{2,eq}

Kumulierter Energiebedarf

Fossil (z.B. Materialtransporte)	30	TJ
Erneuerbar (z.B. Maisstroh)	12,609	TJ
Referenzsystem	5,302	TJ
Differenz fossil/erneuerbar	+ 7,337	TJ

Kosten

Jährliche Kosten	127	Mio. €
Spezifische Kosten	0.61	€/l EtOH
Investitionskosten	422.5	Mio. €

Umsatzerlöse

Umsatzerlöse Ethanol	140.7	Mio. €
Spezifische Erlöse	0.68	€/l EtOH

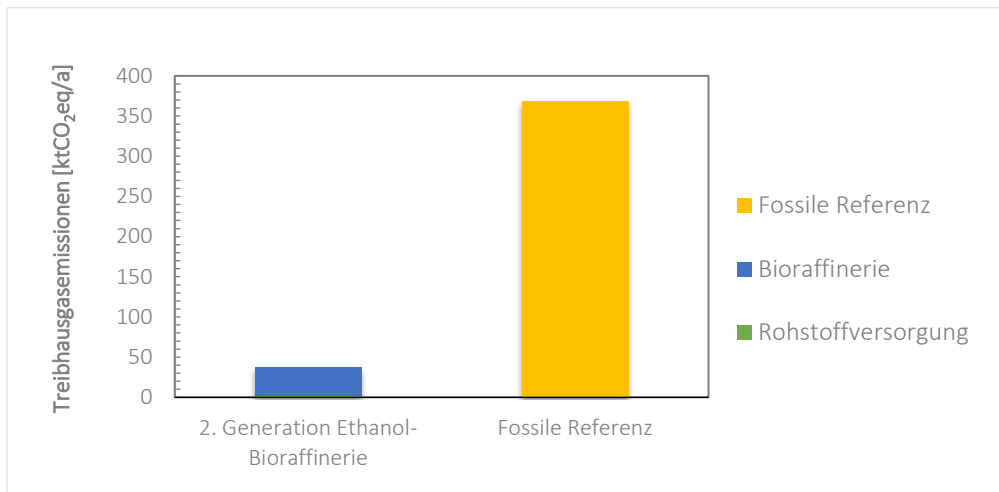


Abbildung 11: Treibhausgasemissionen der Bioraffinerie im Vergleich zur Referenz Fallstudie Lignocellulose-Ethanol-Bioraffineriepfad

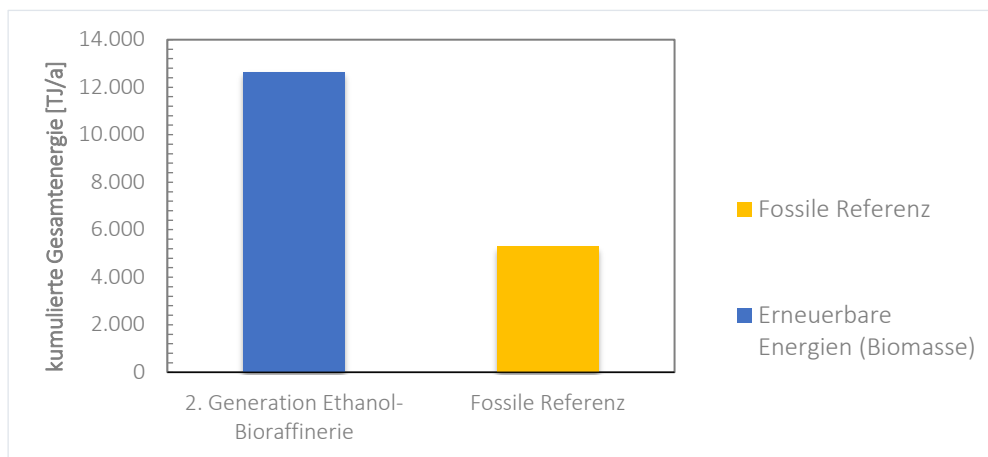


Abbildung 12: Kumulierter Energiebedarf der Bioraffinerie im Vergleich zur Referenz Fallstudie Lignocellulose-Ethanol-Bioraffineriepfad

Wie bereits erwähnt, folgt die Bewertung einem Cradle-to-Gate-Ansatz. Die Bewertung der Treibhausgasemissionen berücksichtigt den detaillierten Chemikalieneinsatz im Maisstroh-basierten Ethanol-Bioraffinerieprozess, die Nutzung von Strom und Dampf aus der Verwertung von Nebenprodukten (Lignin und Biogas aus der anaeroben Vergärung von Abwasser vor Ort) und die direkten Emissionen des Produktsystems. Im Vergleich zum Referenzsystem sind unter den gegebenen Annahmen der kumulierte fossile Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen für die Bioraffinerieysteme deutlich geringer als für das Referenzsystem. Dennoch ist der kumulierte Gesamtenergiebedarf des Bioraffineriepfades deutlich höher als bei der fossilen Referenz, die auf der Grundlage von Rohstoffeinsatz und Umwandlungswirkungsgrad berechnet wird. Effizienzsteigerungen in dieser Hinsicht können den Einsatz und die Marktdurchdringung des Bioraffineriepfades potenziell fördern. Die Treibhausgasemissionen und der kumulierte (fossile) Energiebedarf sind stark abhängig vom Primärenergieeinsatz für den Umwandlungsprozess. Wird z.B. Erdgas für thermische Energie und Strom aus lokalen Netzen anstelle von Nebenprodukten verwendet, nimmt die Umweltverträglichkeit des Bioethanols in der Regel deutlich ab. Beim Rohstoffeinsatz ist Maisstroh ein landwirtschaftlicher Reststoff, während die wichtigsten

landwirtschaftlichen Aufwendungen dem Hauptprodukt Mais zugeordnet werden, wenn alternativ der Mais anstelle des Reststoffs Stroh in Ethanol umgewandelt wird, entsteht ein erheblicher Teil der Umweltauswirkungen des Bioraffineriepfades aus diesen landwirtschaftlichen Betriebsmitteln (z.B. Düngemittel, Bodenbearbeitung, etc.).

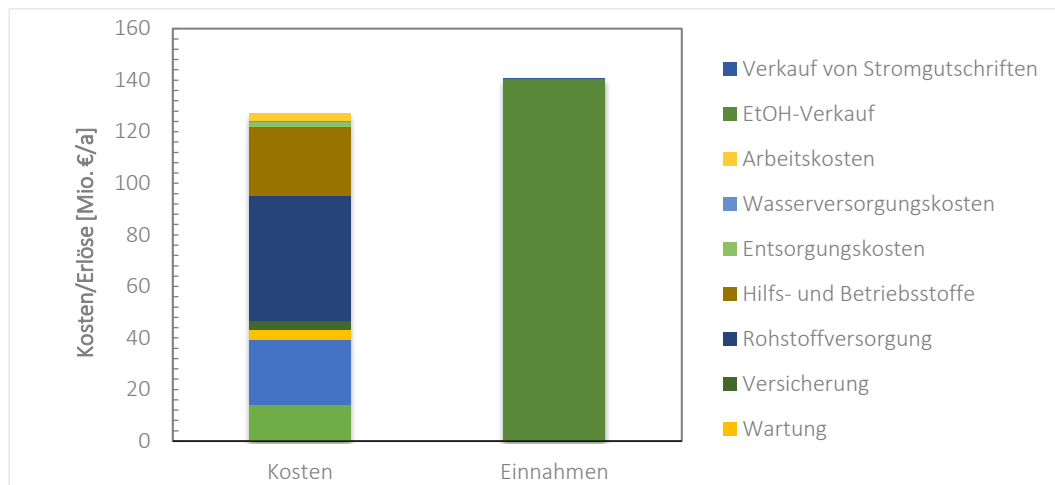


Abbildung 13: Vergleich Kosten und Erlöse - Fallstudie Lignocellulose-Ethanol-Bioraffineriepfad

Die Beurteilung von Kosten und Erträgen (Abbildung 13) ist durch die nicht erreichbare fallbezogene Repräsentativität generischer Daten stark in Frage zu stellen. Unter den gegebenen Annahmen werden die Umsätze ausschließlich durch den Bioethanolabsatz bestimmt, der stark von der internationalen Biokraftstoffpolitik, den Förder- und Preisvolatilitäten auf dem Weltmarkt bestimmt wird. Das Nebenprodukt Lignin wird nicht ausgewiesen, da es im Rahmen des integrierten Bioraffinerieansatzes in der Energieversorgung berücksichtigt wird. Wenn das Lignin als Produkt vermarktet werden könnte, ändert sich die Kosten- und Erlösstruktur, so dass eine alternative Energieversorgung unvermeidlich ist. Zusätzliche wirtschaftliche Auswirkungen auf z.B. die Düngemittelversorgung aus anaeroben Gärresten werden aufgrund der begrenzten Datenverfügbarkeit nicht berücksichtigt.

5.3. Sozioökonomische Bewertung am Beispiel der Lignozellulose Bioraffinerie (Fallstudie 3)

5.3.1. Modul 1 - Definition des Anwendungsbereichs und der Systemgrenzen

Dieses Modul stellt den Ausgangspunkt für die gesamte qualitative sozio-technische Analyse dar und bildet somit den Rahmen für die Module 2 (Stakeholder-Analyse) und 3 (STEEP-Analyse). Die Definition des Anwendungsbereichs und der Systemgrenze umfasst eine Beschreibung des Untersuchungsobjekts, das ein Prozess, eine Technologie, ein Produkt oder eine Dienstleistung sein kann.

Der Anwendungsbereich einer qualitativen sozio-technischen Analyse für industrielle Bioraffinerien und Bioökonomie-Strategien umfasst die Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen technischen und sozialen Faktoren bei der Umsetzung und Nutzung dieser Technologien. Dabei geht es um die

Erfassung und Analyse der vielfältigen Einflussfaktoren auf die Akzeptanz, die Nutzung und die Weiterentwicklung von industriellen Bioraffinerien und Bioökonomie-Strategien.

Die Systemgrenzen umfassen die technologischen Komponenten sowie die sozialen Akteure, die an der Umsetzung und Nutzung von Bioraffinerien und Bioökonomie-Strategien beteiligt sind. Dazu gehören beispielsweise die beteiligten Unternehmen, Forschungsinstitutionen, politischen Akteure, Anwohner:innen und andere Interessengruppen. Auch die verschiedenen technologischen Aspekte wie die Auswahl und Verfügbarkeit von Rohstoffen, die Prozessführung, die Logistik und die Produktvermarktung sind Teil des Systems.

Die qualitative sozio-technische Analyse zielt darauf ab, das komplexe Zusammenspiel dieser Elemente zu verstehen und mögliche Hindernisse und Potenziale zu identifizieren. Ziel ist es, Empfehlungen für eine erfolgreiche Umsetzung von Bioraffinerien und Bioökonomie-Strategien zu entwickeln, die sowohl ökonomische als auch soziale und ökologische Aspekte berücksichtigen.

5.3.2. Modul 2 - Stakeholder-Analyse

Die Stakeholder-Analyse ist eine qualitative Analyse des Umfelds für eine bestimmte Technologie, ein Produkt, ein Geschäftsmodell usw. Sie zielt darauf ab, die relevanten Stakeholder, ihre Rolle und Bedenken sowie ihren potenziellen positiven oder negativen Einfluss auf die Einführung einer Technologie, eines Produkts, eines Prozesses oder einer Dienstleistung zu ermitteln. Stakeholder sind definiert als Personen oder Personengruppen, die an dem in Modul 1 definierten Untersuchungsgegenstand interessiert, beteiligt oder von ihm betroffen sind.

Um einen besseren und strukturierten Überblick zu erhalten, werden die verschiedenen Interessengruppen in die folgenden Gruppen eingeteilt:

- Verwaltung
- Politik
- Verbände & NGOs
- Wirtschaftliche Akteure
- Presse und Medien
- Zivilgesellschaft

Die Stakeholder-Analyse antizipiert potenzielle Hindernisse und Ansichten, um geeignete Maßnahmen zur Bewältigung der voraussichtlichen Probleme ergreifen zu können. Die Einbeziehung relevanter Interessengruppen ist für die Entscheidungsfindung von Vorteil, kann Ideen und Informationen einbringen und Ressourcen sparen[39].

Der erste Schritt der Stakeholder-Analyse ist die Identifizierung relevanter Stakeholder, die auf einer Ad-hoc-Brainstorming-Basis mit Hilfe von Literaturrecherchen und der Bitte an die Mitglieder eines Projektkonsortiums, relevante Stakeholder zu identifizieren, durchgeführt wird. Für die Identifizierung der Stakeholder wurden die folgenden Schlüsselfragen verwendet:

- Wer ist im Zusammenhang mit der Errichtung einer industriellen Bioraffinerie entlang der gesamten Wertschöpfungskette von der Beschaffung der Rohstoffe bis zur Produktvermarktung betroffen?

- Wer ist der/die Initiator/in? Wer ist aktiv an der Errichtung und den Betrieb der Anlagen, einschließlich der gesamten Wertschöpfungskette von der Rohstoffbeschaffung bis zur Produkt-Vermarktung? (Hauptbeteiligte/r)
- Wer verfügt über besondere Kenntnisse und wichtige Ressourcen in dem Bereich, in dem die spezifische industrielle Bioraffinerie eingebettet ist, wiederum einschließlich der gesamten Wertschöpfungskette von der Rohstoffbeschaffung bis zur Produkt-Vermarktung?
- Wer kann die notwendigen Technologien und Logistikketten fördern? Wer kann diese Technologien und Logistikketten finanzieren?
- Wer legt den Rahmen für die Errichtung und den Betrieb der Anlage fest, die die gesamte Wertschöpfungskette von der Rohstoffbeschaffung bis zur Produkt-Vermarktung umfasst?
- Ohne wen würde die Errichtung und der Betrieb der industriellen Bioraffinerie-Anlage, nicht möglich sein? (Veto-Stakeholder)
- Wer sind die direkt Betroffenen? Wer ist indirekt betroffen? (primäre und sekundäre Interessensgruppen)
- Wer hat Bedenken gegen die Errichtung und den Betrieb der Anlage, entlang der gesamten Wertschöpfungskette von der Rohstoffbeschaffung bis zur Produkt-Vermarktung? (Veto-Stakeholder)?

Die Stakeholder-Analyse konzentriert sich auf die Zusammenfassung einer Gruppe von Stakeholdern zu einer Gruppe von 6 Clustern mit folgenden Bezeichnungen: Verwaltung (Ad), Politik (Po), Verbände (As), Wirtschaft (Ec), Presse/Medien (Pr) und Zivilgesellschaft (Cs). Diese Gruppe von Stakeholdern besteht aus mehreren Akteuren, die unter "Stakeholder" genauer benannt sind (z.B.: Errichter & Betreiber, Genehmigungs- und Zulassungsstellen, Gemeinden, Landwirte, Handelsunternehmen, Anwohner:innen usw.). Insbesondere die Identifizierung bestimmter Stakeholder: Schlüssel-, Veto- sowie primäre und sekundäre Stakeholder, ist notwendig, um ihren potenziellen Einfluss sowie ihre Relevanz für das Bioraffinerie-Projekt oder die Bioökonomie-Strategie qualitativ zu beschreiben. Die Definition dieser Akteure wird im Folgenden näher erläutert:

- Key Stakeholder: sind aufgrund ihrer Position, ihrer Fähigkeiten, ihres Wissens oder ihres Netzwerks in der Lage, ein Bioraffinerie-Vorhaben maßgeblich zu beeinflussen. Sie sind direkt von dem Projekt betroffen und durch institutionelle Regelungen oder informelle Beziehungen intensiv mit anderen Akteuren verbunden. Sie können durch drei Kernfunktionen definiert werden: Legitimität, Ressourcen und Vernetzung.
- Veto-Stakeholder: sind diejenigen, die ein Projekt aufgrund fehlender Zustimmung verhindern können. Sie können positive Anstöße geben, aber auch ein Projekt blockieren.
- Primäre Stakeholder: Sie sind direkt von einer Technologie, einem Produkt, einem Verfahren oder einer Dienstleistung der Bioraffinerie-Wertschöpfungskette betroffen. Sie können Nutznießer:in, aber auch die benachteiligte Partei sein.
- Sekundäre Stakeholder: sind indirekt oder vorübergehend von einem Projekt betroffen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse einer Stakeholder-Analyse zur Realisierung einer Lignozellulose-Bioraffinerie wie im Arbeitspaket 2 technisch, ökonomisch und ökologisch charakterisiert, dargestellt. Nach diesem Ansatz wurden 44 Stakeholder für die Stakeholder-Analyse identifiziert. 5 für die Kategorie Verwaltung, 4 für Politik, 7 für Verbände, 15 für Wirtschaftsakteure, 9 für Presse und Medien und 4 für die Zivilgesellschaft. Der nächste Schritt in der Stakeholder-Analyse ist die Stakeholder-Bewertung, um den Einfluss und die Wichtigkeit sowie die potenzielle Einstellung der

Stakeholder gegenüber der Möglichkeit der Etablierung der Bioraffinerie in diesem Segment zu bewerten. Die Bewertungsskalen sind wie folgt definiert:

- Einfluss (Macht): Wie viel Macht hat der Stakeholder, die Ausrichtung einer Realisierung zu ändern, insbesondere in Bezug auf die Wertschöpfungskette der als Beispiel herangezogenen Lignozellulose-Bioraffinerie? (1...*Sehr gering*, 5...*Sehr hoch*)
- Wichtigkeit (Interesse): Welches Interesse haben die Beteiligten an dem Projekt? Wie aktiv/passiv sind sie? (1...*sehr gering*, 5...*sehr hoch*)
- Einstellung: Wie ist die generelle Haltung der Stakeholder gegenüber dem Projekt bzw. der Entwicklung der Wertschöpfungskette der Bioraffinerie? (*Befürworter*, *Neutral*, *Kritisch*)

Die Ergebnisse der Stakeholder-Bewertung sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Stakeholder-Bewertung wurde von relevanten Personen aus den Mitgliedern des Konsortiums durchgeführt. Die in Tabelle 1 dargestellten Ergebnisse stellen die Durchschnittswerte dar, die über diese Bewertungen berechnet wurden.

Tabelle 4: Analyse der Interessengruppen

Stakeholder ID	geschätzter Einfluss auf Prozess/Technologie/Produkt	geschätzte Bedeutung für Prozess/Technologie/Produkt	geschätztes Risikopotential	Einstellung/Beurteilung
Anzeige1	3	4	25	Unterstützer
Ad2	4	4	25	Unterstützer
Ad3	3	5	50	neutral
Ad4	4	5	25	Unterstützer
Ad5	4	5	50	neutral
Verwaltungen	3.6	4.6	3	
Po1	3	1	50	neutral
Po2	3	1	50	neutral
Po3	4	5	25	Unterstützer
Po4	4	5	75	kritisch
Politik	3.5	3.0	2	
As1	1	1	25	Unterstützer
As2	1	3	25	Unterstützer
As3	1	2	25	Unterstützer
As4	1	1	25	Unterstützer
As5	4	2	75	kritisch
As6	4	2	75	kritisch
As7	3	1	75	kritisch
Verbände & NGOs	2.14	1.71	1	
Ec1	5	5	75	kritisch
Ec2	5	4	25	Unterstützer
Ec3	2	4	25	Unterstützer
Ec4	5	3	25	Unterstützer
Ec5	2	4	75	kritisch
Ec6	3	1	50	neutral
Ec7	4	1	50	neutral
Ec8	2	1	50	neutral

Ec9	5	3	50	neutral
Ec10	5	5	25	Unterstützer
Ec11	5	3	50	neutral
Ec12	2	2	75	kritisch
Ec13	5	3	75	kritisch
Ec14	4	1	75	kritisch
Ec15	5	1	75	kritisch
Wirtschafts- akteure	3.93	2.73	3	
Pr1	2	1	50	neutral
Pr2	2	1	50	neutral
Pr3	2	1	50	neutral
Pr4	2	3	50	neutral
Pr5	2	3	50	neutral
Pr6	1	1	50	neutral
Pr7	1	1	50	neutral
Pr8	2	3	50	neutral
Pr9	1	1	50	neutral
Presse & Medien	1.67	1.67	1	
Cs1	3	1	75	kritisch
Cs2	5	5	75	Unterstützer
Cs3	1	4	75	kritisch
Cs4	1	4	75	kritisch
Zivilgesellschaft	2.5	3.5	3	

Wie bereits erwähnt, wurden 44 Interessengruppen in den Prozess der Stakeholder-Analyse einbezogen. Die meisten Stakeholder (18) werden als neutral eingestuft, gefolgt von Befürworter:innen (13) und potenziellen Kritiker:innen (13). Man kann also sagen, dass dies ein sehr ausgewogenes Ergebnis ist. Keine Kategorie sticht besonders hervor. In der Kategorie Presse und Medien wird am häufigsten von einer neutralen Haltung der Beteiligten ausgegangen. Die meiste Kritik wird in den Kategorien Zivilgesellschaft, Wirtschaftsakteure und Verbände erwartet.

Das Thema des geschätzten Einflusses auf den Prozess/die Technologie (*Macht*) wurde auf einer Skala von 1...sehr niedrig bis 5...sehr hoch eingestuft. Ziel war es, aufzuzeigen, welche Interessengruppen als die mächtigsten angesehen werden, wenn es um die Förderung, Verhinderung oder Unterstützung des Projekts geht. Die Befragten bewerteten die einzelnen Interessengruppen in den sechs Kategorien. Das Gleiche wurde für das zweite Hauptthema durchgeführt. Hier ging es um das zugewiesene Interesse an dem Projekt. Von 1...sehr gering bis 5...sehr hoch wurde den Stakeholdern ebenfalls ein mögliches Interesse an dem Projekt und dem Output zugeordnet. Die Ergebnisse dieser Zuordnung sind in Abbildung 2 der Stakeholder-Matrix (Wichtigkeits-Einfluss-Matrix) zu finden.

Aufgrund ihrer Bedeutung und ihres Einflusses sollten die meisten Interessengruppen überwacht werden. Besonderes Augenmerk sollte auf die folgenden Interessengruppen gelegt werden: die Zivilgesellschaft, insbesondere die Eigentümer von Grundstücken [sie müssen zufrieden gestellt werden], die Verwaltung, insbesondere die regionalen Behörden und Verwaltungen [engmaschiges Management] und die Wirtschaft, insbesondere Unternehmen des Primärsektors wie Landwirte und

Betreiber von Anlagen, die auf die gleichen Rohstoffe zugreifen [sie müssen zufrieden gestellt werden].

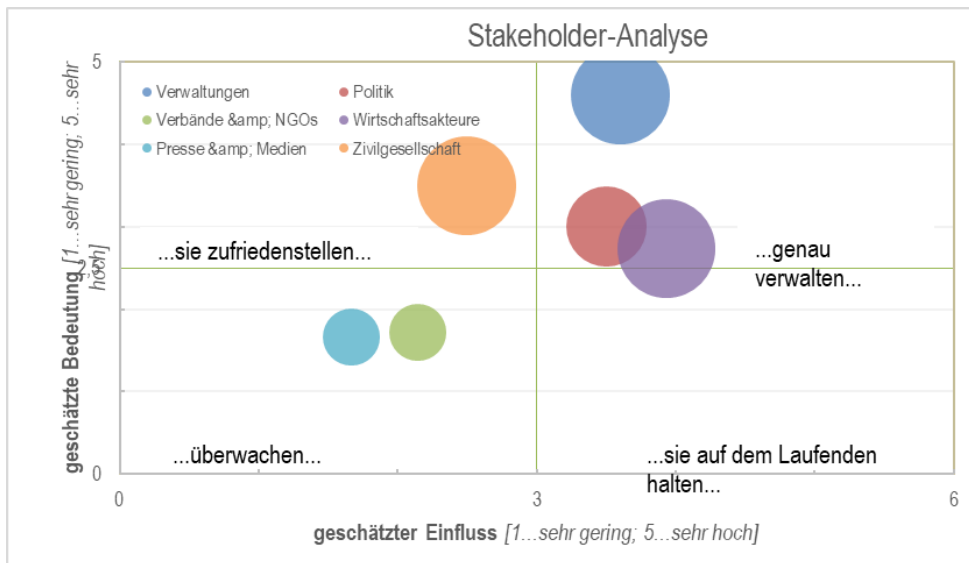


Abbildung 14: Stakeholder-Matrix

Bei der Konzeption von Maßnahmen zur Einbindung von Stakeholdern sollte der Schwerpunkt auf denjenigen liegen, die im Bereich "eng führen" und "informieren" zu finden sind. Die wichtigsten Stakeholder sind also in den Kategorien Verwaltung, Politik und Wirtschaftsakteure in verwandten Marktsegmenten (z.B. Betreiber von Anlagen, die auf die gleichen Rohstoffe zugreifen) zu finden. Sie haben potenziell einen großen Einfluss und sollten gut informiert und überwacht werden, da sie das Bioraffinerie-Projekt fördern, aber auch behindern können. Um Störungen des Projektverlaufs zu vermeiden, sind Maßnahmen erforderlich. Es sollte genau überlegt werden, wer diese Akteure sind und wo ihre spezifischen Interessen liegen. Sie sollten immer bestmöglich einbezogen und regelmäßig informiert werden, ihre Beiträge sollten angenommen und ihre Ratschläge und Fragen sollten ernst genommen werden. Abbildung 3 fasst die Schlussfolgerung zusammen, die sich aus der hier gefundenen Stakeholder-Matrix ziehen lässt und die Gestaltung gezielter Maßnahmen unterstützt.

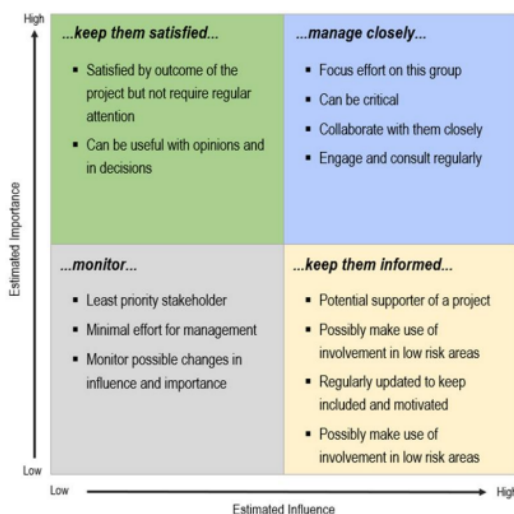


Abbildung 15: Gestaltung gezielter Maßnahmen für spezifische Stakeholder gemäß der Stakeholder-Matrix. Quelle: Energieinstitut an der JKU

Es ist wichtig zu erwähnen, dass eine Stakeholder-Analyse nur ein Ausschnitt ist und während der gesamten Zeitspanne der Bioraffinerie Planung, Errichtung & Betrieb wiederholt werden muss. Dadurch können sich die Ergebnisse der Bewertung ändern, und es ist auch möglich, dass es einen Wechsel von neutralen Befürwortern zu Befürwortern oder sogar Kritikern gibt. Es ist auch wahrscheinlich, dass sich die Gruppe der Stakeholder vergrößern wird.

Die Errichtung von Demonstrationsanlagen spielt eine besondere Schlüsselrolle bei der Technologieentwicklung. Demonstrationsanlagen sind notwendig, um zu zeigen, dass der Bioraffinerieprozess funktioniert, was eine Voraussetzung ist, um beispielsweise Investoren anzuziehen oder langfristig Lizenzen zu verkaufen oder Realisierungen zu erreichen [40] haben acht wichtige Akteure für die Errichtung einer Bioraffinerie-Demonstrationsanlage identifiziert. Diese Akteure und ihre spezifische Rolle sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 5: Die wichtigsten Akteure und ihre Rolle bei der Realisierung von Demonstrationsanlagen im Bereich industrieller Bioraffinerien

Interessensvertreter:innen	Beschreibung der Rolle – Schlüsselaktivitäten und -taktiken zur Bewältigung von Hindernissen und zur Förderung der Entwicklung von Demonstrationsanlagen
Eigentümer:innen/Inhaber:innen	Eigentümer der Anlage und der zugehörigen Einrichtungen. Beseitigt z. B. finanzielle und organisatorische Hindernisse, indem (öffentliche) Mittel für den Bau, die Entwicklung und manchmal den Betrieb der Demo-Anlage bereitgestellt werden. Umfasst nur das Eigentum an der Anlage, nicht unbedingt den Betrieb der Anlage und/oder des Standorts oder die Technologieentwicklung der demonstrierten Technologie.
Koordinierender Infrastrukturmanager:in	Übernimmt die Verantwortung für das Management des Betriebs der Demo-Anlage und bemüht sich, viele der auftretenden Hindernisse zu überwinden, wobei der Schwerpunkt auf den finanziellen Hindernissen für den Betrieb und das Management des Hauptakteursnetzwerks liegt. Als Spinne im Netz verknüpft der Infrastrukturmanager die anderen Akteure und koordiniert die Ressourcen und Maßnahmen rund um die Anlage. Er kann sich auch an der strategischen Entwicklung des PEP beteiligen (aus der Managementperspektive). Der Zugang zu erfahrenen Betreibern der Demo-Anlage ist wichtig. Diese können vom Infrastrukturbetreiber angestellt werden, aber auch von anderen Akteuren auf vertraglicher Basis beschafft werden.
Technologieentwickler:in	ist verantwortlich für die Entwicklung der Technologie, die in der Demo-Anlage demonstriert, verifiziert und eingesetzt wird. Für die entwickelte Technologie ist die Technologie selbst das Kernprodukt, und es müssen geeignete Geschäftsmodelle/Geschäftsszenarien entwickelt werden, um den Markt zu erreichen. Mit der Entwicklung der Technologie (von der Vordemonstration bis zur Demonstration und darüber hinaus) entwickelt sich auch das Geschäftsmodell des Technologieentwicklers.
Sponsor/Investor:in	Langfristiger (öffentlicher oder privater) Geldgeber für die Infrastruktur der Demonstrationsanlage. Vorzugsweise flexibel, Finanzierung der PDP mit einer Vielzahl verschiedener Mittel und in verschiedenen Formen, wobei die Barfinanzierung von Forschungsprogrammen und die Projektfinanzierung, z. B. für den Bau, am häufigsten vorkommen/im Vordergrund stehen. Der Sponsor verleiht der Technologie auch Glaubwürdigkeit und Legitimität durch den Akt der Finanzierung (mit Geld). Diese Rolle kann mehr oder weniger stark ausgeprägt sein, wie der Grad des (strategischen) Engagements des Sponsors zeigt.

Interessensvertreter:innen	Beschreibung der Rolle – Schlüsselaktivitäten und -taktiken zur Bewältigung von Hindernissen und zur Förderung der Entwicklung von Demonstrationsanlagen
Kunde/gewerbliche/r Nutzer/in	Entweder ein kommerzieller Nutzer der Technologie (der eine Lizenz oder ähnliches für die Nutzung der Technologie erwirbt) oder ein kommerzieller Nutzer der Demo-Anlage (der PDP-Dienste für Entwicklungs- oder Testzwecke kauft). Für den Kunden ist der Übergang von der Technologiedemonstration und -verifizierung zu einer permanenten Testeinrichtung wichtig, da der Technologieentwickler und der Infrastrukturbetreiber/-eigentümer in der Anfangsphase einem starken Engagement des Kunden gegenüber eher zurückhaltend (passiv) sein könnten. Nach der anfänglichen Technologiedemonstration und -verifizierung ist der Kunde ein dringend benötigter Akteur im Netz der Demobetriebe.
Vertriebsmitarbeiter:innen	Die Beteiligung hängt von der Phase der Entwicklung der Demonstrationsanlage ab. In den frühen Phasen der Technologiedemonstration und -verifizierung liegt der Schwerpunkt im Allgemeinen auf dem Verkauf der Technologie, während bei einer permanenten Testeinrichtung der Schwerpunkt auf dem Verkauf der Demo-Anlagen-Dienstleistungen liegt. Kann unterschiedliche organisatorische Zugehörigkeiten haben, z. B. zur gleichen Organisation gehören wie der Infrastrukturbetreiber oder der Technologieentwickler.
Wahlkämpfer:innen	Baut auf organisierte Weise Engagement und Netzwerke rund um die Demo-Anlage auf, mit dem Ziel, durch die Kommerzialisierung der betreffenden Technologie zu einer Veränderung/Entwicklung beizutragen. Dies geschieht durch das Sammeln von materiellen (Geld und Menschen) und immateriellen Ressourcen (Interesse, Legitimität usw.). Kann unterschiedliche organisatorische Zugehörigkeiten haben, z. B. zur gleichen Organisation gehören wie der Infrastrukturmanager oder der Technologieentwickler.
Befürworter:innen	Initiiert und beteiligt sich an öffentlichen Debatten, um die Öffentlichkeit und die politischen Entscheidungsträger zu informieren und Legitimität und Bewusstsein für die betreffende Technologie, ihr Potenzial und ihre Herausforderungen zu schaffen. Während der Campaigner darauf abzielt, direkt Ressourcen für die Demo-Anlage zu sammeln, zielt der Debattierer in erster Linie darauf ab, die Technologie hervorzuheben und zu fördern, was indirekt den Aktivitäten der Demo-Anlage durch den Aufbau von Legitimität und Bewusstsein für die Technologie zugutekommt.

Quelle: [40]

5.3.3. Modul 3 - STEEP-Analyse

Die STEEP-Analyse steht für verschiedene soziale, technische, ökologische, wirtschaftliche und politische Aspekte und ist ein strategisches Planungsinstrument für Unternehmen zur Bewertung des externen Umfelds eines Unternehmens, eignet sich aber auch zur Beurteilung von Einflussfaktoren. Sie befasst sich mit der Bewertung von externen Faktoren, die eine Technologie, ein Produkt, einen Prozess oder eine Dienstleistung beeinflussen (Szigeti & Messaadia, 2011). Die Bewertung der verschiedenen Indikatoren stützt sich auf Literaturrecherchen und Expert:innenwissen sowie auf externe Sachverständige.

Tabelle 6: STEEP Dimensionen und Indikatoren, Quelle: Energieinstitut an der JKU

Soziologisch	Technologische	Umwelt	Wirtschaftlich	Politisch
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einbeziehung von Interessensgruppen ▪ Trends und Innovation ▪ Gesundheit und Sicherheit ▪ Sozialleistungen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Stand der Technologieentwicklung ▪ Fortschritte in der Technologieentwicklung ▪ Integration in bestehende Systeme ▪ Innovation 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Treibhausgasbilanz ▪ Umweltauswirkungen ▪ Auswirkungen der Landnutzung ▪ Nachhaltigkeit des Systems ▪ Transport von Rohstoffen und Produkten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Betrieb und Wartung ▪ Wirtschaftliche Machbarkeit ▪ Finanzielle Unterstützung ▪ Kostensenkungspotenzial ▪ Wettbewerbsvorteil 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Politische Akzeptanz ▪ Bestehende politische Hindernisse und Unsicherheiten ▪ Bestehende rechtliche Hindernisse und Unsicherheiten

<ul style="list-style-type: none"> ▪ Soziale und öffentliche Akzeptanz ▪ Kommunikation ▪ Arbeitsbedingungen ▪ Chancengleichheit 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verlässlichkeit und Versorgungssicherheit ▪ Potenzial zur Beseitigung von Engpässen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Primärenergieeinsparung ▪ Kritische Rohstoffe ▪ Geschlossener Kreislauf 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Auswirkungen auf den Wohlstand ▪ Regionalität 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einbettung in Allianzen ▪ Räumliche Energieplanung ▪ Investitionssicherheit ▪ Wettbewerb um Ressourcen
---	--	---	--	---

Die STEEP-Analyse (Social, Technological, Environmental and Political) ist damit eine qualitative Indikatorenanalyse, die eine Reihe von Indikatoren umfasst, die soziale (gesellschaftliche), technologische, wirtschaftliche, ökologische und politische Dimensionen abdecken. Die im Rahmen der IEA IETS Task 11 Aktivitäten entwickelten qualitativen Indikatoren erleichtern die Beschreibung des externen Umfelds ("setting the scene") für die Entwicklung und Etablierung einer innovativen Bioraffinerie-Wertschöpfungskette. Die qualitative Indikatorenanalyse basiert auf einer umfassenden Literaturrecherche sowie auf Experteninterviews, die mit Mitgliedern von Projektkonsortien geförderter H2020 Projekte im Bereich industrieller Bioraffinerieprojekte des Energieinstituts durchgeführt wurden.

Im Allgemeinen ist die STEEP-Analyse eng mit dem PESTEL-Modell verwandt, das in der Literatur gut dokumentiert ist. Während PESTEL für politische, wirtschaftliche, soziale, technische, ökologische und rechtliche Aspekte steht, steht STEEP für soziale, technische, ökologische, wirtschaftliche und politische Aspekte. Dementsprechend unterscheidet sich das Modell nur in der Reihenfolge der Benennung der Aspekte und in der Bandbreite der Aspekte, da STEEP keine rechtlichen Aspekte umfasst [41]. Beide Modelle befassen sich mit der Bewertung der externen Faktoren, die ein Unternehmen beeinflussen. Es ist ein strategisches Planungsinstrument für Unternehmen zur Bewertung des externen Umfelds, eignet sich aber auch zur Bewertung von Einflussfaktoren. Daher stellt es die geeignete Methodik dar, um mögliche oder bestehende externe Hindernisse und Herausforderungen, die Aspekte einer Technologie, eines Prozesses, eines Produkts oder einer Dienstleistung beeinflussen, qualitativ zu bewerten. Für jeden STEEP-Aspekt wurde eine Reihe von qualitativen Indikatoren für die gezielte Bewertung von Bioraffineriepfaden entwickelt.

Das Indikatoren-Set wurde im Rahmen eines internen Workshop-Prozesses am Energieinstitut an der JKU definiert. Grundlage für die Identifikation der relevanten Indikatoren für die IEA IETS Task 11 Aktivitäten war einerseits die Auswahl der in anderen Projekten verwendeten Indikatoren (Praxiserfahrung) und andererseits Indikatoren, die in der wissenschaftlichen Literatur, wie z.B. [42]–[45] für die sozio-ökonomische Bewertung, Social Life Cycle Assessment oder Life Cycle Sustainability Assessment verwendet werden.

Hier werden Literaturrecherchen und statistische Daten zusammengetragen, um Informationen für einen breiteren Kontext auf Makroebene abzuleiten. Diese Hintergrunddaten erleichtern die qualitative Indikatorenanalyse sowie die Bewertung der Indikatoren, da sie die Situation industrieller Bioraffinerien abbilden. Die Kenntnis der aktuellen Situation ist entscheidend für die Abschätzung der Auswirkungen der Planung, Errichtung und des Betriebs von derartigen Anlagen. Diese Indikatoren bilden den Grundstock der Indikatoren, die für die qualitative Bewertung herangezogen werden. Die Gesamtzahl der Indikatoren für jede Dimension sagt nichts über die Bedeutung der einzelnen Dimensionen aus. Je nach Bioraffinerie-Projekt bzw. Fallstudie können Anpassungen vorgenommen werden - falls dies der Fall ist, wird dies im Detail erläutert. Tabelle 7 gibt einen Überblick über die untersuchten Indikatoren.

Tabelle 7: Liste der qualitativen Indikatoren und Beschreibung der Indikatoren.

*P: Prozessbezogener Indikator, der die industrielle Bioraffinerieanlage in den Mittelpunkt stellt;

**E: Umweltbezogene Indikatoren werden analysiert, wobei die Wertschöpfungskette vom Rohstoff zu den Produkten im Mittelpunkt steht.

Indikator	Beschreibung des Indikators	P*/E**
Soziales		
Einbeziehung von Interessengruppen	Aktivitäten zur Einbeziehung von Stakeholdern	P
Trends und Innovation	Beziehung zu und Einfluss auf Trends	E
Gesundheit und Sicherheit	Potenzielle Gesundheits- und Sicherheitsrisiken durch die Technologie für verschiedene Interessengruppen (Mitarbeiter, Nutzer, Nachbarn, Zivilgesellschaft)	P
Soziale Aspekte	Aspekte und potenzielle Vorteile, die sich aus der Ansiedlung der Produktion in einer bestimmten ländlichen Region ergeben	E
Soziale und öffentliche Akzeptanz	Technologiebezogene Aspekte der gesellschaftspolitischen und Marktakzeptanz	E
Kommunikation		
	Aktivitäten zur Information und Sensibilisierung über die Technologie oder neue Entwicklungen für die Öffentlichkeit im Land der Wertschöpfungskette	P
Arbeitsbedingungen	Änderungen der allgemeinen Arbeitsbedingungen aufgrund der neuen Technologie (für Arbeitnehmer im Falle der Einführung der Technologie)	P
Chancengleichheit	Zugänglichkeit der Technologie	E
Technologisch		
Stand der Technologiereife	Abschätzung des Reifegrads einer Technologie	P
Abhängigkeit von der Technologie	Abhängigkeit von der Infrastruktur, bestimmten Rohstoffen usw.	E
Integration in das bestehende System	Möglichkeiten der Integration in bestehende Wertschöpfungsketten	E
Innovation		
	Innovation der Technologie über den Stand der Technik hinaus	P
Reproduzierbarkeit	Fähigkeit, die Technologie auf andere Regionen zu übertragen	P
Anpassungsfähigkeit	Fähigkeit der Technologie, auf veränderte Angebots- und Nachfragebedingungen zu reagieren	P
Umwelt		
Treibhausgasbilanz	Treibhausgaseinsparungen im Vergleich zum fossilen Gegenstück	P
Umweltauswirkungen	Mögliche andere Umweltauswirkungen	P
Auswirkungen der Landnutzung und biologische Vielfalt	Änderungen der Landnutzung	E
Nachhaltigkeit des Systems	Beitrag zu den Zielen für nachhaltige Entwicklung (SDGs)	P
Transport von Rohstoffen und Produkten	Umweltauswirkungen des Verkehrs durch die neue Technologie	P
Primärenergieeinsparung	Auswirkungen der Technologie auf die Primärenergieeinsparungen	P
Geschlossener Kreislauf	Beitrag der Technologie zur Steigerung der Kreislaufwirtschaft	P
Wirtschaftlich		
Arbeitsmarkt	Die potenziellen Auswirkungen der Technologie auf die Beschäftigungssituation in einer bestimmten Region	E
Wirtschaftliche Machbarkeit	Produktionskosten im Vergleich zu den künftigen Preisaussichten für biobasierte und fossile Brennstoffe	P
Wettbewerbsvorteil	Potenzieller Wettbewerbsvorteil für die Europäische Union	E
Auswirkungen auf den Wohlstand	Potenzielle Wohlfahrtseffekte im Zusammenhang mit dem Aufbau der Wertschöpfungskette	E
Politisch		
Politische Akzeptanz	Aktuelle politische Strategien und Richtlinien, die die Technologieeinführung beeinflussen	E
Regulatorische Trends	Frühere, aktuelle und potenzielle künftige Regulierungstrends (EU-Ebene)	E

Die wichtigsten Fragen für die Durchführung der qualitativen Indikatoranalyse sind:

- "Welchen Beitrag/Einfluss hat das Bioraffinerie-Projekt bzw. die -Wertschöpfungskette auf [Indikator X]?"
- "Welchen Einfluss hat [Indikator X] auf das Bioraffinerie-Projekt bzw. die -Wertschöpfungskette?"
- "Welche Implikationen lassen sich aus der Indikatoren-Analyse für das Bioraffinerie-Projekt bzw. die -Wertschöpfungskette ableiten?"

Die Indikatoren-Analyse stellt im Wesentlichen den Rahmen für den spezifischen Indikator mit Statistiken, Berichten, wissenschaftlicher Literatur, politischen Dokumenten usw. dar, um die Grundlage für die Ableitung zu erarbeiten. Basierend auf der Indikatoren-Analyse werden die Auswirkungen auf das Bioraffinerie-Projekt bzw. die -Wertschöpfungskette sowie die Auswirkungen auf die Region aufgrund der Etablierung des speziellen Bioraffinerie-Projektes ermittelt.

5.3.4. Modul 4: Umfassende Ergebnisanalyse

Die umfassende Analyse ist Teil von Modul 4 des angewandten 4-stufigen SAMBA-Modells zur qualitativen sozioökonomischen Bewertung. Sie besteht aus zwei Teilen. Bei der qualitativen Analyse geht es darum, die Barrieren, Zwänge, Herausforderungen sowie die Treiber und Erfolgsfaktoren in einer SWOT-Analyse für das Bioraffinerie-Projekt und die entsprechende Wertschöpfungskette qualitativ zusammenzufassen. Die SWOT-Analyse wird dann zur sogenannten SAMBA-Matrix verdichtet, die einen Überblick über Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken gibt. Die im folgenden Abschnitt dargestellten Ergebnisse basieren auf der vorgelagerten qualitativen Indikatoren-Analyse im Modul 3.

5.3.5. SWOT-Analyse

(1) Stärken

- Sehr starke Einbeziehung der Stakeholder
- Kommunikationsbemühungen verstärken den Informationsfluss und ermöglichen eine starke Beteiligung der Interessengruppen.
- Die Errichtung und der Betrieb der Bioraffinerie ist ein wichtiger Schritt auf dem Weg zur Marktreife der Technologie. Sie wird die weltweite Einführung der Technologie stärken und als erfolgreiches Demonstrationsobjekt dienen.
- Die Debatte über Lebensmittel und Kraftstoffe könnte eine Bedrohung für Biokraftstoffe der ersten Generation darstellen, aber Bioraffinerien der zweiten Generation stärken.
- Die Kohlenstoffbesteuerung wird die Benzinpreise erhöhen, und diese Maßnahmen werden die wirtschaftliche Durchführbarkeit von erneuerbaren Kraftstoffen stärken.
- Eine treibende Kraft für den Einsatz erneuerbarer Brenn- und Treibstoffe aus Bioraffinerien ist die Diskussion über die Sicherheit der Energieversorgung aufgrund der Ukraine-Krise.
- Die aktuellen Trends im Mobilitätssektor wie das Aufkommen neuer Technologien, die Bevölkerungsentwicklung und die allgemeine Einstellung zur Mobilität sind wichtige Triebkräfte für Biokraftstoffe aus Bioraffinerien.

- Die Sicherheit nimmt einen wichtigen Platz in Bioraffinerie-Projekten ein. Die Anlagen werden mit dem Ziel eines minimalen menschlichen Eingriffs nach dem letzten Stand der Technik gebaut.
- Die Schaffung neuer Arbeitsplätze in ländlichen Regionen, die durch Abwanderung, begrenzte Beschäftigungsmöglichkeiten und ein niedrigeres Bildungsniveau gekennzeichnet ist, ist ebenfalls eine wichtige Stärke von Bioraffinerie-Projekten.
- Die Entwicklung, die Errichtung und der Betrieb der Bioraffinerie-Anlage schafft qualifizierte Arbeitsplätze und diversifiziert das Einkommen der Rohstofflieferanten (Landwirte).
- Wiederbelebung der Landwirtschaft und der ländlichen Wirtschaft.
- Schließt die Lücke bei der Umsetzung technologiebasierter Industrien zwischen weiter entwickelten Regionen und weniger entwickelten Regionen.

(2) Schwächen

- Negative Auswirkungen auf die Bodennutzung und die biologische Vielfalt, wenn zu viel Rohstoff von den Feldern entfernt wird.
- Regionale Disparitäten zwischen Regionen: Einkommensniveau, Arbeitslosenquote, ...
- Aufbau der logistischen Wertschöpfungskette für Rohstoffe mit Herausforderungen verbunden (Skalierung, Qualitätssicherung, etc.).

(3) Chancen

- Eine der größten Chancen für lignozellulosehaltiges Bioethanol in der Zukunft ist der SAF-Markt (Sustainable Aviation Fuel). Ein Vorschlag für Beimischungsverpflichtungen und die Prognosen für die steigende Nachfrage nach Flugzeugtreibstoff deuten darauf hin, dass dies ein wichtiger Zukunftsmarkt sein könnte.
- Abhängig von der weiteren technologischen Entwicklung von Dieselmotoren - insbesondere im schwer zu dekarbonisierenden Schwerlastverkehr - könnte sich auch für die Beimischung von Bioethanol die Möglichkeit ergeben, in diesen Markt einzutreten, während die Beimischung im Pkw-Sektor (und bei leichten Nutzfahrzeugen) mit dem zunehmenden Anteil von batteriebetriebenen Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeugen auslaufen wird
- Da der Landkreis Cluj eine positive Binnenwanderung aufweist, ist es wahrscheinlich, dass er Arbeitskräfte für den Betrieb der Anlage anziehen und halten kann.
- Die Lage in einem Gebiet, in dem viele Menschen in der Landwirtschaft arbeiten, unterstützt die Beschaffung von Rohstoffen.
- Die Einrichtung des Lignozellulose-Ethanol-Wegs schafft direkte und indirekte Arbeitsplätze auf regionaler und potenziell auch auf nationaler Ebene. Im konkreten Fall werden langfristig 100 direkte Arbeitsplätze am Standort der Anlage und 300 Arbeitsplätze entlang der Wertschöpfungskette, d. h. für die Lieferung des Stroh, geschaffen. [46]
- Schulung am Arbeitsplatz und Ausbildung für lokale Arbeitnehmer und Landwirte im Sinne eines Wissenstransfers zur Sicherung qualifizierter Arbeitskräfte.
- Durch die Nachfrage nach Getreidestroh wird die Einkommensstruktur der Landwirte diversifiziert, was zur Bekämpfung der Armut der in der Landwirtschaft tätigen Menschen beiträgt, die derzeit ein Problem in ländlichen Regionen darstellt.

- Die Einrichtung der Wertschöpfungskette trägt zur Wiederbelebung der Landwirtschaft in der Region bei, da der Standort auf dem Gelände einer ehemaligen Zuckermühle errichtet wurde.
- Die Schaffung von regionalen Arbeitsplätzen, die Diversifizierung des Einkommens der Landwirte und die Wiederbelebung der Landwirtschaft können als insgesamt positiv für die ländliche Wirtschaft angesehen werden.
- Die Nachfrage nach alternativen Kraftstoffen im Luftfahrtsektor wird in Zukunft aufgrund der vorgeschlagenen Beimischungsziele steigen.
- Da der Alkohol-zu-Jet-Weg unter Verwendung von Ethanol auf Zucker- und/oder Stärkebasis bereits von der ASTM zugelassen ist, könnte sich die SAF-Produktion auch als Zielmarkt für Bioraffinerien entwickeln. [47], [48]
- Die Verpflichtung, die THG-Intensität im Verkehr um 13 % zu reduzieren, wird die Verwendung von Biokraftstoffen mit einer hohen spezifischen THG-Einsparung potenziell fördern. Diese hohe THG-Einsparung von Zelluloseethanol bzw. Bioraffineriekonzepten könnte ein Anreiz sein, diese Art von Biokraftstoff in Zukunft zu verwenden.
- Der Multiplikator von 1,2 bei der Verwendung von Biokraftstoffen für den Luft- und Seeverkehr unterstreicht erneut den verstärkten Einsatz von flüssigen Kraftstoffen in diesen Sektoren.
- Die in Podari eingerichtete Wertschöpfungskette für lignozellulosehaltiges EtOH sowie das Anlagendesign fügen sich vollständig in die aktuellen politischen Rahmenbedingungen und Strategien (RED II, Bioökonomie-Strategie, Kreislaufwirtschaft) ein.
- Es kann von einer sehr guten politischen Akzeptanz ausgegangen werden, da die EtOH nicht nur die von der RED vorgeschriebenen THG-Einsparungen übertreffen, sondern die gesamte Wertschöpfungskette ein gutes Beispiel für die Demonstration der Kreislaufwirtschaft ist.

(4) Risiken

- Aktuelle Unsicherheiten über die zukünftige Entwicklung des Straßenverkehrs in Europa. Dennoch gibt es deutliche Anzeichen dafür, dass ICE mittel- bis langfristig im Bereich der Pkw und leichten Nutzfahrzeuge in Europa auslaufen werden. Dementsprechend wird dieser Markt als Abnehmer in Europa auf lange Sicht nicht lebensfähig sein.
- Die demografische Abhängigkeit der Region könnte auf lange Sicht eine Herausforderung darstellen, wenn es darum geht, Arbeitskräfte entlang der Wertschöpfungskette zu halten.
- Wenn es nur begrenzte Möglichkeiten gibt, qualifizierte lokale Arbeitskräfte einzustellen, werden die Arbeitsplätze von Ausländern übernommen werden. Wenn dies langfristig der Fall sein wird, sind die positiven regionalen begrenzt.
- Gemäß RED III verursacht Strom aus erneuerbaren Energien keine Treibhausgasemissionen und führt daher zu einer Verringerung der Treibhausgasintensität um 100 %, was einen starken Anreiz für den Verkehrssektor darstellt, auf (erneuerbare) Elektrifizierung umzustellen.
- Derzeit gibt es kaum Anhaltspunkte für Gefahren hinsichtlich der politischen Akzeptanz. Zukünftig könnte - vor allem mit der Einführung von immer mehr Wertschöpfungsketten in

Europa, die Getreidestroh verwenden - eine Diskussion über verbindliche Nachhaltigkeitskriterien für die Verwendung von landwirtschaftlichen Reststoffen entstehen.

5.3.6. SAMBA-Matrix

Schließlich folgt die SAMBA-Matrix, in der alle Ergebnisse der sozioökonomischen Analyse dargestellt und kartiert sind. Die Ergebnisse werden hier in komprimierter Form dargestellt.

Tabelle 8: SAMBA Matrix

SAMBA-MATRIX	Stärken	Schwachstellen
	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr starke Einbeziehung der Interessengruppen und große Kommunikationsanstrengungen. • Die Errichtung und der Betrieb einer Vorzeiganlage ist ein wichtiger Schritt auf dem Weg zur technologischen Reife. • Die Debatte über Lebensmittel und Kraftstoffe könnte eine Bedrohung für Biokraftstoffe der ersten Generation darstellen, aber die Wege der zweiten Generation stärken. • Die Besteuerung von Kohlenstoff wird die Benzinpreise erhöhen, und diese Maßnahmen werden die wirtschaftliche Machbarkeit von erneuerbaren Kraftstoffen stärken. • Eine treibende Kraft für den Einsatz erneuerbarer Brennstoffe ist die Diskussion über die Sicherheit der Energieversorgung aufgrund der Ukraine-Krise. • Die aktuellen Trends im Mobilitätssektor (neue Technologien), die Bevölkerungsentwicklung und die allgemeine Einstellung zur Mobilität sind wichtige Triebkräfte für Biokraftstoffe. • Die Sicherheit nimmt einen wichtigen Platz in Bioraffinerien ein. Anlagen werden mit dem Ziel eines minimalen menschlichen Eingriffs gebaut. • Schaffung neuer Arbeitsplätze in einer Region, die durch Abwanderung, begrenzte Beschäftigungsmöglichkeiten und ein niedrigeres Bildungsniveau gekennzeichnet ist. 	<ul style="list-style-type: none"> • Negative Auswirkungen auf die Bodennutzung und die biologische Vielfalt, wenn zu viel Stroh von den Feldern entfernt wird. • Regionale Disparitäten: Einkommensniveau, Arbeitslosenquote, ... • Abwanderung qualifizierter Arbeitskräfte in andere Regionen. • Aufbau der logistischen Wertschöpfungskette für Rohstoffe.

	<ul style="list-style-type: none"> • Die Entwicklung der Anlage schafft qualifizierte Arbeitsplätze und diversifiziert das Einkommen der Landwirte. • Wiederbelebung der Landwirtschaft und der ländlichen Wirtschaft. • Schließt die Lücke bei der Einführung technologiebasierter Industrien zwischen den weiter entwickelten und den weniger entwickelten Regionen. 	
Möglichkeiten	STÄRKEN/CHANCEN	SCHWÄCHEN/CHANCEN
<ul style="list-style-type: none"> • SAF-Markt – es gibt starke Hinweise darauf, dass dies ein wichtiger Zukunftsmarkt sein könnte. • Weiterentwicklung von Dieselmotoren, während die Beimischung im Pkw-Sektor auslaufen wird. • Gewinnung und Bindung von Arbeitskräften für den Betrieb der Anlage. • Unterstützt die Beschaffung von Rohstoffen. • Schaffung von Arbeitsplätzen auf regionaler (möglicherweise auch nationaler) Ebene • Schulung am Arbeitsplatz und Ausbildung für lokale Arbeitnehmer und Landwirte. • Die Wertschöpfungskette trägt zur Wiederbelebung der Landwirtschaft in der Region bei. • Schaffung regionaler Arbeitsplätze, Diversifizierung des Einkommens der Landwirte und Wiederbelebung der Landwirtschaft. • Die Nachfrage nach alternativen Kraftstoffen im Luftfahrtsektor wird in Zukunft steigen. • Auch die SAF-Produktion könnte sich weiterentwickeln. • Die Verpflichtung zur Verringerung der Treibhausgasintensität im Verkehr um 13 % wird die Verwendung von Biokraftstoffen fördern, die eine hohe spezifische 	<p>Die Einrichtung eines vollständig erneuerbaren Bioraffinerieprozesses im Einklang mit den aktuellen politischen Strategien und Richtlinien wird wahrscheinlich öffentliche Mittel für Demonstrationsanlagen und Investoren erhalten.</p> <p>Ein vollständig erneuerbarer Prozess garantiert maximale Treibhausgaseinsparungen des Kraftstoffendprodukts und stellt daher einen wichtigen Vorteil dar, wenn die RED III-Ziele in Kraft treten.</p> <p>Beobachten Sie die Endproduktmärkte sorgfältig, um die Märkte mit den vielversprechendsten langfristigen Perspektiven zu ermitteln.</p>	<p>Da der Bau der Anlage mit einem starken Aufbau von Know-how und Schulungen einhergeht, könnten einige Gefahren entschärft werden.</p> <p>- Die Menschen werden sehr gut geschult sein und können z. B. über die Richtlinien zur biologischen Vielfalt und eine vernünftige Landnutzung aufgeklärt werden.</p> <p>Die regionalen Ungleichheiten in ländlichen Regionen könnten sich durch die zunehmenden Möglichkeiten zur Schaffung von Arbeitsplätzen und höheren Bildungsabschlüssen verringern.</p> <p>Planung aktiverer Stakeholder-Aktivitäten, insbesondere zur Gewinnung von Kunden, Investoren, Rohstofflieferanten usw., um das Netzwerk zu stärken.</p>

<p>Treibhausgaseinsparung ermöglichen.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verwendung von Biokraftstoffen für den Luft- und Seeverkehr. • Die Wertschöpfungskette und das Anlagendesign von Bioraffinerien passen vollständig in die aktuellen politischen Rahmenbedingungen und Strategien (RED II,...) • Es kann von einer sehr guten politischen Akzeptanz ausgegangen werden 		
<p>Bedrohungen</p>	<p>STÄRKEN/BEDROHUNGEN</p>	<p>SCHWÄCHEN/BEDROHUNGEN</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Es ist erwiesen, dass Verbrennungsmotoren bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen in Europa langfristig auslaufen werden. • Die demografische Abhängigkeit der Region könnte auf lange Sicht eine Herausforderung darstellen, wenn es darum geht, Arbeitskräfte entlang der Wertschöpfungskette zu halten. • Die begrenzten Möglichkeiten, qualifizierte Arbeitskräfte einzustellen, werden von Ausländern übernommen werden. Wenn dies langfristig der Fall sein wird, sind die positiven regionalen Auswirkungen begrenzt. • Gemäß RED III verursacht Strom aus erneuerbaren Energien keine Treibhausgasemissionen und führt daher zu einer Verringerung der Treibhausgasintensität um 100 %, was einen starken Anreiz für den Verkehrssektor darstellt, auf (erneuerbare) Elektrifizierung umzustellen. 	<p>Die Schaffung von Arbeitsplätzen geht Hand in Hand mit den folgenden positiven Aspekten:</p> <ul style="list-style-type: none"> - hohe Arbeitsstandards - Qualifizierte Arbeit und Ausbildung - Kombination der wichtigen Sektoren der Landwirtschaft und der ländlichen Wirtschaft. <p>Obwohl die Elektrifizierung immer mehr Verbreitung findet und auch von der RED III als treibhausgasfrei eingestuft wird, führen aktuelle Entwicklungen wie die Ukraine-Krise dazu, dass man sich wieder auf erneuerbare Brenn- und Treibstoffe konzentriert (Energieversorgungssicherheit)</p>	<p>Sorgfältige Standortplanung entsprechend der Verfügbarkeit von Rohstoffen und Erleichterung der langfristigen Zusammenarbeit mit Rohstofflieferanten.</p> <p>Entwicklung einer vollständig erneuerbaren Prozesskette zur Demonstration des Bioraffineriekonzepts, um sicherzustellen, dass das Konzept langfristig in die EU-Politik passt.</p> <p>Konzentration auf Märkte, die bereit sind, für die Vermarktung des Endprodukts eine Umweltprämie zu zahlen.</p>

5.4. Entwickelte KPIs zur kombinierten Betrachtung von Energie- und Ressourceneffizienz

Die Bewertung stellt in der dargestellten Methodik einen wesentlichen Schritt dar. Um diese durchführen zu können bedarf es aber der Entwicklung von speziellen KPIs, die im Rahmen der Arbeiten des IEA IETS Task 11 erstmalig entwickelt wurden. Die Definition von KPIs lehnte sich methodisch an die VDI 6310 Richtlinie und wurde durch andere Forschungsarbeiten, die speziell zur Bewertung der Energie- und Ressourceneffizienz veröffentlicht wurden, gestärkt.

5.4.1. Grundlagen für die Erstellung für KPIs

Einteilung des Systems in Cluster

Die Basis für die Bewertung ist eine gute Datengrundlagen und Prozessübersicht. Daher sollten die Schritte 1 und 2 aus der beschriebenen Methodik (vgl. Abbildung 5) durchgeführt werden. Basierend darauf erfolgt eine Einteilung des gesamten Systems in Cluster. Ein Cluster dient dazu, den Betrachtungsrahmen einzugrenzen, ohne dabei die Ergebnisse zu verändern. Sie bestehen aus einzelnen, individuellen Prozessen oder auch aus der Summe zusammenhängender Prozessschritte. Am Beispiel einer Kläranlage wird beispielsweise in Vorbehandlung, Hauptbehandlung und Nachbehandlung unterteilt.

Ermittlung relevanter Schlüsselparameter - Key Performance Indikatoren KPIs

Die Schlüsselparameter sind relevante Größen, die einen Prozess beschreiben. Zur Ermittlung der Schlüsselparameter ist es vorerst wichtig, Parameter zu identifizieren, die Bioraffinerien am aussagekräftigsten in Bezug auf Energie- und Ressourceneffizienz bewerten können. Für die Basis der Definition von Schlüsselparametern für die betrachteten Fallbeispiele, dienen die in der VDI 6310 definierten Parameter zur ökonomischen und ökologischen Bewertung von Bioraffinerien. (VDI 2016) Dabei wurde auf die monetäre Bewertung verzichtet und nur Fokus auf die energetische und stoffliche Bewertung gelegt. Beispiele für solche Parameter sind:

- Eingesetzte Stoffe und Energie (Menge und Art)
- Eingesetzte Wassermenge
- Erzeugte Produkte (stofflich, energetisch in Menge und Art)
- Produzierter Abfall (Menge und Art)
- Emissionen in die Luft oder ins Wasser (Treibhausgasemissionen, CO₂-Äquivalente)

Folgende Fragen können bei der Identifizierung von Schlüsselparameter hilfreich sein:

- Was ist der In- und Output der jeweiligen Cluster?
- Welche aus der Bioraffinerie entstehenden Produkte sind für die Betrachtung relevant?
- Wie hoch ist der Energieverbrauch der einzelnen Prozessschritte bzw. der gesamten Bioraffinerie?
- Wie hoch ist der Wasserverbrauch?
- Welche Treibhausgase entstehen bei den in den einzelnen Prozessschritten bzw. emittieren aus der gesamten Bioraffinerie?

5.4.2. Definition der KPIs

Um eine kombinierte Bewertung der Energie- und Ressourceneffizienz von Bioraffinerien zu bewirken, wurden im Zuge der Methodenentwicklung drei Kategorien ausgearbeitet. Diese wären spezifische, globale und Benchmark KPIs und diese auf Grundlage der ISO-Norm 22400 in einer hierarchischen Struktur zusammengefasst. (ISO 22400-2:2014).

Spezifische KPIs

Die spezifischen KPIs sind dafür vorgesehen, ein Verständnis für die betrachtete Bioraffinerie zu bekommen. Sie setzen die im Vorfeld definierten Schlüsselparameter in Beziehung zu einer bestimmten Menge. Je nach Detaillierungsgrad können sich diese Indikatoren auf einzelne Einheiten, Produkte oder Prozesse beziehen. An dieser Stelle ist es wichtig zu erwähnen, dass die spezifischen KPIs die kennzeichnenden Prozesse des jeweiligen Clusters beschreiben. Die Bilanzgrenze inkludiert nur einzelne Cluster.

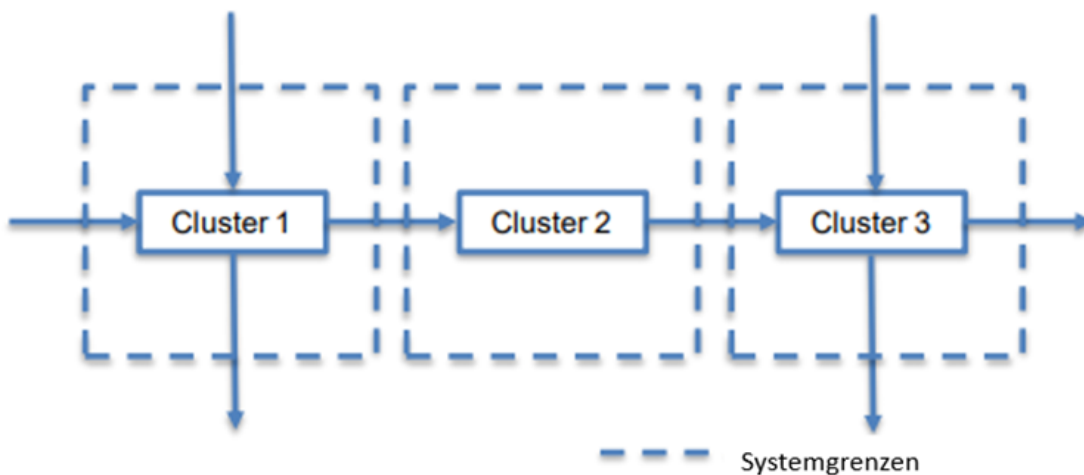


Abbildung 16: Darstellung der Systemgrenzen für Teilprozesse

Der Grund für die Isolation von einem solchen Cluster in separate Bilanzgrenzen ist die Identifikation von relevanten Prozessen im Hinblick auf Energie- und Ressourceneffizienz. An dieser Stelle ist zu betonen, dass für jede charakterisierte Bioraffinerie ein Set aus spezifischen KPIs definiert, werden sollten, mit der Begründung, damit genügend gemeinsame Schlüsselparameter zu identifizieren, die alle Typen von Bioraffinerien gemeinsam haben und ein Set von spezifischen KPIs für jeden betrachteten Bioraffinerietyp zu erstellen. Diese festgelegten Kennzahlen bilden somit die Basis zur Erkennung von globalen KPIs.

Beispiele für spezifischen KPIs sind:

- Energiebedarf für den CSB-Abbau durch die Hauptreinigung
- Biogasertrag durch die Schlammbehandlung
- Erzieltes Ausgangsverhältnis durch die Werkstoffrückgewinnung
- Technologischer Wirkungsgrad durch die Werkstoffrückgewinnung
- Chemikalieneinsatz für die Fraktionierung von Biomasse

Globale KPIs

In einem nächsten Schritt wird für die Definition von globalen KPIs die Bilanzgrenze auf mehrere Cluster erweitert. Diese KPIs werden dann zur Beschreibung der gesamten Bioraffinerie herangezogen.

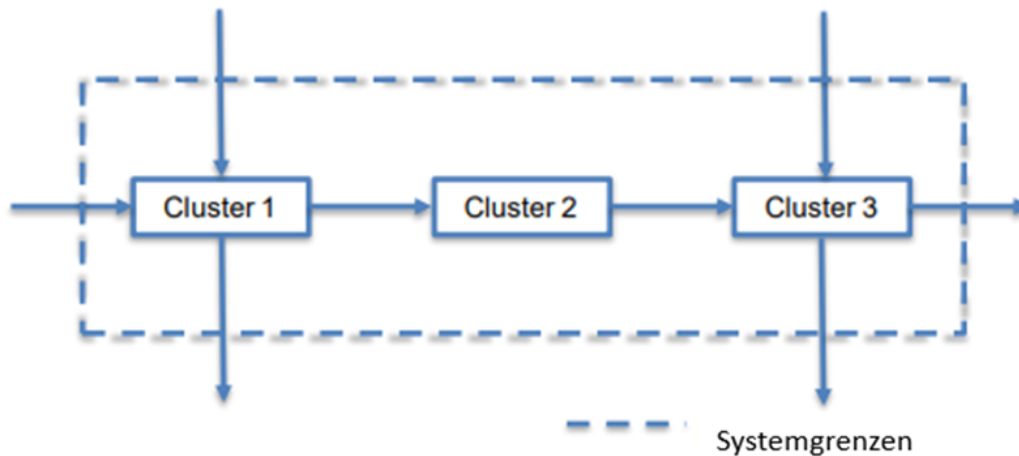


Abbildung 17: Darstellung der Bilanzgrenze bei globaler Betrachtung des Systems

Das Ziel der Definition dieser Indikatoren ist die ganzheitliche Darstellung des Einsatzes und Verbrauchs von Energie und Ressourcen innerhalb des gesamten betrachteten Systems. Beispiele für globale KPIs sind:

- Energieverbrauch: Energiebedarf [kWh] pro eingesetzte Biomasse [kg]
- Ressourcenrückgewinnung: Generierte Produktmenge [kg] pro Einsatzstoffe (Biomasse + Additive [kg])
- Chemikalieneinsatz: Menge an Additiven [kg] pro Produktmenge [kg]
- Wasserrückgewinnung: Rückgewonnene Wassermenge [m³] bezogen auf die Frischwassermenge [m³]
- Produkteffizienz: Generierte Produktmenge [kg] pro eingesetzte Biomasse [kg]
- Energieertrag: Erzeugte Biogasmenge [kWh] pro vorhandenem CSB [kg]
- Treibhausgasemissionen: erzeugte CO₂-Emissionen [g CO₂ Äqu.]
- Abfallgrad: Abfallmenge [kg] pro eingesetzte Biomasse [kg]

Benchmark KPIs

Diese Indikatoren sind eine Erweiterung der globalen KPIs und dienen dazu, verschiedenen Optimierungsszenarien einer bestimmten Bioraffinerie oder unterschiedliche Bioraffinerien miteinander zu vergleichen. Sie beschreiben die Verbesserungen oder Einsparungen des vorliegenden Systems zu einem vordefinierten Referenzsystem. Abbildung 18 zeigt wie beispielsweise zwei solcher Systeme aussehen, welche für einen Vergleich herangezogen werden.

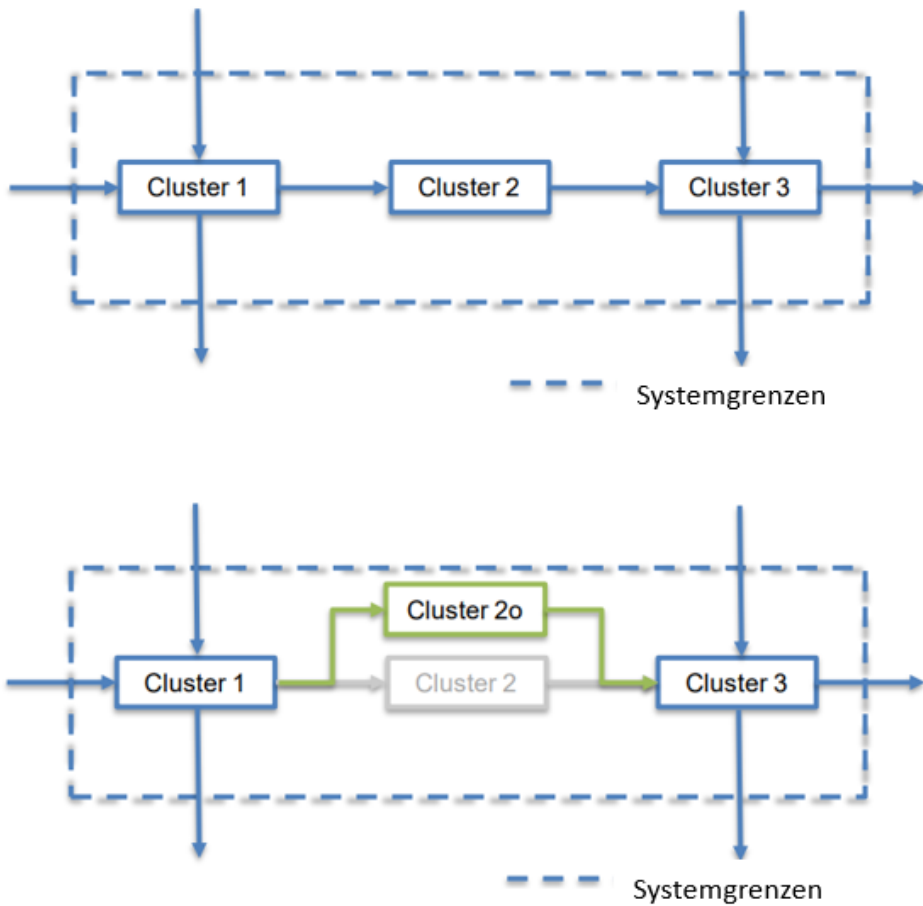


Abbildung 18: Vergleich zwischen einem Referenzszenario (oben) und einem Optimierungsszenario (unten)

Tabelle 9: Benchmark KPIs inklusive Darstellung der Formeln

Benchmark KPIs	Formel
Endenergieverbrauch	$1 - \frac{\left(\frac{kWh_{EE}}{kg_{Biomasse}}\right)_{OS}}{\left(\frac{kWh_{EE}}{kg_{Biomasse}}\right)_{RS}}$
Prozesseffizienz	$\frac{\left(100 - \frac{kg_{Produkt}}{kg_{Biomasse} + kg_{Additive}} * 100\right)_{OS} - 1}{\left(100 - \frac{kg_{Produkt}}{kg_{Biomasse} + kg_{Additive}} * 100\right)_{RS}}$
Chemikalieneinsatz	$\frac{\left(\frac{kg_{Additive}}{kg_{Produkt}}\right)_{OS} - 1}{\left(\frac{kg_{Additive}}{kg_{Produkt}}\right)_{RS}}$

Wasserrückgewinnung	$\frac{\left(\frac{m^3 \text{ Wasser}_{Recycled}}{m^3 \text{ Wasser}_{Frisch}}\right)_{OS} - 1}{\left(\frac{m^3 \text{ Wasser}_{Recycled}}{m^3 \text{ Wasser}_{Frisch}}\right)_{RS}}$
Energieertrag	$\frac{\left(\frac{kWh_{Energie\ erzeugt}}{kg\ Biomasse}\right)_{OS} - 1}{\left(\frac{kWh_{Energie\ erzeugt}}{kg\ Biomasse}\right)_{RS}}$
Systemverbesserung	$\frac{\left(\frac{kg_{Produkt}}{kg_{Biomasse}} * 100\right)_{OS} - 1}{\left(\frac{kg_{Produkt}}{kg_{Biomasse}} * 100\right)_{RS}}$
Abfallgrad	$1 - \frac{\left(\frac{kg_{Abfall}}{kg_{Biomasse}} * 100\right)_{OS}}{\left(\frac{kg_{Abfall}}{kg_{Biomasse}} * 100\right)_{RS}}$
Treibhausgaseinsparung	$1 - \frac{\left(\frac{gCO_2\ddot{A}q}{kWh} * \frac{kW}{10^6} * h\right)_{OS}}{\left(\frac{gCO_2\ddot{A}q}{kWh} * \frac{kW}{10^6} * h\right)_{RS}}$

5.5. Anwendung der Methodik am Beispiel der Kläranlage als Bioraffinerie (Fallstudie 1)

Im Rahmen der österreichischen Aktivitäten des IEA IETS Task 11 wurden wie bereits beschrieben 4 Fallstudien anhand der erarbeiteten Methodik erarbeitet und mit den definierten KPIs bewertet. Dabei wurden folgende Szenarien für jede Fallstudie betrachtet:

- Referenzszenario:

In dieser Arbeit wird als Referenzsystem kein fossiler Vergleichsprozess herangezogen, sondern stattdessen Bioraffinerien untereinander verglichen. Somit dient hier als Referenzszenario der Ist-Zustand des vordefinierten Fallbeispiels.

- Optimierungsszenario:

Jener Zustand einer Bioraffinerie, die nach Implementierung einer Verbesserung vorliegt. Um die entstehenden Veränderungen aufzuzeigen, werden die Ergebnisse des Optimierungsszenarios mit denen des Referenzszenarios verglichen.

Folgend wird beispielhaft für alle Fallstudien, die Fallstudie „Kläranlage als Bioraffinerie“ näher beschrieben. Nähere Informationen wurden im Rahmen der Masterarbeit „Bewertung der Energie- und Ressourceneffizienz von Bioraffinerien anhand von realen Fallbeispielen“ (Emre Aydudu, 02/2022) zusammengefasst.

5.5.1. Referenzszenario (RS 1)

Die vorgegebene Fallstudie widmet sich der Optimierung einer Abwasserreinigungsanlage (ARA) und besteht aus drei Clustern (Vorreinigung, Hauptreinigung und Schlammbehandlung) mit dazugehörigen Technologien, wie in Abbildung 19 dargestellt.

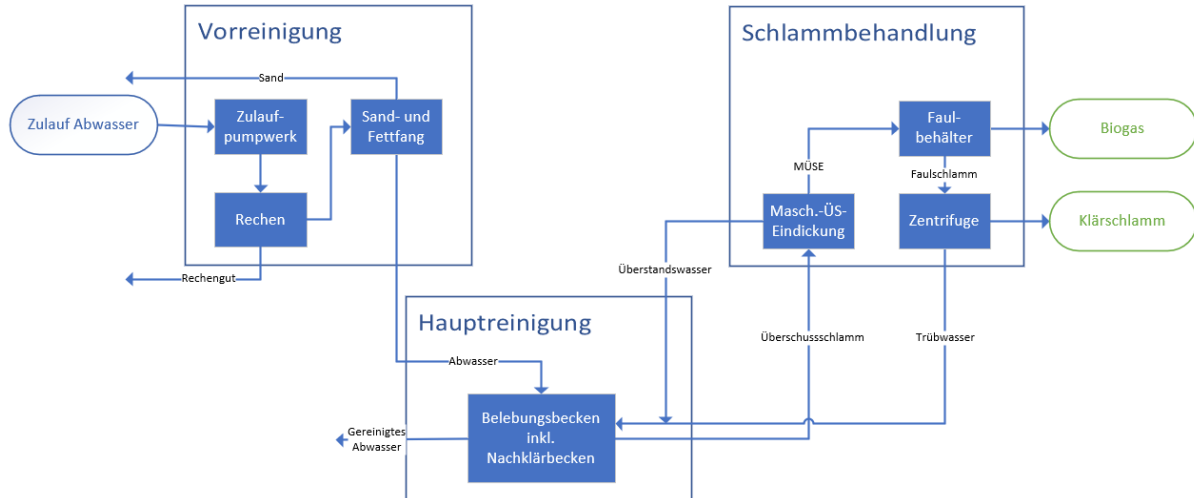


Abbildung 19 Referenzszenario der Fallstudie (CS1) "Kläranlage als Bioaffinerie"

Die im Fließbild dargestellte ARA ist eine Anlage zur biologischen Abwasserreinigung nach dem Belebtschlammverfahren. Die Vorreinigung besteht aus den Anlagenteilen: Zulaufpumpe, Rechen, Sand- und Fettfang. Nach der ersten Vorreinigung und Entfernung von Grobstoffen kommt das Abwasser in das Belebungsbecken. Hier werden unerwünschte Schmutzstoffe mithilfe von Bakterien und unter Belüftung biologisch abgebaut. Im nächsten Schritt wird der Überschussschlamm maschinell eingedickt und in einem Faulbehälter anaerob stabilisiert und mithilfe einer Zentrifuge entwässert.

Datengrundlage

Im Rahmen des vorliegenden Fallbeispiels wurden verschiedene Szenarien für die Abwasserreinigungsanlage (ARA) berechnet. Diese errechneten Parameter dienen im Anschluss als Basis für die Entwicklung der Energie- und Massenbilanzen und für die Bewertung der Energie- und Ressourceneffizienz von Bioaffinerien.

Energiebilanz und Massenbilanzen zum Referenzszenario

Für das Referenzszenario wurden Energiebilanzen sowie Massenbilanzen (Stickstoff N, CSB) berechnet. Beispielhaft werden folgend die Energiebilanz (Abbildung 20) sowie repräsentativ für die Massenbilanzen, die Stickstoffbilanz (Abbildung 21) dargestellt.

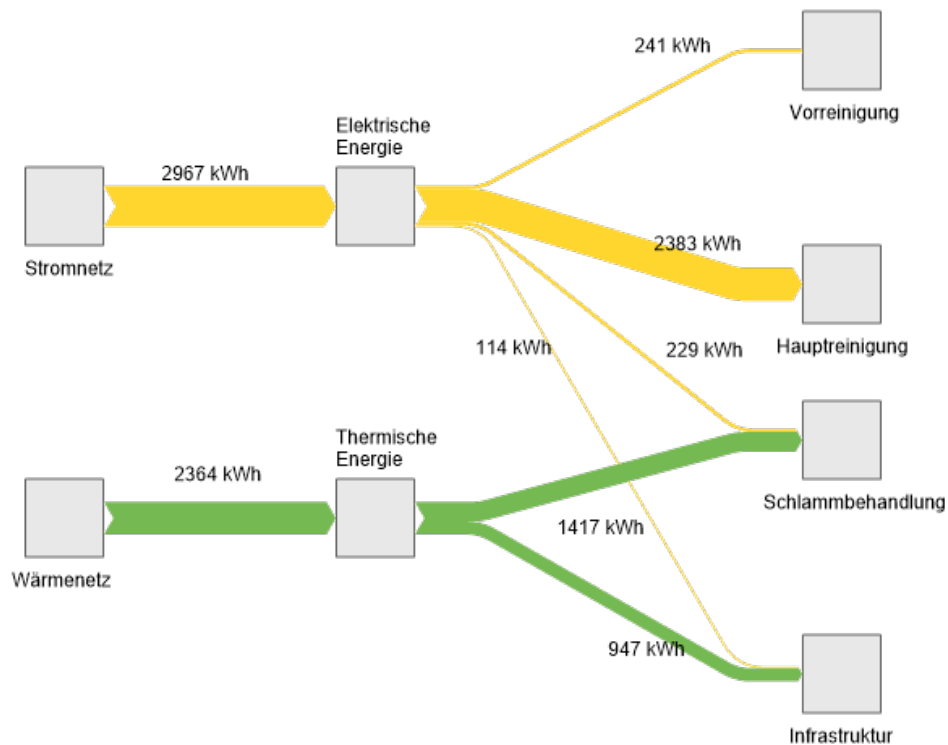


Abbildung 20 Energiebilanz zum Referenzszenario (CS1)

Aus der dargestellten Energiebilanz ist ersichtlich, dass sich die eingesetzte Energie in elektrische und thermische Energie aufteilt. Dabei handelt es sich um Tageswerte [kWh pro Tag]. Es ist auch erkennbar, dass der größte Verbraucher von elektrischer Energie der Cluster Hauptreinigung ist, wobei hier die Belüftung ausschlaggebend für den hohen elektrischen Energiebedarf ist. Der größte thermische Verbraucher in einer konventionellen Abwasserreinigungsanlage ist die Schlammbehandlung. Hier ist der hohe Verbrauch auf die zur Faulung benötigte thermische Energie zurückzuführen.

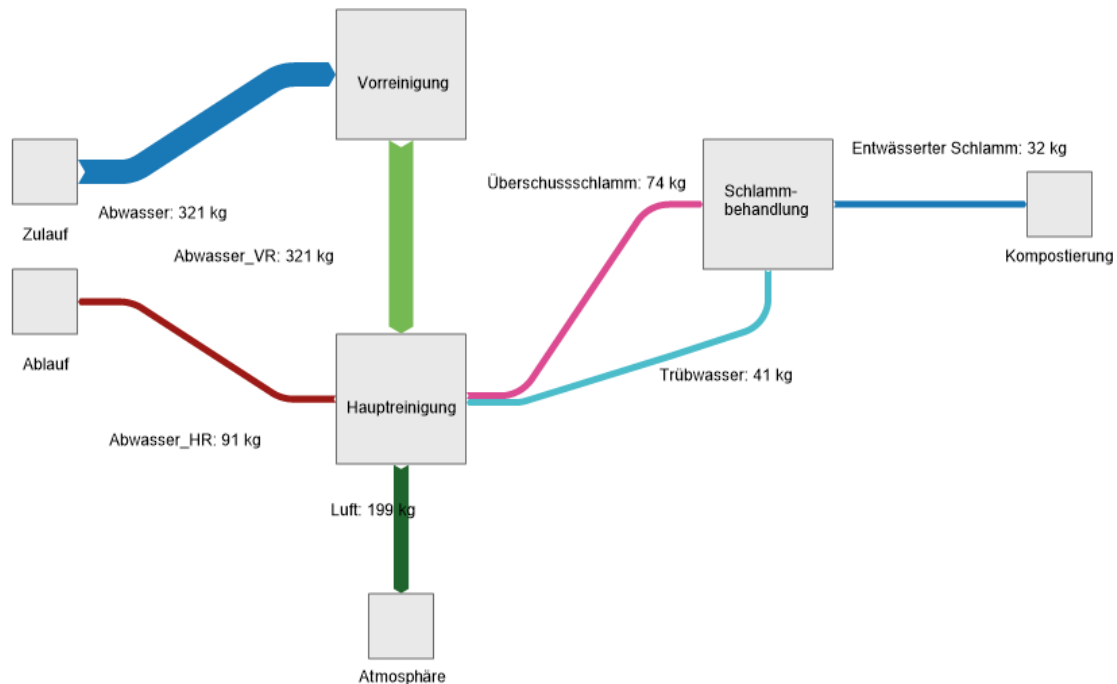


Abbildung 21 N-Bilanz zum Referenzszenario (CS1)

Die abgebildete Massenbilanz gibt einen Überblick über die Stickstoffströme auf der gesamten ARA. Es handeln sich dabei um Tageswerte und wird angegeben in kg N/d. Die Dicke der Pfeile ist proportional zum gesamten Stickstoff und die Farben charakterisieren die verschiedenen Bezeichnungen der Ströme. Es ist zu erkennen, dass der größte Transfer von Stickstoff in der Hauptreinigung stattfindet. Der Grund für diesen Effekt sind die Verfahrensschritte Nitrifikation und Denitrifikation, die auch maßgebend für die Dimensionierung eines Belebungsbeckens sind. [49] (DWA 2016) Weiters ist auch eine erhöhte Stickstoffbelastung im Trübwasser erkennbar. Diese Rückbelastung aus der Schlammbehandlung tritt aufgrund der Schlammstabilisierung auf, in der 50 % der organischen Bestandteile abgebaut und der darin gebundene N zu Ammonium (NH_4^+) umgewandelt und in der flüssigen Phase gelöst vorliegt. Aus der Literatur ist bekannt, dass der im Prozesswasser gelöste Ammonium 80 – 95% des Stickstoffs im Trübwasser ausmacht. Diese Eigenschaft des Prozesswassers kann im Folgeschritt, aufgrund der Rückführung in die Belebung, die Nitrifikation und Denitrifikation überlasten und somit das Gewässer negativ beeinflussen [50]. Somit kann die N-Entfernung aus dem Trübwasser als eine Optimierungsmaßnahme gesehen werden.

5.5.2. Beschreibung der Optimierungsszenarien (OS 1)

Für die Fallstudie „Kläranlage als Bioraffinerie“ wurden 3 Optimierungsszenarien ausgewählt:

- Integration eines Vorklärbeckens (OS1.1)
- Integration Nährstoffrückgewinnung mittels Membrandestillation (OS1.2)
- Integration eines Zelluloserückgewinnungssystems (OS1.3)

Für alle Optimierungsszenarien wurden Energiebilanzen sowie Massenbilanzen (Stickstoff N, CSB) berechnet, um die Auswirkungen der einzelnen Maßnahmen im Vergleich zum Referenzszenario zu evaluieren.

Die einzelnen Optimierungen werden folgend erläutert.

Integration eines Vorklärbeckens (OS 1.1)

Bei einstufigen Belebungsanlagen ist die Funktion des Vorklärbeckens noch vor der biologischen Reinigung partikuläre Stoffe abzuscheiden. Durch die Integration einer Vorklärung steigt somit die Produktion von Primärschlamm und durch den hohen organischen Anteil des entstehenden Schlammes auch proportional die Biogasproduktion. Ein weiterer Vorteil, den die Einbindung eines Vorklärbeckens begleitet, ist, dass die entfernten Stoffe, in der nachgestellten Belebungsstufe nicht mehr aerob abgebaut werden müssen, womit auch der Energieverbrauch die zur Belüftung notwendig ist, gesenkt wird. [49]

Der in die Schlammbehandlung geführte Primärschlamm benötigt eine zusätzliche statische Schlammeindickung. Diese zusätzlichen Anlagenteile sind im nachfolgenden Fließbild (Abbildung 22) ersichtlich und entsprechend mit einem roten Rechteck versehen. Die Voreindickung dient zum einen für die Entlastung der maschinellen Eindickung und zum anderen dienen beide sowohl die maschinelle als auch die statische Voreindickung zur Volumenreduktion der eingehenden Schlämme. Die abgetrennte und somit überstehende Flüssigkeit wird im Anschluss in die Abwasserlinie zurückgeleitet.

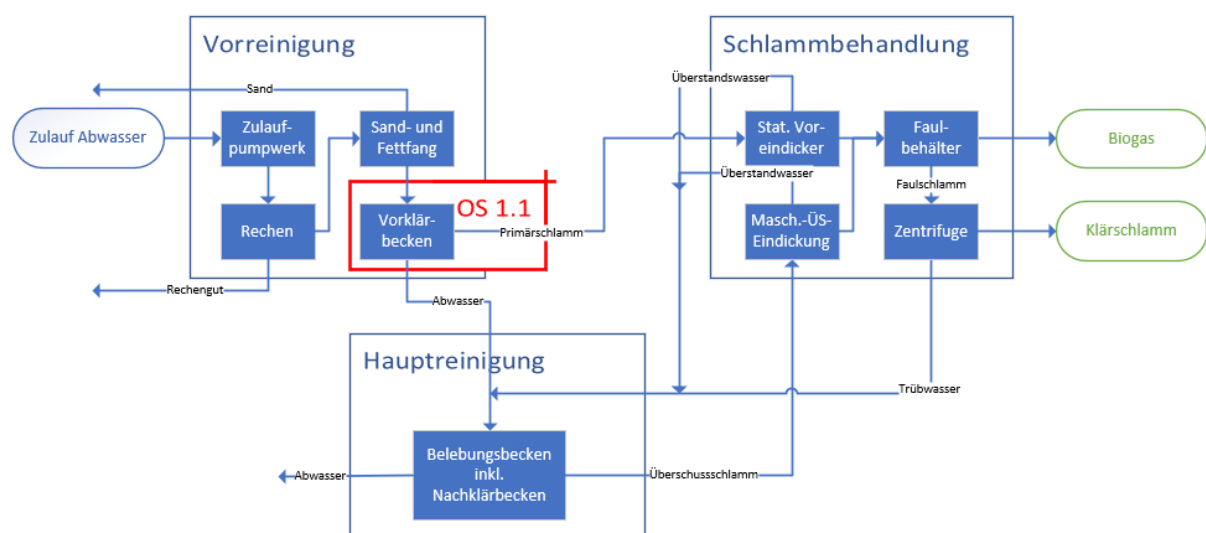


Abbildung 22 Erstes Optimierungsszenario (OS 1.1) mit integrierter Vorklärung

Es ist bekannt, dass in einem klassischen Vorklärbecken typischerweise 30 – 35 % der CSB-Fracht aus dem anfallenden Abwasser abgetrennt wird. Der dadurch entstehende Primärschlamm wird über einen Voreindicker geleitet und wird von dort in den Faulturm gefördert. Somit kann die Integration eines Vorklärbeckens eine höhere Schlammproduktion und somit eine höhere Biogasproduktion bewirken.

Integration einer Membrandestillation (OS 1.2)

Die hohe Ammoniakkonzentration im Trübwasser bietet für die Rückgewinnung von Stickstoff eine geeignete Quelle. Daher wird im zweiten Optimierungsszenario, aufbauend auf der ersten Optimierung, zusätzlich eine Nährstoffrückgewinnung, insbesondere die Rückgewinnung von Stickstoff aus dem Zentratwasser, mittels der Technologie Membrandestillation berücksichtigt.

Dazu wurde das Modell um den Cluster Materialrückgewinnung und mit einer neuen Technologie Membrandestillation erweitert. Somit wird die Rückbelastung im Zulauf der Kläranlage durch das Zentratwasser verringert. Das Zentratwasser wird in den Cluster Wertstoffrückgewinnung geleitet, wo mithilfe der MD und Zugabe von Additiven, Natriumhydroxid (NaOH) und Schwefelsäure (H₂SO₄), Ammoniumsulfat als Produkt gewonnen wird. Aufgrund der neuen Zusammensetzung des Zentratwasser und der dadurch resultierenden reduzierten N-Belastung im Belebungsbecken. Dies ermöglicht es noch mehr CSB abzubauen, um die Faulgasproduktion weiter zu erhöhen.

Die durchgeführten Änderungen resultieren in der anschließenden Abbildung 23 und entsprechend mit einem roten Rechteck versehen. Die Datengrundlage für die Berechnung dieser Optimierung basiert auf Ergebnissen des Demonstrationsprojektes ThermoFLEX.

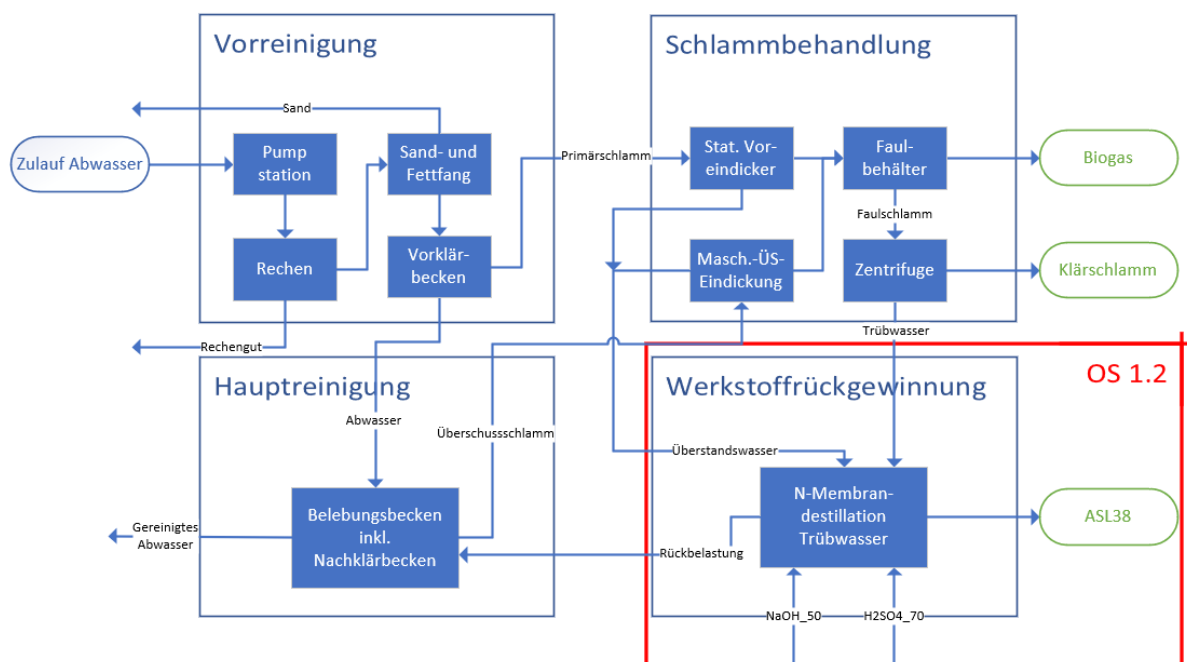


Abbildung 23 Zweites Optimierungsszenario (OS 1.2) mit erweiterter Nährstoffrückgewinnung

Integration eines Zelluloserückgewinnungssystems (OS 1.3)

Die dritte Optimierung befasst sich mit den Auswirkungen bei der Substitution des Vorklärbeckens durch ein Zelluloserückgewinnungssystem (ZRS). Zellulose ist eine wertvolle Ressource, stellt aber bei näherer Betrachtung eine zusätzliche Belastung für die Kläranlage dar. Durch die Integration einer ZRS kann somit die Zulaufbelastung der ARA erheblich gesenkt werden. Eine ZRS zeigt nicht nur Vorteile in der Entfernung von Faserstoffen, sondern kann auch durch den Einsatz eines solchen Systems, folgende theoretische, positive Aspekte analysiert werden.

- ein geringeres Aufkommen an Primär- und Sekundärschlämmen

- aufgrund der geringeren Belastung der Schlammlinie, weniger Belüftungsenergie in der Belebung benötigt
- erhebliche Reduktion der Klärschlammmenge
- weniger Treibhausgasemissionen

Für das Optimierungsszenario wird das patentierte Verfahren Cellvation [51] zur genauer untersucht. Dies ist eine Technologie zur Werkstoffrückgewinnung, die speziell für die Rückgewinnung von Zellstofffasern aus Abwässern konzipiert wurde und auf bestehende Anlagen nachgerüstet werden kann. Neben der Eigenschaft, Zellstoffe aus dem Abwasser zu entfernen, erfolgt durch diese Technologie auch die Aufwertung durch Reinigung, Entwässerung und bei Bedarf auch die anschließende Hygienisierung und Trocknung in weiteren Behandlungsprozessen. Die nachfolgende Hygienisierung und Trocknung werden im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet. Die Endprodukte, die aus der Wertschöpfungskette resultieren, sind Wertstoffe, die in weiterer Folge, in Form von Pellets oder Granulat als Additive, in der Zellstoffindustrie Anwendung finden. [51]

In Abbildung 24 ist das Fließbild zum Szenario ersichtlich.

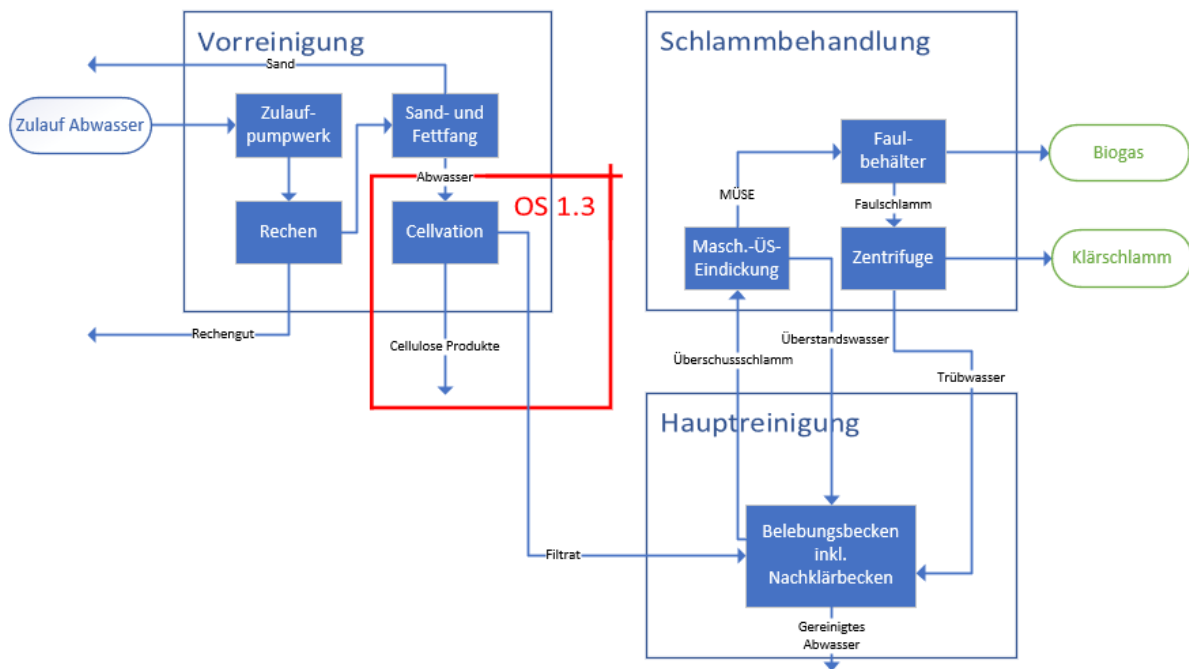


Abbildung 24: Drittes Optimierungsszenario (OS 1.3) mit Zellstoffrückgewinnung

5.5.3. Energie- und Massenbilanzen zu Bewertung der Optimierungsszenarien

Beispielhaft wird die Vorgehensweise zur Energie- und Massenbilanzierung und zugehöriger grafischer Darstellung am Beispiel des Optimierungsszenarios 2 für die Kläranlage als Bioaffinerie dargestellt.

Integration Vorklärbecken und Membrandestillation (OS 1.2)

Energiebilanz

Die Wirkung, die die Integration eines Vorklärbeckens und die Integration einer Wertstoffrückgewinnung mittels Membrandestillation auf die Energieflüsse der gesamten ARA haben, werden in der folgenden geänderten Energiebilanz (Abbildung 25) dargestellt.

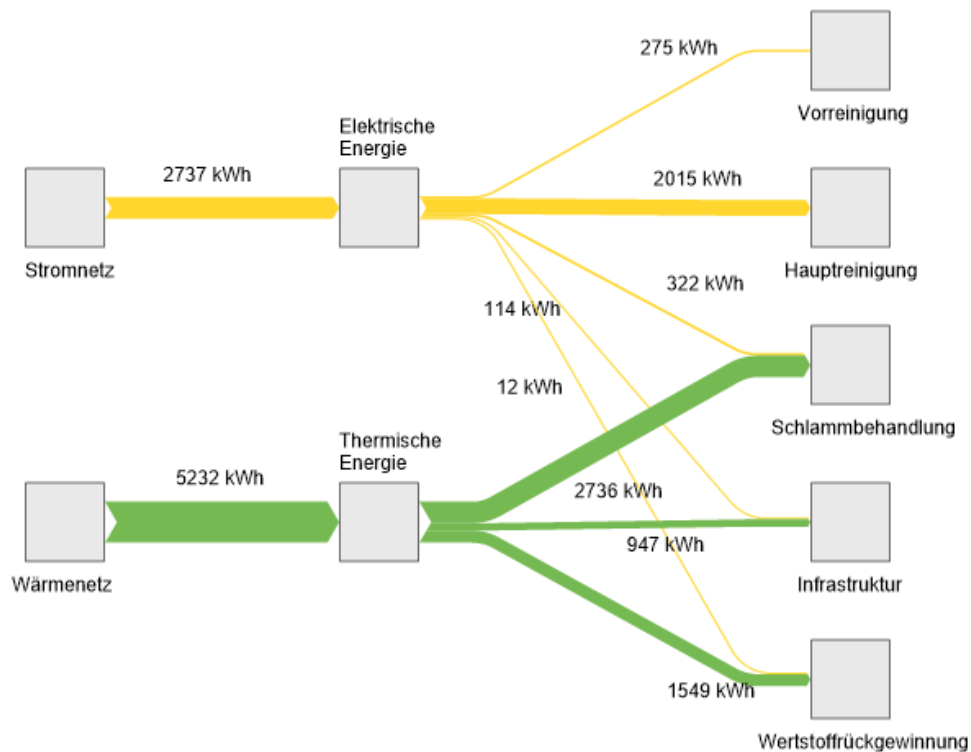


Abbildung 25 Geänderte Energiebilanz in Bezug auf die Optimierung OS 1.2

Grundsätzlich lässt sich durch die Vorklärung und auch die Integration der Membrandestillation der elektrische Energiebedarf der ARA deutlich reduzieren. Dies ist durch den verringerten Bedarf an elektrischer Energie in der Belüftung, durch die deutlich reduzierte Stickstoffbelastung in der Belüftung zurückzuführen, da bereits in der Vorklärung entfernte Stoffe nicht mehr aerob abgebaut werden müssen.

Durch die Maßnahmen ist aber ein Anstieg im thermischen Energiebedarf zu verzeichnen. Dies ist zum einen auf die erhöhte Schlammproduktion und den höheren thermischen Energiebedarf in der Faulgasproduktion zurückzuführen. Zugleich trägt die Integration des thermischen Trennverfahrens (Membrandestillation) zur Wertstoffrückgewinnung zu einer Erhöhung des thermischen Energiebedarfs bei.

N-Bilanz

Die Vorteile der Membrandestillation können auch in einer N-Bilanz dargestellt werden, die in folgender Abbildung 26 präsentiert werden. Zudem bewirkt die MD das Hinzukommen eines neuen Clusters Wertstoffrückgewinnung mit einer entsprechenden Produktlinie. Im Hinblick auf das Referenzszenario (Abbildung 21) ist eine deutliche Veränderung sichtbar. Die Auswirkungen der Integration eines Vorklärbeckens auf die Nitrifikations- und Denitrifikationsvorgänge in der

nachgeschalteten Belebungsstufe werden in der N-Bilanz dargestellt. Zudem wird die N-Beladung im Trübwasser der Membrandestillation zugeführt, was zu einer Reduktion der Rückbelastung auf 4 kg N/Tag in der Hauptreinigung und andererseits zur Abtrennung von 37 kg N/Tag über die MD führt. Zusätzlich kann Ammoniumsulfat als Produkt generiert werden.

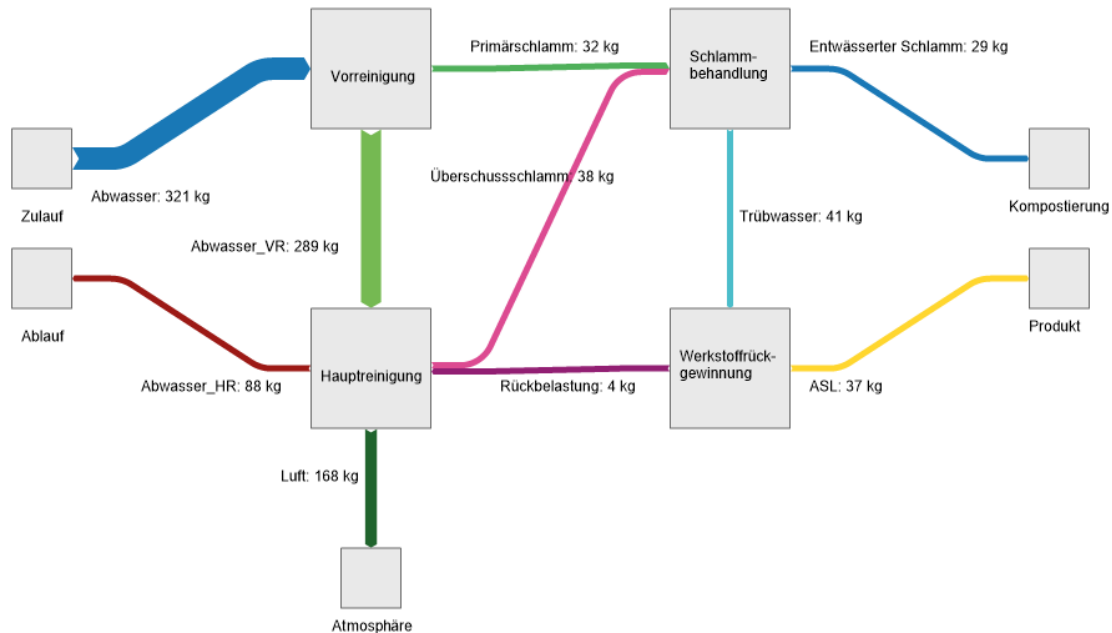


Abbildung 26 Geänderte N-Bilanz in Bezug auf die Optimierung OS 1.2

5.5.1. Ergebnisse aus der Bewertung der Optimierungsszenarien mittels KPIs

Für die Fallstudie wurden sowohl die Referenz- als auch die Optimierungsszenarien berechnet und deren Auswirkungen der einzelnen Optimierungen bezogen auf die Referenz ermittelt. Um einen Überblick über die Ergebnisse der Anwendung der definierten KPIs zu gewähren, werden die ermittelten Veränderungen von Energie- und Ressourceneffizienz in der Tabelle 10 zusammengefasst.

Tabelle 10 Übersicht über die Veränderungen aller Szenarien des CS1 - Kläranlage als Bioraffinerie

KPI	RS 1 [%]	OS 1.1 [%]	OS 1.2 [%]	OS 1.3 [%]
Endenergieverbrauch	1,00	1,21	1,50	0,84
Abfallgrad	1,00	1,26	1,26	0,64
Ressourcenrückgewinnung	1,00	1,02	1,02	1,01
Energieertrag	1,00	1,39	1,41	0,68
Wasserrückgewinnung	1,00	0,99	0,99	1,00
Produkteffizienz	1,00	1,39	1,45	1,73
Treibhausgasemissionen	1,00	1,02	1,14	0,91

Der Energieverbrauch der ARA ist durch die Integration einer Vorklä rung (OS 1.1) um 21% gestiegen, was einer Erhöhung des spezifischen Energieverbrauchs von 0,31 kWh_{EE}/kg eingesetzter Biomasse entspricht. Es ist auch zu erkennen, dass der Abfallgrad der Bioraffinerie gestiegen ist, was dem Anstieg des Trockensubstanz-Gehalts im Klärschlamm entspricht. Eine minimale Erhöhung der Technologieverbesserung ist festzustellen. Diese Verbesserung ist auf die optimierte Ressourcenverwertung zurückzuführen. Außerdem ist aufgrund der Erhöhung der Schlammproduktion auch ein Anstieg des Energieertrags festzustellen. Erwähnenswert ist an dieser Stelle die Zunahme der Produkteffizienz um 39 %. Dieser Anstieg repräsentiert eine effizientere Nutzung der Ressourcen und Transfer der stofflichen Komponenten in das Produkt.

Das zweite Optimierungsszenario (OS 1.2) zeigt durch die Integration einer Membrandestillation eine um fast 50 % höheren Energieverbrauch im Unterschied zum Referenzszenario auf, da das Integrationskonzept zum Zeitpunkt der Erstellung der Studie bei 38°C Betriebstemperatur der Membrandestillation erstellt wurde. Hier zeigt sich der signifikante Beitrag zur Weiterentwicklung von Technologien, den KPIs leisten können. Mittlerweile wurde die Forschung erweitert, um die Zentratwasser Temperatur bei MD-Betrieb auf 25°C zu senken, welche im kontinuierlichen Betrieb ohne Erwärmung aus dem Faulturm (bzw. nach der Zentrifuge) möglich sein könnte. Positive Aspekte beinhalten den Anstieg der Ressourceneffizienz durch den erhöhten Biogasertrag und zusätzlichem Produktaufkommen. Der Grund, wieso der Anstieg des Chemikalieneinsatzes so hoch ist, kann durch den fehlenden Einsatz von Chemikalien in den anderen Szenarien begründet werden.

Im gleichen Zuge zeigt dieses Szenario aber Verbesserungen in der Ressourcenrückgewinnung, sowie deutliche Verbesserungen in Energieertrag und Produkteffizienz.

Die höchste Steigerung der der Produkteffizienz ist im letzten der drei Optimierungsszenarien (OS 1.3) zu erkennen. Hier ist aufgrund der effektiven Produktion von Zelluloseprodukten bereits im Vorfeld der Abwasserreinigung eine Verbesserung der Produkteffizienz von 73 % sowie Reduktion des Abfallgrads festzustellen. Da bereits im Zulauf der ARA das Abwasser durch die Zelluloseentfernung mit weniger organischen Stoffen beladen ist, reduziert sich jedoch auch der potentielle Energieertrag. Positiv wirkt sich die Technologie auf den Energieverbrauch am Standort aus, was auf die Entlastung der Abwasserreinigung aufgrund der geringeren Zulaufkonzentrationen zurückzuführen ist. Es ist allerdings wichtig hervorzuheben, dass die Trocknung der entfernten Zellulose nicht in Bilanzrahmen betrachtet wurde, da diese nicht am Standort der Kläranlage durchgeführt werden würde. Damit zeigt sich wie essenziell eine klare Definition an Bilanzgrenzen ist, um Optimierungsszenarien zu vergleichen. Diese Bilanzgrenzen sind in neuen Bioraffineriekonzepten nicht immer örtlich zu ziehen, sondern je nach Status des Produktes/Zwischenproduktes.

Abschließend werden die Ergebnisse der Systemanalysen aus der Tabelle 10. visuell und zur einfachen Interpretation in einem Netzdiagramm (vgl. Abbildung 27) dargestellt, - mit dem Ziel, den Entscheidungsträgern die Möglichkeit zu schaffen, strategische, taktische und operative Entscheidungen schnellstmöglich treffen zu können.

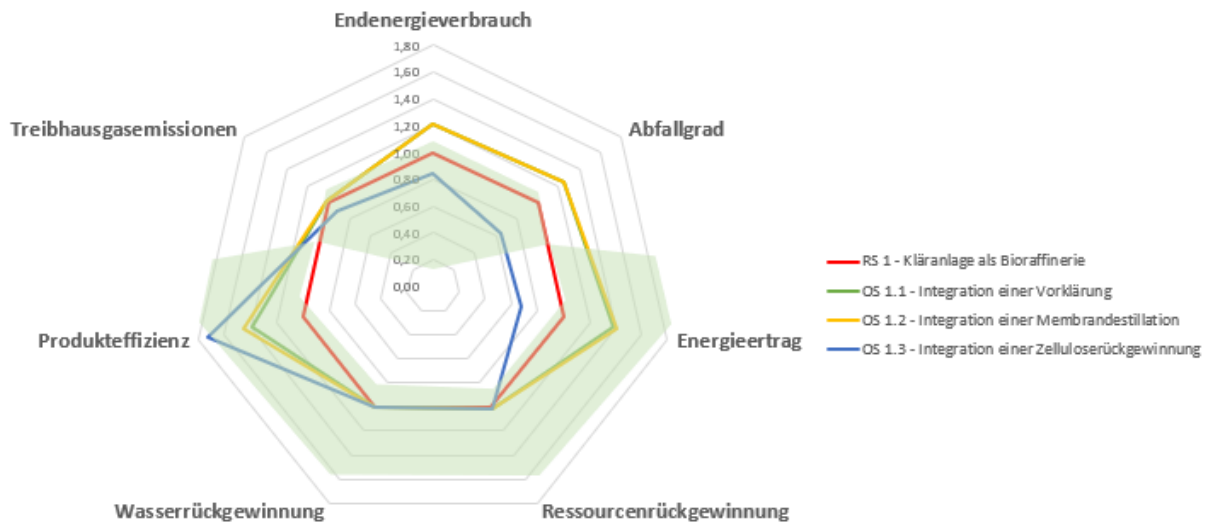


Abbildung 27: Ergebnisse aus der Berechnung der Benchmark-KPIs für die Fallstudie „Kläranlage als Bioraffinerie“ (rot – Referenzszenario, grün – Integration einer Vorklärung (OS1.1.); gelb – Integration Membrandestillation (OS1.2.); blau – Integration Zelluloserückgewinnung (OS1.3.)

5.6. Digitalisierungsmethoden

Industrielle Prozesse werden immer noch hauptsächlich durch fossile Brennstoffe (z.B. Erdgas) versorgt und stehen vor der Herausforderung, dass sie einen großen Teil ihres Wärmebedarfs mit erneuerbaren Energien decken könnten. Bisher gab es kaum Tools, um die Systeme so zu designen und zu regeln, dass sie unter den jeweiligen Bedingungen die maximale Emissions- und Kostenersparnis bewirken. Gleiches gilt für Bioraffinerien, wobei deren Ausgangslage oftmals eine andere ist. Bioraffinerien, die im Sinne einer kaskadischen Nutzung das eingesetzte Rohmaterial in hochwertige Produkte (chemische Bausteine, biobasierte Chemikalien und Materialien) umsetzen und sich dabei weniger auf die Energieerzeugung konzentrieren, stehen vor allem sie vor der Herausforderung geschlossene Kreisläufe in Bezug auf Ressourcen (Prozesswasser, Chemikalien) mit dem Energiebedarf in Einklang zu bringen. In der klassischen Holz-basierten Bioraffinerie beispielsweise, spielte die Verfügbarkeit an Energie (thermisch und elektrisch) bisher keine wesentliche Rolle. Reststoffe aus einzelnen Prozessschritten werden über Verbrennung/Kraft-Wärme-Kopplung (z.B. Dicklaug aus Papier- und Zellstoffindustrie [4]) zu nutzbarer Energie umgewandelt, die für diverse Prozessschritte zur Verfügung steht.

Neue Bioraffineriekonzepte und -strategien streben danach, Stoffströme in hochwertige, vermarktete Produkte umzuwandeln bzw. zusätzliche Nutzungspfade (z.B. zusätzliche Produkte aus Hemizellulose und/oder Lignin) zu etablieren. Durch die immer stärker in den Vordergrund rückende stoffliche Nutzung von Biomasse wird die Energieeffizienz von Prozessen bedeutend wichtiger, da das Potential der energetischen Nutzung reduziert wird.

Betrachtet man Entwicklungen in der Industrie der letzten Jahre, so wurden beispielsweise Methoden untersucht, die sich sowohl mit dem Demand als auch mit dem Supply Side Management beschäftigen. Die beiden Methoden haben die Grundvoraussetzung sich im ersten Schritt dem Status Quo eines Prozessablaufes zu beschäftigen (Daten Akquise – Evaluierung Status quo). Basierend

darauf lassen sich dann Effizienzmaßnahmen definieren, die sowohl Bedarfs- als auch die Versorgungsseite beeinflussen. Dies spiegelt sich im Wesentlichen, mit der im IEA IETS Task 11 entwickelten und angewandten Methodik, wider. Basierend darauf konnten auf nationaler Ebene bereits ein paar Stoßrichtungen gesammelt werden, die für das Thema „Digitalisierung für Bioraffinerien“ in internationale Arbeiten einfließen können. Die Digitalisierung bietet in der industriellen Bioraffinerie eine Vielzahl von Methoden und Technologien, die die Effizienz und Nachhaltigkeit der Produktion verbessern können. Hier sind einige Beispiele:

- **Sensortechnologie:** Die Verwendung von Sensoren kann dazu beitragen, den Produktionsprozess in Echtzeit zu überwachen und zu optimieren. Beispielsweise können Sensoren in Fermentern verwendet werden, um den pH-Wert, die Temperatur und den Nährstoffgehalt zu messen und automatisch Anpassungen vorzunehmen.
- **Künstliche Intelligenz (KI):** Durch die Verwendung von KI-Systemen können Produktionsprozesse optimiert und automatisiert werden. Beispielsweise können KI-Systeme zur Prozesssteuerung eingesetzt werden, um optimale Betriebsbedingungen für Fermenter zu ermitteln.
- **Big Data-Analyse:** Durch die Verwendung von Big Data-Technologien können große Mengen an Produktionsdaten analysiert werden, um Trends zu identifizieren und Probleme zu lösen. Beispielsweise können Produktionsdaten verwendet werden, um vorherzusagen, wann Wartungsarbeiten erforderlich sind.
- **Simulation und Modellierung:** Die Verwendung von Simulation und Modellierung kann dazu beitragen, die Effizienz und Nachhaltigkeit der Produktion zu optimieren. Beispielsweise können Modelle verwendet werden, um den Energieverbrauch von Produktionsprozessen zu reduzieren.
- **Vernetzung und Automatisierung:** Durch die Vernetzung von Maschinen und Systemen kann die Produktion automatisiert werden. Beispielsweise können verschiedene Systeme wie Fermenter, Destillationskolonnen und Trockner miteinander vernetzt werden, um einen vollständig automatisierten Produktionsprozess zu schaffen.

Insgesamt bietet die Digitalisierung in der industriellen Bioraffinerie eine Vielzahl von Möglichkeiten, um die Effizienz und Nachhaltigkeit der Produktion zu verbessern und gleichzeitig die Kosten zu senken.

Zu Beginn der Neudefinition des IEA IETS Task 11 war es geplant einen eigenen Subtask zum Thema "Digitalisierungsmethoden für industrielle Bioraffinerien" zu entwickeln. Die letzte Berichtsperiode konzentrierte sich (aufgrund Einschränkungen von zeitlichen Ressourcen im internationalen Task Management) auf den Start von Subtasks 5 und 6. Aufgrund dessen gab es in den letzten 2 Jahren keinen inhaltlichen Fortschritt zum Thema der Digitalisierung in Bioraffinerien innerhalb des Task 11 auf internationaler Ebene. Weitere Arbeiten für 2023 sind jedoch geplant.

6 Vernetzung und Ergebnistransfer

6.1. Zielgruppen des IEA IETS Task 11

Die Zielgruppen des Projektes IEA IETS Task 11 waren Industrie, Wissenschaft und Entscheidungsträger:innen. Die Industrie war sowohl in Bezug auf Technologieanbieter (z.B.: Membranproduktion, Modulproduktion) als auch Bioraffineriebetreiber, hier Kläranlagen, Lignocellulose Bioraffinerie, Biogasanlagenbetreiber in der Konzeptentwicklung, Integration und Optimierung eingebunden. Neben der Integration des Stand-der-Technik wurde direkter Kontakt mit Stakeholdern aufgenommen, sowie zahlreiche Meetings durchgeführt. Bei verschiedensten Veranstaltungen wurden die aktuellen politischen Ansichten erfasst und direkte Gespräche mit Entscheidungsträger:innen geführt.

Die Vernetzung ist durch das wissenschaftliche Konsortium auf nationaler und internationaler Ebene gegeben. Eine weitreichende nationale Vernetzungstätigkeit erfolgte mit der Veranstaltung „Neue Produkte und Wege für eine kreislauf-orientierte Bioökonomie“. Die Veranstaltung fand am 20. September 2022 bei der TU Graz statt. In einem abwechslungsreichen Programm haben sich StartUps wie Econutri (CO₂ zu Proteinen), Lignovations (Lignin zu UV-Schutz), Agrobiogel (Lignin zu Wasserspeichern), Ecolyte (Lignin zu Stromspeichern) gemeinsam mit Projekten aus der Wissenschaft dem breiten Publikum vorgestellt. Der Nachmittag in Graz wurde durch interessante Vorträge zu den IEA Task11 Aktivitäten zu Bioraffinerie-Forschung sowie Fachvorträgen von Technische Universität Graz (Papierbeschichtung), TU Wien (Nutzung von Landwirtschaftlichen Reststoffen) und AEE INTEC zu (Proteingewinnung aus Lebensmittelresten) einem informativen Nachmittag rund um Bioraffinerieaktivitäten in Österreich.



Abbildung 28: Flyer der Vernetzungsveranstaltung „Neue Produkte und Wege für eine Kreislauforientierte Bioökonomie“

Die internationale Vernetzung wurde durch einen internationalen Workshop des IEA IETS Task 11, am 5. April 2022, als Auftaktveranstaltung des neuen Subtasks „Technology Pathways towards Negative and/or Net-Zero Emission Biorefineries“, gestärkt. 31 TeilnehmerInnen aus Forschung und Industrie beteiligten sich an dem interaktiven Meeting. Diskutiert wurden emergierende Technologien und Tools zur Energie- und Ressourceneffizienz um Net-Zero Emissionen in Bioraffinerien zu erzielen. Des Weiteren wurden gemeinsam Ziele und Inhalte des neuen Subtasks definiert.

6.2. Relevanz und Nutzen der Projektergebnisse auf nationaler und internationaler Ebene

Die Industrie macht 35 % des Endenergieverbrauchs in Österreich aus und ist für 30% der österreichischen CO₂-Emissionen verantwortlich. Somit ist ein hohes Potential für die Senkung des Energieverbrauchs durch Energieeffizienz und den vermehrten Einsatz von Erneuerbaren Energien gegeben. Die europäische Green-Deal-Strategie zielt auf eine nachhaltige, klimaneutrale und kreislaforientierte Wirtschaft in Europa bis 2050 ab. Im März 2020 wurde der neue Aktionsplan zur Kreislaufwirtschaft (CEAP) verabschiedet, die mehrere Ziele für den grünen Wandel in Europa festlegt. Auch auf nationaler Ebene wurde in Österreich die Bioökonomie-Strategie durch einen Aktionsplan aufgegriffen, der eine Orientierung für ein nachhaltiges Wirtschaftskonzept bis 2030 gibt, um Klimawandel, Nahrungsmittel- und Wasserknappheit sowie wachsende Umweltbelastungen zu bekämpfen.

Die Relevanz des Vorhabens hinsichtlich der österreichischen Klima- und Energiezielsetzungen sind im vorliegenden Projekt durch folgende Aspekte dargestellt; Net-Zero bzw. Net-negative Bioraffinerien sind ein national und international aufstrebendes Technologie- und Innovationsfeld, das fossile Kohlenstoff-Wertschöpfungsketten ersetzen kann und ein erhebliches Potenzial zur Emissionsminderung oder sogar zu "negativen Emissionen" hat - allerdings in vielen Fällen mit Herausforderungen an die technologische Machbarkeit und die wirtschaftliche Tragfähigkeit. Der IEA IETS Task 11 realisiert das strategische Ziel, langfristig eine Dekarbonisierung der Industrie durch integrale Bioraffinerien zu erreichen. Die Komplexität der Wahl geeigneter Bioökonomiestrategien für Unternehmen, um einerseits hohe Produktwertschöpfung zu erreichen, gleichzeitig Ressourceneffizienz und Zirkularität zu erzielen und nicht zuletzt durch energieeffiziente Produktionsverfahren und Einsatz erneuerbarer Energie die THG-Emissionen bei der Herstellung biobasierter Produkte zu minimieren, ist groß. Diese Zielstellung kann nur durch holistische Optimierungsansätze, die Umstellung von Prozesstechnologien, Methoden und Werkzeuge erreicht werden, deren Erarbeitung bestmöglich in einem internationalen Netzwerk erfolgt um international anerkannte Tools, Methoden und Bewertungskriterien zu entwickeln, die gezielt verbreitet werden können und damit der Industrie zugänglich werden.

7 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen

Schlussfolgerung und Empfehlungen

Grundsätzlich zielt der IEA IETS Task 11 darauf ab eine weitreichende Dekarbonisierung von und durch industrielle Bioraffinerien zu erreichen um Negative/Net-Zero Treibhausgasemissionen zu erzielen. Wie bereits gezeigt wurde, gab es bereits Forschungsarbeiten zur Bewertung von Bioraffinerien, doch konnten diese keine geeignete Evaluierung für unser Ziel - eine kombinierte Betrachtung der Energie- und Ressourceneffizienz - bereitstellen. In der vorliegenden Berichtsperiode (11/2020 - 10/2022) zu den nationalen Tätigkeiten konnte die Bedeutung von Methoden, Tools und Konzepten unter kombinierter Betrachtung von Energie- und Ressourceneffizienz als Entscheidungsgrundlage zur Realisierung einer Reduktion von Treibhausgasemissionen sichtbar gemacht werden. Gleichzeitig sind noch wichtige Forschungsfragen mit der Entwicklung von Konzepten verbunden.

Nach einer allgemeinen Systematik zur Erfassung, Charakterisierung und Klassifizierung von Bioraffinerien konnten 4 Fallstudien ausgewählt werden, die die Basis für die Entwicklung von Prozess- und Systemkonzepten für Bioraffinerien mit kombinierter Energie- und Ressourceneffizienz bildeten. Diese inkludierten:

- *Fallstudie 1: Kläranlage als Bioraffinerie*
- *Fallstudie 2: Lignozellulose Bioraffinerie*
- *Fallstudie 3: 2-Plattform-Bioraffinerie (C5&C6-Zucker, Lignin) zur Herstellung von Bioethanol, Strom und Wärme aus Maisstroh*
- *Fallstudie 4: Biogasanlage als Bioraffinerie*

Für die ausgewählten Fallstudien wurden Fließbilder zum Prozessablauf ausgearbeitet sowie deren Status Quo in Form von Referenzszenarien erfasst und Massen- und Energiebilanzen berechnet. Optimierungsszenarien zur Verbesserung der Ressourcen- und Energieeffizienz (kombinierte Betrachtungsweise), konnten definiert werden. Um die Vorgehensweise zur Optimierung sowie Bewertung systematisch abzubilden, wurde eine methodische Vorgehensweise erarbeitet und im Anschluss anhand der Fallstudien validiert. Zur Bewertung wurden Key Performance Indikatoren (KPIs) definiert und herangezogen. Im Rahmen der Methodvalidierung durch Fallbeispiele konnten diese KPIs validiert und erweitert werden. In Summe konnte durch diese Vorgehensweise die kombinierte Bewertung der Energie- und Ressourceneffizienz gewährleistet werden. Dabei konnte gezeigt werden, dass diese kombinierte Betrachtung wichtig ist, um Zusammenhänge von einzelnen Maßnahmen und auch Optimierungsoptionen aufzuzeigen. Beispielsweise konnte festgestellt werden, dass die Integration von neuen Technologien zur Schließung von Kreisläufen viele Vorteile (z.B. Ressourcenrückgewinnung, Minimierung Rohstoffeinsatz, Reduktion der Abfalllasten etc.) mit sich bringt, jedoch auch gleichzeitig Effekte wie beispielsweise zusätzlicher Energiebedarf, Chemikalienbedarf, etc. zu erwarten sind. Damit zeigt sich erneut die Bedeutung der Forschung für biobasierte Verfahrensentwicklung mit minimalem Wasser/Chemikalien- und Energiebedarf.

Die Methodik sowie KPIs stehen als wesentliches Ergebnis der Arbeiten zur Verfügung und dienen als Empfehlung für die Vorgehensweise bei der Bewertung von kombinierter Energie- und Ressourceneffizienz von Bioraffinerien.

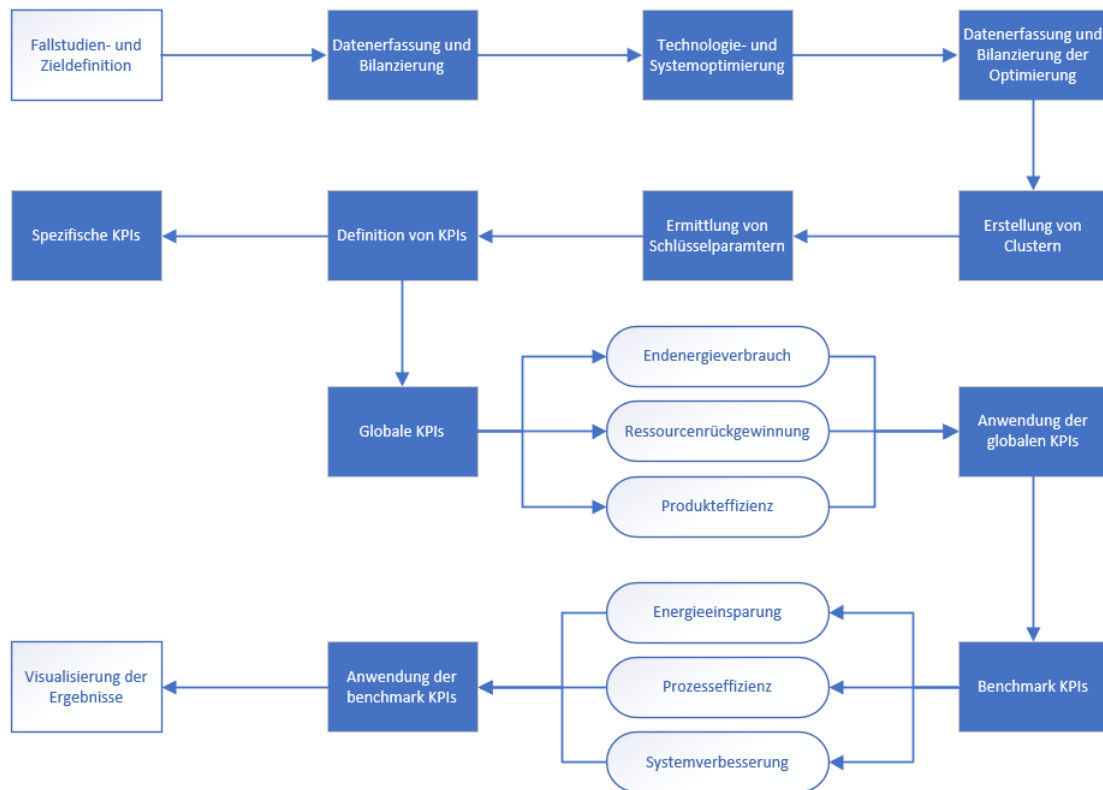


Abbildung 29: Empfehlung für die Durchführung und Bewertung der Energie- und Ressourceneffizienz von Bioraffinerien

Zudem wurde eine sozioökonomische Analyse für die Auswirkungen von Optimierungen auf ausgewählten Fallstudien angewandt und damit relevante Stakeholder identifiziert und qualitative Indikatoren einer Bioraffinerie-Wertschöpfungskette charakterisiert. Die sozioökonomische Analyse für die Auswirkungen von Optimierungen auf ausgewählte Fallstudien hat sich als eine wichtige Methode erwiesen, um den Einfluss von Bioraffinerien auf die Gesellschaft und die Wirtschaft zu untersuchen. Durch diese Analyse konnten nicht nur relevante Stakeholder identifiziert werden, sondern es wurden auch qualitative Indikatoren für eine Bioraffinerie-Wertschöpfungskette charakterisiert. Die Identifikation von relevanten Stakeholdern ist von entscheidender Bedeutung, um die Interessen aller Beteiligten bei der Planung und Umsetzung von Bioraffinerien zu berücksichtigen. Durch die sozioökonomische Analyse konnten wichtige Stakeholder wie lokale Gemeinden, Umweltgruppen, Regulierungsbehörden, landwirtschaftliche Erzeuger und Verbraucher identifiziert werden. Durch die Einbindung dieser Stakeholder in den Planungs- und Entscheidungsprozess kann eine breite Akzeptanz für Bioraffinerien geschaffen werden. Darüber hinaus ermöglicht die Charakterisierung von qualitativen Indikatoren für eine Bioraffinerie-Wertschöpfungskette eine umfassende Bewertung der Auswirkungen von Bioraffinerien auf die Gesellschaft und die Wirtschaft. Hierzu zählen Faktoren wie Arbeitsplätze, Einkommen, Steuereinnahmen, Energieeffizienz und Umweltauswirkungen. Durch die Verwendung dieser Indikatoren können die positiven Auswirkungen von Bioraffinerien auf die lokale Wirtschaft und

Gesellschaft ermittelt werden. Zur Unterstützung von zukünftigen Entwicklungen IEA IETS Task 11 (ev. weiterer Subtask), wurden aktuelle Digitalisierungsmethoden aus der Industrie erhoben, und deren Anwendbarkeit auf industrielle Bioraffinerien diskutiert. Parallel dazu konnte in der letzten Berichtsperiode der Arbeitsplan für einen neuen Subtasks 6 - Technology Pathways towards Negative and/or NetZero Emission Biorefineries – unter österreichischer Leitung (AEE INTEC) erarbeitet werden. Der Subtask an sich sowie der zugehörige Arbeitsplan wurden bereits bestätigt und mit einem Kick-Off Meeting gestartet. Der neue Subtask baut auf den Ergebnissen dieser Periode auf, in dem ein Kompendium von Technologien („key enabling technologies“) und Methoden erstellt wird. Dadurch sollen unterschiedliche Wege und Möglichkeiten für Bioraffinerien aufgezeigt werden, um negative bzw. Netto-Null Emissionen zu erreichen bzw. zu evaluieren. Die Definition von Bilanzgrenzen wird dabei eine wichtige Rolle spielen.

Alle Ergebnisse und Aktivitäten der letzten Task 11 Periode wurden entsprechend zusammengefasst, um einen entscheidenden Wissenswachstum sowohl auf nationaler als auch internationaler Ebene zu generieren. Dafür sollen die Ergebnisse aus dieser Arbeit mit den Erkenntnissen anderer Projektpartner zusammengeführt werden, um mithilfe des für sozioökonomische Bewertungen entwickelten Tools SAMBA, mehr über die Auswirkungen neuer Technologien, Prozesse und Produkte zu erfahren. Um die Anwendbarkeit dieser Bewertungsmethodik zu untersuchen, wäre es von Vorteil, diese Bewertung auch auf andere Bioraffinerien auszudehnen, um etwaige Lücken zu schließen und bei Bedarf zusätzliche KPIs zu definieren.

Es besteht sicherlich noch Forschungsbedarf in der technologischen Weiterentwicklung der Verfahrens- und Anlagenkonzepte in Richtung innovativere Produkte. Bereits heute wird an zahlreichen Technologiekonzepten für effiziente Wert- und Nährstoffrückgewinnung geforscht. Die genauere Untersuchung von neuen möglichen Technologiekombinationen und deren Integration in Bioraffinerien sollten bei weitergehenden Betrachtungen mitberücksichtigt werden.

Die Forschung in Bioraffinerien war in den letzten Jahren sehr stark auf ideale Produktionswege für Biokraftstoffe, biobasierte Materialien und Chemikalien konzentriert. Für die Zukunft ist es entscheidend, die Minimierung der THG-Emissionen entlang dieser Bioraffinerie-Routen zu gewährleisten, um die Ziele des Pariser Abkommens zu erreichen und letztendlich die Emissionen auf Netto-Null zu begrenzen. Dekarbonisierungsansätze auf der Grundlage eines dreifachen Ansatzes entwickelt: 1) Technologieoptimierung (Einsatz der effizientesten Technologien in Betriebseinheiten und Prozessen, Minimierung des Energiebedarfs an der Quelle); 2) Systemoptimierung (Optimierung der Verarbeitungssysteme und -ströme auf ganzheitlicher Basis, Bewertung der Möglichkeiten der Prozessintegration auf der Grundlage des Energiebedarfs und der verfügbaren überschüssigen Wärme); 3) erneuerbare Energieversorgung für den verbleibenden Energiebedarf. Die Komplexität ist jedoch erheblich gestiegen, da nicht nur einzelne Standorte, sondern integrierte Standorte über Branchengrenzen hinweg betrachtet werden müssen. Diese Ansätze gilt auf Bioraffinerien umzulegen, um Netto-Null- oder negative Emissionsziele zu erreichen.

Aktuelle Aktivitäten des IEA IETS Task 11

Die Arbeiten des IEA IETS Task 11 werden aktiv weiterbearbeitet. Für die österreichische Beteiligung wurde dazu der Subtasks 6 - Technology Pathways towards Negative and/or NetZero Emission Biorefineries – unter österreichischer Leitung, genehmigt und ein Arbeitsplan erstellt. Um die Aktivitäten im internationalen Konsortium zu stärken, wurde eine Workshopreihe initiiert - 2 Termine dazu haben bereits stattgefunden.

Literaturverzeichnis

- [1] V. Leitner und J. Lindorfer, „Evaluation of technology structure based on energy yield from wheat straw for combined bioethanol and biomethane facility“, *Renewable Energy*, Bd. 87, S. 193–202, März 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.09.037.
- [2] M. Prieler, J. Lindorfer, und H. Steinmüller, „Life-cycle assessment of green biorefinery process options“, *Biofuels, Bioprod. Bioref.*, Bd. 13, Nr. 6, S. 1391–1401, Nov. 2019, doi: 10.1002/bbb.2022.
- [3] BMVIT, „Bioökonomie -Eine Strategie für Österreich, Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie“. 2019.
- [4] M. Suhr u. a., *Best Available Techniques (BAT) reference document for the production of pulp, paper and board*. Luxembourg: Publications Office, 2015.
- [5] B. Muster-Slawitsch, „Thermal Energy Efficiency and Process Intensification for the Food Industry - Methodology development for breweries“, Technical University of Graz, Graz, 2014.
- [6] F. Gallucci, M. van Sint Annaland, und B. Muster und C. Brunner, Hrsg., *Process intensification for sustainable energy conversion*. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley, 2015.
- [7] A. Górak, A. Stankiewicz, und B. Muster und C. Brunner, Hrsg., *Intensification of biobased processes*. in Green chemistry series, no. 55. Cambridge, UK: Royal Society of Chemistry, 2018.
- [8] B. Muster-Slawitsch u. a., „Oscillating flow bioreactors: An enabling technology for sustainable biorefining operations?“, *Jnl Adv Manuf & Process*, Bd. 2, Nr. 2, Apr. 2020, doi: 10.1002/amp2.10046.
- [9] B. Muster-Slawitsch u. a., „Potential Enhancement of Solar Process Heat by Emerging Technologies“, 2016. [Online]. Verfügbar unter: http://task49.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/D5_Report_potential_enhancement_solar_process_heat_by_emerging_technologies_March_2016.pdf
- [10] J. Vanneste, T. Ennaert, A. Vanhulsel, und B. Sels, „Unconventional Pretreatment of Lignocellulose with Low-Temperature Plasma“, *ChemSusChem*, Bd. 10, Nr. 1, S. 14–31, Jan. 2017, doi: 10.1002/cssc.201601381.
- [11] X.-J. Shen u. a., „Facile fractionation of lignocelluloses by biomass-derived deep eutectic solvent (DES) pretreatment for cellulose enzymatic hydrolysis and lignin valorization“, *Green Chem.*, Bd. 21, Nr. 2, S. 275–283, 2019, doi: 10.1039/C8GC03064B.
- [12] M. N. Borand und F. Karaosmanoğlu, „Effects of organosolv pretreatment conditions for lignocellulosic biomass in biorefinery applications: A review“, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Bd. 10, Nr. 3, S. 033104, Mai 2018, doi: 10.1063/1.5025876.
- [13] M. Cárdenas-Fernández, C. Hamley-Bennett, D. J. Leak, und G. J. Lye, „Continuous enzymatic hydrolysis of sugar beet pectin and l-arabinose recovery within an integrated biorefinery“, *Bioresource Technology*, Bd. 269, S. 195–202, Dez. 2018, doi: 10.1016/j.biortech.2018.08.069.
- [14] J. Buchmaier u. a., „Oscillatory Flow Bioreactor (OFB) Applied in Enzymatic Hydrolysis at High Solid Loadings“, *Chem. biochem. eng. q. (Online)*, Bd. 33, Nr. 4, S. 459–470, 2020, doi: 10.15255/CABEQ.2018.1553.
- [15] O. P. Karthikeyan, A. Selvam, und J. W. C. Wong, „Hydrolysis–acidogenesis of food waste in solid–liquid–separating continuous stirred tank reactor (SLS-CSTR) for volatile organic acid production“, *Bioresource Technology*, Bd. 200, S. 366–373, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.biortech.2015.10.017.
- [16] S. Cui, S. Zhang, S. Ge, L. Xiong, und Q. Sun, „Green preparation and characterization of size-controlled nanocrystalline cellulose via ultrasonic-assisted enzymatic hydrolysis“, *Industrial Crops and Products*, Bd. 83, S. 346–352, Mai 2016, doi: 10.1016/j.indcrop.2016.01.019.
- [17] S. Kassaye, K. K. Pant, und S. Jain, „Synergistic effect of ionic liquid and dilute sulphuric acid in the hydrolysis of microcrystalline cellulose“, *Fuel Processing Technology*, Bd. 148, S. 289–294, Juli 2016, doi: 10.1016/j.fuproc.2015.12.032.
- [18] J. M. Prado, D. Lachos-Perez, T. Forster-Carneiro, und M. A. Rostagno, „Sub- and supercritical water hydrolysis of agricultural and food industry residues for the production of fermentable

- sugars: A review“, *Food and Bioproducts Processing*, Bd. 98, S. 95–123, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.fbp.2015.11.004.
- [19] T. H. Kwan, Y. Hu, und C. S. K. Lin, „Valorisation of food waste via fungal hydrolysis and lactic acid fermentation with *Lactobacillus casei* Shirota“, *Bioresource Technology*, Bd. 217, S. 129–136, Okt. 2016, doi: 10.1016/j.biortech.2016.01.134.
- [20] H. D. Lee, M. Y. Lee, Y. S. Hwang, Y. H. Cho, H. W. Kim, und H. B. Park, „Separation and Purification of Lactic Acid from Fermentation Broth Using Membrane-Integrated Separation Processes“, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Bd. 56, Nr. 29, S. 8301–8310, Juli 2017, doi: 10.1021/acs.iecr.7b02011.
- [21] Q.-Z. Li u. a., „Recovery Processes of Organic Acids from Fermentation Broths in the Biomass-Based Industry“, *Journal of Microbiology and Biotechnology*, Bd. 26, Nr. 1, S. 1–8, Jan. 2016, doi: 10.4014/jmb.1505.05049.
- [22] N. Murali, K. Srinivas, und B. K. Ahring, „Biochemical Production and Separation of Carboxylic Acids for Biorefinery Applications“, *Fermentation*, Bd. 3, Nr. 2, S. 22, Mai 2017, doi: 10.3390/fermentation3020022.
- [23] Y. Wang, Y. Tashiro, und K. Sonomoto, „Fermentative production of lactic acid from renewable materials: Recent achievements, prospects, and limits“, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, Bd. 119, Nr. 1, S. 10–18, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.jbiosc.2014.06.003.
- [24] B. Muster-Slawitsch, C. Brunner, und J. Fluch, „Application of an advanced pinch methodology for the food and drink production“, *WIREs Energy Environ.*, Bd. 3, Nr. 6, S. 561–574, Nov. 2014, doi: 10.1002/wene.117.
- [25] Verein Deutscher Ingenieure, *VDI 6310 - Klassifikation und Gütekriterien von Bioraffinerien*. 2016.
- [26] C. Bramsiepe u. a., „Low-cost small scale processing technologies for production applications in various environments—Mass produced factories“, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Bd. 51, S. 32–52, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.cep.2011.08.005.
- [27] B. Muster-Slawitsch, M. Hubmann, M. Murkovic, und C. Brunner, „Process modelling and technology evaluation in brewing“, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Bd. 84, S. 98–108, Okt. 2014, doi: 10.1016/j.cep.2014.03.010.
- [28] P. Krummenacher und B. Muster, „in 13th International Conference on Sustainable Energy technologies Geneva“, 2014.
- [29] P. Lamers, *Developing the global bioeconomy: technical, market, and environmental lessons from bioenergy*, 1st edition. Cambridge, MA: Elsevier, 2016.
- [30] D. Humbird, R. Davis, L. Tao, C. Kinchin, D. Hsu, und A. Aden, „Process Design and Economics for Biochemical Conversion of Lignocellulosic Biomass to Ethanol“, National Renewable Energy Laboratory Golden, Colorado, Technical Report, 2011.
- [31] M. Wang, J. Han, J. B. Dunn, H. Cai, und A. Elgowainy, „Well-to-wheels energy use and greenhouse gas emissions of ethanol from corn, sugarcane and cellulosic biomass for US use“, *Environ. Res. Lett.*, Bd. 7, Nr. 4, S. 045905, Dez. 2012, doi: 10.1088/1748-9326/7/4/045905.
- [32] S. Spatari, D. M. Bagley, und H. L. MacLean, „Life cycle evaluation of emerging lignocellulosic ethanol conversion technologies“, *Bioresource Technology*, Bd. 101, Nr. 2, S. 654–667, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2009.08.067.
- [33] A. Uihlein und L. Schebek, „Environmental impacts of a lignocellulose feedstock biorefinery system: An assessment“, *Biomass and Bioenergy*, Bd. 33, Nr. 5, S. 793–802, Mai 2009, doi: 10.1016/j.biombioe.2008.12.001.
- [34] R. Slade, A. Bauen, und N. Shah, „The greenhouse gas emissions performance of cellulosic ethanol supply chains in Europe“, *Biotechnol Biofuels*, Bd. 2, Nr. 1, S. 15, 2009, doi: 10.1186/1754-6834-2-15.
- [35] H. Karlsson, P. Börjesson, P.-A. Hansson, und S. Ahlgren, „Ethanol production in biorefineries using lignocellulosic feedstock – GHG performance, energy balance and implications of life cycle calculation methodology“, *Journal of Cleaner Production*, Bd. 83, S. 420–427, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.07.029.

- [36] K. Koponen, S. Soimakallio, E. Tsupari, R. Thun, und R. Antikainen, „GHG emission performance of various liquid transportation biofuels in Finland in accordance with the EU sustainability criteria“, *Applied Energy*, Bd. 102, S. 440–448, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.07.023.
- [37] S. González-García, L. Luo, M. T. Moreira, G. Feijoo, und G. Huppes, „Life cycle assessment of flax shives derived second generation ethanol fueled automobiles in Spain“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 13, Nr. 8, S. 1922–1933, Okt. 2009, doi: 10.1016/j.rser.2009.02.003.
- [38] C. Whittaker, M. C. McManus, und G. P. Hammond, „Greenhouse gas reporting for biofuels: A comparison between the RED, RTFO and PAS2050 methodologies“, *Energy Policy*, Bd. 39, Nr. 10, S. 5950–5960, Okt. 2011, doi: 10.1016/j.enpol.2011.06.054.
- [39] S. van Vliet, S. L. Kronberg, und F. D. Provenza, „Plant-Based Meats, Human Health, and Climate Change“, *Front. Sustain. Food Syst.*, Bd. 4, S. 128, Okt. 2020, doi: 10.3389/fsufs.2020.00128.
- [40] J. Mossberg, P. Söderholm, H. Hellsmark, und S. Nordqvist, „Crossing the biorefinery valley of death? Actor roles and networks in overcoming barriers to a sustainability transition“, *Environmental Innovation and Societal Transitions*, Bd. 27, S. 83–101, Juni 2018, doi: 10.1016/j.eist.2017.10.008.
- [41] S. Hadrien, M. Mourad, M. Anirban, und E. Benoit, „STEEP-Analyse als Werkzeug zur Erstellung von Technologie-Roadmaps: Konferenzpapier“,
- [42] M. Kühnen und R. Hahn, „Indicators in Social Life Cycle Assessment: A Review of Frameworks, Theories, and Empirical Experience: Indicators in Social Life Cycle Assessment“, *Journal of Industrial Ecology*, Bd. 21, Nr. 6, S. 1547–1565, Dez. 2017, doi: 10.1111/jiec.12663.
- [43] C. Visentin, A. W. da S. Trentin, A. B. Braun, und A. Thomé, „Life cycle sustainability assessment: A systematic literature review through the application perspective, indicators, and methodologies“, *Journal of Cleaner Production*, Bd. 270, S. 122509, Okt. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122509.
- [44] S. Sureau, B. Mazijn, S. R. Garrido, und W. M. J. Achten, „Social life-cycle assessment frameworks: a review of criteria and indicators proposed to assess social and socioeconomic impacts“, *Int J Life Cycle Assess*, Bd. 23, Nr. 4, S. 904–920, Apr. 2018, doi: 10.1007/s11367-017-1336-5.
- [45] A. Siebert, A. Bezama, S. O’Keeffe, und D. Thrän, „Social life cycle assessment indices and indicators to monitor the social implications of wood-based products“, *Journal of Cleaner Production*, Bd. 172, S. 4074–4084, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.02.146.
- [46] Clariant, „Sunliquid plant in romania produces cellulosic etanol on a commercial scale obtained from agricultural residues“. <https://www.clariant.com/en/Company/Contacts-and-Locations/Key-Sites/Romania> (zugegriffen 30. September 2021).
- [47] Nordischer Ministerrat. Nachhaltiger Düsenkraftstoff für die Luftfahrt, „Nordische Perspektiven für die Verwendung von fortschrittlichem, nachhaltigem Flugturbinenkraftstoff für die Luftfahrt“, 2016.
- [48] A. Lang und A. E. Hazir Farouk, „Die weltweite Produktion von Bio-Jet-Kraftstoffen - Die aktuellen Entwicklungen bei Technologien und Rohstoffen sowie innovative neue F&E-Entwicklungen“, 2014.
- [49] DWA-A 131, *Arbeitsblatt DWA-A 131, Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen*. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), 2016.
- [50] W. Gujer, *Siedlungswasserwirtschaft: mit 84 Tabellen*, 3., Bearb. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer, 2007.
- [51] PVS GmbH, „Cellvation“, 9. März 2021. <https://www.pvs.at/de/wertstoffgewinnung/cellvation> (zugegriffen 2. Januar 2023).

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Konzept einer integrierten Bioraffinerie (AEE INTEC).....	11
Abbildung 2: Schematische Darstellung einer Bioraffinerie-Klassifizierung mit den entsprechenden Elementen [25].....	14
Abbildung 3: Grafische Darstellung des TEE-Assessment Ansatz des IEA Bioenergy Task 42.....	16
Abbildung 4: SAMBA-Modell. Quelle: Energieinstitut an der JKU Linz	18
Abbildung 5: Übersicht über die entwickelte Methodik	21
Abbildung 6: Lignocellulose-Ethanol-Bioraffinerie Fallstudie	24
Abbildung 7: Massenbilanz Fallstudie Lignocellulose-Ethanol-Bioraffineriepfad	26
Abbildung 8: Kostenanalyse Fallstudie Lignocellulose-Ethanol-Bioraffineriepfad.....	27
Abbildung 9: Sensitivitätsanalyse der Kostenstruktur Fallstudie Lignocellulose-Ethanol-Bioraffineriepfad	27
Abbildung 10: Bioraffinerie und Referenzsystem - Wertschöpfungskette Fallstudie Lignocellulose-Ethanol-Bioraffineriepfad (Cradle-to-Gate)	28
Abbildung 11: Treibhausgasemissionen der Bioraffinerie im Vergleich zur Referenz Fallstudie Lignocellulose-Ethanol-Bioraffineriepfad.....	29
Abbildung 12: Kumulierter Energiebedarf der Bioraffinerie im Vergleich zur Referenz Fallstudie Lignocellulose-Ethanol-Bioraffineriepfad.....	29
Abbildung 13: Vergleich Kosten und Erlöse - Fallstudie Lignocellulose-Ethanol-Bioraffineriepfad.....	30
Abbildung 14: Stakeholder-Matrix	35
Abbildung 15: Gestaltung gezielter Maßnahmen für spezifische Stakeholder gemäß der Stakeholder-Matrix. Quelle: Energieinstitut an der JKU	36
Abbildung 16: Darstellung der Systemgrenzen für Teilprozesse	47
Abbildung 17: Darstellung der Bilanzgrenze bei globaler Betrachtung des Systems.....	48
Abbildung 18: Vergleich zwischen einem Referenzszenario (oben) und einem Optimierungsszenario (unten).....	49
Abbildung 19 Referenzszenario der Fallstudie (CS1) "Kläranlage als Bioraffinerie"	51
Abbildung 20 Energiebilanz zum Referenzszenario (CS1)	52
Abbildung 21 N-Bilanz zum Referenzszenario (CS1)	53
Abbildung 22 Erstes Optimierungsszenario (OS 1.1) mit integrierter Vorklärung	54
Abbildung 23 Zweites Optimierungsszenario (OS 1.2) mit erweiterter Nährstoffrückgewinnung.....	55
Abbildung 24: Drittes Optimierungsszenario (OS 1.3) mit Zellstoffrückgewinnung	56
Abbildung 25 Geänderte Energiebilanz in Bezug auf die Optimierung OS 1.2	57
Abbildung 26 Geänderte N-Bilanz in Bezug auf die Optimierung OS 1.2.....	58
Abbildung 27: Ergebnisse aus der Berechnung der Benchmark-KPIs für die Fallstudie „Kläranlage als Bioraffinerie“ (rot – Referenzszenario, grün – Integration einer Vorklärung (OS1.1.); gelb – Integration Membrandestillation (OS1.2.); blau – Integration Zelluloserückgewinnung (OS1.3.)	60
Abbildung 28: Flyer der Vernetzungsveranstaltung „Neue Produkte und Wege für eine Kreislauforientierte Bioökonomie	62

Abbildung 29: Empfehlung für die Durchführung und Bewertung der Energie- und Ressourceneffizienz von Bioraffinerien..... 65

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: internationale Vertreter des IEA IETS Task 11	13
Tabelle 2: Wichtigste Merkmale der Lignocellulose-Ethanol-Bioraffinerie Fallstudie	25
Tabelle 3: Übersicht der TEE-Bewertungsergebnisse Fallstudie Lignocellulose-Ethanol-Bioraffineriepfad	28
Tabelle 4: Analyse der Interessengruppen.....	33
Tabelle 5: Die wichtigsten Akteure und ihre Rolle bei der Realisierung von Demonstrationsanlagen im Bereich industrieller Bioraffinerien	36
Tabelle 6: STEEP Dimensionen und Indikatoren, Quelle: Energieinstitut an der JKU	37
Tabelle 7: Liste der qualitativen Indikatoren und Beschreibung der Indikatoren. <i>*P: Prozessbezogener Indikator, der die industrielle Bioraffinerieanlage in den Mittelpunkt stellt; ** E: Umweltbezogene Indikatoren werden analysiert, wobei die Wertschöpfungskette vom Rohstoff zu den Produkten im Mittelpunkt steht.</i>	39
Tabelle 8: SAMBA Matrix.....	43
Tabelle 9: Benchmark KPIs inklusive Darstellung der Formeln	49
Tabelle 10 Übersicht über die Veränderungen aller Szenarien des CS1 - Kläranlage als Bioraffinerie. 58	
Tabelle 11: Teilnehmende Institutionen Subtask 6 des IEA IETS Task 11	74
Tabelle 12. Parameter und Werte für die wirtschaftliche Bewertung von Bioraffinerien.....	75

Abkürzungsverzeichnis

CED	kumulierte Energiebedarf (cumulative energy demand)
DEST	Decision Support Tool
DSS	Decision Support Systems
EtOH	Ethanol
LCA	Life Cycle Assessment
LCC	Life Cycle Costs
SAMBA	Socio- And Multicriteria Model for Reducing Barrier Analysis
STEEP	Social, Technological, Environmental, Economic, Political Indicators
THG	Treibhausgas
TEE	Technical, Economical and Environmental
z.B.	zum Beispiel

8 Anhang

Im Anhang können ergänzende Informationen angeführt werden, die zur Vollständigkeit des Ergebnisberichts notwendig sind, aber wegen ihres Umfangs nicht innerhalb des Ergebnisberichts dargestellt werden können. Zu beachten ist, dass alle Teile des Anhangs auf www.nachaltigwirtschaften.at zum Download zur Verfügung gestellt werden und dieser damit auch den Anforderungen an Barrierefreiheit und Urheberrecht entsprechen muss. Eine weitere Möglichkeit vertiefende Information zugänglich zu machen, besteht durch eine entsprechende Verlinkung auf andere Websites.

8.1. Teilnehmende Institutionen/Länder des Subtask 6

Tabelle 11: Teilnehmende Institutionen Subtask 6 des IEA IETS Task 11

Institutionen	Länder
AEE Institute for Sustainable Technologies	Austria
National Resources Canada	Canada
Polytechnique Montréal	Canada
Chalmers University	Sweden
Warsaw University of Technology	Polen
Montan University Leoben	Austria
Christof Industries	Austria
Biobase GmbH	Austria
Miscancell	Austria
JKU-Energieinstitut	Austria
Texas A&M university	-
CREM	Switzerland
AINIA	Spain
National Resources Canada	Canada
TBW Research	-
DBFZ Germany	-
HSLU	Switzerland
TU Wien	Austria

8.1. Parameter und Werte für die wirtschaftliche Bewertung von Bioraffinerien

Tabelle 12. Parameter und Werte für die wirtschaftliche Bewertung von Bioraffinerien

Nein	Parameter	Beschreibung	Einheit
1 Investitionen*			
1.1	Investitionssumme	Summe der Anlageninvestitionen einschließlich Nebenanlagen, Nebenkosten (z.B. Finanzierung, Grundstücksgebühren) sowie Erweiterung oder Optimierung.	€
2 Investitionskosten**			
2.1	Abschreibungen	Unter Berücksichtigung der jeweiligen technischen Nutzungsdauer	€/a
2.2	Aufgelaufene Zinsen	Kapitalrendite	€/a
2.3	Wartung	Kosten für Service und Wartung sowie eine Instandhaltungsreserve für die Bioraffinerien.	€/a
2.4	Steuern	Grundsteuern im Zusammenhang mit der Investition	€/a
2.5	Versicherung	Versicherungskosten für Bioraffinerieanlagen	€/a
2.6	Verwaltung	Verwaltungskosten im Zusammenhang mit der Investition	€/a
3 Material- und Energiekosten			
3.1	Rohstoffversorgung	Summe der Rohstoffkosten, einschließlich Lieferung, Lagerung und eventuell notwendiger Vorbehandlung.	€/a
3.2	Hilfs- und Betriebsstoffe	Summe der Neben- und Betriebskosten, einschließlich Lieferung, Lagerung und eventuell notwendiger Vorbehandlung.	€/a
3.3	Energieversorgung	Kosten für den eigenen Stromverbrauch in der Bioraffinerie	€/a
3.4	Entsorgungskosten	Entsorgungsbetten	€/a
3.5	Transportkosten	Eventuell anfallende zusätzliche Transportkosten	€/a
4 Material- und Energiekosten			
4.1	Material (Produkte)	Erlöse aus dem Verkauf von wesentlichen Produkten (gasförmig, flüssig, fest) und Energieträgern	€/a
4.2	Elektrizität	Erzielbare Gewinne aus dem Verkauf von Strom	€/a
4.3	Wärme	Berechnet auf Basis der gelieferten Wärmemenge und des Verkaufspreises.	€/a
5 Arbeitskosten			
5	Arbeitskosten	Personalkosten für Betrieb, Wartung und Management	€/a
6 Sonstige Kosten			
6	Sonstige Kosten	Sonstige Kosten, die nicht an anderer Stelle erfasst wurden	€/a
7 Gemeinkosten			
7	Gemeinkosten	Zusätzliche Kosten für Gemeinkosten	€/a
8 Gesamtbewertung			
8.1	Operative Ergebnisse	Erlöse abzüglich Kosten (ggf. unter Berücksichtigung anderer kalkulierter Kosten)	€/a
8.2	Barwert	Summe aller abgezinsten Nettozahlungen (Erträge abzüglich Aufwendungen), die der Investition zu diesem Zeitpunkt zuzurechnen sind.	€

* siehe Investitionen Investitionen

** siehe OPEX.... Betriebsausgaben im Zusammenhang mit platzierten Investitionen.

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

+43 800 21 53 59

servicebuero@bmk.gv.at

bmk.gv.at