

IEA Industrielle Energietechnologien und Systeme (IETS) Annex 17: Membranfiltration zur energie- effizienten Trennung lignocellulose- haltiger Biomassebestandteile

Arbeitsperiode 2017 - 2021

J. Buchmaier, E. Guillen,
S. Meitz, B. Muster,
P. Demmelmayer, M. Kienberger

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

10/2023

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe
unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

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

Copyright und Haftung:

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:

<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

IEA Industrielle Energietechnologien
und Systeme (IETS) Annex 17:
Membranfiltration zur energieeffizienten
Trennung lignocellulosehaltiger
Biomassebestandteile

Arbeitsperiode 2017 - 2021

DIⁱⁿ Judith Buchmaier, Dr.ⁱⁿ Bettina Muster,
Dr.ⁱⁿ Elena Guillen, DIⁱⁿ Sarah Meitz
AEE - Institut für Nachhaltige Technologien

Dr.ⁱⁿ Marlene Kienberger, DIⁱⁿ Paul Demmelmayr
Graz University of Technology

Gleisdorf, November 2021

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	7
2	Abstract	8
3	Ausgangslage	9
4	Projekthalt	11
4.1	Darstellung IETS Annex XVII - Membrane Processes in Biorefineries.....	11
4.1.1	Internationaler IETS Annex XVII - Membrane processes in biorefineries	11
4.2	Projektziele des Annex 17 (nationale Ebene)	13
4.3	Vorgangsweise und Methodik	14
5	Ergebnisse	16
5.1	Potentielle Prozessströme sowie definierte Integrationspunkte für effiziente Trenntechnologien in Bioraffinerien	17
5.2	Kenn- und Leistungsdaten unterschiedlicher Membrantechnologien	21
5.3	Herausforderungen bei dem Einsatz von Membranverfahren in Bioraffinerieansätzen	23
5.3.1	Fouling	23
5.3.2	Reinigung	27
5.3.3	Vorbehandlung	28
5.4	Technisch-ökonomische Bewertung von hybriden Trennverfahren	33
5.5	Bewertungsmethodik: Kriterien zur Bewertung unterschiedlicher Membranverfahren	36
5.5.1	Allgemeine Bewertungskriterien.....	37
5.5.2	Spezifische Bewertungskriterien Membrandestillation	38
5.5.3	Spezifische Bewertungskriterien Flüssigmembranpermeation.....	40
5.5.4	Spezifische Bewertungskriterien Pervaporation	41
5.5.5	Spezifische Bewertungskriterien Vorwärtsosmose	42
5.6	Ergebnisse der Bewertung für Wertstoffgewinnung mittels Membranverfahren in der Papier- und Zellstoffindustrie.....	44
5.7	Leitfaden zur Integration von nachhaltigen und energieeffizienten Membranverfahren in Bioraffinerien	45
6	Vernetzung und Ergebnistransfer	47
6.1	Zielgruppen des IEA IETS Annex 17	47
6.2	Veröffentlichungen im Rahmen des IEA IETS Annex 17	51
6.3	Relevanz und Nutzen der Projektergebnisse auf nationaler und internationaler Ebene	52
7	Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen	55
7.1	Schlussfolgerungen des Projektteams	55
7.2	Weiterführende Forschungsprojekte und IEA-Kooperationen.....	57
7.3	Empfehlung des Projektteams an die österreichische FTI Politik	57

1 Kurzfassung

In Anbetracht der globalen Bevölkerungsentwicklung und dem fortschreitenden Klimawandel sind Lösungsansätze gefordert, die eine ressourcen- und energieeffiziente, nachhaltige Wirtschaftsweise fördern und den Umstieg von erdölbasierter auf biobasierte Industrie ermöglichen bzw. unterstützen. Membranprozesse können potentielle technologische Lösungen für die kaskadische Nutzung von Prozess- und Abfallströmen in Bioraffinerien bieten, da sie die stoffliche Nutzung der Komponenten durch zum Teil hoch selektive Trennmechanismen mit Energieeffizienzmaßnahmen kombinieren. Der Zellstoff- und Papierindustrie kommt aufgrund des Einsatzstoffes Holz, sowie der hoch-volumigen Produktion, eine besondere Rolle in der Bioraffinerie zu. Da diese Industriesparte in Österreich gleichzeitig zu den energieintensivsten Industrien zählt, wurde im Zuge des Projektes ein spezieller Fokus daraufgelegt.

Ziel des IEA MD TCP Annex 17 Projektes war es emergierende Membranverfahren für biobasierte Anwendungsgebiete zu evaluieren. Dies wurde sowohl theoretisch hinterlegt als auch in praktischen Versuchen durchgeführt. Folgende emergierende Membranverfahren wurden betrachtet: Vorwärtosmose (VO), Membrandestillation (MD), Pervaporation (PV) und Flüssigmembranpermeation (FMP). Weiteres waren internationale Netzwerkaktivitäten und Know-how Aufbau und Transfer Ziel des Projektes.

Methodisch wurde im Projekt IEA IETS TCP Annex 17 neben einer eingängigen Literaturrecherche, und wissenschaftlichen Experimenten mit MD und FMP zu Membranauswahl, Reinigung, Fouling und Langzeitverhalten, auch an einer Entscheidungshilfe für die Anwendung von emergierenden Membranverfahren gearbeitet. Diese ist in der Form des Leitfadens „Membranes in Biorefineries- Guideline“ zusammenfasst und beschreibt eine mögliche Vorgehensweise zur eigenständigen Evaluierung des Einsatzes eines emergierenden Membranverfahrens. Beschrieben wird ein Weg zur Definition technologischer Kriterien und deren Bewertung hinsichtlich der Eignung in spezifischen Anwendungen. Auch die Auswahl geeigneter Vorbehandlungs- bzw. Reinigungsstrategien wird durch einen methodischen Ansatz unterstützt.

Die erzielten Ergebnisse umfassen die Aufbereitung des Status Quo von herkömmlichen und emergierenden Membranverfahren in Bioraffinerie-Anwendungen, die Betrachtung von Potentialen und Herausforderungen bei Vorbehandlung, Fouling und Reinigung sowie einen Leitfaden hinsichtlich Integrationsmöglichkeiten von emergierenden Membrantechnologien in der Zellstoff- und Papierindustrie. Der intensive Austausch der Expert:innen auf nationaler und internationaler Ebene ist in die Ergebnisse eingebunden. Aufgrund der Komplexität und Inhomogenität der Prozess- und Abwässer im Zellstoff- und Papiersektor bleiben bestimmte Herausforderungen für zukünftige Membrananwendungen bestehen. Forschungsbedarf rund um Themen wie die Selektivität, Produktreinigung, Prozessstabilität und Flexibilität besteht auch in Zukunft. Konkret sieht das Konsortium Handlungsbedarf in den Bereichen nachhaltige und fortschrittliche Membranentwicklung und Produktion; Material-/Fertigungs-/Modifizierungsinnovationen in technischem Maßstab; Verbesserung der Selektivität durch Entkopplung von Transportantriebskräften; effektive kombinierte physikalische und chemische Membranreinigungsprotokolle und Ermittlung optimaler Betriebsbedingungen in Bezug auf Hydrodynamik uvm.

2 Abstract

In view of the global population development and the advancing climate change, solution approaches are required that promote a resource- and energy-efficient, sustainable economy and enable or support the transition from petroleum-based to bio-based industries. Membrane processes can offer potential technological solutions for the cascading use of process- and waste streams in biorefineries, as they combine the material use with energy efficiency measures through sometimes highly selective separation mechanisms. The pulp and paper industry plays a special role in biorefineries due to the use of wood as a feedstock and its high-volume production. Since this industrial sector is also one of the most energy-intensive industries in Austria, a special focus was placed on it in the course of the project.

The aim of the IEA MD TCP Annex 17 project was to evaluate emerging membrane processes for biobased applications. This was done both theoretically and in practical experiments. The following emerging membrane processes were considered: Forward Osmosis (FO), Membrane Distillation (MD), Pervaporation (PV) and Liquid Membrane Permeation (LMP). Furthermore, international networking activities such as know-how build-up and transfer were objectives of the project.

Methodologically, the IEA IETS TCP Annex 17 project worked on a decision support for the application of emerging membrane processes in addition to a comprehensive literature review and scientific experiments with MD and LMP on membrane selection, cleaning, fouling and long-term behaviour. This is summarized in the form of the guideline "Membranes in Biorefineries " and describes a possible procedure for the evaluation of the use of an emerging membrane process. It leads through a pathway of defining technological criteria and its evaluation with respect to their suitability in specific applications. The selection of suitable pre-treatment or purification strategies is also supported by a methodical approach.

The results achieved include a review of the status quo of conventional and emerging membrane processes in biorefinery applications, a consideration of potentials and challenges in pre-treatment, fouling and cleaning, and a guidance on integration possibilities of emerging membrane technologies in the pulp and paper industry. The intensive exchange of experts on a national and international level is integrated into the results.

Due to the complexity and inhomogeneity of process- and wastewater in the pulp and paper sector, certain challenges for future membrane applications remain. Research needs around topics such as selectivity, product purification, process stability and flexibility will continue to exist in the future. Specifically, the consortium sees a need for action in the areas of sustainable and advanced membrane development and production, material/manufacturing/modification innovations at technical scale, improvement of selectivity by decoupling transport driving forces, effective combined physical and chemical membrane cleaning protocols and determination of optimal operating conditions in terms of hydrodynamics, and many more.

3 Ausgangslage

Im Rahmen des Wandels von einer auf fossilen Rohstoffen basierenden Industrie zu einer erneuerbaren Industrie wird ein großer Fokus auf Bioraffinerie-Ansätze gelegt. In Europa und Österreich haben in den letzten Jahren mehrere Bewegungen in Richtung biobasierter Wirtschaft die Bedeutung dieses Bereichs gezeigt. Ein wichtiges Ziel der EU und Kommissar des Europäischen Green Deals¹ ist es, die Umweltverschmutzung auf null zu reduzieren. Dies beinhaltet eine Chemikalienstrategie für mehr Nachhaltigkeit. Die Herstellung und Verwendung sicherer und nachhaltiger Chemikalien soll auch biobasierte Chemikalien umfassen. Die europäische Green-Deal-Strategie zielt auf eine nachhaltige, klimaneutrale und kreislauforientierte Wirtschaft in Europa bis 2050 ab. Im März 2020 wurde der neue Aktionsplan zur Kreislaufwirtschaft (CEAP)² verabschiedet, der mehrere Ziele für den grünen Wandel in Europa festlegt. Auch auf nationaler Ebene wurde in Österreich die Bioökonomie-Strategie³ durch einen Aktionsplan aufgegriffen, der eine Orientierung für ein nachhaltiges Wirtschaftskonzept bis 2030 gibt, um Klimawandel, Nahrungsmittel- und Wasserknappheit sowie wachsende Umweltbelastungen zu bekämpfen.

Fossiler Kohlenstoff ist derzeit die dominierende Energie- und Chemiequelle, welche jedoch nur begrenzt verfügbar ist. Gleichzeitig ist reichlich Lignocellulose-haltige Biomasse verfügbar, die in Bioraffinerien als erneuerbare Ressource genutzt werden kann. Die Unterschiede zwischen fossilen Raffinerien und Bioraffinerien sind vielfältig. In fossilen Raffinerien wird ein flüssiges Feed-Material verwendet, das hauptsächlich aus Kohlenstoff- und Wasserstoffkomponenten und geringen Mengen an Stickstoff und Schwefel besteht. In der Erdölraffinerie wird als erster Schritt eine Destillation durchgeführt, die zur Aufspaltung in verschiedene Ströme wie leichtes und schweres Naphtha, Düsenkraftstoff und Dieselöl führt. Weitere Verfahren wie Cracken (zur Gewinnung "leichterer" Flüssigkeiten), Reformieren (Verbesserung von Qualität und Volumen), „Treating“ (zur Abtrennung unerwünschter Moleküle wie Schwefel, Stickstoff sowie von Schwermetallen) und Mischen als abschließender Prozess werden nacheinander angewendet.

Im Gegensatz dazu wird in einer Bioraffinerie auch feste Biomasse eingesetzt. Ein grober Weg führt von ganzen Holzstämmen über die Zerkleinerung zu Präkursoren zu Plattformchemikalien und schließlich zu Produkten und deren Anwendung. Entscheidende Faktoren für den Erfolg solcher Bioraffinerien sind energie- und kosteneffiziente Konzentrations- und Reinigungsschritte im industriellen Maßstab. Hochselektive und energieeffiziente neue Membrantechnologien wurden als Schlüsseltechnologien für künftige Bioraffinerien identifiziert. Lignocellulose-Biomasse (LCB) kann aus Reststoffen der Forstwirtschaft, der Landwirtschaft oder aus industriellen bzw. kommunalen Abfällen gewonnen werden. Lignocellulose-haltige Biomasse besteht aus einer sehr komplexen Struktur aus Cellulose, Hemicellulose und Lignin, was Bioraffinerieprozesse wie Vorbehandlung, Hydrolyse und Fermentation, aber auch die Trennung der Produkte zu einer Herausforderung macht. Daher ist es notwendig, Forschung hinsichtlich des Einsatzes neuartiger Technologien, wie emergierender Membranverfahren, zu betreiben, um langfristige Erfahrungen zu sammeln und Integrationsrichtlinien zu generieren. Zahlreiche Sektoren wie die Lebensmittel- und Getränkeindustrie, die biopharmazeutische Industrie, die Düngemittelindustrie (auf der Grundlage von Gülle, Gärresten und Klärschlamm), die Zellstoff- und Papierindustrie, die Biotechnologie und Biokunststoffe, die Abwasserbehandlung usw. können als Bioraffinerie betrieben werden, wenn sie mehr als nur eine Ressource bzw. ein Produkt nutzen. Mit dem steigenden Marktanteil biobasierter Produkte sind die Konzepte der Kreislaufwirtschaft für die

Industrie von hoher Relevanz. Dabei haben sich Bioraffinerien als explizit integratives, multifunktionelles Gesamtkonzept und wesentliche Drehscheibe in der Nutzung von Biomasse als Rohstoffquelle für die nachhaltige Erzeugung unterschiedlicher (Zwischen-) Produkte (Chemikalien, Wertstoffen, Energieträgern) etabliert. Neben den stark an Bedeutung gewinnenden Reststoffbioraffinerien, Ganzpflanzen- (Mais, Roggen) und grüner Bioraffinerie (Gras) ist eines der „ältesten“ angewandten Konzepte das der Lignocellulose- Bioraffinerie basierend auf Holz als Rohstoff.

In der Zellstoff- und Papierbioraffinerie können die Hauptbestandteile Cellulose, Hemicellulose und Lignin für folgende Produkte verwendet werden. Cellulose kann in Nanocellulose (z.B. als Verstärkungsmittel und Viskositätsmodifikator), Spezialpapieren und Verpackungen (als technisches Papier), grafischen Papieren, Gieß- und Trennpapieren (in Form von Texturen für Werkstoffe, Funktionsfolien), Faserverbundwerkstoffen (für Fahrzeugteile, Möbel, Lautsprecher) oder Chemiezellstoff (in Anwendungen für Textilien, Zellophan oder Arzneimittel) verwendet werden. Xylit, Furfural und Chemikalien aus Zuckern, die aus Hemicellulose gewonnen werden, können in kalorienarmen Süßungsmitteln, Zahnpasta oder recyclebarem Kunststoffen eingesetzt werden. Chemikalien aus Lignin finden Einsatzgebiete in Bindemittel, Dispersionsmittel oder Emulsionsstabilisatoren. Um einige weitere Alltagsprodukte einer Holzbioraffinerie zu nennen, finden sich Zusatzstoffe für Produkte oder Vorverarbeitungsschritte in Ketchup, Gurken, Zigarettenfiltern oder Vanillekeksen und Kaugummis. Die Hauptvorteile von Membrantrennverfahren sind unter anderem ihre hohe Selektivität und ihr geringer Energieverbrauch. Moderne Membranverfahren wie Umkehrosmose, Mikrofiltration, Ultrafiltration und Nanofiltration sind in zahlreichen industriellen Anwendungen etabliert, z.B. bei der Trennung, Aufkonzentrierung oder Reinigung. Aufgrund der großen Vielfalt an unterschiedlichen Bestandteilen Lignocellulose-haltiger Rohstoffe und deren Komplexität müssen Design, Betrieb und Integration an die jeweiligen Prozesse angepasst werden.

Im Rahmen des internationalen Annex XVII werden sowohl Potenziale als auch Herausforderungen des Einsatzes von Membranen in solchen Prozessen untersucht. Vorhandenes Wissen wird zusammengetragen, transferiert und zwischen industriellen und akademischen Partnern ausgetauscht. Österreich ist Teil des internationalen Konsortiums und leitet einen Subtask zu emergierenden Membranprozessen. IETS Annex XVII - Membranen in Bioraffinerien wird von Frank Lipnizky von der Universität Lund koordiniert. Ein früherer Annex lief von 2013 bis 2017, die Fortsetzung begann 2018 und wird bis zum Frühjahr 2022 laufen. Der etablierte Annex wird von einem Netzwerk von Expert:innen auf dem Gebiet energieeffizienter Membrantrennverfahren gebildet. Das Konsortium umfasst Partner aus Industrie und Wissenschaft aus Österreich, Dänemark, Deutschland, Portugal, Schweden, Italien, den Niederlanden und Frankreich. Im Rahmen des national finanzierten IEA TCP Annex 17 Projektes wurde neben dem vorliegenden publizierten Endbericht auch ein in englischer Sprache verfasster Leitfaden entwickelt. Ziel der Erstellung dieses Leitfadens war es, einen Überblick über die emergierenden Membrantechnologien zu geben, die bisher durchgeführten Maßnahmen darzustellen und den Know-how-Transfer innerhalb des internationalen Konsortiums einzubeziehen, einschließlich Integrationskonzepte von Membrananwendungen in Bioraffinerien, wie Vorbehandlungs- und Reinigungsansätze. Das Ziel dieses Leitfadens ist es, die Integration potenzieller Membrantechnologien in die Bioraffinerie zu unterstützen und zu ermöglichen. Dieser Leitfaden soll mögliche Integrationskonzepte von Membranen in Bioraffinerien sowie Empfehlungen für F&E, Technologieentwicklung, Forschung, Industrie und Entscheidungsträger geben.

4 Projektinhalt

4.1 Darstellung IETS Annex XVII - Membrane Processes in Biorefineries

Der IETS Annex XVII - Membrane processes in biorefineries wird unter der Leitung der Lund Universität LTH, Fakultät für Engineering durchgeführt. Der Annex Manager ist Frank Lipnizki, Deputy Manager ist Ann-Sofi Jönsson.

Industrial Energy-Related Technologies and Systems (IETS) ist ein Implementing Agreement (Durchführungsabkommen), das mit Unterstützung der Internationalen Energieagentur (IEA) eingerichtet wurde. Das IETS-Programm konzentriert sich auf die Energienutzung in einem breiten Spektrum von Industrie-sektoren und bündelt die Aktivitäten der IEA in diesem Bereich.

Die Industrie bietet ein erhebliches Einsparpotenzial durch die Senkung der Energiekosten. Die Arbeiten im Rahmen von IETS reichen von spezifischen Entwicklungen von Prozess- oder Energietechnologien bis hin zu Gesamtsystemaspekten, bei denen die Energieeffizienz ein wichtiger Bestandteil ist, für praktisch alle Arten von Industriezweigen. Aufgabe des IETS ist es, die internationale Zusammenarbeit zwischen OECD- und Nicht-OECD-Ländern zu fördern, um die Forschung und Technologieentwicklung im Bereich der industriellen Energietechnologien und -systeme zu beschleunigen.

4.1.1 Internationaler IETS Annex XVII - Membrane processes in biorefineries

Der IETS Annex XVII - Membrane processes in biorefineries ist in sechs Subtasks untergliedert. Diese reichen von Separation, über die Integration und Optimierung von Membranverfahren in Bioaffinerien, mit Fokus auf Fouling und Reinigungsstrategien, sowie Vorbehandlungsmethoden hin zu neuartigen, emergierenden Membranprozessen bis zur Wasser- und Abwasserbehandlung in Bioaffinerien. Die Bezeichnung der einzelnen Subtasks sowie deren Leitung sind wie folgt:

1. **Separation in biorefineries**
Subtask leader: **Knud Villy Christensen**, University of Southern Denmark (SDU), Denmark
2. **Integration and optimization of membrane processes in biorefineries**
Subtask leader: **Peter Czermak**, University of Applied Sciences Mittelhessen. Germany
3. **Fouling and cleaning in biorefineries**
Subtask leader: **Maria Norberta de Pinho**, Instituto Superior Técnico (IST), Portugal
4. **Pre-treatment of biomass process streams before membrane separation**
Subtask leader: **Tuve Mattsson**, Chalmers University of Technology, Sweden
5. **Emerging membrane processes (MD, FO, ED, VP, PV)**
Subtask leader: **Judith Buchmaier**, AEE - Institute for Sustainable Technologies (AEE INTEC), Austria
6. **Water and wastewater treatment in biorefineries**
Subtask leader: **Morten Lykkegaard Christensen**, Aalborg University, Denmark

Die mitwirkenden Partner des Annexes sind Forscher:innen aus der Wissenschaft, Membranhersteller und Industriepartner welche gemeinsames Interesse an dem Einsatz energieeffizienter Membranverfahren in Bioraffinerien teilen:

Aalborg University, AEE - Institute for Sustainable Technologies, Alfa Laval - Business Centre Membranes, Aquaporin A/S, Chalmers University of Technology, DTU - Technical University of Denmark, Ecohelix AB, Technical University of Lisbon, Kaffe Bueno, LiqTech International A/S, Lund University, National Research Council of Italy - Institute on Membrane Technology, Nordic Sugar AB, Novozymes A/S, Research Institutes of Sweden, Pentair, University of Twente, University of Applied Sciences Mittelhessen, Universidade NOVA de Lisboa, Umeå University



Abbildung 1: Darstellung der Logos teilnehmender Partner.

4.2 Projektziele des Annex 17 (nationale Ebene)

Der österreichische Annex 17 wurde in Anlehnung an den internationalen Annex erstellt, um im speziellen den Subtask E zu emergierenden Membranverfahren behandeln zu können. Mit dem IEA IETS TCP Annex 17 wurde das übergeordnete Ziel verfolgt, die Vernetzung der österreichischen Membran- und Bioraffinerie-Forschungslandschaft zu stärken und durch den Austausch mit dem internationalen Konsortium aus dem IEA Annex 17 durch energie- und kosteneffiziente Trenntechnologien eine optimierte Nutzung von Lignocellulose-haltigem Material in Bioraffinerien sicherzustellen. Im Rahmen der Subtasks A-F wurden in diesem Projekt verschiedene Membranverfahren bewertet, optimiert und integriert, sowie Strategien zur Biomasse Bestandteilsverwertung entwickelt.

Die Arbeitspakete des österreichischen Annexes waren in sieben Teilbereiche untergliedert:

- AP 1 Projektmanagement*
- AP 2 Verwertungsstrategie in Bioraffinerien*
- AP 3 Integration und Optimierung von Membranprozessen in Bioraffinerien*
- AP 4 Vorbehandlung von Prozess- und Abwasserströmen*
- AP 5 Emergierende Membranverfahren in Bioraffinerien*
- AP 6 Wasser- und Abwassermanagement in Bioraffinerien*
- AP 7 Know-how Transfer*

Technologische Zielsetzung im Rahmen des Annexes war es, emergierende Membranverfahren in Anwendungen der Papier- und Zellstoffbioraffinerie mit unterschiedlichen Prozessströmen zu betrachten und hinsichtlich deren Eignung der Separation oder Konzentration spezieller Komponenten zu evaluieren. Der Fokus lag dabei auf der Identifikation optimaler Prozessparameter sowie einer geeigneten Reinigungsstrategie zur Minimierung von Fouling. Durch den Einsatz von Trennverfahren (wie Membrandestillation (MD), Vorwärtsosmose (VO), Pervaporation (PV), Flüssigmembranpermeation (FMP) etc.) und der Integration von Abwärme sollte in Bioraffinerien der Ansatz nachhaltiger Verwertung von Abfallstoffen/Abfallströmen und einer Reduktion des Wasserbedarfs durch Kreislaufschließung aufgezeigt werden. Als Output des österreichischen Beitrags wurden ausgehend von den betrachteten Abwasser- und Prozessströmen aus der Papier- und Zellstofffabrik Leitlinien für den Einsatz von emergierenden Membrantrennverfahren in Bioraffinerien ausgearbeitet.

4.3 Vorgangsweise und Methodik

Im Vordergrund der Beteiligung am IEA IETS Annex 17 standen der Wissenstransfer und die internationale Zusammenarbeit innerhalb des Annexes. Darüber hinaus wurden ergänzende Arbeiten durchgeführt, deren Methodik beziehungsweise auf die Subtasks im Folgenden beschrieben wird:

Um Lösungsansätze für die Integration von Membranverfahren in Bioraffinerien identifizieren und bearbeiten zu können wurde zunächst in der methodischen Vorgehensweise konsolidiertes Wissen durch aktive Recherche von Literatur sowie einem Datenaustausch innerhalb des Konsortiums erarbeitet. Es erfolgte eine Erhebung des aktuellen Standes an nachhaltigen und energieeffizienten Trenntechnologien. Durch Erarbeitung einer einheitlichen Bewertungsmethode und Anwendung dieser, erfolgte ein Vergleich unterschiedlicher Verfahren sowie deren Bewertung für den Einsatz in Bioraffinerien in Form einer Bewertungsmatrix. (Arbeitspaket 2)

Um aktuelle Barrieren zur Anwendung von Membranverfahren in Bioraffinerien bestmöglich beseitigen zu können, wurden Fragestellungen rund um die Integration und Optimierung von Membranverfahren beleuchtet. Die Literaturrecherche als methodische Vorgehensweise zur Erhebung von Optimierungsmaßnahmen und darauf aufbauend durch den Einbezug bereits vorhandener Erfahrungen aus Forschung und Industrie dienten als Basis für Kriterien einer technisch-ökonomischen Bewertung unterschiedlicher Membranverfahren im Einsatz in verschiedenen Prozess- und Abwasserströmen in Bioraffinerien. Das Ergebnis wurde in Form einer Matrix dargestellt. (Arbeitspaket 3)

Da der Einsatz von Membrantechnologien in Bioraffinerien grundsätzlich von den Eigenschaften der Prozess- und Abwasserströme abhängig ist, erfolgt im methodischen Ansatz eine Qualifizierung und Quantifizierung von potentiellen Prozess- und Abwasserströmen in der Papier- und Zellstoffindustrie. Basierend auf Kenndaten und Know-how Austausch innerhalb des Konsortiums wurden technische Ansätze zur Kombination unterschiedlicher Verwertungsmethoden erarbeitet. In der Herangehensweise wurde versucht, die Leistung von emergierenden Technologien bestmöglich mit einer entsprechenden Vorbehandlungstechnologie zu verschränken. (Arbeitspaket 4)

In Anlehnung an bereits bestehende Integrationspunkte von Membrantechnologien in Bioraffinerien wurde die Einsatzfähigkeit von emergierenden Membranprozessen identifiziert. Es wurden die beiden Verfahren – Membrandestillation (AEE INTEC) und Flüssigmembranpermeation (TU Graz) – im Detail behandelt. Dies geschah im Rahmen von Testreihen an definierten Abwasserströmen, wobei Kenndaten für die Verfahren zur Einbindung in die Bewertungsmatrix und Vergleich des Standes der Technik mit emergierenden Verfahren generiert werden konnten. (Arbeitspaket 5)

Alle Erkenntnisse wurden als Endergebnis in Form eines Leitfadens zusammengeführt. Basierend auf den gesamten Aktivitäten die auf nationaler und internationaler Ebene im IEA IETS Annex 17 durchgeführt wurden, steht betreffenden Akteuren (aus Forschung, Industrie und Entscheidungsträgern) mit dem Leitfaden ein Überblick über Potenziale und Handlungsfelder für den Einsatz von emergierenden Membrantrennverfahren am Beispiel der Zellstoff- und/oder Papierfabrik zur Verfügung. (Arbeitspaket 6)

Wesentlich in der methodischen Vorgehensweise ist der Know-how Transfer zwischen dem internationalen Konsortium des Annex 17 und dem österreichischen. Wichtige Erkenntnisse, Erfahrungen und Ergebnisse wurden zwischen dem internationalen mit dem österreichischen Konsortium diskutiert

und ein Mehrwert für nationale weiterführende Aktivitäten im Bereich Membranverfahren und Bio-raffinerien kreiert. (Arbeitspaket 7)

Die im Laufe des Projektes verfolgte Methodik hat sich bewährt. Die Mischung aus aktuellem Stand der Technik in Literatur, mit der praktischen Durchführung von Versuchsreihen gemeinsam mit dem kontinuierlichen wissenschaftlichen Austausch innerhalb des Konsortiums wird als sehr effizient für die Projektergebnisse betrachtet.

5 Ergebnisse

Die im Annex 17 erreichten Ergebnisse und Erfahrungen wurden auch in englischer Version in einem Leitfaden Dokument „Guideline – Membranes in Biorefineries“⁴⁴ zusammengefasst und dargestellt. In den erreichten Ergebnissen spiegeln sich die im Rahmen des Annex 17 gesteckten Ziele wider, welche im groben die Erfassung vom Status Quo von herkömmlichen und emergierenden Membranverfahren in Bioraffinerie-Anwendungen, die Betrachtung von Herausforderungen bei Vorbehandlung, Fouling und Reinigung und Integrationsmöglichkeiten von emergierenden Membrantechnologien in der Zellstoff- und Papierindustrie sowie die Netzwerk- und Know-how-Transfer-Tätigkeiten beinhalten.



Abbildung 2: Darstellung von zusammengefassten und veröffentlichten Ergebnissen in „Membranes in Biorefineries – Guideline“

Die erzielten Ergebnisse im Überblick:

- Klassifizierte und quantifizierte Prozessströme sowie definierte Integrationspunkte für effiziente Trenntechnologien,
- Darstellung von aktuellem Stand sowie Herausforderungen von Verwertungsstrategien in Bioraffinerien
- Technisch-ökonomische Bewertung von hybriden Trennverfahren
- Vorbehandlungsmethoden für Prozess- und Abwasserströme, Methodik zur Identifikation der optimalen Vorbehandlungsmethode
- Kenndaten von emergierenden Membranverfahren, Bewertungsmatrix zum Vergleich der Kenn- und Leistungsdaten unterschiedlicher Technologien
- Leitfaden zur Integration von nachhaltigen und energieeffizienten Membranverfahren in Bioraffinerien
- Nationale Beiträge für internationale Berichte des Annexes, Nationale Beiträge in Branchenzeitschriften und Newslettern, Fachvorträge/Publicationen

5.1 Potentielle Prozessströme sowie definierte Integrationspunkte für effiziente Trenntechnologien in Bioraffinerien

Zu Beginn der Arbeiten in Annex 17, wurde der Stand der Technik in Bezug auf Herausforderungen in Bioraffinerien gescreent. Die Biomasse-Umwandlung (Konversion), Trennung und Reinigung können zu den Units zusammengefasst werden, in denen der größte Handlungsbedarf hinsichtlich ökologischer und ökonomischer Lösungen besteht. In diesen Prozessschritten wurden die derzeitigen Lösungen mit neuartigen Möglichkeiten verglichen und deren Potential dargelegt. Zudem wurden konkrete potentielle Prozess- bzw. Abwasserströme für weitere wertschöpfende Nutzung identifiziert. Dafür wurden qualitative und quantitative Parameter betrachtet. Im Austausch mit dem nationalen und internationalen Konsortium, im Dialog mit Industriepartnern und unter Zuhilfenahme von Literatur wurden Integrationspunkte für den Einsatz der im Projekt betrachteten emergierenden Membranverfahren identifiziert.

Die Bioraffinerie ist eine der wichtigsten Strategien der Kreislaufwirtschaft, um die „Closing-the-Loop“ Zielstellung von Rohstoffen aus forstwirtschaftlichen, landwirtschaftlichen, verfahrenstechnischen oder anderen Rückständen, Mineralien, Wasser und Kohlenstoff zu erreichen.

Eine der größten Herausforderungen für Bioraffinerien ist jedoch neben der effektiven Umwandlung der Biomasse, die Trennung und Reinigung der Produkte. Tatsächlich sind die Abtrennungs- und Reinigungsvorgänge der größte Faktor, der die Gesamtwirtschaftlichkeit von Bioraffinerien beeinflusst. Aus diesem Grund werden Trenntechnologien in einem zukünftigen Szenario der Kreislaufwirtschaft immer wichtiger. Fortschrittliche Trenntechnologien sind Schlüsselprozesse im neuen Aktionsplan der Kreislaufwirtschaft (CEAP II), einem der wichtigsten Bausteine des europäischen Green Deal, Europas neuer Agenda für nachhaltiges Wachstum.

Der Stand der Technik von Separationstechniken, welche derzeit im Bioraffineriesektor am häufigsten Anwendung finden, wird im Folgenden kurz dargestellt und zeigt die Wichtigkeit von Membrantechnologien.

Destillation ist ein Hauptkandidat für die Reinigung von Endprodukten mit niedrigem Molekulargewicht, allerdings ist sie nicht für hochsiedende Komponenten geeignet, insbesondere wenn diese stark funktionalisiert und damit temperaturempfindlich sind. Außerdem ist die Destillation generell ein sehr energieintensiver Prozess, wobei die Extraktiv Destillation (ED) mit Ionischen Flüssigkeiten (IF), die vielversprechendste Technik der Destillation, zusätzlich den Nachteil des hohen Preises der IF hat.

Auf Affinität basierende Trennverfahren werden häufig bei der Entfernung von sauren Gasen aus Synthesegas vor der weiteren Umwandlung in Methanol und Dieselkraftstoff oder bei der CO₂-Abscheidung eingesetzt. Die Selektivität des Extraktionsmittels ist jedoch teilweise nicht für hochreine Produkte geeignet und kann sogar Verunreinigungen adsorbieren. Ein weiterer kritischer Punkt bei diesen Methoden ist das Konzept der Sorptionsmittelrückgewinnung, das zusätzliche Energie- und Betriebskosten verursacht.

Fest-Flüssig-Methoden wie Fällung und Kristallisation sind ebenfalls weit verbreitet, z. B. bei der Proteinausfällung. Sie weisen gute Trennfaktoren auf und funktionieren gut bei niedrigen Temperaturen für thermisch labile Verbindungen. Sie werden jedoch unter Zugabe eines Fällungsreagens betrieben, wie z. B. die Rückgewinnung von Hemicellulosen aus der Vorhydrolyse und das Ablaugen durch Ethanol-Fällung oder die Zugabe von Ammoniumsulfat zur Ausfällung von Proteinen. Die Zugabe dieses Mittels kann kostspielig sein, insbesondere wenn die Konzentration des Produkts niedrig ist. Zusätzlich kann die erreichbare Produktreinheit dadurch beeinträchtigt werden. Eine Rückgewinnung des Fällungsmittels ist auch mit zusätzlichen Betriebskosten verbunden.

Als Alternative sind Membranfiltrationsverfahren als fortschrittliche Trenntechnologien von großer Bedeutung. Aufgrund ihrer Vielseitigkeit, der Trennleistung, der Energieeinsparungen und der wirtschaftlichen Vorteile von Membranverfahren gewinnt ihr Einsatz in Bioraffinerien immer mehr an Bedeutung. Bereits in großem Umfang in Bioraffinerien eingesetzt werden Membrane zur

- Vorbehandlung von Abfällen,
- Enzymrückgewinnung,
- Recycling und Konzentration von Mikroorganismen bei der Fermentation,
- Entfernung von Inhibitoren usw.
- In der Form von Membranbioreaktoren, in denen die Umwandlung der Biomasse und die Trennung gleichzeitig stattfinden.

Die Vielzahl der verfügbaren traditionellen und emergierenden Membranverfahren sowie die intensive Materialforschung im Bereich der funktionalisierten Membranen eröffnen neue Anwendungen und Möglichkeiten, die derzeitigen Stand-der-Technik (SdT) -Trennverfahren zu ersetzen.

Alle Autoren und die im Rahmen dieses Berichts durchgesehene Literatur kommen zu dem Schluss, dass die größte Herausforderung für die Membranverfahren in Bioraffinerien das Fouling ist. In diesem Zusammenhang werden nicht nur neue Materialien oder Modifikationstechniken für bessere Anti-Fouling-Eigenschaften benötigt, sondern auch Kenntnisse über die in den Strömen vorhandenen Verunreinigungen und Foulants. Solche Verunreinigungen können auch eine Anpassung und Optimierung der Membranprozesse erfordern, um einen langfristig stabilen Betrieb zu ermöglichen.

Es wurden konkrete Ströme aus der Papierindustrie hergenommen und die für die Anwendung von emergierenden Membranverfahren wichtigen Inhaltsstoffe hervorgehoben, um das Potential des Einsatzes zu evaluieren. Zusätzlich wirken sich auf die Eignung von Membranverfahren verschiedene Faktoren aus, darunter die Eigenschaften des Einsatzmaterials, Membraneigenschaften, Betriebsbedingungen und die Art der Vorbehandlung.

Was die Eigenschaften des Feeds (Prozess- oder Abwasserstrom) betrifft, so kann das Vorhandensein von Verbindungen wie extrazellulären polymeren Substanzen (EPS), löslichen mikrobiellen Produkten (SMP) und gelösten anorganischen Stoffen ein Fouling der Membran verursachen. Bei den meisten Membranverfahren ist der Feststoffgehalt nicht so ausschlaggebend, wie die Wechselwirkung der Feststoffe untereinander und mit der Membran. Einige Feststoffe können beispielsweise eine poröse Fouling-Schicht (d. h. eine Kuchenschicht) bilden, die unabhängig von TSS oder Trübung ideal für die direkte Filtration ist. Andere Feststoffe hingegen können selbst bei geringer Trübung oder TSS eine dichte Verschmutzungsschicht bilden, die dem Durchfluss einen erheblichen Widerstand entgegengesetzt.

Als Ausgangspunkt für die Integration der betrachteten Membranverfahren wurden in Tabelle 1

Beispiele für potentielle Prozess- und Abwasserströme aus der Zellstoff- und Papierindustrie werden in Tabelle 1 zusammengefasst. Es werden im Folgenden die anfallenden Mengen und die Zusammensetzung als Basis für die Integration von Membranverfahren beispielsweise in den Strömen Schwarzlauge aus dem Kraft Prozess, Sulfit Lauge, sowie Schlämme und Bleich(ab)wässer dargestellt. Die Zusammensetzung beinhaltet nicht die vollständige Aufschlüsselung, sondern lediglich die, welche für den Einsatz der Membranverfahren in Hinsicht auf Aufbereitungsziele, Fouling, Reinigung und Vorbehandlung als entscheidende Inhaltsstoffe im jeweiligen Medium angesehen werden. Die Auflistung fand auf Basis von Literatur sowie einer bereits durchgeführten Case Study bei AEE INTEC statt.

Tabelle 1: Überblick über Prozess- und Abwasserströme als potenzielle Integrationspunkte für neu entstehende Membranverfahren. (Die Tabelle zeigt nicht die Gesamtzusammensetzung, sondern nur die Komponenten der jeweiligen Rohstoffe, die für die betrachtete Anwendung von Interesse sind.)

Medium	Anfallende Menge	Zusammensetzung	Quelle
Schwarzlaug (Kraftprozess)	13 Mrd. Tonnen pro Jahr weltweit	31 wt% Lignin, 29 wt% organische Säuren, 7 wt% andere organische Verbindungen, 33 wt% anorganische Komponenten (basierend auf Trockenmasse)	5, 6
		127-210 g/l Trockengehalt, 40-71 g/l Lignin, 20-43 g/l organische Säuren	6, 7
		12 - 15 g/L Feststoffgehalt, 0,1 – 30 % Hemicellulosen, 0,6 - 71 g/L Lignin, 1 – 6 wt % Gesamtzucker	26
Sulfit Ablauge (Spent Sulphite Liquor SSL)	90 Mrd. Tonnen pro Jahr weltweit	128 – 220 g/L Feststoffgehalt, 15 – 22% Hemicellulosen, 50 – 120 g/L Lignin, 7,5 – 60 g/L Gesamtzucker, 137 g/l Lignosulfonat	8, 9, 26
Papierschlamm (Paper Mill Sludge PMS)	99 Millionen Tonnen Papier in Europa davon 11 Millionen Tonnen Abfall. 23.4 % PMS per a unit of paper produced ¹⁰	30.6% Cellulose, 8% Lignin, 12.1% Zucker, 41.6% anorganische Materialien (Al, Si, Ca, Cu, Fe, oder Mg)	11, 12
Bio-Schlamm aus dem Kraft Prozess	80% des gesamten Zellstoffs	43.9 wt% Glucan, 9.4 wt% Xylan, 22.5 wt% Protein, 6.4 wt% Asche (P, Fe, K, Mg, Mn) (in % Trockenmasse)	13
Bleich(ab)-wasser (TS Aufkonzentrierung; CSB Reduktion Abwasser)	50 kg/t Lutro bei CS	0,66 – 1% TS, 6.000 mg/L CSB, Cl 40 mg/l, 100-400 mg/l Faser	Industrie, Case Study AEE INTEC

Eines der Ziele der Arbeiten in Annex 17 war es, Integrationsbeispiele von Membrantechnologien als Teil von Bioaffinerien aufzuzeigen. Daher wird hier die Integration eines Pervaporationsverfahren in der Anwendung der Zellstoff- und Papierindustrie als Beispiel dargestellt:

TNO, die niederländische Organisation für angewandte wissenschaftliche Forschung, präsentierte ein Beispiel für die Integration von Nanofiltrations- und Pervaporationsmembranen zur Verbesserung der Fraktionierung von Lignocellulose-haltiger Biomasse. Ihr patentiertes Verfahren befasst sich mit der Abtrennung von Lignin und monomeren Zuckern aus einem Flüssigkeitsstrom, beispielsweise aus dem Organosolv-Verfahren, das aus Wasser und einem organischen Lösungsmittel besteht. Der Vorteil dieses Verfahrens gegenüber den herkömmlichen Verfahren (Fällung und Zentrifugation/Dekantieren/Filtration in kleinem Maßstab) und der Destillation in großem Maßstab ist der geringere Energiebedarf und damit eine Kostenreduzierung. Außerdem können beide Fraktionen, Lignin und monomere Zucker, wie die Organosolv-Flüssigkeit, weiterverwendet werden. Die Nanofiltrationsmembran kann aus einem keramischen Träger und einer polymeren Deckschicht bestehen, die aus sulfoniertem Polyetheretherketon besteht. Für den Pervaporationsschritt können beliebige wasserselektive Membranen wie polymere Membranen auf Polyvinylalkoholbasis, Membranen auf Polyimidbasis, Zeolithmembranen, Silikamembranen oder organisch-anorganische Hybrid-Silikamembranen verwendet werden¹⁴.

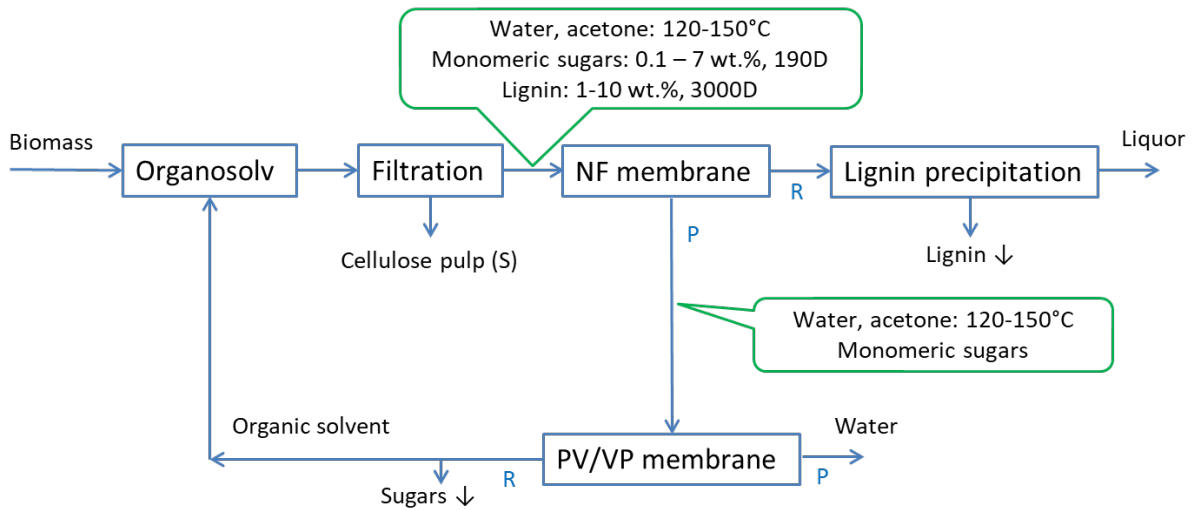


Abbildung 3: Schema des 2-stufigen TNOs-Verfahrens (Nanofiltration + Pervaporation/ Dampfpermeation) zur Lignocellulosefraktionierung (Quelle: TNO)

5.2 Kenn- und Leistungsdaten unterschiedlicher Membrantechnologien

Zur Evaluierung des potentiellen Einsatzes von Membrantechnologien in Bi Raffinerien wurden neben dem Fokus auf Bi Raffinerieanwendungen und deren potentiellen Prozess- und Abwasserströmen auch eine Zusammenfassung von Kenn- und Leistungsdaten der Membranverfahren erstellt. Auf Basis definierter Kriterien wurde eine Matrix entwickelt zur Bewertung der Eignung einer Technologie im jeweiligen Einsatzgebiet.

In Tabelle 2 werden zusammenfassend emergierende Membrantechnologien wie die Membrandestillation und Pervaporation mit Stand-der-Technik Verfahren wie Mikrofiltration, Ultrafiltration, Nanofiltration und Umkehrosmose dargestellt. Der entscheidende Unterschied der emergierenden und konventionellen Membrantechnologien liegt in der treibenden Kraft und dem damit verknüpften Trennprinzip. Die treibende Kraft in Stand der Technik Membranverfahren MF, UF, NF und RO ist die Druckdifferenz, wobei die angelegten Drücke in genannter Reihenfolge vom einstelligen in den dreistelligen bar-Bereich steigen (2-150 bar). Die Separation/Konzentration bei Pervaporation und Membrandestillation basiert hingegen auf unterschiedlicher Partialdampfdruckdifferenz zwischen der Feed- und Permeatseite. Einhergehend mit unterschiedlichen Abtrennungs- bzw. Aufbereitungsgraden unterscheiden sich die Technologien in Membranmaterialien, -struktur, und -dicke, sowie in der Porosität bzw. der Porengröße. Die Membranen können in flacher (Platten-, Spiralwickelmodul) oder rohrförmiger Weise (Hohlfaser-, Kapillar, Rohrmodul) in unterschiedlichen Modulkonfiguration verarbeitet sein. Die Anwendungen reichen von der klassischen Meerwasserentsalzung bis hin zur selektiven Abtrennung wertvoller Komponenten in unterschiedlichen Industriespaten.

Tabelle 2: Überblick von Eigenschaften der derzeit eingesetzten Membrantrennverfahren in Bioraffinerien (15, 16, 17, 18, 19, 20, 21)

Technologie	Membrandestillation (MD)	Pervaporation (PV)	Mikrofiltration (MF)	Ultrafiltration (UF)	Nanofiltration (NF)	Umkehrosmose (UO)
Treibende Kraft	Dampfdruckdifferenz <small>Fehler! Textmarke nicht definiert.</small>	Partialdampfdruckdifferenz	Druck <2 bar	Druck 1-10 bar	Druck 5-35 bar <small>Fehler! Textmarke nicht definiert.</small>	Druck 15-150 bar
Trennprinzip	Dampf-Flüssigkeits-Gleichgewicht	Lösungsdiffusionsmechanismus	Siebmechanismus	Siebmechanismus	Lösungsdiffusionsmechanismus	Lösungsdiffusionsmechanismus
Membranstruktur	Symmetrische oder asymmetrische poröse Membrane	Homogene- oder Verbundmembrane	Symmetrisch oder asymmetrisch poröse Membrane	Asymmetrisch poröse Membrane	Verbundmembrane	Verbundmembrane
Membranomaterial	Hydrophobes Polymer	Polymer, Keramik, organisch-anorganisch	Polymer, Keramik	Polymer, Keramik	Polymer	Organische Polymere (Cellulose- und Polyamidderivate)
Membrandicke (µm)	20–100	~0,1 oder geringer (oberste Schicht)	~10-150	~150	Oberste Schicht: ~150 Untere Schicht: ~1	150
Porengröße (nm)	10–5.000	Nicht porös (dicht)	~50–10.000	~1–100	<2	0,1-1
Modulkonfiguration	Plattenmodul, Rohrmodul, Kapillarmodul	Plattenmodul, Rohrmodul, Hohlfasermodul	Plattenmodul, Rohrmodul, Hohlfasermodul	Plattenmodul, Rohrmodul, Spiralwickelmodul, Hohlfasermodul, Kapillarmodul	Plattenmodul, Rohrmodul, Spiralwickelmodul	Plattenmodul, Rohrmodul, Spiralwickelmodul, Hohlfasermodul
Anwendungsbeispiele	Rückgewinnung wertvoller Komponenten aus Abwässern; Herstellung von destilliertem Wasser; ...	Prozesswasseraufbereitung; Entwässerung von org. Lösemitteln; ...	Klärung & Konzentrierung in der Getränkeindustrie; Rückgewinnung von Lignin, Hemicellulose und Enzymen; ...	Trennung von Öl/Wasser-Emulsionen; Rückgewinnung von Lignin, Hemicellulose und Enzymen; ...	Filtration von Säuren und Laugen <small>Fehler! Textmarke nicht definiert.</small> ; Rückgewinnung von Lignin, Hemicellulose und Entfernung von Fermentationshemmer; ...	Meer- und Brackwasserentsalzung; Rückgewinnung von Lignin, Hemicellulose und Entfernung von Fermentationshemmer; ...

Eine umfassende Literaturrecherche zum Einsatz der Membranverfahren Membrandestillation (MD), Flüssigmembranpermeation (FMP), Pervaporation (PV) und Vorwärtsosmose (VO) in der biobasierten Industrie wurde durchgeführt. Aus der Vielfalt an möglichen Bioraffinerieanwendungen wurden die Prozessabläufe der Papier- und Zellstoffindustrie im Detail hinsichtlich des Potentials der Anwendung einer der vier betrachteten emergierenden Membrantrennverfahren zur Gewinnung wertvoller Komponenten analysiert. (Im Folgeprojekt des Annex wird der Bereich von Papier- und Zellstoffindustrie auf weitere Bioraffinerieanwendungen ausgeweitet.) Der Zellstoffaufschluss, welcher je nach verwendeter Holzart als Sulfitkochverfahren (Bisulfitverfahren) oder als alkalisches Sulfitkochverfahren (Kraft-Verfahren) durchgeführt werden kann, ist ein wesentlicher Prozess Abschnitt, da die Hälfte des eingesetzten Rohstoffes Holz in wasserlösliche Verbindungen überführt wird, welche sich schlussendlich in der Ablauge wiederfinden²². Zusätzlich befinden sich darin auch Kochchemikalien, welche aber zu mindestens 99 % rückgewonnen werden können²³. Die Gewinnung von organischen Verbindungen wurde selten untersucht, da sie oftmals aufgrund ihrer geringen Konzentrationen und der Anwesenheit von anorganischen Verbindungen schwer zu separieren sind²⁴. Die Kenn- und Leistungsdaten zur Abtrennung/Aufkonzentrierung wertvoller Inhaltsstoffe wurden für die folgenden Stoffe gesammelt: Lignin, Lignosulfonate, Glucose, Essigsäure, Methanol, Vanillin, Furfural, Harze und Fettsäuren. Die in Kapitel 5.5 beschriebene Bewertungsmethodik wurde mit diesen Daten angewandt. Details dazu finden sich in J. Reßler, 2019²⁵.

5.3 Herausforderungen bei dem Einsatz von Membranverfahren in Bioaffinerieansätzen

Die größten Einschränkungen von Membranverfahren in sämtlichen Bereichen, einschließlich Bioaffinerien, sind das Fouling und die Reinigung der Membranen. Daher ist es ein Ziel der Vorbehandlung, Fouling zu vermeiden und/oder zu minimieren, die Reinigungs- und Austauschkosten der Membrane zu senken und indirekt die Permeatqualität zu verbessern. Aus diesem Grund legen die Hersteller für ihre Produkte bestimmte Wasserqualitätsgrenzwerte fest (die durch die Vorbehandlung erreicht werden sollen), um 1) irreversibles Fouling zu verhindern, 2) die Reinigungshäufigkeit niedrig zu halten und 3) die Lebensdauer der Membran zu erhöhen. So wird beispielsweise bei Wasserentsalzungsanlagen mit Umkehrosmose allgemein davon ausgegangen, dass eine Vorbehandlung ausreicht, wenn die Membran nur 3 bis 4 Mal pro Jahr oder weniger gereinigt wird. Verschiedene Faktoren wirken sich auf das Fouling der Membranen aus, darunter die Eigenschaften des Feedstromes, die Eigenschaften der Membranen, die Betriebsbedingungen und die Art der Vorbehandlung. Auf diese wird im Folgenden etwas detaillierter eingegangen:

5.3.1 Fouling

Feed Eigenschaften

Was die Eigenschaften des Feeds betrifft, so kann das Vorhandensein von Verbindungen wie extrazellulären polymeren Substanzen (extracellular polymeric substances, EPS), löslichen mikrobiellen Produkten (soluble microbial products, SMP) und gelösten anorganischen Stoffen ein Fouling der Membran verursachen. Bei den meisten Membranverfahren ist die Anzahl der Feststoffe nicht so wichtig wie die Wechselwirkung der Feststoffe untereinander und mit der Membran.

Bei der direkten Filtration von Abwässern aus der Zellstoff- und Papierindustrie sind beispielsweise organische und anorganische Verschmutzungen der Membran die vorherrschenden Mechanismen, da Holzhydrolysat verschiedene Substanzen enthält, darunter Kohlenhydrate, Extrakte und Lignin²⁶. Bei der Rückgewinnung, Fraktionierung und Reinigung von Lignin und Hemicellulosen aus Holzhydrolysaten mittels UF wird von einer hohen Foulingneigung berichtet²⁷. Holzhydrolysate enthalten Hemicellulosen, Lignin und Holzextrakte, wie Fett- und Harzsäuren, wobei Lignin der wichtigste Verschmutzungsfaktor ist, weshalb sich eine Vielzahl an Vorbehandlungsstrategien auf dessen Beseitigung vor der UF konzentrieren.

In dem Zellstoff- und Papierreview Paper von Bokhary et al. ²⁶ über Strategien zur Vermeidung und Kontrolle von Membranverschmutzung geben die Autoren detaillierte Informationen über die Eigenschaften typischer Zellstoff- und Papierabwässer wie Schwarzlauge oder Sulfit Abwässern.

Tabelle 3: Verschiedene Eigenschaften von Zellstoff- und Papierabwässern und Prozesswässern

	Sulfit Ablaugen	Schwarzablaugen	Pre-hydrolysis Li- quor (PHL)	Prozesswasser aus dem ther- momechanischen Aufschluss
pH	1,7 – 3,4	12 – 14	3,5 – 4,5	3,3 – 6,5
Gesamtzucker (g/l)	7,5 – 60	1 – 6 wt %	0,6 – 50,33	0,090 – 1,9
Lignin (g/l)	50 – 120	0,6 – 71	0,10 – 10,2	0,8 – 3,5
Hemicellulose (g/L)	15 – 22%	0,1 – 30	0,5 – 25,92	0,8 – 1,5
Gesamtfeststoffgehalt (g/l)	128 – 220	12 – 15	80,5	3,3 – 4,9

(modifiziert aus Bokhary et al., 2018 ²⁶)

Bokhary et al. ²⁶ kommen zu ähnlichen Schlussfolgerungen wie Koivula et al. ²⁷ hinsichtlich der Beschaffenheit der verschiedenen Zellstoff- und Papierabwässer: Insgesamt sind Holzextrakte die Hauptverschmutzungsart in Membranprozessen. Dabei handelt es sich insbesondere um lipophile Extrakte (Fettsäuren, Harzsäuren, Sterole usw.), die sich durch ihre hydrophobe Beschaffenheit und ihre negative Ladung in einem weiten pH-Bereich (d. h. 2-11) auszeichnen. Hemicellulosen sind ebenfalls hydrophob, ebenso wie Lignin, das jedoch unter alkalischen Bedingungen, wie es in der Schwarzlauge vorkommt, hydrophil wird.

Betriebsbedingungen

Die Ermittlung optimaler Prozessbedingungen ist aufgrund der Komplexität des Fouling-Phänomens und aller Faktoren, die dabei eine Rolle spielen, eine anspruchsvolle Aufgabe. In der Literatur wurden in den meisten Studien die Auswirkungen von Temperatur, Druck, Geschwindigkeit und Volumenreduktionsfaktor/Rückgewinnungsfaktor untersucht. Im Allgemeinen trägt die Verbesserung der hydrodynamischen Bedingungen durch höhere Geschwindigkeiten zur Verringerung der Polarisierungseffekte und des Foulings bei, während eine Erhöhung des Volumenreduktionsfaktors dem Fouling abträglich sein kann. Die Temperatur hat eine konträre Wirkung gezeigt, da sie einerseits den Permeatfluss steigern, andererseits aber z.B. die Flockengröße verringern und damit den Filtrationswiderstand und die Verschmutzung erhöhen kann.

Die verschiedenen verfügbaren Membranen haben zusätzliche Einschränkungen in ihrem Betrieb. Diese Betriebsgrenzen hängen mit dem Membranmaterial zusammen, wirken sich auf ihre Lebensdauer aus und können die Wahl der Vorbehandlung einschränken.

Celluloseacetat (CA), das für RO-, NF- und UF-Anwendungen verwendet wird, hat beispielsweise Einschränkungen in Bezug auf pH-Wert und Temperatur. Es hat auch eine geringe Resistenz gegen Biofouling, da es von den Mikroorganismen als Substrat genutzt werden kann. Polysulfon (PSO), das auch in UF- und MF-Anwendungen eingesetzt wird, ist außergewöhnlich temperatur- und pH-beständig. Aus diesem Grund wird PSO hauptsächlich in der Lebensmittel- und Milchwirtschaft eingesetzt. Allerdings verträgt Polysulfon keine Öle, Fette und polare Lösungsmittel. Der Hauptvorteil von Polyvinylidenfluorid (PVDF) ist seine hohe Beständigkeit gegen Kohlenwasserstoffe und oxidierende Umgebungen. Neue Komposit- (thin-film-composit, TFC) oder Dünnschichtmembranen (TFM) haben eine gute Temperatur- und pH-Beständigkeit, vertragen aber keine oxidierende Umgebung. Auch wenn die spezifische Zusammensetzung proprietär ist, besteht eine Dünnschicht-Komposit Membran im Allgemeinen aus einer PSO-Membran als Träger für die sehr dünne Membranschicht, die in situ auf der PSO-UF-Membran polymerisiert wird. Andere Materialien wie Polyacrylnitril (PAN), keramische Materialien (SiO_2) und Cellulose (hydrolysiertes Celluloseacetat) werden ebenfalls zur Herstellung von Membranen verwendet.

Die folgende Tabelle zeigt die chemische Beständigkeit einiger dieser Membranmaterialien. Sie wurde aus dem Membrane Filtration Handbook Practical Tips and Hints, veröffentlicht von Osmonics im Jahr 2001²⁸ übernommen.

Tabelle 4: Chemische Beständigkeit einiger Membranmaterialien. Modifiziert nach Wagner, 2001²⁸.

	Komposit	CA	PSO	PVDF	PAN	SiO ₂	Cellulose
3 < pH ¹ < 8	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
pH<3 oder pH>8	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓
Temp >35°C	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓
Huminsäuren	(✓)	✓	✗	✗	(✓)	✗	✓
Proteine	✓	(✓)	✓	(✓)	(✓)	✓	✓
Polysaccharide	(✓)	✗	✓	✗	(✓)	✓	✗
Aliphatische Kohlenwasserstoffe	✗	✗	✗	(✓)	✓	✓	✓
Aromatische Kohlenwasserstoffe	✗	✗	✗	✓	✗	✓	(✓)
Oxidationsmittel	✗	(✓)	✓	✓	(✓)	✓	(✓)
Ketone, Ester	✗	✗	✗	✓	✗	✓	(✓)
Alkohol	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓

- ✓ hohe Beständigkeit
- (✓) Angaben beruhen auf der Theorie oder praktische Ergebnisse als zweifelhaft erwiesen
- ✗ geringe Beständigkeit

Im Hinblick auf die spezifischen Membranverfahren (d. h. UF, RO usw.) fasst Abbildung 4 einige der für die verschiedenen Membranverfahren spezifischen Wasserqualitätsanforderungen zusammen. Diese Anforderungen werden von den Herstellern diktiert und hängen von vielen Membraneigenschaften ab. Das Diagramm enthält Beispiele für kommerzielle Produkte von Dupont (US) und Mega (CK).

¹ Die von den meisten Membranherstellern angegebenen pH-Beschränkungen sind in Wirklichkeit die Beschränkungen, die durch die Gesamtmembranconfiguration oder das Membransystem und nicht durch das Membranmaterial selbst gegeben sind; das schwächste Material im gesamten System bestimmt die Beschränkung. Zum Beispiel sind PE-Backer-Materialien nur begrenzt beständig gegen hohe pH-Werte.

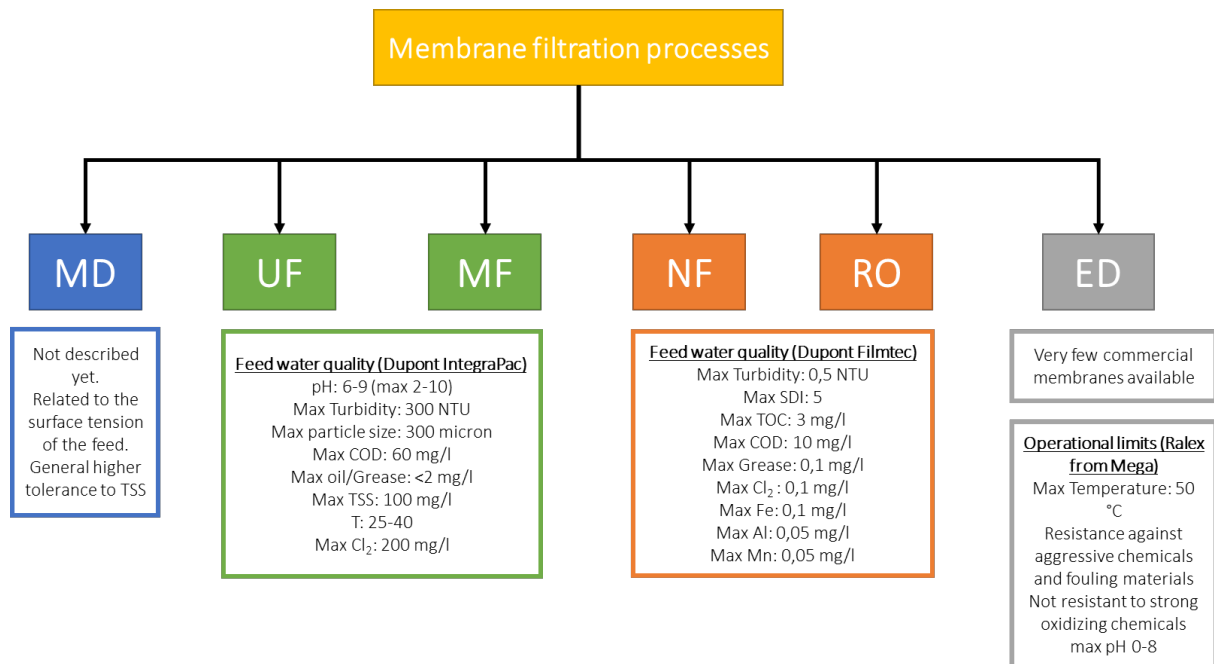


Abbildung 4: Typische Feed-wasserqualität und/oder Betriebsgrenzen für verschiedene Membranverfahren (MD, UF, MF, NF, RO, ED).

5.3.2 Reinigung

Reinigungsvorgänge sind in Membranprozessen unvermeidlich. Die Planung und Gestaltung geeigneter Reinigungsverfahren sind von größter Bedeutung. Ziel der Reinigung ist die Wiederherstellung der Flusskapazität des Systems und die Entfernung von Verschmutzungen/Ablagerungen/Biofouling ohne Beschädigung der Membran oder anderer hitze- und chemikalienempfindlicher Teile (z. B. Dichtungen).

Die Parameter, die die Reinigungseffizienz verbessern (vorausgesetzt, die Membran und das System werden nicht beschädigt), sind: Temperatur, Druck und Durchflussmenge, Konzentration der Reinigungsmittel und Verweilzeit.

Die Temperatur verringert die Viskosität der Reinigungslösung und erhöht ihre Turbulenz, wodurch sich die Reaktionsgeschwindigkeit der Reinigungsmittel (d. h. die Proteinhydrolyse) erhöht. Abhängig von den Fouling-Eigenschaften kann sich eine Temperaturerhöhung während der Reinigung jedoch nachteilig auswirken, da beispielsweise Carbonate bei höheren Temperaturen ausfallen und einige Proteine denaturiert werden können, was das Fouling-Problem verschlimmert. In jedem Fall wird bei komplexen Gemischen empfohlen, spezifische Reinigungsmittel zu verwenden bzw. saure und alkalische Lösungen zu kombinieren, um die Ausfällung von Mineralien (saure Lösungen) zu vermeiden und die Solubilisierung von Proteinen (alkalische Lösungen) zu fördern.

Bei der Reinigung ist nicht nur die Art der Reinigungsmittel wichtig, sondern auch Konzentration und Reihenfolge der Anwendung bestimmen die Qualität der Behandlung. So ist es beispielsweise in der Milchindustrie üblich, nach einer alkalischen Wäsche mit Säure zu reinigen, da die umgekehrte Reihenfolge bei Kasein zu Proteinaggregation führen würde.

In Bezug auf Druck und Strömungsgeschwindigkeit sollte bei der Reinigung mit einem niedrigen Transmembrandruck und einer möglichst hohen Querströmungsgeschwindigkeit gearbeitet werden, um die Bildung zusätzlicher Kuchenschichten während des Reinigungsprozesses zu begrenzen ²⁸.

5.3.3 Vorbehandlung

Das Management des Membran-Fouling durch die Einbeziehung von Vorbehandlungsmethoden hat in der Membrantechnologie zunehmend an Popularität gewonnen ²⁶, da sie nicht nur das Fouling verhindern oder verzögern, sondern auch die Permeatleistung und -qualität potenziell erhöhen können.

Die meisten Beispiele für vorgeschlagene Vorbehandlungsstrategien zur Verringerung des Membran Fouling, die in der Literatur zu finden sind, beziehen sich auf druckgetriebene Membranverfahren (hauptsächlich UF) und die Zellstoff- und Papierindustrie ²⁹. Für andere Membrantrenntechnologien wie FO ³⁰, oder andere Sektoren der Bioraffinerien wie Algenanbau/-ernte ³¹ oder Biogasgärreste ³² finden sich nur wenige Beispiele.

Die Vorbehandlung vor der Membranfiltration ist äußerst wichtig, und die Art und Gründlichkeit der Vorbehandlung ist in vielen Fällen ausschlaggebend für die Gesamtleistung der Anlage. Eine gute Vorbehandlungsstrategie lässt sich in diese 3 Schritte zusammenfassen.

- Beseitigung schädlicher Schwebstoffe
- Entfernung von Oxidationsmitteln
- Verhinderung von Ausfällungen in der Anlage (gilt auch für den Betrieb der Anlage)

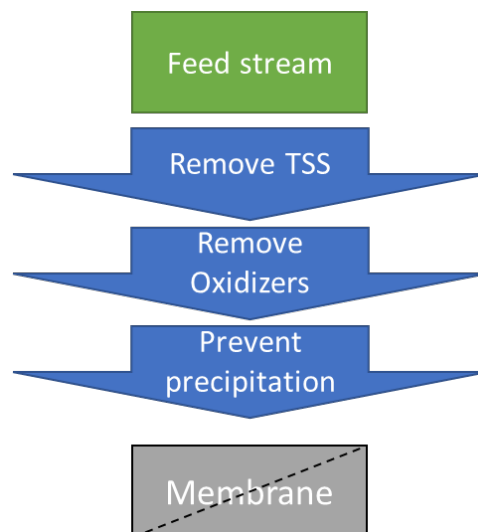


Abbildung 5: Allgemeine Vorbehandlungsstrategie vor dem Membranverfahren.

Im Folgenden befindet sich ein Überblick zu Vorbehandlungsstrategien in der Zellstoff- und Papierindustrie:

pH-Einstellung

Die pH-Einstellung ist im Allgemeinen der erste Schritt der Vorbehandlung. Der pH-Wert bestimmt die Polarität der Schmutzpartikel und der Membranoberfläche. Im Allgemeinen nimmt die negative Polarität der Partikel mit basischeren pH-Werten zu. Die Abwässer von Zellstoff- und Papierfabriken können sowohl extrem alkalisch als auch sauer sein; daher kann eine pH-Änderung die Wechselwirkungen zwischen den Verunreinigungen auf der Membran stark verändern und die Verunreinigung der Membran möglicherweise verringern. Im Allgemeinen wurde beobachtet, dass alkalische Bedingungen das Fouling der Membranen verringern.

Koivula et al.²⁷ verwendeten einen alkalischen pH-Wert (NaOH) für die Vorbehandlung von Hydrolysaten aus Birke und Fichte als Vorstufe zur Destabilisierung des Lignin Netzwerks. Bei hohem pH-Wert wurden einige der Carbonsäuren in Salze umgewandelt, was ihre Fähigkeit zur Stabilisierung des Lignin Netzwerks verringerte. Bei neutralem pH-Wert werden die Carbonsäuregruppen jedoch von der negativ geladenen Membran abgestoßen, was die Verschmutzung verringern könnte. Die Autoren stellten jedoch keinen signifikanten Einfluss der pH-Einstellung auf die Filtrationskapazität fest.

Ein nennenswerter Nachteil dieser Methode ist, dass große Mengen an Zellstoff- und Papierabwässern große Mengen an Chemikalien benötigen, was diese Methode wirtschaftlich ineffizient macht²⁶. An dieser Stelle sei daran erinnert, dass der pH-Wert für einige Membranen ein einschränkender Betriebsfaktor ist, was bei der Anwendung dieser Vorbehandlungsmethode berücksichtigt werden muss. Ein vorgegebener pH-Grenzwert kann bis zu einem gewissen Grad flexibel sein und kann für kurze Zeiträume und unter den richtigen Bedingungen ohne nachteilige Auswirkungen überschritten werden. Ein niedriger pH-Wert ist in der Regel nicht so problematisch wie ein hoher pH-Wert. Das Überschreiten von pH-Grenzwerten bei erhöhten Temperaturen führt fast garantiert zu Problemen²⁸.

Vorfiltration

Mikrofiltration wird häufig vor Ultrafiltration und Nanofiltration eingesetzt, um das Fouling der Membranen in der Forstindustrie zu reduzieren, z. B. bei der Abtrennung von Hemicellulosen aus Weizenkleie, bei der Behandlung von Abwässern aus mechanischen Zellstofffabriken oder Kraft Schwarzlauge, wobei gute Ergebnisse bei der Erhaltung der Filtrationskapazität des UF-Systems erzielt werden. Es wurde jedoch über erhebliche Hemicellulose-Verluste berichtet.

Koagulation

Die Koagulation ist eine gängige Methode der Abwasserbehandlung. Es handelt sich dabei um ein einfaches, wirtschaftliches Verfahren welches die Aggregation der suspendierten/instabilen Partikel vor der Sedimentation/Filtration erleichtert und sehr effizient bei der Entfernung von Farbe und chemischen Sauerstoff Bedarf (CSB) ist. Allerdings gibt es nur begrenzte Forschungsarbeiten zur Verwendung der Koagulation zur Reduktion des Membran-Foulings sowie zur Verbesserung der Durchlässigkeit von Zellstoff- und Papierprozesswasser²⁶. Der Koagulationsprozess hängt stark vom pH-Wert ab. Da Abwässer aus der Zellstoff- und Papierindustrie sehr alkalisch oder sauer sein können, kann eine Anpassung des pH-Werts für den Koagulationsprozess wirtschaftlich schwer realisierbar sein.

Polymere Adsorbentien

Polymere Adsorbentien können zur Verringerung des Foulings vor der Membranfiltration eingesetzt werden, um kolloidale Schwebstoffe zu reduzieren, aber auch zur Entfernung von Lignin und Lignanen durch Zugabe eines ungeladenen Polyacrylat-Adsorptionsmittels. Im Allgemeinen werden hydrophobe und ungeladene hydrophobe Adsorptionsmittel verwendet, um hydrophobe Moleküle und unpolare Verbindungen zu entfernen. Diese Methode kann sehr effizient sein, um das Fouling von UF-Membranen zu verhindern, ist aber auch mit großen Hemicellulose-Verlusten verbunden. Die Entwicklung spezifischer selektiver polymerer Adsorptionsmittel zur Verringerung der Hemicellulose Verluste durch Adsorption ist erforderlich.

Aktivkohle-Adsorption

Eine Vorbehandlung durch Aktivkohle-Adsorption vor der Membranfiltration wurde ebenfalls eingesetzt, um das Fouling der Membran zu verhindern. Die Kapazität von Aktivkohle-Adsorption hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie der Porengröße, dem Carboxylanteil und der Oberfläche. Ein großes Problem bei der Aktivkohle-Adsorption in größeren und industriellen Anwendungen ist, dass eine große Menge fester Abfälle anfällt²⁷. Die Einstellung des pH-Werts von Zellstoff- und Papierabwässern kann, abhängig von der Pufferkapazität des Abwassers, im Vergleich zu Aktivkohle-Adsorption weniger kostspielig sein²⁶. Alternativ wurde auch die Adsorption von Holzkohle für die Entfernung von Phenolverbindungen aus Holzhydrolysat vorgeschlagen³³.

Zugabe von aktivierter und inaktivierter Laccase

Laccase ist eine kupferhaltige Oxidase, die O_2 als Oxidationsmittel nutzt und auch phenolische Ringe zu Phenoxy-Radikalen oxidiert und als Vorbehandlung zur Fouling Minimierung eingesetzt wurde. Sie gilt als umweltfreundlich, da sie O_2 als Co-Substrat für die Katalyse benötigt und als einziges Nebenprodukt Wasser liefert. In der Literatur finden sich einige Beispiele für den Einsatz von Laccase zur Entfernung von Phenolen durch Ausfällung in der Zellstoff- und Papierindustrie. Es wurde berichtet, dass die Wirkung der Zugabe von Laccase darin besteht, die Durchlässigkeit der Filtrationsmembran aufgrund der Bildung einer Gelschicht zu Beginn zu verringern, in weitere Folge aber keine zusätzliche Verringerung des Durchflusses eintritt. Laccase wurde auch in Kombination mit der Adsorption an Bentonit zur Behandlung von Lignin und Hemicellulosen eingesetzt³⁴.

Oxidation

Erweiterte Oxidationsverfahren (Advanced Oxidation Process (AOP)) können zur Verringerung der Membranverschmutzung sehr nützlich sein. AOPs können hochmolekulare Lignin-Verbindungen teilweise abbauen, was die Filtrationskapazität verbessern kann, indem die Viskosität des Einsatzmaterials verringert und die Bildung von Gelschichten minimiert wird. Bei Untersuchungen hinsichtlich der Anwendung von gepulster Corona-Entladung (Pulsed Corona Discharge (PCD)) sowie Ozonierung vor der Membranfiltration wurde das Fouling der Membranen vermindert. Bei der PCD verringerte sich die durchschnittliche molekulare Masse der Hemicellulosen in gewissem Maße, was zu Hemicellulose-Verlusten führen kann²⁶.

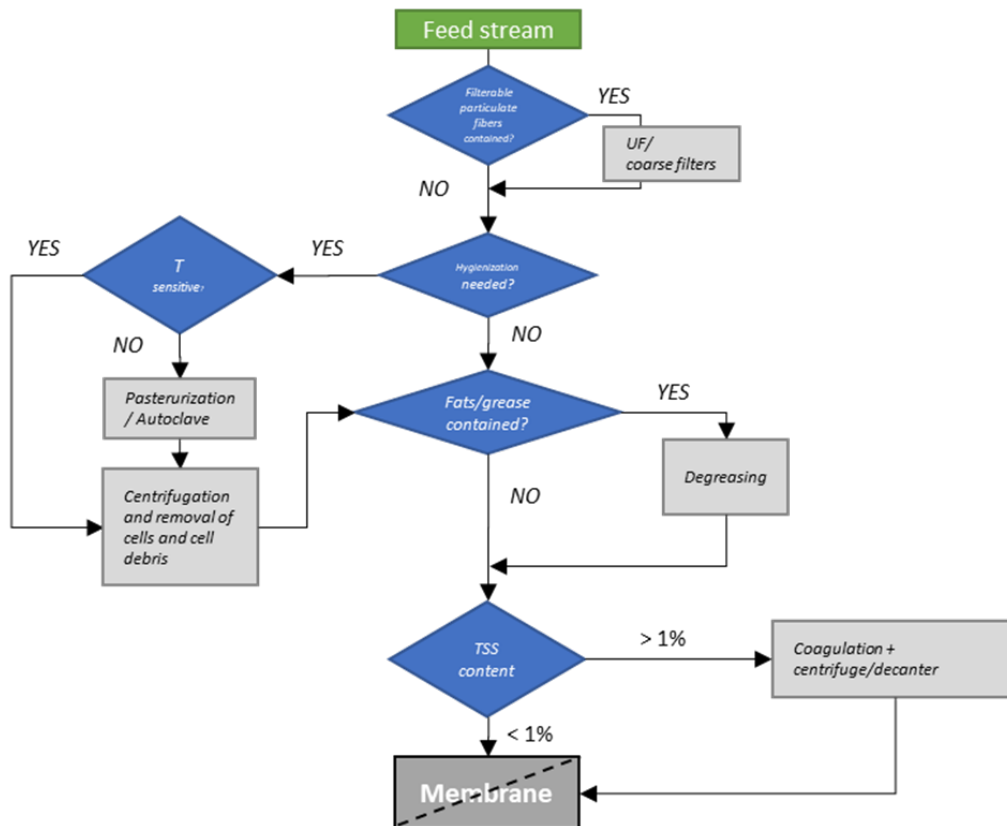


Abbildung 6: Methode zur Unterstützung der Auswahl einer Vorbehandlung eines Bioabfallstroms (Fragen in Rautenform, mit Ja oder Nein zu beantworten führen zu möglichen Behandlungsschritt (rechteckige Kästchen).

Gemäß dem methodischen Ansatz in Abbildung 6 kann der anfallende Feedstrom nach den folgenden Punkten bewertet werden. Sind abfiltrierbare Partikel wie Fasern im Flüssigkeitsstrom vorhanden, kann in einem ersten Schritt ein Grobfilter oder UF eingesetzt werden. Andernfalls ist die Frage zu klären, ob eine Hygienisierung erforderlich ist (z. B. bei kommunalem Abwasser). Wenn Bedenken hinsichtlich der Hygiene bestehen und ein temperaturempfindliches Medium verwendet wird, kann der Weg der Zentrifugation und der Entfernung von Zellen/Zellteilchen eingeschlagen werden. Bei einem nicht empfindlichen Medium kann zusätzlich eine Pasteurisierung oder Autoklavierung durchgeführt werden. Enthält das Substrat zusätzlich Fette oder Öle, könnte ein Entfettungsschritt angebracht sein. Bei einem TSS-Gehalt von mehr als 1 % kann vor dem Membranbetrieb eine Koagulation und Zentrifugation/Dekantierung durchgeführt werden.

Ein etwas spezifischerer und schrittweiser Ansatz ist in Abbildung 7 dargestellt. Hier ist ein Zellstoff- und Papierstrom dargestellt. Nach der Entscheidung über das anzuwendende Membranverfahren muss der Feedstrom zunächst hinsichtlich seiner Hauptverunreinigungen charakterisiert werden. Dies kann entweder direkt zur Auslegung der Vorbehandlung oder zur Auswahl der Membran (in Bezug auf Material, Modul usw.) sowie zur Ermittlung der Operationsparameter von Prozess und Membran (in Bezug auf pH, T, TSS usw.) führen. In den rautenförmigen Kästchen sind drei spezifische Entfernungsschritte angegeben, die die TSS-Entfernung durch MF, Koagulation oder Polymeradsorption, die Phenolentfernung durch Aktivkohle oder Laccase-Zusatz und den Lignin Abbau mit AOPs vor der Anwendung des gewählten Membranverfahrens vorschlagen.

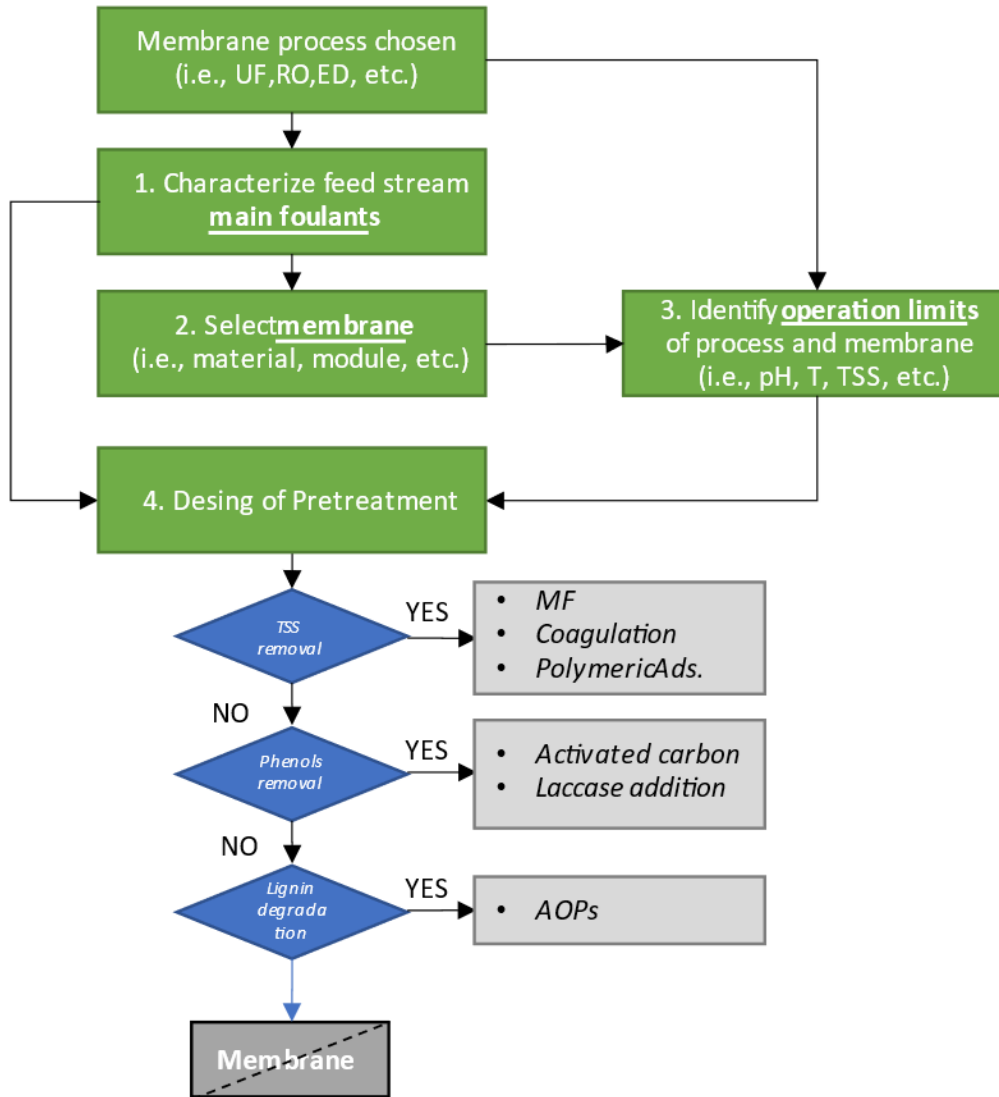


Abbildung 7: Schrittweiser Ansatz zur Integration von Membranen in der Zellstoff- und Papierindustrie

5.4 Technisch-ökonomische Bewertung von hybriden Trennverfahren

Um die Anwendung hybrider Trenntechnologien zu bewerten, wurde eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt, mit dem Ziel, den Zusammenhang zwischen Prozessdesign, Produktionskosten und Produktqualität aufzuzeigen. Die erzielten Ergebnisse werden in einer Übersichtsarbeit veröffentlicht. Im Folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst: Im Allgemeinen ist für jedes Membranverfahren eine Vorbehandlung erforderlich. Dabei spielt es keine Rolle, ob es sich um Flüssigmembranpermeation, Membrandestillation oder klassische Membranverfahren wie MF, UF, NF oder RO handelt. Daher wird diese Vorbehandlung in der folgenden Zusammenfassung nicht berücksichtigt.

Tabelle 5 zeigt Membranverfahren wie Mikrofiltration (MF), Ultrafiltration (UF) und Nanofiltration (NF), die bereits in der Zellstoff- und Papierindustrie eingesetzt werden. Hier werden Membrantechnologien entweder zur Rückgewinnung bestimmter Verbindungen, wie Lignin, Hemicellulosen, Extraktstoffen, Terpentin oder Tallöl, oder zur Abwasserreinigung eingesetzt. Daten über emergierende Technologien, die in der Zellstoff- und Papierindustrie eingesetzt werden, sind nicht bekannt. Es gibt fast keine Studien, die sich mit der Installation neuer Membrantechnologien in diesem Industriezweig befassen. Lediglich einige Studien befassen sich im Labormaßstab mit der Abtrennung von Lignosulfonaten^{35, 36, 37}. Eine Übersichtsarbeit mit dem Titel "Membrane operations in the paper and pulp industry: a review" ist für eine Publikation im Jahr 2022 vorgesehen, dort werden die nachfolgenden Daten ausführlicher dargestellt werden.

Tabelle 5: Bereits in Betrieb befindliche Membrananlagen in der Zellstoff- und Papierindustrie (* = Betriebsbeginn 2022).

Firma	Anwendung	Abwasserstrom	Membrantechnologie	Endprodukt	Jahr
Borregaard Industries Ltd in Sarpsborg, Norwegen	Rückgewinnung Komponenten	SSL	UF	Lignosulfonat-reicher Strom (ca. 95 % Reinheit) für die Vanillin Produktion ^{38, 39, 40} .	1981
Champion International's pulp mill in Araponti, Brasilien	Abwasserbehandlung	TMC Abwasser	RO und MBR	CSB von 7800 auf <20 mg/L und TDS von 2000 auf <300 mg/L ⁴¹ .	1996
Domsjö Fabriker AB, Sulfite Pulp Mill, Örnsköldsvik, Schweden	Abwasserbehandlung	Aufbereitung von Prozesswasser nach der Zellstoffwäsche.	Drei CR 1000/60-Filter	Rückgewinnung 80-90% ⁴¹ .	2000
StoraEnso, Sulfite Pulp Mill, Nymölla, Schweden	Abwasserbehandlung	Bleich-abwasser	UF	Reduziert den CSB um 40-50% ⁴² .	1995

Firma	Anwendung	Abwasserstrom	Membran-technologie	Endprodukt	Jahr
Eltmann newsprint mill, Papierfabrik Palm, Germany	Abwasser-behandlung	Abwasser aus dem Belebt-schlamm-verfahren	NF	CSB-Wert von 587 mg/L bis 29 mg/L, Härte 7 mg/L, Chlorid, Sulfat, Härte und anionischem Abfall von 330, 148, 7 bzw. 6 mg/L. Rückgewinnungsrate 84 %, Durchfluss 10-30 L/m ² ·h ⁴¹ .	1999
LINPAC paper plant, US	Abwasser-behandlung		Ozon-Membran-filtration unter Druck und UF/NF	CSB 3100 mg/L bzw. 9800-12900 mg/L im NF- und UF-Permeat ^{43, 44} .	2000
Papeterie du Rhin's paper roll mill, Frankreich	Abwasser-behandlung		MBR mit UF-Membranen	CSB von 4.000 mg/L auf < 200mg/L (95% Entfernung) und BSB von 1700mg/L auf < 5mg/L. (>99% Entfernung) Das Permeat wird teilweise als Prozesswasser recycelt. ⁴⁴	2000
Sofidel, Soffass Paper Mill Via Giuseppe Lazzareschi, Porcari (Lucca) in Porcari, Italien	Abwasser-behandlung		UF/RO	TSD entfernt Material aus der Flüssigkeit und RO, um den restlichen Salzgehalt zu entfernen.	2014
UPM-Kymmene Tervasaari in Valkeakoski, Finnland	Abwasser-behandlung	Weisses Wasser, Wasser	CR-UF		2005
SunCarbon AB, Schweden	Rück-gewinnung Komponenten	Schwarz-lauge	UF		2022*

Bei der wirtschaftlichen Bewertung des Einsatzes von Membranverfahren muss folgendes berücksichtigt werden ⁴³:

- Kapitalkosten: Diese bestehen aus Membraneinheiten und Nicht-Membraneinheiten (mechanische und elektrische Teile, Steuergeräte, Rohrleitungen und damit verbundene Tiefbaukosten). Abhängig vom Material, der MCWO und dem Hersteller.
- Der Austausch der Membranen hängt von der Lebensdauer der einzelnen Membranen ab und ist abhängig von der Anwendung und dem Material der Membran.
- Kosten für den Strom, der zum Pumpen der Ströme durch die Membran benötigt wird (oder zur Erzeugung von Vakuum)
- Kosten für Arbeit
- Reinigung und Wartung

Tabelle 6: Kosten für verschiedene Anwendungen und Membrantypen

Prozess	Anwendung	COPEX (k€/year)	Produktionsrate	Kosten/Produkt	Referenz
NF, Keramik; 1 kDa	Rückgewinnung von Lignin aus TMC-Prozesswasser	27	1.049 Tonnen Retentat/Jahr (23% Lignin)	17000 €/ Tonnen Lignin	45
NF, Polymer, 300 Da	Rückgewinnung von Lignan aus TMC-Prozesswasser		0,6972 Tonnen Retentat/Jahr (2% Lignan)	17000 €/ Tonnen Lignin	
UF (Keramik) - NF (Keramik)	Rückgewinnung von Lignin aus Schwarzlauge	2800	8300 Tonnen Lignin/Jahr	430 €/ Tonnen Lignin	46
UF (Keramik) - NF (Polymer)		3000	30000 Tonnen Lignin/Jahr	130 €/ Tonnen Lignin	
NF (Keramik)		3600	41000 Tonnen Lignin/Jahr	68 €/ Tonnen Lignin	
NF (Polymer)		3500	68000 Tonnen Lignin/Jahr	46 €/ Tonnen Lignin	
UF-RO, mit 80% Wasserrückgewinnung	Rückgewinnung von Lignin aus der Ablauge des AlkOx-Verfahrens und Wiederverwendung des gereinigten Wassers	51	10000 m ³ behandelte Lauge/Jahr	521-1175 €/ Tonnen Lignin	40
UF-RO, ohne Wasserrückgewinnung		55	10000 m ³ behandelte Lauge/Jahr	539-616 €/ Tonnen Lignin	
UF	Rückgewinnung von Galactoglucomman aus verbrauchter Sulfitablauge	1060 €/Jahr	2.75 GGM/h**	48.23 €/Tonne GGM	47
MF-UF	Rückgewinnung von Galactoglucomman aus TMC-Prozesswasser	713 €/Tonne Hemicellulose *	31200 m ³ /Jahr	1159 €/ Tonne Hemicellulose	48

Da sogar herkömmliche Membrantechnologien in der Zellstoff- und Papierindustrie selten eingesetzt werden und es keine veröffentlichten Daten über emergierende Membrantechnologien gibt, die in der Zellstoff- und Papierindustrie eingesetzt werden, wurde eine Übersicht über die bereits eingesetzten Membrantechnologien wie MF, UF, NF und RO erstellt.

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass der Preis des Endprodukts mit der Konzentration der Zielverbindung im Prozessstrom steigt. Das Ziel von emergierenden Membrantechnologie-Anlagen ist es, auf dem Markt wettbewerbsfähig zu sein. Daher muss der Preis im Vergleich zu den in dieser Literatürübersicht bewerteten Technologien niedriger sein. Ein anderer Ansatz wäre die Anwendung emergierender Membrantechnologien für die Isolierung hochpreisiger Produkte, die in kleinen Mengen, aber hoher Reinheit benötigt werden.

5.5 Bewertungsmethodik: Kriterien zur Bewertung unterschiedlicher Membranverfahren

Im Rahmen des Annex 17 wurde eine Methodik erarbeitet, die eine Hilfestellung zur Abschätzung der Eignung einer Membrantechnologie geben kann. Die Bewertungsmethode, ebenso wie allgemeine und technologie-spezifische Bewertungskriterien werden im folgenden Kapitel dargestellt. In Kapitel 5.6 wird diese Methodik zur Aufkonzentrierung oder Abtrennung ausgewählter Komponenten der Papierindustrie angewandt.

Für die Bewertung des Potentials der Implementierung eines Membrantrennverfahrens, wie der Membrandestillation (MD), Flüssigmembranpermeation (FMP), der Pervaporation (PV) und der Vorwärtsosmose (VO) wurden primär theoretische und technologische Grundlagen der einzelnen Membrantrennverfahren herangezogen. (Die ökonomische Analyse wurde in Kapitel 5.4 durchgeführt.)

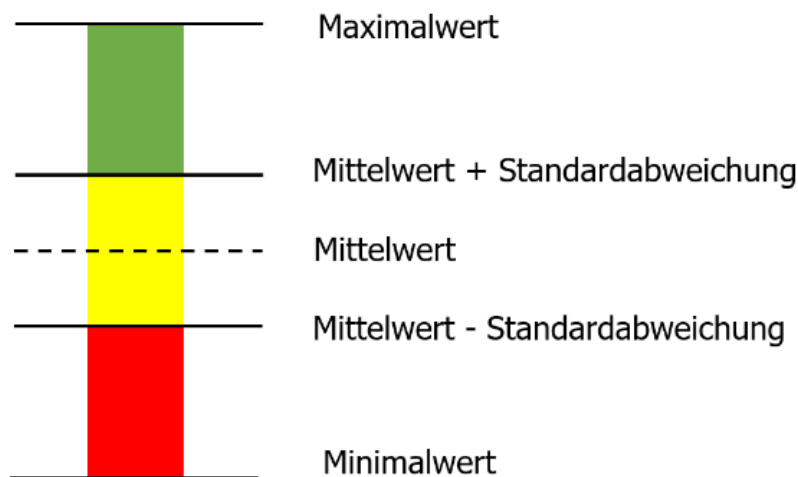


Abbildung 8: Schematische Einstufung eines Bewertungskriteriums nach dem Ampelsystem mit einbezogener Standardabweichung

Die Bewertungsmethode selbst wird anhand eines Ampelsystems (Grün, Gelb oder Rot siehe Abbildung 8) durchgeführt. Bewertungskriterien bestehend aus quantitativen und qualitativen Punkten wurden für jedes der betrachteten Membrantrennverfahren erstellt. Bei quantitativen Bewertungskriterien (beispielsweise dem transmembranen Fluss [Lm^2/h]) wurde die resultierende Farbe durch numerische Werte festgelegt (beispielsweise durch die Farbe Rot bei einem geringen transmembranen Fluss). Die Bandbreite (= höchster und niedrigster numerischer Wert) und Unterteilung (= die Grenze,

bis zu der eine Ampelfarbe gültig ist) für die Einstufung nach dem Ampelsystem erfolgte spezifisch nach dem zu bewertenden Kriterium des jeweiligen Membrantrennverfahrens. Ein qualitatives Bewertungskriterium ist beispielsweise, das Vorhandensein von Ergebnissen wissenschaftlicher Experimente. Die Einstufung erfolgte basierend auf der Definition des Bewertungskriteriums.

Neben der spezifischen Bewertungskriterien wurden auch folgende allgemeine Bewertungskriterien erstellt: Abtrennungs- bzw. Aufkonzentrierungserfolg, wissenschaftliche Experimente, sowie Primärenergiebedarf.

5.5.1 Allgemeine Bewertungskriterien

Abtrennungs-/Aufkonzentrierungserfolg

Erhobene Werte aus empirischen Studien werden prozentuell je Abtrennungs- oder Aufkonzentrierungserfolg der Komponente angegeben. Die Festlegung der Einstufung erfolgt nach dem Mittelwert der in der durchgeführten Literaturrecherche erhobenen Abtrennungs-/Aufkonzentrierungserfolge der zu bewertenden Komponenten aller Membrantrennverfahren. Innerhalb der Einstufung erfolgt eine feinere Bewertung durch lineare Interpolation.

Tabelle 7: Allgemeines Bewertungskriterium Abtrennungs-/Aufkonzentrierungserfolg, durchgeführte wissenschaftliche Experimente und Primärenergiebedarf

Grün	Abtrennungs- oder Aufkonzentrierungserfolg ≥ 55 bis 100 %.
Gelb	Es sind keine/fehlende Daten oder empirische Studien vorhanden.
Rot	Abtrennungs- oder Aufkonzentrierungserfolg 0 % bis < 55 %.

Wissenschaftliche Experimente

Durchgeführte Experimente aus ausgewählten wissenschaftlichen Veröffentlichungen geben Auskunft, ob Forschungsaufwand unternommen worden ist, die Komponente zu gewinnen. Sie liefern neben den theoretischen Grundlagen zusätzliche Daten für Bewertungskriterien, um dadurch eine präzisere Aussage über die Gewinnbarkeit einer Komponente zu treffen.

Tabelle 8: Allgemeines Bewertungskriterium durchgeführte wissenschaftliche Experimente

Grün	Es wurden repräsentative wissenschaftliche Experimente eruiert, welche zeigen, wie erfolgreich eine wertvolle Komponente gewonnen werden kann.
Gelb	Es wurden keine repräsentativen wissenschaftlichen Experimente eruiert, welche zeigen, ob und wie erfolgreich eine wertvolle Komponente gewonnen werden kann. Dies bedeutet aber nicht, dass die Komponente (nicht) gewonnen werden kann.
Rot	Es wurden repräsentative wissenschaftliche Experimente eruiert, welche zeigen, wie erfolgreich eine wertvolle Komponente gewonnen werden kann. Jedoch sind laut dem Studienautor die erhaltenen Ergebnisse nicht zufriedenstellend und es bedarf noch weiterer Forschungsanstrengungen.

Primärenergiebedarf

Der Primärenergiebedarf bezeichnet jene Energie die im vorhandenen Energieträger (Energieströmen und Energiespeichern) enthalten ist und eine Basis für eine vielseitige Energienutzung darstellt. Der Konversionsfaktor berücksichtigt Verluste, welche bei der Bereitstellung des Energieträgers entstehen. Je geringer der Primärenergiebedarf einer Technologie ist, desto wirtschaftlicher wird die Betriebsweise sein. Er umfasst den thermischen und/oder elektrischen Energieverbrauch und wird in kWh·m⁻³ des gewonnenen Permeats angegeben. Die Festlegung der Einstufung erfolgt nach Einbeziehung des Mittelwertes (μ) und der positiven Standardabweichung (σ) des Primärenergiebedarfes aller untersuchten Membrantrenntechnologien.

Tabelle 9: Allgemeines Bewertungskriterium Primärenergiebedarf

Grün	Der Primärenergieverbrauch ist $<208 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ ($= \mu$).
Gelb	Der Primärenergieverbrauch liegt zwischen $208\text{-}556 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$.
Rot	Der Primärenergieverbrauch ist $>556 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ ($= \sigma$).

5.5.2 Spezifische Bewertungskriterien Membrandestillation

In diesem Kapitel sind für die Membrandestillation die spezifischen Bewertungskriterien inklusive Einstufung im Farbcode (grün, gelb, rot) dargestellt.

Partialdampfdruckdifferenz

Die Partialdampfdruckdifferenz [mbar] stellt die Triebkraft der MD dar. Jene Komponente, deren Partialdampfdruck höher ist als der von Wasser ($p_i > p_W$), permeiert durch die Membran, ansonsten erfolgt eine Aufkonzentrierung der Komponente im Feedstrom ($p_i < p_W$). Je geringer die Partialdampfdruckdifferenz ($\Delta p = |p_W - p_i|$) ist, desto geringer wird die Wahrscheinlichkeit einer selektiven Abtrennung beziehungsweise Aufkonzentrierung der Komponente sein. Die Festlegung der Einstufung und der Bandbreite des Farbbereiches erfolgt nach dem Median aller Partialdampfdruckdifferenzen der zu bewertenden Komponenten in Bezug auf Wasser (Bandbreite eines Farbbereiches = Null bis Median). (p_W = Partialdampfdruck von Wasser; p_i = Partialdampfdruck der Komponente)

Tabelle 10: Darstellung der Einstufung des spezifischen Bewertungskriteriums Partialdampfdruckdifferenz.

Grün	Die Partialdampfdruckdifferenz (Δp) ist $>58 \text{ mbar}$.
Gelb	Die Partialdampfdruckdifferenz (Δp) liegt in einem Bereich von $29\text{-}58 \text{ mbar}$ oder konnte nicht eruiert werden.
Rot	Die Partialdampfdruckdifferenz (Δp) ist $<29 \text{ mbar}$. Der Partialdampfdruck der Komponente nähert sich jenem von Wasser an und es wird immer schwieriger, die Komponente selektiv abtrennen beziehungsweise aufkonzentrieren zu können.

Transmembraner Fluss (Flux)

Die Leistungsfähigkeit einer Membran in der MD wird unter anderem durch den transmembranen Fluss (Flux) [$L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$] angegeben. Die erhobenen Werte stammen aus empirischen Studien. Die Festlegung der Einstufung erfolgt nach dem Mittelwert der in der durchgeführten Literaturrecherche erhobenen transmembranen Flüsse der zu bewertenden Komponenten aller Membrantrennverfahren. Innerhalb der Einstufung erfolgt eine feinere Bewertung durch lineare Interpolation.

Tabelle 11: Darstellung der Einstufung des spezifischen Bewertungskriteriums transmembraner Fluss.

Grün	Transmembraner Fluss $\geq 5 L \cdot m^2/h$.
Gelb	Es sind keine/fehlende Daten oder empirische Studien vorhanden.
Rot	Transmembraner Fluss $< 5 L \cdot m^2/h$.

Feedtemperatur

Der technologisch optimale Arbeitsbereich der MD liegt bei Betriebstemperaturen in einem Bereich von 30-95 °C, wobei das Abwärmepotenzial nicht berücksichtigt wird. Daher ist es empfehlenswert, dass sich der Feedstrom (und daher auch der Ablaugen- und Kondensatstrom) in diesem Temperaturbereich befindet, damit eine zusätzliche Energiezufuhr nicht nötig ist.

Tabelle 12: Darstellung der Einstufung des spezifischen Bewertungskriteriums Feedtemperatur.

Grün	Eine ausreichende Temperatur des Feedstromes (≥ 30 °C) ist gegeben, um die MD ohne zusätzliche Energiezufuhr betreiben zu können.
Gelb	Temperatur des Feedstromes ist unbekannt.
Rot	Eine ausreichende Temperatur des Feedstromes (< 30 °C) ist nicht gegeben und es bedarf einer zusätzlichen Energiezufuhr, um die MD optimal betreiben zu können.

5.5.3 Spezifische Bewertungskriterien Flüssigmembranpermeation

In diesem Kapitel sind für die Flüssigmembranpermeation die spezifischen Bewertungskriterien inklusive Einstufung im Farbcode (grün, gelb, rot) dargestellt.

Diffusionskoeffizient

Je höher der Diffusionskoeffizient einer Komponente [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] ist, desto höher ist der Materialstrom durch molekulare Diffusion aufgrund von Konzentrationsunterschieden. Die Festlegung der Einstufung und der Bandbreite des Farbbereiches erfolgt nach Einbeziehung der Standardabweichung (σ) der Diffusionskoeffizienten aller zu bewertenden Komponenten in der FMP. Innerhalb der Einstufung erfolgt eine feinere Bewertung durch lineare Interpolation.

Tabelle 13: Darstellung des spezifischen Bewertungskriteriums Diffusionskoeffizient für die Flüssigmembranpermeation (FMP) inklusive Einstufung mit Farbcode.

Grün	Der Diffusionskoeffizient der Komponente liegt über dem Wert $9,77 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.
Gelb	Der Diffusionskoeffizient der Komponente liegt im Wertebereich $2,72 \cdot 10^{-10}$ - $9,77 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.
Rot	Der Diffusionskoeffizient der Komponente liegt unter dem Wert $2,72 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Wasserlöslichkeit der Komponente

Je höher die Löslichkeit einer Komponente in Wasser [$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$] ist, desto schwieriger kann eine selektive Abtrennung der Komponente erfolgen. Die Festlegung der Einstufung des Bewertungskriteriums basiert auf dem Europäischen Arzneibuch⁴⁹. Innerhalb der Einstufung erfolgt eine feinere Bewertung durch lineare Interpolation.

Tabelle 14: Darstellung des spezifischen Bewertungskriteriums Wasserlöslichkeit der Komponente für die Flüssigmembranpermeation (FMP) inklusive Einstufung mit Farbcode.

Grün	$\leq 33.000 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ (= wenig löslich).
Gelb	Keine/fehlende Daten oder empirische Studien vorhanden.
Rot	$> 33.000 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ (= löslich).

5.5.4 Spezifische Bewertungskriterien Pervaporation

In diesem Kapitel sind für die Pervaporation die spezifischen Bewertungskriterien inklusive Einstufung im Farbcode (grün, gelb,rot) dargestellt.

Temperatur des Feedstromes

Der technologisch optimale Arbeitsbereich der PV liegt bei Betriebstemperaturen in einem Bereich von 25- 85 °C, wobei das Abwärmepotenzial nicht berücksichtigt wird. Daher ist es empfehlenswert, dass sich der Feedstrom (und daher auch der Ablaugen- und Kondensatstrom) in diesem Temperaturbereich befindet, damit eine zusätzliche Energiezufuhr nicht nötig ist.

Tabelle 15: Darstellung des spezifischen Bewertungskriteriums Feedtemperatur für die Pervaporation (PV) inklusive Einstufung mit Farbcode.

Grün	Eine ausreichende Temperatur des Feedstromes (≥ 25 °C) ist gegeben, um die PV ohne zusätzliche Energiezufuhr betreiben zu können.
Gelb	Temperatur des Feedstromes ist unbekannt.
Rot	Eine ausreichende Temperatur des Feedstromes (< 25 °C) ist nicht gegeben und es bedarf einer zusätzlichen Energiezufuhr, um die PV optimal betreiben zu können.

Partialdampfdruckdifferenz

Die Partialdampfdruckdifferenz [mbar] stellt die Triebkraft der PV dar. Jene Komponente, deren Partialdampfdruck höher ist als der von Wasser ($p_i > p_W$), permeiert durch die Membran, ansonsten erfolgt eine Aufkonzentrierung der Komponente im Feedstrom ($p_i < p_W$). Je geringer die Partialdampfdruckdifferenz ($\Delta p = |p_W - p_i|$) ist, desto geringer wird die Wahrscheinlichkeit einer selektiven Abtrennung beziehungsweise Aufkonzentrierung der Komponente sein. Die Festlegung der Einstufung und der Bandbreite des Farbbereiches erfolgt nach dem Median aller Partialdampfdruckdifferenzen der zu bewertenden Komponenten in Bezug auf Wasser (Bandbreite eines Farbbereiches = Null bis Median). Innerhalb der Einstufung erfolgt eine feinere Bewertung durch lineare Interpolation. (p_W = Partialdampfdruck von Wasser; p_i = Partialdampfdruck der Komponente)

Tabelle 16: Darstellung des spezifischen Bewertungskriteriums Partialdampfdruckdifferenz für die Pervaporation (PV) inklusive Einstufung mit Farbcode.

Grün	Die Partialdampfdruckdifferenz (Δp) ist > 58 mbar.
Gelb	Die Partialdampfdruckdifferenz (Δp) liegt in einem Bereich von 29-58 mbar oder konnte nicht eruiert werden.
Rot	Die Partialdampfdruckdifferenz (Δp) ist < 29 mbar. Der Partialdampfdruck der Komponente nähert sich jenem von Wasser an und es wird immer schwieriger, die Komponente selektiv abtrennen beziehungsweise aufkonzentrieren zu können.

Transmembraner Fluss (Flux)

Die Leistungsfähigkeit einer Membran in der PV wird unter anderem durch den transmembranen Fluss (Flux) [$L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$] angegeben. Die erhobenen Werte stammen aus empirischen Studien. Die Festlegung der Einstufung erfolgt nach dem Mittelwert der in der durchgeführten Literaturrecherche erhobenen transmembranen Flüsse der zu bewertenden Komponenten aller Membrantrennverfahren. Innerhalb der Einstufung erfolgt eine feinere Bewertung durch lineare Interpolation.

Tabelle 17: Darstellung des spezifischen Bewertungskriteriums transmembraner Flux für die Per-vaporation (PV) inklusive Einstufung mit Farbcode.

Grün	Transmembraner Fluss $\geq 5 L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$.
Gelb	Es sind keine/fehlende Daten oder empirische Studien vorhanden.
Rot	Transmembraner Fluss $< 5 L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$.

5.5.5 Spezifische Bewertungskriterien Vorwärtsosmose

In diesem Kapitel sind für die Vorwärtsosmose die spezifischen Bewertungskriterien inklusive Einstufung im Farbcode (grün, gelb, rot) dargestellt.

Molekülgröße

Die Molekülgröße kann durch das molare Volumen einer Komponente [$cm^3 \cdot mol^{-1}$] ausgedrückt werden. Durch die Membran können kleine Moleküle, wie es beispielsweise Wasser ist, hindurchdiffundieren und größere zurückgehalten beziehungsweise aufkonzentriert werden. Je mehr sich die Molekülgröße der Komponente an jene von Wasser annähert, desto schwieriger wird es, die Komponente aufkonzentrieren zu können. Die Festlegung der Einstufung erfolgt nach dem Median aller erhobenen Molekülgrößen in der VO und dem Wert von Wasser ($18 cm^3 \cdot mol^{-1}$). Innerhalb der Einstufung erfolgt eine feinere Bewertung durch lineare Interpolation.

Tabelle 18: Darstellung des spezifischen Bewertungskriteriums Molekülgröße für die Vorwärtsosmose (VO) inklusive Einstufung mit Farbcode.

Grün	Die Molekülgröße der Komponente ist größer als jene von Wasser und ist größer als der Median ($> 129 cm^3 \cdot mol^{-1}$).
Gelb	Die Molekülgröße der Komponente ist größer als jene von Wasser und liegt zwischen der von Wasser ($18 cm^3 \cdot mol^{-1}$) und dem Median ($129 cm^3 \cdot mol^{-1}$).
Rot	Die Molekülgröße der Komponente ist kleiner als jene von Wasser ($< 18 cm^3 \cdot mol^{-1}$).

Transmembraner Fluss (Flux)

Die Leistungsfähigkeit einer Membran in der VO wird unter anderem durch den transmembranen Fluss (Flux) [$L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$] angegeben. Die erhobenen Werte stammen aus empirischen Studien. Die Festlegung der Einstufung erfolgt nach dem Mittelwert der in der durchgeführten Literaturrecherche erhobenen

transmembranen Flüsse der zu bewertenden Komponenten aller Membrantrennverfahren. Innerhalb der Einstufung erfolgt eine feinere Bewertung durch lineare Interpolation.

Tabelle 19: Darstellung des spezifischen Bewertungskriteriums transmembraner Fluss für die Vorwärtsosmose (VO) inklusive Einstufung mit Farbcode.

Grün	Transmembraner Fluss $\geq 5 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$.
Gelb	Es sind keine/fehlende Daten oder empirische Studien vorhanden.
Rot	Transmembraner Fluss $< 5 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$.

In einer von AEE INTEC betreuten Diplomarbeit²⁵ wurden diese Bewertungskriterien für Membranverfahren zur Gewinnung von Wertstoffen in der Papier- und Zellstoffindustrie angewandt.

Um eine „scharfe Abgrenzung“ von fixen Farbwerten zu verhindern, wurde ein variabler Farbwert durch lineare Interpolation implementiert. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt die schematische Darstellung der linearen Interpolation beispielhaft anhand des Bewertungskriteriums „Diffusionskoeffizient“ in der Flüssigmembranpermeation. Die theoretische Ober- und Untergrenze, im Falle des Diffusionskoeffizienten, wurde durch Beziehung der Standardabweichung aller vorhandenen Diffusionskoeffizienten definiert.

Das arithmetische Mittel aller Farbwerte innerhalb einer Technologie wurde zusammengefasst und diente der Bewertung.

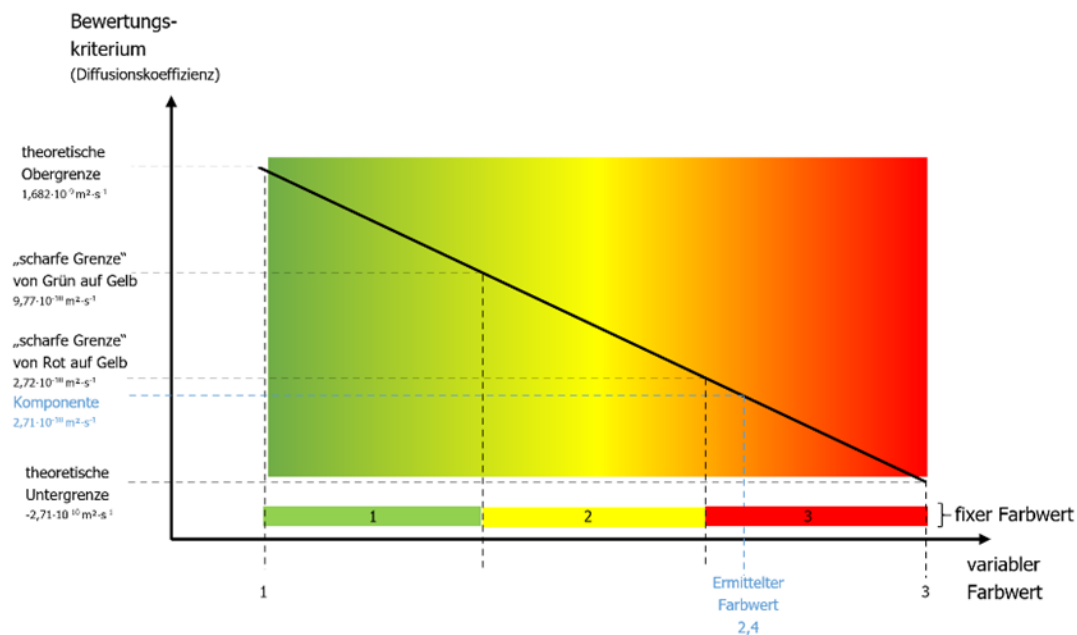


Abbildung 9: Schematische Darstellung der linearen Interpolation anhand des Beispiels des Bewertungskriteriums „Diffusionskoeffizient“ in der Flüssigmembranpermeation.

5.6 Ergebnisse der Bewertung für Wertstoffgewinnung mittels Membranverfahren in der Papier- und Zellstoffindustrie

Als Ergebnis konnte je Verfahren eine Matrix mit Bewertung des Potentials zur Abtrennung der Komponenten Lignin, Lignosulfonate, Glucose, Essigsäure, Methanol, Vanillin, Furfural, Harze und Fettsäuren erstellt werden. Diese beruhte auf den Technologie-bezogenen Daten und den definierten Bewertungskriterien mit der Farbcode Einstufung. In einer von AEE INTEC betreuten Diplomarbeit wurde jede Membrantechnologie auf Basis der Bewertungskriterien für die Anwendung zu Abtrennung der einzelnen Wertstoffe analysiert. Details dazu finden sich in J.Reßler, 2019. Tabelle 20 zeigt die zusammenfassende Bewertungsmatrix aller analysierten Membrantechnologien bezüglich der identifizierten Wertstoffe. Der Farbbereich (Farbwert) reicht von Grün (1) als sehr geeignetes Membrantrennverfahren bis zum Farbbereich (Farbwert) Rot (3) als weniger geeignetes Membrantrennverfahren zur Gewinnung einer Komponente. Um eine vergleichbare Bewertung aller Membrantrennverfahren zu gewährleisten, wurden die allgemeinen Bewertungskriterien (Primärenergiebedarf, durchgeführte wissenschaftliche Experimente, Ausbeuten) herangezogen. Diese stellen jene Kriterien dar, die es ermöglichen eine einheitliche Bewertung über alle Membrantrenntechnologien durchzuführen. Das Potential der Aufkonzentrierung oder Abtrennung der gegebenen Komponenten mit einer der betrachteten emergierenden Membranverfahren wird zusammenfassend in Tabelle 20 dargestellt. Eine detaillierte Aufschlüsselung dieser zusammenfassenden Tabelle befindet sich im Anhang.

Tabelle 20: Bewertungsmatrix aller Membrantrennverfahren hinsichtlich des Potentials zur Abtrennung (gelbe Werte) oder Aufkonzentrierung (blaue Werte) von Lignin, Lignosulfonat, Glucose, Essigsäure, Methanol, Vanillin, Furfural, Harzen und Fettsäuren.

Membrantrennverfahren/ Komponente	Membran- destillation (MD)	Flüssigmembran permeation (FMP)	Pervaporation (PV)	Vorwärts-os- mose (VO)
Lignin	1,74	1,08	2,33	1,67
Ligninsulfonate	1,74	1,10	2,33	1,67
Glucose	1,08	1,34	2,33	1,07
Essigsäure	1,64	2,22	2,00	1,04
Methanol	1,26	1,67	2,96	1,67
Vanillin	1,74	1,12	2,26	1,67
Furfural	1,18	1,67	1,81	1,06
Harze & Fettsäuren	1,74	1,67	2,33	1,67

Anhand der oben angeführten Methode konnte mittels der definierten Bewertungskriterien folgende Eignung der emergierenden Membrantrennverfahren zur Aufkonzentrierung bzw. Abtrennung wertvoller Komponenten ermittelt werden. Blickt man in Tabelle 20 in die Technologien- Spalten, ist für MD, FMP und VO die grüne Farbe überwiegend, während bei PV der Farbton orange überwiegt. Es sei darauf hingewiesen, dass die schlechtere Bewertung der PV gegenüber den anderen Membrantrennverfahren in Zusammenhang mit dem höheren Primärenergiebedarf steht. Dieser kann allerdings

kompensiert werden, da das Verfahren durch die hohe Selektivität der Membranen in der Lage ist, auch geringe Konzentrationen an Komponenten abzutrennen.

Betrachtet man nun die einzelnen Komponenten zeilenweise, so zeigt sich für Lignin und dessen Derivat Lignosulfonat die beste Gewinnung anhand der Abtrennung durch die FMP. Hier kann ein sehr guter (Re-)Extraktionserfolg durch die emulsionsgestützte Flüssigmembran-Konfiguration erreicht werden. Zu erwähnen ist hier jedoch, dass größere Moleküle, wie es Lignin ist, höhere Mengen an Carrier für den Extraktionsprozess benötigen. Dies wirkt sich negativ auf die Wirtschaftlichkeit aus.

Für die Aufkonzentrierung von Glucose wurden MD und VO am besten bewertet. Membran Fouling bei zunehmender Versuchsdauer ist jedoch in wissenschaftlichen Experimenten zu beobachten. Durch die Kombination der VO mit einer Nanofiltration (= NF-VO Hybridprozess) kann ebenfalls eine gute Aufkonzentrierung von Glucose erreicht werden. Essigsäure und Furfural können gut mittels VO aufkonzentriert werden. Bei der Aufkonzentrierung von Essigsäure durch VO wird festgestellt, dass es zu einer signifikanten Konzentrationspolarisation an der Membran kommt, was den Wasserfluss reduziert. Die Vakuum MD kann eine vielversprechende Methode zur vollständigen Entfernung von Furfural darstellen, da sie einen guten Abtrennungserfolg liefert. Ebenso erfolgt die Gewinnung von Methanol am besten durch Abtrennung mittels MD, da hier ein guter transmembraner Fluss und Abtrennungserfolg erzielt werden kann. Die FMP kann als geeignetes Membrantrennverfahren identifiziert werden, um Vanillin aus wässriger Lösung durch Abtrennung zu gewinnen. Die Auswahl des imprägnierten Lösungsmittels im mikroporösen Feststoffträger (Stützkörper), der die gestützte Membran darstellt, spielt dabei eine wichtige Rolle. Für Harze und Fettsäuren kann sowohl die Abtrennung durch die FMP als auch die Aufkonzentrierung durch die MD und VO in Frage kommen, da diese Komponenten eine komplexe Molekülstruktur aufweisen und ihr Dampfdruck unter jenem von Wasser liegt.

Die Einschätzung der Eignung der einzelnen Technologien für die Einzelkomponenten ist offensichtlich zu einem gewissen Grad abhängig vom aktuellen Stand der Forschung, insbesondere in Bezug auf neue Membranentwicklungen mit spezieller Selektivität. Für zukünftige Einschätzungen und auch Übertragung auf andere Industriesektoren und Wertstoffen, bilden die entwickelten technischen Bewertungskriterien aber eine wichtige Basis für Evaluierung, da diese auf die Verfahrensprinzipien aufbauenden Kriterien Gültigkeit behalten.

5.7 Leitfaden zur Integration von nachhaltigen und energieeffizienten Membranverfahren in Bioraffinerien

Die Hauptvorteile von Membrantrennverfahren sind unter anderem ihre hohe Selektivität und ihr geringer Energieverbrauch. Moderne Membranverfahren wie Umkehrosmose, Mikrofiltration, Ultrafiltration und Nanofiltration sind in zahlreichen industriellen Anwendungen etabliert, z. B. bei der Trennung, Aufkonzentrierung oder Reinigung. Aufgrund der großen Vielfalt an unterschiedlichen Bestandteilen von Lignocellulose-haltigen Rohstoffen und deren Komplexität müssen Design, Betrieb und Integration an die jeweiligen Prozesse angepasst werden. Im Rahmen des internationalen Annex XVII werden sowohl Potenziale als auch Herausforderungen des Einsatzes von Membranen in solchen Prozessen untersucht. Vorhandenes Wissen wird zusammengetragen, transferiert und zwischen industriellen und akademischen Partnern ausgetauscht.



Abbildung 10: Guideline – Membranes in Biorefineries

Der Leitfaden „Membranes in Biorefineries“ wurde im Rahmen des national finanzierten IEA TCP Annex 17 Projektes entwickelt. Ziel der Erstellung dieses Leitfadens war es, einen Überblick über die emergierenden Membrantechnologien zu geben, die bisher durchgeführten Maßnahmen darzustellen und den Know-how-Transfer innerhalb des internationalen Konsortiums einzubeziehen, einschließlich der Integrationskonzepte von Membrananwendungen in Bioraffinerien, wie Vorbehandlungs- und Reinigungsansätze. Die Arbeiten rund um den Leitfaden sollen die Integration potenzieller Membrantechnologien in der Bioraffinerie unterstützen bzw. ermöglichen indem mögliche Integrationskonzepte von Membranen in Bioraffinerien sowie Empfehlungen für F&E, Technologieentwicklung, Forschung, Industrie und Entscheidungsträger dargestellt sind. Die derzeitige Version des Leitfadens wird auch weiterhin im Rahmen des internationalen Annexes herangezogen und durch den Input internationaler Expert:innen erweitert, insbesondere auf weitere Bioraffinerien neben der Papier- und Zellstoffindustrie. Der Leitfaden steht als Download unter <https://www.aee-intec.at/news-29> zur Verfügung.

6 Vernetzung und Ergebnistransfer

6.1 Zielgruppen des IEA IETS Annex 17

Die Zielgruppen des IEA IETS Annex 17 waren Industrie, Wissenschaft und Entscheidungsträger:innen. Die Industrie war sowohl in Bezug auf Technologiehersteller (z.B.: Membranproduktion, Modulproduktion) als auch Bioraffineriebetreiber, hier Papier- und Zellstofffabriken 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 wie dem den „BBI Stakeholder Workshops“ oder den „Grüne Chemie“ Veranstaltungsreihen 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 Vernetzungstätigkeit wurde mit der internationalen Nexus-Veranstaltung ausgeführt.

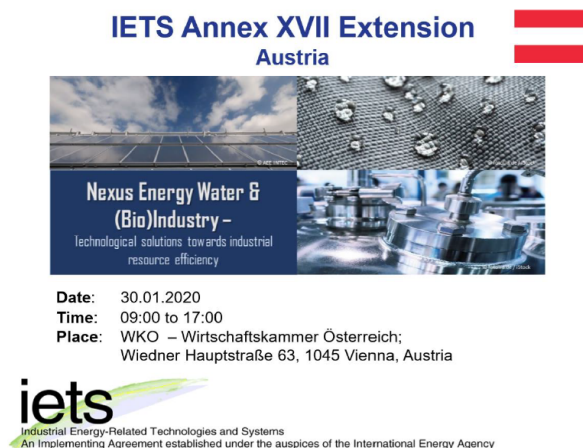


Abbildung 11: International Workshop zum Nexus Energie, Wasser & (Bio)-Industrie

Am 30. Jänner 2020 veranstaltete AEE INTEC in der Wirtschaftskammer Wien den internationalen Workshop zum Thema „Nexus Energie, Wasser & Bioindustrie“. Die Teilnehmer:innen aus Industrie, Wissenschaft, Politik und Verwaltung konnten in spannenden Vorträgen einen Überblick über technologische Lösungen in industrieller Energie- und Ressourceneffizienz im Themenkomplex Bioindustrie gewinnen. Aktuelle Entwicklungen und Best Practice Beispiele wurden vorgestellt, um sichtbar zu machen, wie vielschichtig die Themen Wasser und Energie in Industriebetrieben und Bioraffinerien miteinander verwoben sind. Die Teilnehmer:innen waren sich einig, dass die effiziente Bereitstellung von Energie, die bestmögliche Integration erneuerbarer Energieträger und die Rückgewinnung von Ressourcen im Sinne einer Kreislaufschließung essentiell für den Wandel hin zu einer nachhaltigen, ressourcen- und energieeffizienten Industrie sind.

Unterstützt wurde die Veranstaltung vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, dem Klima- und Energiefond sowie der Wirtschaftskammer Österreich.

In den einführenden Worten unterstrich Mag. Axel Steinsberg, stellvertretender Abteilungsleiter der Wirtschaftskammer Österreich, Abteilung für Umwelt- und Energiepolitik, das Interesse seitens der WKO an Energie- und Ressourceneffizienz, sowie die Relevanz für die österreichischen Betriebe technologisch fortschrittliche, wettbewerbsfähige Lösungen zu realisieren.

Mag. Elvira Lutter, Program- und Research-Managerin des Klima- und Energiefonds Austria zeigte in ihrem Statement Zuversicht, dass die neue Ministerienstruktur eine integrierte Betrachtung der Themen Wasser, Ressourcen und Energie forcieren könnte und hob die Relevanz der Ressource Wasser auch in vielen energieorientierten Forschungsprojekten hervor.

Mag. Sabine Mitter, zuständig für die „IEA Forschungskoooperation“ im Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie betonte, die Wichtigkeit in zukünftigen Entwicklungen die Thematiken Wasser und Energie im gemeinsamen Kontext zu betrachten. Die Veranstaltung sollte erstmalig die Möglichkeit bieten, Stakeholder aus unterschiedlichen Gebieten zusammenzubringen, um die Fortschritte in Forschung und Entwicklung zu innovativen Technologien und integrativen Ansätzen zur effizienten Nutzung von Energie und Wasser in der (Bio)-Industrie zu präsentieren. Abgedeckt wurde dies durch folgende Vorträge:

- **Linking water and energy efficiency in industry – challenges and solutions (IEA SHC Task 62)** - *Dr. Bettina Muster-Slawitsch, AEE INTEC,*
- **Energy efficient separation technologies in biorefineries (IEA IETS Annex 17)** - *Prof. Frank Lipnizki, Lund University Sweden,*
- **Decentralization – can a new solar desalination technology inspire innovative (bio) industrial solutions?** - *Alexander van der Kleij, SolarDew International B.V.)*
- **Development and optimization of sustainable biorefineries** - *Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Anton Friedl, Technical University Vienna*
- **Energy, water and transportation challenges for decentralised biorefinerie** - *DI Dr. Viktoria Leitner, Wood-kplus*
- **Technical solutions towards an integrated optimization of energy – fiber fractionation** - *Dr. Stefan Radl, Institute of Process and Particle Engineering, TU Graz*
- **Solar energy-water nexus for industrial wastewater recovery** - *Dr Isabel Oller Alberola, CIEMAT- Plataforma Solar de Almería Spain*
- **Resource and energy efficiency in municipal waste water treatment plants** - *DI Wolfgang Gruber Glatzl, AEE INTEC*
- **Biorefineries and the food, energy, water nexus** - *Dr. Elias Martinez-Hernandez, University of Bath*

Im Grunde ist die Aussage stimmig, dass Wasser und Energie im industriellen Einsatzgebiet zentrale Themengebiete geworden sind, sodass es unumgänglich ist, diese beiden Bereiche gemeinsam zu betrachten. Dazu braucht es einen holistischen Ansatz, um die (Bio)-Industrie im Vergleich zu Petrol-basierter Industrie zu einem ebenbürtigen Konkurrenten wachsen zu lassen.



Program: Nexus "Energy, Water & (Bio)Industry"

09:00	Arrival
09:30	Welcome
	Univ. Doz. Dr. Mag. Stephan Schwarzer <i>(Head of Department Environmental- and Energy Policy, Austrian Federal Economic Chamber)</i>
	Mag. Elvira Lutter <i>(Program- and Researchmanager, Klima- und Energiefonds Austria)</i>
	Mag. Sabine Mitter <i>(Federal Ministry Transport, Innovation and Technology, IEA Research Cooperation)</i>
	DI Christoph Brunner <i>(AEE INTEC, Head of Department Industrial Processes and Energy Systems)</i>
Session 1 - Realizing circular economy - International networks on energy and water focus in biorefineries	
09:40	Linking water and energy efficiency in industry – challenges and solutions (IEA SHC Task 62) <i>(Dr. Bettina Muster-Slawitsch, AEE INTEC)</i>
10:00	Energy efficient separation technologies in biorefineries (IEA IETS Annex 17) <i>(Prof. Frank Lipnizki, Lund University Sweden)</i>
10:25	Decentralization – can a new solar desalination technology inspire innovative (bio) industrial solutions? <i>(SolarDew International B.V.)</i>
10:50	Opinion Poll
Coffee Break	
Session 2 - Water-Energy Nexus in biobased processes	
11:30	Development and optimization of sustainable biorefineries <i>(Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Anton Friedl, Technical University Vienna)</i>
11:55	Energy, water and transportation challenges for decentralised biorefineries <i>(DI Dr. Viktoria Leitner, Wood-kplus)</i>
12:20	Technical solutions towards an integrated optimization of energy – fiber fractionation <i>(Dr. Stefan Radl, Institute of Process and Particle Engineering, TU Graz)</i>
12:45	Opinion Poll
Lunch	
Session 3- Treatment of liquid side streams /downstream processing in biorefineries	
14:00	Solar energy-water nexus for industrial wastewater recovery <i>(Dr. Isabel Oller Alberola, CIEMAT- Plataforma Solar de Almeria Spain)</i>
14:25	Resource and energy efficiency in municipal waste water treatment plants <i>(DI Wolfgang Gruber Glatzl, AEE INTEC)</i>
14:50	Biorefineries and the food, energy, water NEXUS <i>(Elias Martinez-Hernandez, University of Bath)</i>
15:15	Opinion Poll
Coffee Break	
Session 4 – Interactive	
15:45	Fish Bowl Discussion with selected experts about the question <i>"How can the Water-Energy-Nexus be realized within the next phase of biorefineries ?"</i>
16:30	Closing
	Summary and Closing
17:00	End

Abbildung 12: Programm des Internationalen Workshop zum Nexus Energie, Wasser & (Bio) Industrie

Um diese Entwicklung zu fördern, wurde aber eines klar: Es kann nicht nur ein Teilstrom oder eine Technologie betrachtet werden - wenn es um optimierte, integrierte Lösungen gehen soll, ist „system thinking“ angesagt. Es ist notwendig, Optimierungsziele festzusetzen, um gemeinsam in einem multidisziplinären Netzwerk innovative Lösungen zu erarbeiten. In einer nachhaltigen Bioraffinerie müssen einerseits die optimierte Nutzung der vorhandenen Biochemie (Valorisierung der vorhandenen Biomassestrukturen, Fasern und Polymeren), sowie in der Verarbeitung emergierende Technologien von der Vorbehandlung bis zur Produktreinigung und schließlich die Energieversorgung (kostengünstige Energiequellen und Low-Ex Ansätze), gemeinsam betrachtet und bestmöglich miteinander kombiniert werden. Die bestmögliche Abstimmung zwischen zentralisierten und dezentralisierten Lösungen sowie die Thematik des Transports dürfen dabei nicht in Vergessenheit geraten. Im Endeffekt müssen „Ecology“ und „Economy“ miteinander verknüpft und ausgewogen betrachtet werden, um den Nexus Wasser und Energie auch für die (Bio) Industry wirtschaftlich interessant gestalten zu können.

6.2 Veröffentlichungen im Rahmen des IEA IETS Annex 17

Im Rahmen des IEA IETS Annex 17 veröffentlichte Publikationen:

- **D.M. Scheepers, A.J. Tahir, C. Brunner, E. Guillen-Burrieza, Vacuum membrane distillation multi-component numerical model for ammonia recovery from liquid streams, Journal of Membrane Science, Volume 614, 2020.**

Synopsis: In der Publikation „Vacuum membrane distillation multi-component numerical model for ammonia recovery from liquid streams“ wurde ein Mehrkomponentensimulationsmodell für die Leistungsbewertung der Ammoniakrückgewinnung mittels VMD (Vakuum-Membrandestillation) aus Wasserlösungen entwickelt und experimentell validiert. Das Modell wurde verwendet, um den Einfluss der wichtigsten Prozess- und Membranparameter auf die Leistung der Technologie in Bezug auf den Ammoniakfluss, die Selektivität und den thermischen Energieverbrauch zu untersuchen.

- **Masterarbeit Johann Ressler, Membranfiltration zur energieeffizienten Trennung lignocellulosehaltiger Biomassebestandteile, 2019, Fachhochschule Burgenland GmbH, Department Energie- und Umweltmanagement**

Synopsis: Die Masterarbeit „Membranfiltration zur energieeffizienten Trennung lignocellulosehaltiger Biomassebestandteile“ von Johann Ressler beinhaltet eine Darstellung und Bewertungsmöglichkeit für den Einsatz emergierender Membranverfahren zur Rückgewinnung von wertvollen Inhaltsstoffen in der Zellstoff- und Papierindustrie. Eine Literaturrecherche über die theoretischen Grundlagen der emergierenden Membrantrennverfahren, Membrandestillation (MD), Pervaporation (PV), Flüssigmembranpermeation (FMP) und Vorwärtsosmose (VO) beschreibt deren Funktionsweise. Durch die Auswertung wissenschaftlich durchgeführter Experimente aus vorhandenen Studien und/oder technologischer Grundlagen der Technologien wurde untersucht, ob wertvolle Komponenten aus potenziellen Prozess- und Abwasserströmen gewonnen werden können. Erhaltene Ergebnisse wurden in einer Bewertungsmatrix aufbereitet.

- **Masterarbeit Paul Demmelmayr „Isolation of lignosulfonates from spent sulfite liquor using supported liquid membrane permeation“, 2018, TU Graz, Institute of Chemical Engineering and Environmental Technology**

Synopsis: Die Masterarbeit „Isolation of lignosulfonates from spent sulfite liquor using supported liquid membrane permeation“ beschäftigt sich mit Ablauge aus dem Sulfit-Prozess der Papier- und Zellstoffindustrie. Diese enthält neben den Kochchemikalien auch Kohlenhydrate und Lignosulfonate. Das wachsende Interesse an der Isolierung von Lignosulfonaten ist deren vielseitigen Einsatzmöglichkeiten zuzuschreiben, wie zum Beispiel als Dispergiemittel, als Flockungsmittel oder in Bleiakkumulatoren. In dieser Arbeit wurde die Flüssigmembranpermeation mit gestützten Membranen auf ihre Eignung zur selektiven Abtrennung von Lignosulfonaten untersucht, wobei verschiedene Amine als Extraktionsmittel zum Einsatz kamen. Es zeigte sich, dass die Wahl der Lösungsmittelphase entscheidend ist für die Effizienz und die Verminderung ungewünschter Emulsionsbildung. Mit einer in Vorversuchen ausgewählten Lösungsmittelphase konnte ein stabiler Betrieb über 6 Stunden realisiert werden.

- **Masterarbeit Ingrid Eisl: „Elektrodialytische Isolierung von organischen Säuren aus der Kraft Schwarzlauge und Analyse mit HPIC“ 2018, TU Graz, Institute of Chemical Engineering and Environmental Technology**

Synopsis: In der Masterarbeit „Elektrodialytische Isolierung von organischen Säuren aus der Kraft Schwarzlauge und Analyse mit HPIC“ wurde die Kraft-Schwarzlauge als potentielle Quelle für organische Säuren untersucht. Dafür wurde die Elektrodialyse hinsichtlich der Isolierung der Säuren aus der Ablauge gewählt. Die Ergebnisse zeigen, dass der Prozess für Modelllösungen gute Ergebnisse liefert, für die Schwarzlauge hingegen, Lignin die Effizienz stark senkt und daher möglichst vollständig aus dem Prozessstrom entfernt werden muss.

6.3 Relevanz und Nutzen der Projektergebnisse auf nationaler und internationaler Ebene

Vor dem Hintergrund der globalen Bevölkerungsentwicklung und dem fortschreitenden Klimawandel ergeben sich beim Umstieg von einer erdölbasierten auf eine biobasierte Industrie technologische und soziale Herausforderungen auf nationaler und internationaler Ebene. Die zentrale Aufgabe in der Bewältigung dieser Herausforderungen wird es sein, die wachsende Weltbevölkerung ausreichend mit Nahrungsmitteln, Energie und Rohstoffen zu versorgen und diese Versorgung in Einklang mit Umwelt und Natur zu bringen. Dafür sind Lösungsansätze gefordert, die eine ressourcen- und energieeffiziente, nachhaltige Wirtschaftsweise fördern. Unter dieser Prämisse stellen Bioraffinerien als explizit integratives, multifunktionelles Gesamtkonzept eine wesentliche Drehscheibe in der Nutzung von Biomasse als Rohstoffquelle für die nachhaltige Erzeugung unterschiedlicher (Zwischen-) Produkte (Chemikalien, Wertstoffe, Energieträger) dar. Um den größtmöglichen Nutzen zu erzielen, ist eine internationale Vernetzung von Industrie, Politik und Forschung notwendig. Das vorliegende Projekt adressierte den Ausschreibungsschwerpunkt 5.4.2: Annex 17: ‚Membranfiltration zur energieeffizienten Trennung Lignocellulose-haltiger Biomassebestandteile‘ im IETS TCP (Technology Collaboration Programms) Industrielle Energietechnologien und Systeme. Die Zielsetzungen dieses Projektes stimmten mit der Programmzielsetzung wie z.B. Erforschung und Entwicklung neuer Verfahren, erfolgreiches Einbringen österreichischer Expertise sowie Know-how und Ergebnistransfer zu österreichischen Forschungseinrichtungen überein.

Sowohl auf europäischer als auch auf nationaler Ebene haben sich in den letzten Jahren bereits Bioraffinerien entwickelt, die sich der Problematik der Versorgung mit Nahrungsmitteln, Energie und Rohstoffen annehmen. Ein österreichisches Beispiel ist die „Grüne Bioraffinerie in Utzenaich“. Hier wird Grassilage unter Verwendung von modernsten Trenntechnologien zur Gewinnung von Aminosäure und Milchsäure verwendet⁵⁰. Auf europäischer Ebene kann das Beispiel der Firma Stora Enso genannt werden⁵¹, wo Micro-fibrillierte Cellulose, Cellulose-Schaum oder zB. Lignin-basierte Bindematerialien produziert werden. Die Textilfaserfabrik Lenzing verfolgt in Oberösterreich als Vorzeige-Bioraffinerie den integrativen Ansatz einer Bioraffinerie seit langem und hat eine breite Produktpalette entwickelt⁵². Industrielle Bioraffineriestrategien im internationalen Kontext sind beispielsweise API GreenBox+™ von Cascades (Cabano, Canada), Bioproducts Mill von Metsä Fibre (Äänekoski, Finnland), LignoBoost Process™ von Domtar (Plymouth, USA), LignoBoost Process™ am Stora Enso Sunila Standort (Kotka, Finnland), LignoForce System™ von West Fraser (Hinton, Canada), „crude tall oil hydrotreatment into BioVerno Renewable Diesel & Naptha“ von UPM (Lappeenranta, Finnland), „TEMPO-oxidized cellulose

nanofibre“ von Nippon Paper Industries (Miyagi, Japan), FiloCell™ Process von Kruger (Trois-Rivieres, Canada), und das Al-Pac Verfahren (Methanol Produktion) von Alberta Pacific (Boyle, Canada).

Problemstellungen in der stofflichen Nutzung von Prozessströmen ergeben sich aus den zumeist geringen Wertstoffkonzentrationen sowie der komplexen Matrix. Eine Aufkonzentrierung oder selektive Trennung ist meist erforderlich. Zudem bringen die diversen Stoffströme aus Holz, ganzen Pflanzen, Gras etc. unterschiedliche sowie Feedströme (verschiedener Komponentenzusammensetzung, Temperaturen, pH-Werte etc.) und Produkte mit sich. Zur Aufkonzentrierung sind Aufbereitungsmethoden nach aktuellem Stand der Technik durch druckgetriebene Membranverfahren sowie thermische Trennverfahren gegeben. Die Stand-der-Technik Verfahren benötigen große Mengen an elektrischer Energie zur Bereitstellung hoher Drücke bzw. thermischer Energie auf hohem Temperaturniveau. Bei der Verwendung von Membranen ist Fouling ein immanentes Thema. Um die Ressourceneffizienz in Bioraffinerien nachhaltig zu gestalten, ist es notwendig, auch die energetische Betrachtungsweise von Trenntechnologien zu berücksichtigen. Der Einsatz neuer Technologien, bzw. die Kombination verschiedener Trenntechnologien, soll den Energiebedarf von Papier- und Zellstoffindustrien innerhalb eines energieeffizienten Gesamtkonzeptes darstellen, welches die Nutzung innerbetrieblicher Abwärme sowie energetische Potentiale aus der Verarbeitung (z.B. Vergärung) von biogenen Reststoffen nutzt.

Einen Lösungsansatz zur nachhaltigen und effizienten Gestaltung der Aufbereitung von Stoffströmen konnte mit dem Einsatz alternativer Methoden wie emergierende Membranverfahren gezeigt werden. Die im Rahmen des IEA IETS Annex 17 durchgeführte Langzeitstudie zur Anwendung der Membrandestillation zur Ammoniakvalorisierung aus Abwasser kann als relevantes Beispiel zum Nutzen des Projektes über die österreichischen Grenzen hinaus hervorgehoben werden. Im Konzept einer Abwasserreinigungsanlage als Bioraffinerie vereint sich die stoffliche Nutzung der Komponenten durch zum Teil selektive Trennmechanismen mit Energieeffizienzmaßnahmen. Wesentlich dabei ist, dass Verfahren, wie beispielsweise die Membrandestillation einen zusätzlichen Nutzen sowie die Aufwertung der bestehenden Produktionsprozesse bringen und keinen oder geringen zusätzlichen Aufwand zur Energiebereitstellung erzeugen. Beim thermisch getriebenen Membranverfahren der Membrandestillation kann der thermische Energiebedarf aufgrund der geringen Prozesstemperaturen durch Abwärmenutzung gedeckt werden. In Industriebetrieben wie der Papierfabrik sind oftmals nicht genutzte Abwärmepotentiale ideal integrierbar. Um den Anforderungen der Aufbereitung von Stoffströmen mit unterschiedlichen Anforderungen zu entsprechen, ergibt sich die Möglichkeit oder Notwendigkeit der Kombination emergierender Verfahren als Unterstützung des Stands der Technik von Membranverfahren in mehrstufigen Trennkonzepeten. Im IEA IETS TCP Annex 17 wurde der Einsatz der Membrandestillation für den gegebenen Fall als Bioraffinerie zugänglich gemacht.

Effizienter Energieeinsatz im Allgemeinen, energieeffiziente Aufbereitungstechnologien und industrielle Abwärmenutzung im Besonderen, ist angesichts der Erfüllung nationaler klima- & energiepolitischer Ziele, aber auch hinsichtlich der zukünftigen Wettbewerbsfähigkeit nationaler (energieintensiver) Industrieunternehmen, unabdingbar. Hier zeigt sich, dass insbesondere die Selektivität der Membranen oder die erreichte Selektivität durch intelligente Wahl der Betriebsparameter ein ganz entscheidender Faktor für die Energieeffizienz von Membranverfahren sein kann. In der Membrandestillation beispielsweise kann der Energiebedarf drastisch reduziert werden, wenn die gewünschte volatile Komponente ohne zusätzlichen Wasserdampf durch die Membran diffundieren kann. Die zukünftige Forschung in Bezug auf Entwicklung selektiver Membranen wird daher einen entscheidenden Schritt in der Weiterentwicklung der Membranverfahren darstellen.

Die Teilnahme am Annex gab dem Konsortium die Möglichkeit, seine Expertise aus zahlreichen (inter-)nationalen Forschungsprojekten in die IEA Forschungskoooperation einzubringen und damit die Sichtbarkeit der nationalen Forschungsaktivitäten in diesem Bereich auf internationaler Ebene zu erhöhen. Zudem ermöglichte sie Know-how und Ergebnis-Transfer der ausländischen Expertise zu österreichischen F&E-Einrichtungen und vice versa. Die durchgeführten Vernetzungs- und Know-how Transfer Maßnahmen umfassten die Durchführung eines internationalen Stakeholder Workshops, Beiträge in relevanten Newslettern, Präsentationen auf entsprechenden Homepages (Programmwebseite des bmvit, BIEGE Webseite), Präsentation der Ergebnisse in relevanten Papers, im Rahmen des Science Brunch etc. und die Teilnahme am jährlichen IEA Vernetzungstreffen. Auch auf österreichischen Hochschulen konnten im Rahmen der Lehrtätigkeit des Projektteams die Forschungsarbeiten in der Lehre (TU Graz, FH Burgenland) verbreitet werden. Die Ergebnisse wurden zudem für Publikation auf der IEA Website des bmvit entsprechend aufbereitet.

Des Weiteren erfolgte die Dissemination auf internationalem Level in regelmäßigen Abständen bei den Projektmeetings. Das internationale Konsortium ist sich der Notwendigkeit einer verstärkten Zusammenarbeit und des laufenden Know-how Austausches einig. Ein laufender Wissensaustausch wurde mit höchster Priorität versehen. Dieses Projekt und die Teilnahme am IEA IETS Annex 17 bot somit auch Österreich die Chance im internationalen Umfeld mitwirken zu können und von dem vorhandenen Know-how zu profitieren.

7 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen

7.1 Schlussfolgerungen des Projektteams

Der Wandel hin zu ressourcen- und energieeffizienten Produktionsverfahren vor allem in energie- und ressourcenintensiven Industriezweigen, wie beispielsweise der Papier- und Zellstoffindustrie, stellt in den kommenden Jahren eine wesentliche Herausforderung dar. Bioraffinerien spielen im Kontext einer gesamtheitlichen systemischen Betrachtung eine bedeutsame Rolle, um als Drehschreibe zwischen Ressourcen- und Energieeffizienz in bestimmten Industriezweigen zu wirken.

Der Ansatz einer energieeffizienten und nachhaltigen Aufbereitung von Stoffströmen, durch den Einsatz emergierender Membrantrennverfahren und der Kombinationen unterschiedlicher Technologien kann bestehende Prozesse wie auch neue Konzepte der Bioraffinerie deutlich vorantreiben. Es können neue, entsprechend höhere Aufbereitungsziele verfolgt werden und damit können bislang stofflich und energetisch nicht relevante Teilströme zu wertvollen Produktströmen aufgewertet werden. Zudem bietet die systemische Betrachtung der Bioraffinerie als Ganzes durch die Identifikation von Abwärmequellen und deren Nutzung dieser in den Membrantechnologien als Wärmesenken deutliche Vorteile.

Die ersten Ergebnisse des internationalen IEA IETS Annex 17 haben deutliches Potential der Integration von Membrantechnologien in Bioraffinerien gezeigt und den Grundstein für den nationalen Fokus gelegt. Es wurde dargestellt, welche Forschungsfragen umfassender adressiert werden müssen und dass weiterführende Forschung (Annex 17 Extended) unbedingt notwendig ist. Das Themenfeld im Annex 17 Extended wurde breiter angesetzt: Membrane processes in biorefineries statt Membrane filtration for energy-efficient separation of lignocellulosic biomass components. In der Weiterführung des Annexes auf internationaler Ebene wurden neue Subtasks (mit verstärktem Fokus auf Fouling, Reinigung, Vorbehandlung, Wasser- und Abwasserbehandlung und emergierenden Membranverfahren) definiert. AEE INTEC übernahm den Lead für Subtask E- „Emerging membrane processes“ und das damit verbundene nationale Projekt. Darin wurden Herausforderungen in emergierenden Membranverfahren wie die Membranstabilität gegenüber pH-Wert und Temperatur, mechanische- und chemische Widerstandskraft, optimierte Module mit geringem Fouling Potential und die Selektivität der Membran untersucht. Trotz zufriedenstellenden Ergebnissen werden diese Forschungsfragen auch in Zukunft weiterhin eine entscheidende Rolle spielen und es wird notwendig sein, weiteren Fokus in diese Felder zu legen. Wie anfangs beschrieben ist Lignocellulose-haltige Biomasse eine sehr komplex aufgebaute pflanzliche Struktur, die stark in Bezug auf die Art der Pflanze, Vorkommen und etlichen weiteren Faktoren variiert. Daher ist es aus Sicht des Projektteams notwendig, weitere Biomasse zu betrachten und eine Art Stoffkatalog mit Membranverfahren zu vernetzen, um weiter reichende Aussagen und eventuell grobe Vorhersagen geben zu können.

Die bereits laufende Extension des nationalen Projektes beschäftigt sich mit dem breiten Feld der Bioraffinerien, während im vorliegenden Projekt der Fokus vermehrt auf Zellstoff- und Papier lag. Das Projektteam sieht in jedem Fall Potential und Bedarf, die Forschungstätigkeiten im Feld der Membrantechnologien in Bioraffinerien fortzuführen und zu erweitern. Im Rahmen des Projekts konnte der

intensive Know-how-Austausch eine solide Basis für den weiteren Wissensaufbau bieten. Die in diesem Projekt betrachteten Schwerpunkte lagen auf den emergierenden Membranprozessen (wie Membrandestillation und Flüssigmembranpermeation). Die Anwendungen für die Papier- und Zellstoffindustrie haben dabei gezeigt, dass die Verfahren großes Potential haben, aber noch weitere Entwicklungsschritte benötigen. Für eine wirtschaftliche Anwendung der Verfahren braucht es neben der Steigerung der Membrandurchflusses der gewünschten Komponenten und Erhöhung der Selektivität (Membranforschung und Optimierung von Betriebsparametern) jedenfalls auch Langzeitstudien, um Wartungsaufwand, Fouling, mögliche Reinigungsstrategien und stabile Betriebsbedingungen darstellen zu können.

Gerade in der Papier- und Zellstoffindustrie spielt organisches Fouling eine entscheidende Rolle. Zwar ist das Auftreten in der Membrandestillation weniger intensiv als bei druckbetriebenen Membranverfahren, dennoch müssen vermehrt Langzeitstudien durchgeführt und evaluiert werden. In der Erweiterung des IEA IETS Annex 17 (nationales Projekt Annex 17.1) konnte hier im letzten Jahr durch eine erfolgreiche Langzeitstudie im 24h Betrieb zur Ammoniumentfernung in Kläranlagen ein Meilenstein erreicht werden.

Es ist notwendig, Studien wie diese mit weiteren Bioraffinerie-Strömen durchzuführen, um die Membrandestillation und andere emergierende Membrantechnologien besser in dieser Industrie zu verankern. Außerdem müssen neben notwendigen Optimierungsarbeiten (an pH-Wert und Temperaturoptimum, Reinigungsstrategie etc.) auch ökonomische Studien durchgeführt werden. Die gesamte Palette an möglichen Optionen um innovative Membranprozesse in den Fertigungsablauf zu integrieren, muss forciert werden. Dazu zählen Gesichtspunkte der Energieeffizienz einerseits und die Verlängerung der Wertschöpfungskette durch die Gewinnung von Chemikalien oder/und Wertstoffen andererseits. Diese müssen sichergestellt werden, um neue Verfahren tatsächlich im Stand-der-Technik etablieren zu können.

Bioraffinerien haben zweifelsohne ein enormes Potenzial für die Industrie der Zukunft. Zu den Vorteilen von Bioraffinerien für Lignocellulose gehören die Produktion von Wertstoffen, Biokraftstoffen oder Energie, aber auch die wirtschaftliche Entwicklung in ländlichen Gebieten, die nachhaltige Abfallbewirtschaftung und der allgemeine Nutzen für den Klimawandel, wie die Verringerung der Treibhausgasemissionen. Unregelmäßige Versorgungsketten für Biomasse, Marktunsicherheiten und Herausforderungen bei der Maßstabsvergrößerung stehen dem vollständigen Durchbruch jedoch noch im Wege.

Das Bewusstsein für die Vorteile der industriellen Symbiose für alle Beteiligten muss gestärkt werden. Die industrielle Symbiose von biobasierten Materialien kann Akteure wie Rohstoffverwerter, Energieerzeuger, Energieverbraucher, Abfallverwerter, Düngemittelerzeuger, Düngemittelverbraucher usw. zusammenbringen und dadurch die Schließung von Kreisläufen und die Schaffung einer Kreislaufwirtschaft fördern, wobei die Wiederverwendung von Agro- und Post-Verbraucher-Rückständen zu Kostenwettbewerbsfähigkeit und Umweltvorteilen führt.

Entscheidungsunterstützende Werkzeuge für allgemeine Bioökonomieansätze könnten in Zukunft dabei helfen, die Auswirkungen wirtschaftlicher, ökologischer, technischer, sozialer, politischer oder rechtlicher Aspekte zu evaluieren und der Lieferkette verschiedener Szenarien zu bewerten.

7.2 Weiterführende Forschungsprojekte und IEA-Kooperationen

Auf nationaler Ebene wird der Annex 17.1 bis Ende 2022 weitergeführt, wobei die Arbeiten auf Integrationsbeispiele der gesamten Bioraffinerie ausgeweitet werden (im Vergleich zum bisherigen Fokus auf den Papier- und Zellstoffbereich) und eine Langzeitstudie zu Fouling und Reinigungsstrategien der Membrandestillation zur Ammoniakabtrennung bei Kläranlagen durchgeführt wird.

Auf internationaler Ebene läuft der IETS Annex XVII - Membranes in Biorefineries von Mai 2019 bis 2022. Aus derzeitiger Sicht besteht innerhalb des Konsortiums großes Interesse die Zusammenarbeit fortzuführen und wenn möglich parallel auch zusätzliche Projekte zu akquirieren. Aus Sicht des österreichischen Konsortiums ist es entscheidend, das Thema Langzeitstudien und Fouling inkl. Membrancharakterisierungen, Kombinationen von Membranverfahren sowie Membranreaktoren zu Integration von Reaktion und Separation in den zukünftigen Annex 17 Aktivitäten zu verankern. Die Forschung zur Membranreaktoren könnte die derzeitigen Aktivitäten der Projektpartner im Bereich Hydrolyse, Fraktionierung und Wertstoffextraktion von Biomasse durch die Kopplung mit Membranverfahren ideal erweitern und ein nächster Meilenstein in der Prozesseffizienz erzielt werden. Dies betrifft beispielsweise die in-Situ Abtrennung von Alkoholen in der Fermentation. Eine angrenzende Forschungsthematik betrifft auch die Abwasserbehandlung von Strömen, die mit speziellen Lösemitteln des organischen Aufschlusses (wie EDTA) verunreinigt sind. Eine Kopplung des EDTA Abbaus durch photokatalytische Prozesse zu Wasserstoffgewinnung und dessen selektive Abtrennung aus der Reaktion wäre ein weiteres Beispiel des Einsatzes von Membranreaktoren in Bioraffinerien.

Über den IEA IETS Annex XI ist AEE INTEC in einer weiteren IEA Kooperation zum Thema Industrielle Bioraffinerien vertreten. Dieser zielt auf Lösungen im industriellen Maßstab ab, die eine weitreichende Dekarbonisierung von Energiesektoren durch integrierte Bioraffinerien erreichen und läuft bis Oktober 2022.

Seit 2021 ist AEE INTEC in dem Netzwerk der Innovationsplattform für Bioökonomie & Kreislaufwirtschaft - der BioBASE GmbH - aktiv. Darunter zählt die Teilnahme mit Vorträgen an Veranstaltungen wie Webinaren etc.

Zusätzlich laufen bei AEE INTEC weitere Forschungsprojekte rund um die Membrandestillation, wie beispielsweise Thermaflex: <https://thermaflex.greenenergylab.at/> und Feasibility Studien für die Industrie. Im nationalen Kontext wird ein starker Forschungsbedarf im Feld optimierter Membranstrukturen und Eigenschaften gesehen. Auch im internationalen Kontext geht die Forschung in eine ähnliche Richtung mit spezifischen Ausschreibungen zu optimierten Membranen für Membrandestillation im Horizon Europe Programme 2022.

7.3 Empfehlung des Projektteams an die österreichische FTI Politik

Das Projektteam kann der Politik rund um Forschung, Technologie und Innovation in Österreich nur empfehlen, Forschung zu unterstützen, in welcher es um grundlagenbasierte, aber anwendungsnahe Themen mit holistischem Zugang geht. Hervorzuheben ist dabei die gesamtheitliche Betrachtung von energetischen- und stofflichem Zugang eines technologischen Ansatzes.

Aufgrund der Komplexität und Inhomogenität der Prozess- und Abwässer im Zellstoff- und Papiersektor bestehen für künftige Membrananwendungen bestimmte Forschungs Herausforderungen, um ihre

endgültige Demonstration im industriellen Umfeld ermöglichen. Themen wie die Selektivität einer Rückgewinnungsstufe, die Reinigung des gewünschten Produkts, die Prozessstabilität und Flexibilität sind von großer Bedeutung. Darüber hinaus sind zuverlässige Prozessdaten für eine Umsetzung in der Zellstoff- und Papierindustrie sowie weitere erfolgreiche Pilotprojekte erforderlich, um einen robusten und zuverlässigen Betrieb in der realen Umgebung als Best-Practice-Beispiele zu zeigen, damit die Technologien in größerem Maßstab eingesetzt werden können. Prozessströme aus der Zellstoff- und Papierindustrie enthalten eine Vielzahl interessanter Verbindungen wie Lignin, Hemicellulose, Tallöl, Furfural oder Carbonsäuren. Je nachdem, welche der Verbindungen isoliert werden sollen, müssen unterschiedliche Fragen beantwortet werden.

Fasst man einige wichtige Punkte zusammen, können seitens des Projektteams die folgenden Empfehlungen gegeben werden. Vom derzeitigen Standpunkt wird die Notwendigkeit gesehen, folgende Studien verstärkt zu fördern:

- Untersuchungen zu maßgeschneiderten und kosteneffizienten Verfahrensprotokollen für die Fraktionierung für die entsprechende Auswahl von Vorbehandlungsmitteln, vorzugsweise mit hoher Leistung, geringen Kosten und reduziertem Hemicelluloseabbau²⁶.
- Neue Membranentwicklungen (Konfigurationen und Herstellung). Optimierte Membranen durch e-Beam Bestrahlung; 3D-Druck von Membranen, Membranen ohne halogenierte Elemente (PP statt PTFE)

Nachhaltige Materialien sind das Rückgrat einer umweltfreundlichen Produktion - um wirklich umweltfreundliche Produktionstechniken zu ermöglichen, müssen die verwendeten Materialien nachhaltig produziert werden, eine lange Lebensdauer haben und gut recycelbar sein oder ein Potenzial für After-Life-Produkte aufweisen. Membranverfahren sind in vielen Industriezweigen bereits Stand-der-Technik, z.B. bei der Gastrennung, der Abwasserbehandlung, der Lebensmittelverarbeitung usw., und das Interesse an der Anwendung von Membranverfahren in anderen Industrieprozessen nimmt zu. Im Allgemeinen ermöglichen sie eine nachhaltigere und kreislauforientierte Produktion (d. h. eine bessere Energie- und Ressourceneffizienz) sowie hochwertigere und sicherere Produkte. Membranprozesse gelten als präzise und flexible Technologien, welche bei maximalem Phasenkontakt, Aufbereitungs- und Trennprozesse mit verbesserter Ressourcen- und Energieeffizienz als herkömmlichen Verfahren eingesetzt werden können. In den meisten Fällen werden jedoch die Herkunft, der Produktions- Footprint und die „After-life“ -Nutzung von Membranmaterialien noch nicht in Frage gestellt. Um diese Ziele zu erreichen, sind Membranen mit verbesserten mechanischen und thermischen Eigenschaften erforderlich, die auf die spezifischen Herausforderungen zugeschnitten sind, um eine hohe Leistung bei langer Lebensdauer zu erreichen. Material-/Fertigungs-/Modifizierungsinnovationen mit nachgewiesener hervorragender Leistung und Flexibilität müssen in einen technisch machbaren und skalierbaren Membranherstellungsprozess umgesetzt werden können.

Aktuelle Forschungsthemen, die sich mit diesen Fragen befassen, sind:

- i. Membranoberflächen-Engineering z.B. Modifizierung von Membranen durch E-beam- oder Kaltplasmamodifizierung zur Anpassung der Polymerstruktur (Crosslinking, Porengröße) und zur Funktionalisierung von Oberflächen
- ii. Entwicklung nachhaltigerer Materialien (nicht halogenierte Polymere wie PP oder PE anstelle von PTFE/PVDF oder Biopolymeren) mit geeigneten thermischen und mechanischen Eigenschaften

- iii. Entwicklung neuartiger Membranstrukturen durch 3D-Druck
- iv. Modellbasiertes Membrandesign auf der Grundlage von Transport- und Foulingmodellen um Limitationen entgegenzuwirken:

Um Membranoberflächen-Engineering so einzusetzen, dass die gewünschte Leistung durch ein modifiziertes Membranmaterial mittels E-Beam/Kaltplasma umsetzbar und kontrollierbar sein kann, muss eine Forschungslücke geschlossen werden. Forschung rund um die Fragestellung wie sich die einstellbaren Membraneigenschaften auf die Membranleistung auswirken, und in weiterer Folge auf neue Anwendungen sind von großem Interesse. Könnten wirksame Korrelationen zwischen der Membranstruktur, thermomechanischen Eigenschaften und Leistung hergestellt werden, ließe sich dieser Ansatz auf etliche Polymermembran und/oder Polymermaterialien sowie eine Vielzahl spezieller Einsatzgebiete anwenden.

- Mechanismen zur Verbesserung der Selektivität durch Entkopplung von Transportantriebskräften

- Integrierte Membranprozessdesigns, die eine Kopplung verschiedener Membranprozesse ermöglichen.

Sollen Komponenten selektiv abgetrennt werden, müssen oft mehrere Membranprozesse integriert werden. Die Selektion und Integration der endgültigen Konfiguration ist dabei nicht trivial. Klare Richtlinien und Strategien könnten hier in Zukunft einen Vorteil bringen, idealerweise basieren diese auf integrierten Modellierungswerkzeugen um das Zusammenspiel verschiedener Membrantrennverfahren mit der jeweiligen Prozesseffizienz, dem Energiebedarf und der Komponentenreinheit darzustellen.

- Ausgereifere effektive kombinierte physikalische und chemische Membranreinigungsverfahren, bei denen die Kosten für die erforderlichen Chemikalien die wirtschaftliche Durchführbarkeit der Membrantechnologien nicht beeinträchtigen und bei denen auch Umweltaspekte berücksichtigt werden²⁶.

- Daten zur Identifizierung der wichtigsten Fouling Komponenten durch fortschrittliche Autopsie- und Charakterisierungstechniken für Membranen, um der Komplexität und der hohen Foulingneigung von unterschiedlichen Abwässern gerecht zu werden²⁶.

- Ermittlung optimaler Betriebsbedingungen in Bezug auf Hydrodynamik, Beschickung und Membraneigenschaften²⁶.

- Pilot-Langzeitstudien im 24h Betrieb zur Evaluierung von stabilen Betriebsszenarien und Ermittlung des Wartungsaufwands

- Etablierung der Forschung zu Membranreaktoren, zur in-Situ Entfernung von Wertstoffen aus Reaktionsprozessen in Bioraffinerien

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung der Logos teilnehmender Partner.	12
Abbildung 2: Darstellung von zusammengefassten und veröffentlichten Ergebnissen in „Membranes in Biorefineries – Guideline“	16
Abbildung 3: Schema des 2-stufigen TNOs-Verfahrens (Nanofiltration + Pervaporation/ Dampfpermeation) zur Lignocellulosefraktionierung (Quelle: TNO)	21
Abbildung 4: Typische Feed-wasserqualität und/oder Betriebsgrenzen für verschiedene Membranverfahren (MD, UF, MF, NF, RO, ED).	27
Abbildung 5: Allgemeine Vorbehandlungsstrategie vor dem Membranverfahren.	28
Abbildung 6: Methode zur Unterstützung der Auswahl einer Vorbehandlung eines Bioabfallstroms (Fragen in Rautenform, mit Ja oder Nein zu beantworten führen zu möglichen Behandlungsschritt (rechteckige Kästchen).	31
Abbildung 7: Schrittweiser Ansatz zur Integration von Membranen in der Zellstoff- und Papierindustrie	32
Abbildung 8: Schematische Einstufung eines Bewertungskriteriums nach dem Ampelsystem mit einbezogener Standardabweichung.....	36
Abbildung 9: Schematische Darstellung der linearen Interpolation anhand des Beispiels des Bewertungskriteriums „Diffusionskoeffizient“ in der Flüssigmembranpermeation.....	43
Abbildung 10: Guideline – Membranes in Biorefineries	46
Abbildung 11: International Workshop zum Nexus Energie, Wasser & (Bio)-Industrie	47
Abbildung 12: Programm des Internationalen Workshop zum Nexus Energie, Wasser & (Bio) Industrie	49

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick über Prozess- und Abwasserströme als potenzielle Integrationspunkte für neu entstehende Membranverfahren. (Die Tabelle zeigt nicht die Gesamtzusammensetzung, sondern nur die Komponenten der jeweiligen Rohstoffe, die für die betrachtete Anwendung von Interesse sind.)	20
Tabelle 2: Überblick von Eigenschaften der derzeit eingesetzten Membrantrennverfahren in Bioraffinerien (,,,,,)	22
Tabelle 3: Verschiedene Eigenschaften von Zellstoff- und Papierabwässern und Prozesswässern (modifiziert aus Bokhary et al., 2018 ²⁶)	24
Tabelle 4: Chemische Beständigkeit einiger Membranmaterialien. Modifiziert nach Wagner, 2001 .	26
Tabelle 5: Bereits in Betrieb befindliche Membrananlagen in der Zellstoff- und Papierindustrie (* = Betriebsbeginn 2022).	33
Tabelle 6: Kosten für verschiedene Anwendungen und Membrantypen	35
Tabelle 7: Allgemeines Bewertungskriterium Abtrennungs-/Aufkonzentrierungserfolg, durchgeführte wissenschaftliche Experimente und Primärenergiebedarf	37
Tabelle 8: Allgemeines Bewertungskriterium durchgeführte wissenschaftliche Experimente	37
Tabelle 9: Allgemeines Bewertungskriterium Primärenergiebedarf.....	38
Tabelle 10: Darstellung der Einstufung des spezifischen Bewertungskriteriums Partialdampfdruckdifferenz.	38
Tabelle 11: Darstellung der Einstufung des spezifischen Bewertungskriteriums transmembraner Fluss.	39
Tabelle 12: Darstellung der Einstufung des spezifischen Bewertungskriteriums Feedtemperatur.....	39
Tabelle 13: Darstellung des spezifischen Bewertungskriteriums Diffusionskoeffizient für die Flüssigmembranpermeation (FMP) inklusive Einstufung mit Farbcode.	40
Tabelle 14: Darstellung des spezifischen Bewertungskriteriums Wasserlöslichkeit der Komponente für die Flüssigmembranpermeation (FMP) inklusive Einstufung mit Farbcode.	40
Tabelle 15: Darstellung des spezifischen Bewertungskriteriums Feedtemperatur für die Pervaporation (PV) inklusive Einstufung mit Farbcode.....	41
Tabelle 16: Darstellung des spezifischen Bewertungskriteriums Partialdampfdruckdifferenz für die Pervaporation (PV) inklusive Einstufung mit Farbcode.....	41
Tabelle 17: Darstellung des spezifischen Bewertungskriteriums transmembraner Flux für die Pervaporation (PV) inklusive Einstufung mit Farbcode.....	42
Tabelle 18: Darstellung des spezifischen Bewertungskriteriums Molekülgröße für die Vorwärtsosmose (VO) inklusive Einstufung mit Farbcode.	42
Tabelle 19: Darstellung des spezifischen Bewertungskriteriums transmembraner Fluss für die Vorwärtsosmose (VO) inklusive Einstufung mit Farbcode.	43
Tabelle 20: Bewertungsmatrix aller Membrantrennverfahren hinsichtlich des Potentials zur Abtrennung (gelbe Werte) oder Aufkonzentration (blaue Werte) von Lignin, Lignosulfonat, Glucose, Essigsäure, Methanol, Vanillin, Furfural, Harzen und Fettsäuren.....	44

Abkürzungsverzeichnis

AOP	Advanced Oxidation Process
BSB	Biologischer Sauerstoffbedarf
CA	Cellulose Acetat
COD	Chemical Oxygen Demand
CSB	Chemischer Sauerstoff Bedarf
CR	Cross-Rotational
ED	Extraktiv Destillation
EPS	Extrazelluläre polymere Substanzen
FMP	Flüssigmembranpermeation
FO	Forward osmosis
IF	Ionische Flüssigkeit
LCB	Lignocellulose-Biomasse
MBR	Membran Bioreaktor
MD	Membrandestillation
MF	Mikrofiltration
MWCO	Molecular Weigth Cut Off
NF	Nanofiltration
PAN	Polyacrylnitril
PSO	Polysulfon
PTFE	Polytetrafluorethylen
PV	Pervaporation
PCD	Pulsed Corona Discharge (gepulste Corona-Entladung)
PVDF	Polyvinylidenfluorid
RO	Reverse Osmosis
SdT	Stand der Technik
SiO ₂	Siliciumdioxid
SLMP	Supported liquid membrane permeation
SMP	Lösliche (Soluble) mikrobielle Produkte
SSL	Spent sulfite liquor
TFC	Thin-film composit

TFM	Thin-film membrane
TMC	Trimesoyl Chloride
TMW	Thermomechanical pulping water
TDS	Total dissolved solids
TS	Total solids
TSS	Total suspended solids
UF	Ultrafiltration
UO	Umkehr Osmose
VO	Vorwärtsosmose
wt %	(eng. Weight) Gewichtsprozent

Literaturverzeichnis

- ¹ https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en#documents aufgerufen am 31.05.2022
- ² https://ec.europa.eu/environment/strategy/circular-economy-action-plan_en aufgerufen am 31.05.2022
- ³ <https://www.bmk.gv.at/themen/innovation/publikationen/energieumwelttechnologie/biooekonomiestrategie.html> aufgerufen am 31.05.2022
- ⁴ <https://www.aee-intec.at/iea-iets-tcp-task-17-membranfiltration-zur-energieeffizienten-trennung-lignozelluloser-biomassebestandteile-p226>
- ⁵ H. Niemi et al., "Fractionation of Organic and Inorganic Compounds from Black Liquor by Combining Membrane Separation and Crystallization," *Chem. Eng. Technol.*, vol. 34, no. 4, pp. 593–598, 2011, doi: 10.1002/ceat.201000520.
- ⁶ C.-H. Kim, J.-Y. Lee, S.-H. Park, and S.-O. Moon, "Global Trends and Prospects of Black Liquor as Bioenergy," *JKTAPPI*, vol. 51, no. 5, pp. 3–15, 2019, doi: 10.7584/JKTAPPI.2019.10.51.5.3.
- ⁷ M. Mänttari, J. Lahti, H. Hatakka, M. Louhi-Kultanen, and M. Kallioinen, "Separation phenomena in UF and NF in the recovery of organic acids from kraft black liquor," *Journal of Membrane Science*, vol. 490, pp. 84–91, 2015, doi: 10.1016/j.memsci.2015.04.048.
- ⁸ P. Demmelmayer, J. Hilgert, R. Wijaya, and M. Kienberger, "Screening of Reactive Extractants for the Lignosulfonate Extraction from Lignosulfonate Model Solution and Spent Sulfite Liquor," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 59, no. 37, pp. 16420–16426, 2020, doi: 10.1021/acs.iecr.0c02525.
- ⁹ H. G. Lawford and J. D. Rousseau, "Production of ethanol from pulp mill hardwood and softwood spent sulfite liquors by genetically engineered *E. coli*," *ABAB*, 39–40, pp. 667–685, 1993, doi: 10.1007/BF02919027.
- ¹⁰ R. Miner, Environmental Considerations and Information Needs Associated With an Increased Reliance on Recycled Fiber, In Focus 95+ Proceedings, TAPPI PRESS, Atlanta, pp. 343–362. Mill waste materials. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, Vol. 86, pp. 66–73, 1991.
- ¹¹ M. Likon, Polonca Trebše, Insol Ltd, Postojna, University of Nova Gorica, Slovenia
- ¹² B. Dhandapani *et al.*, "Production of lactic acid from industrial waste paper sludge using *Rhizopus oryzae* MTCC5384 by simultaneous saccharification and fermentation," *Chemical Engineering Communications*, pp. 1–9, 2019, doi: 10.1080/00986445.2019.1657422.
- ¹³ A. Romani, R. Yáñez, G. Garrote, and J. L. Alonso, "SSF production of lactic acid from cellulosic biosludges," *Bioresource technology*, vol. 99, no. 10, pp. 4247–4254, 2008, doi: 10.1016/j.biortech.2007.08.051.
- ¹⁴ <https://patents.google.com/patent/WO2016131828A1/en> aufgerufen am 04.01.2022.
- ¹⁵ K. He, H.J. Hwang, M.W. Woo and I.S. Moon, 'Production of drinking water from saline water by direct contact membrane distillation (DCMD)', *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 17, No. 1, pp.41–84, 2011.
- ¹⁶ A. Basile, A. Figoli and M. Khayet, *Pervaporation, Vapour Permeation and Membrane Distillation, Principles and Applications*, Woodhead Publishing Series in Energy, Book 2015.
- ¹⁷ A. Bokhary, L. Cui, H.J. Lin, B.Q. Liao, A Review of Membrane Technologies for Integrated Forest Biorefinery, *Journal of Membrane Science and Research* 3, 120–141, 2017.
- ¹⁸ K. Ohlrogge, K. Ebert, *Membranen, Grundlagen, Verfahren und industrielle Anwendungen*, ISBN: 9783527309795, 2006.
- ¹⁹ T.-C. Chen, G.-H. Huang, C.-S. Chen, Y.-H. Huang, Reducing industrial wastewater and recovery of gold by direct contact membrane distillation with electrolytic system, 2013, *Sustainable Environment Research* 23(3):209–214.
- ²⁰ C. Staudt, D. D. Katarzynski, D. I. Bettermann, *Membranverfahren zur Auftrennung von gasförmigen und flüssigen Stoffgemischen*. Analytik NEWS, Ober-Ramstadt, 17, 2010.
- ²¹ Van der Bruggen, *Integrated Membrane Separation Processes for Recycling of Valuable Wastewater Streams: Nanofiltration, Membrane Distillation and Membrane Crystallizers Revisited*, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, ISSN: 1520-5045, 2013.
- ²² J. Stubenvoll u. a., „TECHNISCHE MASSNAHMEN ZUR MINDERUNG DER STAUB- UND NOX- EMISSIONEN BEI WIRBELSCHICHT- UND LAUGENVERBRENNUNGSKESSELN“, o. J., 129.
- ²³ M. Suhr u. a., *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp , Paper and Board*, <https://doi.org/10.2791/370629>, 2015.
- ²⁴ B. Liao u. a., „A Review of Membrane Technology for Integrated Forest Biorefinery“, *Journal of Membrane Science and Research*, Nr. Online First , <https://doi.org/10.22079/jmsr.2016.22839>, 2016.
- ²⁵ Masterarbeit Johann Ressler, *Membranfiltration zur energieeffizienten Trennung Lignocellulose-haltiger*

Biomassebestandteile, 2019, Fachhochschule Burgenland GmbH, Department Energie- und Umweltmanagement

²⁶ A. Bokhary u. a., „Membrane Fouling Prevention and Control Strategies in Pulp and Paper Industry Applications: A Review“, *Journal of Membrane Science and Research* 4, Nr. 4: 181–97, <https://doi.org/10.22079/jmsr.2018.83337.1185>, 2018.

²⁷ E. Koivula u. a., „Evaluation of Various Pretreatment Methods to Manage Fouling in Ultrafiltration of Wood Hydrolysates“, *Separation and Purification Technology* 83: 50–56, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.09.006>, 2011.

²⁸ J. Wagner, „Membrane Filtration Handbook Practical Tips and Hints“ (Osmonics, Inc., <https://dpyxfsj0mft.cloudfront.net/filtertechnics/Membrane%20Filtration%20Handbook%20Filter-Technics.pdf?1600418482&w=0&h=0>, 2001.

²⁹ Bokhary u. a., „Membrane Fouling Prevention and Control Strategies in Pulp and Paper Industry Applications“; Koivula u. a., „Evaluation of Various Pretreatment Methods to Manage Fouling in Ultrafiltration of Wood Hydrolysates“;

Yanmei Xu, Youming Li, und Yi Hou, „Reducing Ultrafiltration Membrane Fouling during Recycled Paper Mill Wastewater Treatment Using Pretreatment Technologies: A Comparison between Coagulation and Fenton“, *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 94, Nr. 3 (2019): 804–11, <https://doi.org/10.1002/jctb.5826>.

³⁰ S. Kalafatakis u. a., „Biofouling Mitigation Approaches during Water Recovery from Fermented Broth via Forward Osmosis“, *Membranes* 10, Nr. 11: 307, <https://doi.org/10.3390/membranes10110307>, 2020.

³¹ S. Babel und S. Takizawa, „Chemical Pretreatment for Reduction of Membrane Fouling Caused by Algae“, *Desalination* 274, Nr. 1–3: 171–76, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.02.008>, 2011.

³² F. Román, J. Adolph, O. Hensel, „Hydrothermal Treatment of Biogas Digestate as a Pretreatment to Reduce Fouling in Membrane Filtration“, *Bioresource Technology Reports* 13: 100638, <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100638>, 2021.

³³ J. C. Parajó, H. Domínguez, und J. M. Domínguez, „Charcoal Adsorption of Wood Hydrolysates for Improving Their Fermentability: Influence of the Operational Conditions“, *Bioresource Technology* 57, Nr. 2: 179–85, [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(96\)00066-1](https://doi.org/10.1016/0960-8524(96)00066-1), 1996.

³⁴ E. Strand u. a., „Multivariate Data Examination in Evaluation of the Effect of the Molecular Mass of Lignin and Hemicelluloses on Ultrafiltration Efficiency“, *Separation and Purification Technology* 144: 146–52, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.02.013>, 2015.

³⁵ A.-K. Kontturi, K. Kontturi, P. Niinikoski, and G. Sundholm, „Extraction and fractionation of lignosulfonate by a supported liquid membrane,“ in *Progress in Colloid & Polymer Science*, vol. 88, *Advances in colloid structures*, B. Lindman and J. Sjöblom, Eds., Darmstadt: Steinkopff, pp. 90–95, 1992.

³⁶ M. Kienberger, P. Demmelmayer, M. Weißl, A. Zankl, and S. Spirk, „Biobased Support Layers for the Fractionation and Selective Extraction of Lignosulfonates,“ *Solvent Extraction and Ion Exchange*, vol. 38, no. 1, pp. 132–141, 2020, doi: 10.1080/07366299.2019.1691764.

³⁷ C. Ke Xian, N. Othman, N. Harruddin, N. A. Nasruddin, and Z. Yi Ooi, „Extraction of Lignosulfonate using TOA-Kerosene-PVDF in Supported Liquid Membrane Process,“ *Jurnal Teknologi*, vol. 67, no. 2, doi: 10.11113/jt.v67.2737, 2014.

³⁸ H. Evju, „Process for Preparation of 3-methoxy-4-hydroxybenzaldehyde,“ Patent 4151207, <https://patents.google.com/patent/US4151207A/en> aufgerufen 20. Februar 2022.

³⁹ B. Al-Rudainy, M. Galbe, and O. Wallberg, „From lab-scale to on-site pilot trials for the recovery of hemicellulose by ultrafiltration: Experimental and theoretical evaluations,“ *Separation and Purification Technology*, vol. 250, p. 117187, 2020.

⁴⁰ K. Servaes et al., „Purification and concentration of lignin from the spent liquor of the alkaline oxidation of woody biomass through membrane separation technology,“ *Industrial Crops and Products*, vol. 106, pp. 86–96, doi: 10.1016/j.indcrop.2016.10.005, 2017.

⁴¹ A. K. Pabby, S. S. H. Rizvi, and A. M. Sastre, *Handbook of membrane separations: Chemical, pharmaceutical, food, and biotechnological applications*. Boca Raton: CRC Press, 2009.

⁴² E. Trokic, „Ultrafiltration of BPE from a sulphite plant.docx,“ Master Thesis, Lund University, Sweden, 2017. Accessed: Jul. 19 2021. [Online]. Available: <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=8913697&fileId=8913719>

⁴³ E. Moslehi, „Integrating membrane filtration for water reuse in tissue mill,“ Master thesis, KTH Royal Institute of Technology, SKOLAN FÖR KEMI, BIOTEKNOLOGI OCH HÄLSA, Stockholm, 2018.

⁴⁴ M. Mänttari, M. Kallioinen, A. Pihlajamäki, and M. Nyström, „Industrial membrane processes in the treatment of process waters and liquors,“ *Water Science and Technology*, vol. 62, no. 7, pp. 1653–1660, doi: 10.2166/wst.2010.940, 2010.

-
- ⁴⁵ M. Villain-Gambier, M. Courbalay, A. Klem, S. Dumarcay, and D. Trebouet, "Recovery of lignin and lignans enriched fractions from thermomechanical pulp mill process water through membrane separation technology: Pilot-plant study and techno-economic assessment," *Journal of Cleaner Production*, vol. 249, p. 119345, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119345, 2020.
- ⁴⁶ A. Arkell, J. Olsson, and O. Wallberg, "Process performance in lignin separation from softwood black liquor by membrane filtration," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 92, no. 9, pp. 1792–1800, doi: 10.1016/j.cherd.2013.12.018, 2014.
- ⁴⁷ B. Al-Rudainy, M. Galbe, F. Lipnizki, and O. Wallberg, "Galactoglucomannan Recovery with Hydrophilic and Hydrophobic Membranes: Process Performance and Cost Estimations," *Membranes*, vol. 9, no. 8, doi: 10.3390/membranes9080099, 2019.
- ⁴⁸ J. Thuvander, F. Lipnizki, and A.-S. Jönsson, "On-Site Recovery of Hemicelluloses from Thermomechanical Pulp Mill Process Water by Microfiltration and Ultrafiltration," *Journal of Wood Chemistry and Technology*, vol. 39, no. 3, pp. 214–223, doi: 10.1080/02773813.2019.1565865, 2019.
- ⁴⁹ Europäisches Arzneibuch, Europäische Arzneibuch-Kommission, 7. Ausgabe, inkl. Nachtrag 7.8: Amtliche deutsche Ausgabe CD-ROM, Version 7, Stuttgart: Deutscher Apotheker Verlag, 2011,. 978-3-7692-5879-0 (ISBN).
- ⁵⁰ <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/fdz/projekte/demonstrationsanlage-gruene-bioraffinerie-utzenaich.php> aufgerufen am 04.01.2022.
- ⁵¹ <https://www.storaenso.com/en/products/bio-based-materials> aufgerufen am 04.01.2022.
- ⁵² <https://www.lenzing.com/de/nachhaltigkeit/produktion/bioraffinerie/> aufgerufen am 04.01.2022.

Anhang

Tabelle 1a: Darstellung der detaillierten Bewertungsmatrix der Technologien Membrandestillation, Pervaporation, Flüssigmembranpermeation und Vorwärtsosmose. (J. Ressler, 2019 ²⁵)

Membrandestillation (MD)								
	Lignin	Ligno-sulfonate	Glucose	Essig-säure	Methanol	Vanillin	Furfural	Harze & Fettsäuren
Temperatur des Feedstromes	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Partialdampfdruckdifferenz	2,00	2,00	1,91	2,63	1,00	1,91	2,01	2,00
Wissenschaftliche Experimente	2,00	2,00	1,00	1,00	1,00	2,00	1,00	2,00
Transmembraner Fluss	2,00	2,00	1,38	2,15	1,00	2,00	2,15	2,00
Aufkonzentrierungserfolg	2,00	2,00	1,01			2,00		2,00
Abtrennungserfolg				2,69	1,53		1,29	
Primärenergiebedarf	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22
Bewertung innerhalb MD	1,70	1,70	1,25	1,78	1,13	1,69	1,45	1,70

Pervaporation (PV)								
	Lignin	Lignin-sulfonate	Glucose	Essig-säure	Methanol	Vanillin	Furfural	Harze & Fett-säuren
Temperatur des Feedstromes	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Partialdampfdruckdifferenz	2,00	2,00	1,91	2,63	1,00	1,91	2,01	2,00
Wissenschaftliche Experimente	2,00	2,00	2,00	1,00	3,00	1,00	1,00	2,00
Transmembraner Fluss	2,00	2,00	2,00	2,43	2,49	2,93	2,00	2,00
Aufkonzentrierungserfolg	2,00	2,00	2,00	2,00				2,00
Abtrennungserfolg					2,88	2,77	1,50	
Primärenergiebedarf	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00

Bewertung innerhalb PV	2,00	2,00	1,99	2,01	2,23	2,10	1,75	2,00
-------------------------------	------	------	------	------	------	------	------	------

Flüssigmembranpermeation (FMP)								
	Lignin	Lignin-sulfonate	Glucose	Essig säure	Methanol	Vanillin	Furfural	Harze & Fett-säuren
Diffusionskoeffizienten	2,58	2,68	2,17	1,88	1,69	2,24	2,05	2,40
Wasserlöslichkeit der Komponente	2,00	2,00	3,00	2,83	2,83	1,33	2,04	1,00
Wissenschaftliche Experimente	1,00	1,00	1,00	3,00	2,00	1,00	2,00	2,00
Re-/Extraktionserfolg	1,20	1,26	2,00	2,61	2,00	1,31	2,00	2,00
Primärenergiebedarf	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01

Bewertung innerhalb FMP	1,56	1,59	1,84	2,27	1,91	1,38	1,82	1,68
--------------------------------	------	------	------	------	------	------	------	------

Vorwärtsosmose (VO)								
	Lignin	Lignin-sulfonate	Glucose	Essig-säure	Methanol	Vanillin	Furfural	Harze & Fettsäuren
Molekülgröße	1,00	1,00	1,80	2,52	2,72	2,72	1,45	2,20
Wissenschaftliche Experimente	2,00	2,00	1,00	1,00	2,00	2,00	1,00	2,00
Transmembraner Fluss	2,00	2,00	2,24	1,66	2,00	2,00	2,63	2,00
Aufkonzentrierungserfolg	2,00	2,00	1,19	1,10	2,00	2,00	1,15	2,00
Primärenergiebedarf	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
Bewertung innerhalb VO	2,00	2,00	1,81	1,82	2,43	2,43	1,81	2,30

A large, light blue geometric shape, resembling a right-angled triangle or a trapezoid, is positioned on the right side of the page. It has a vertical right edge and a horizontal top edge, with a diagonal line connecting the top-left corner to the bottom-right corner.

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)