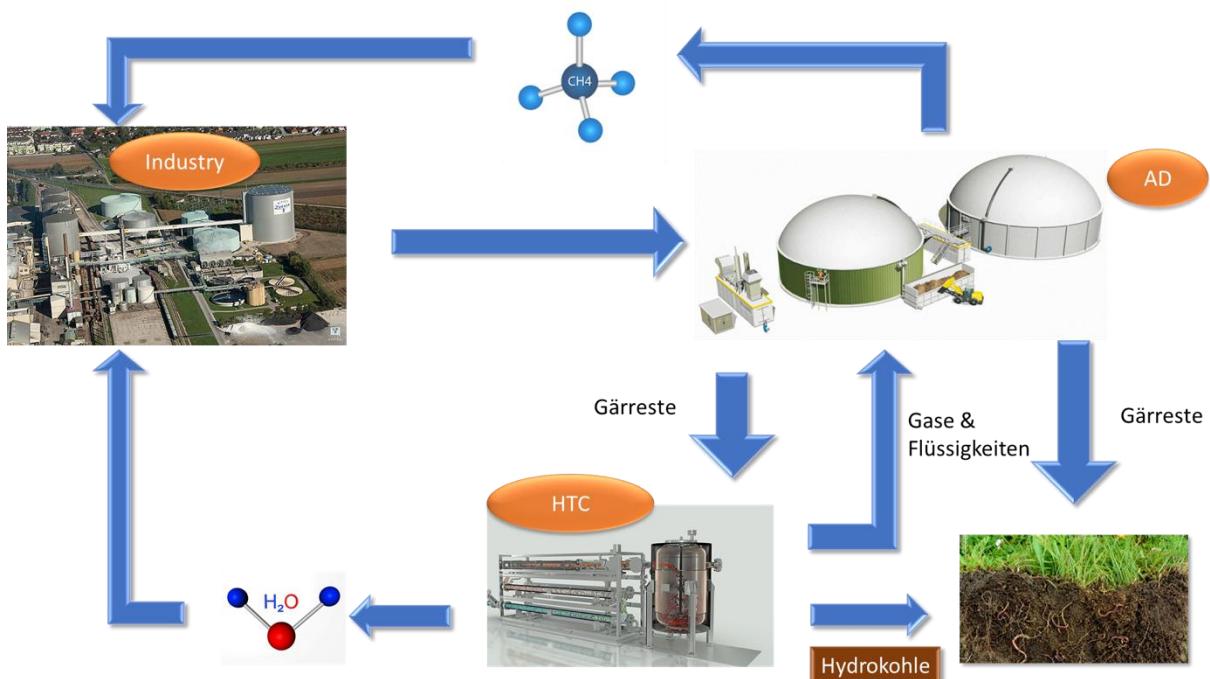




Schlussbericht vom 25.Okt 2025

VARESI – Valorisation of industrial residues for a sustainable industry

Verwertung von industriellen Reststoffen für eine nachhaltige Industrie





Zurich University
of Applied Sciences



Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Biomasse
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger/innen:

ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften
LSFM Departement Life Science and Facility Management
ICBT Institut für Chemie und Biotechnologie
Fachstelle Biokatalyse und Prozesstechnologie
Fachgruppe Umweltbiotechnologie
Campus Reidbach, Postfach, CH – 8820 Wädenswil
<https://www.zhaw.ch/de/forschung/forschungsdatenbank/projektdetail/projektid/5694/>

Autor/innen:

Alexander Treichler, ehemals ZHAW, (ICBT) alex.treichler@trectec.net
Hans-Joachim Nägele, ZHAW, (ICBT) hans-joachim.naegele@zhaw.ch
Jörg Musiolik, ZHAW; (INE) joerg.musiolik@zhaw.ch
Paola Yanguas, ZHAW; (INE) yanu@zhaw.ch

BFE-Projektbegleitung:

Sandra Hermle, sandra.hermle@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502006-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren/Autorinnen dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Im Rahmen der 14. ERA-NET Bioenergie Ausschreibung (2021) wurde ein Null-Abfall-Konzept für die Bereitstellung von Wärme und Wasser aus industriellen Reststoffen erarbeitet. **Das VARESI-Konzept führt zu einer verbesserten energetischen Ausnutzung von nasser Biomasse**, was zu einer Reduktion von Treibhausgasemissionen führt und so die Netto-Null-Ziele der Industrie unterstützt.

Die Prozesskaskade anaerobe Vergärung → hydrothermale Carbonisierung (HTC) → anaerobe Vergärung soll leicht verwertbare Inhaltsstoffe primär zu Biogas / Biomethan umwandeln, der mikrobiell nicht verwertbare Kohlenstoff im Gärrest wird mittels HTC aufbereitet. So wird gleichzeitig Kohlenstoff in der hydrothermalen Biokohle fixiert, aber auch in das Prozesswasser überführt. Dieser teilweise erneut mikrobiell verfügbare Kohlenstoff wird in einer zweiten anaeroben Vergärungsstufe ebenfalls zu Biogas bzw. Biomethan verwertet. Biomethan und Biokohle lassen sich ausgezeichnet in hochtemperatur Prozesswärme für industrielle Zwecke umwandeln.

Die **Valorisierung des Prozesswassers**, insbesondere dem schwer abbaubaren Anteil, gilt als grosse Herausforderung der HTC-Technologie. Für die Wirtschaftlichkeit, aber auch für die Umweltbilanz des Gesamtprozesses ist eine hohe Kohlenstoff-Effizienz essenziell.

Die konsequente Verwertung des Prozesswassers verfolgt die **vollständige Rückgewinnung der chemisch gebundenen Energie durch anaerobe Vergärung und Membranfiltration**, gefolgt von der Bereitstellung von gereinigtem Wasser als Ressource. Dieser Ansatz bietet eine wertvolle Alternative zu anderen Verfahren, deren Reinigungsleistung primär durch Elimination zu CO₂ erfolgt, welche nie energiepositiv ausfallen kann.

Das «Proof of Principle» einer vollständigen Verwertungskette mit einer über 200 Tage kontinuierlich betriebenen, stabilen anaeroben Vergärung konnte im grösseren Labormasstab gezeigt werden.

Insgesamt dient **HTC als Schlüsseltechnologie**, um nasse Biomasse effizienter zu nutzen, da carbonisiertes Material aufgrund der wasserabweisenden Eigenschaften bedeutend einfacher zu entwässern und trocknen ist. Im Vergleich zur konventionellen Nutzung lassen sich wesentliche Energiegewinne erzielen und der Brennstoff Biokohle besitzt eine verbesserte Lagerbarkeit.

Um das neue Konzept zu prüfen, stellt die papierverarbeitende Industrie einen geeigneten Anwendungsfall dar, denn Wärmebereitstellung und Wasserrückgewinnung aus lokal anfallenden Reststoffen sind zentrale Aspekte. Die von der Papierfabrik TELA GmbH, Niederbipp zur Verfügung gestellten Substrate wurden carbonisiert und die erhaltenen Labor-Messdaten in einem Energiemodell angewendet.

Das neue Verfahrenskonzept führt aufgrund **deutlich effizienterer Ausnutzung der bestehenden Biomasseströme** zur Verbesserung der Gesamtenergiebilanz der TELA GmbH und somit zu einer signifikanten Reduktion fossiler Emissionen. Gemäss den Berechnungen können aus 20'420 t Papier- und Bioschlamm im konventionellen Betrieb 22'133 MWh und mittels VARESI-Konzept 33'311 MWh (Variante 2.2) bzw. 34'738 MWh (Variante 2.4) Energie gewonnen werden. Der zusätzliche Energiegewinn beläuft sich dabei auf rund 11'200 bzw. 12'600 MWh, was umgerechnet auf den Gesamtenergiebedarf von 2023 einem Mehrwert von 5.9% bis 6.7% entspricht. Durch Substitution von Erdgas liessen sich die CO₂-Emissionen um 2'500 t pro Jahr reduzieren, was knapp 13% der jährlichen Gesamtemissionen entspräche.

Die experimentellen Ergebnisse belegen, dass das energetische Potenzial von Papierschlamm bereits unter moderaten Prozessbedingungen der hydrothermalen Carbonisierung weitgehend ausgeschöpft werden kann. Die **substratspezifische Optimierung der HTC-Prozessbedingungen führt zu einer erhöhten Energieausbeute**. Ohne diese genauer eingegrenzten Prozessparameter ist eine detaillierte Prozessauslegung nicht belastbar und eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung im Rahmen dieser Arbeit wäre verfrüht.



Résumé

Dans le cadre du 14e appel à projets ERA-NET Bioénergie (2021), un concept zéro déchet a été élaboré pour la fourniture de chaleur et d'eau à partir de résidus industriels. Le concept VARESI permet une meilleure utilisation énergétique de la biomasse humide, ce qui entraîne une réduction des émissions CO₂ à effet de serre et soutient ainsi les objectifs de zéro émissions nettes de l'industrie.

La cascade de processus fermentation anaérobie → carbonisation hydrothermique (HTC) → fermentation anaérobie vise à transformer les composants facilement exploitables en biogaz / biométhane, tandis que le carbone non exploitable par les micro-organismes dans les résidus de fermentation est traité par HTC. Ainsi, le carbone est à la fois fixé dans le charbon hydrothermique, mais également transféré dans l'eau de traitement. Ce carbone, en partie à nouveau disponible pour les micro-organismes, est également valorisé en biogaz ou biométhane lors d'une deuxième étape de fermentation anaérobie. Le biométhane et le charbon peuvent être facilement convertis en chaleur industrielle à haute température à des fins industrielles.

La valorisation de l'eau de traitement, en particulier de la partie difficilement dégradable, est considérée comme un défi majeur de la technologie HTC. Une efficacité carbone élevée est essentielle pour la rentabilité, mais aussi pour le bilan environnemental de l'ensemble du processus.

La valorisation systématique des eaux de process vise à récupérer intégralement l'énergie chimiquement liée par fermentation anaérobie et filtration membranaire, puis à fournir de l'eau purifiée comme ressource. Cette approche offre une alternative intéressante à d'autres procédés de purification dont la performance repose principalement sur l'élimination vers CO₂, qui ne peut jamais être positive sur le plan énergétique.

La «preuve de principe» d'une chaîne de valorisation complète avec une fermentation anaérobie stable fonctionnant en continu pendant plus de 200 jours a pu être démontrée à une échelle de laboratoire plus grande.

Dans l'ensemble, la HTC est une technologie clé pour une utilisation plus efficace de la biomasse humide, car les matériaux carbonisés sont beaucoup plus faciles à déshydrater et à sécher en raison de leurs propriétés hydrofuges. Par rapport à l'utilisation conventionnelle, des gains énergétiques importants peuvent être réalisés et le biocarbone est un combustible plus facile à stocker.

L'industrie papetière constitue un cas d'application approprié pour tester ce nouveau concept, car la fourniture de chaleur et la récupération d'eau à partir de résidus locaux sont des aspects centraux. Les substrats fournis par la papeterie TELA GmbH, à Niederbipp, ont été carbonisés et les données de mesure obtenues en laboratoire ont été utilisées dans un modèle énergétique.

Le nouveau concept de procédé permet d'améliorer le bilan énergétique global de TELA GmbH grâce à une utilisation nettement plus efficace des flux de biomasse existants, ce qui se traduit par une réduction significative des émissions fossiles. Selon les calculs, 20'420 tonnes de papier et de boues biologiques permettent de produire 22'133 MWh en fonctionnement conventionnel et 33'311 MWh (variante 2.2) ou 34'738 MWh (variante 2.4) avec le concept VARESI. Le gain d'énergie supplémentaire s'élève à environ 11'200 ou 12'600 MWh, ce qui correspond à une valeur ajoutée de 5,9% à 6,7% par rapport aux besoins énergétiques totaux de 2023. La substitution du gaz naturel permettrait de réduire les émissions de CO₂ de 2'500 tonnes par an, soit près de 13% des émissions annuelles totales.

Les résultats expérimentaux montrent que le potentiel énergétique des boues de papier peut déjà être largement exploité dans des conditions de carbonisation hydrothermique modérées. L'optimisation des conditions du processus HTC en fonction du substrat permet d'augmenter le rendement énergétique. Sans ces paramètres de processus plus précis, une conception détaillée du processus n'est pas fiable et une analyse de rentabilité dans le cadre de ce travail serait prématuree.



Summary

As part of the 14th ERA-NET Bioenergy call for proposals (2021), a zero-waste concept for the provision of heat and water from industrial residues was developed. The VARESI concept leads to improved energy utilisation of wet biomass, which results in a reduction in greenhouse gas emissions and thus supports the industry's net-zero targets.

The process cascade anaerobic digestion → hydrothermal carbonisation (HTC) → anaerobic digestion is designed to convert easily usable ingredients primarily into biogas/biomethane, while the carbon in the digestate that cannot be used microbially is processed using HTC. This simultaneously fixes carbon in the hydrothermal biochar, but also transfers it to the process water. This carbon, some of which is once again microbiologically available, is also converted into biogas or biomethane in a second anaerobic digestion stage. Biomethane and biochar can be excellently converted into high-temperature process heat for industrial purposes.

The valorisation of the process water, especially the difficult-to-degrade fraction, is considered a major challenge for HTC technology. High carbon efficiency is essential for the economic viability and environmental performance of the overall process.

The consistent recycling of process water aims to fully recover the chemically bound energy through anaerobic digestion and membrane filtration, followed by the provision of purified water as a resource. This approach offers a valuable alternative to other relevant purification processes whose performance is primarily achieved through elimination to CO₂, which can never be energy-positive.

The proof of principle of a complete utilisation chain with stable anaerobic fermentation operated continuously for over 200 days has been demonstrated on a larger laboratory scale.

Overall, HTC serves as a key technology for using wet biomass more efficiently, as carbonised material is significantly easier to dewater and dry due to its water-repellent properties. Compared to conventional use, significant energy gains can be achieved and biochar fuel has improved storability.

The paper processing industry is a suitable application for testing the new concept, as heat supply and water recovery from locally produced waste materials are key aspects. The substrates provided by the TELA GmbH paper mill in Niederbipp were carbonised and the laboratory measurement data obtained was applied in an energy model.

The new process concept leads to an improvement in the overall energy balance of TELA GmbH and thus to a significant reduction in fossil emissions due to the significantly more efficient utilisation of existing biomass flows. According to calculations, 20'420 tonnes of paper and biosludge can be used to generate 22'133 MWh of energy in conventional operation and 33'311 MWh (variant 2.2) or 34'738 MWh (variant 2.4) using the VARESI concept. The additional energy gain amounts to around 11'200 and 12'600 MWh respectively, which corresponds to an added value of 5.9% to 6.7% when converted to the total energy requirement for 2023. Substituting natural gas would reduce CO₂ emissions by 2'500 tonnes per year, which would correspond to just under 13% of total annual emissions.

The experimental results prove that the energy potential of paper sludge can already be largely exploited under moderate hydrothermal carbonisation process conditions. Substrate-specific optimisation of the HTC process conditions leads to increased energy yield. Without these more precisely defined process parameters, a detailed process design is not reliable and an economic assessment within the scope of this work would be premature.



Kernbotschaften («Take-Home Messages»)

- Das VARESI-Konzept führt zu einer verbesserten energetischen Ausnutzung von nasser Biomasse, was zu einer Reduktion von Treibhausgasemissionen führt und so die Netto-Null-Ziele der Industrie unterstützt.
- Am Beispiel der Papierfabrik TELA GmbH führte das neue Verfahrenskonzept aufgrund deutlich effizienterer Ausnutzung der bestehenden Biomasseströme zur Verbesserung der Gesamtergiebilanz. Durch Substitution von Erdgas liessen sich die CO₂-Emissionen um 2'500 t pro Jahr reduzieren, was knapp 13% der jährlichen Gesamtemissionen entspräche.
- Das HTC-Verfahren bietet die ideale technologische Plattform, um das gesamte chemische und energetische Potential in den vorhandenen, nassen Reststoffen zu nutzen und hilft zukünftige Konkurrenzsituationen bzgl. Energiressourcen zu entschärfen.
- Innerhalb des VARESI-Konzeptes nimmt der Einsatz der HTC-Technologie eine Schlüsselrolle ein, denn erst die effektivere Entwässerbarkeit der carbonisierten Biomasse ermöglicht eine verbesserte Ausnutzung des Energiepotentials.
- Die Valorisierung des entstehenden Prozesswassers, insbesondere dem schwer abbaubaren Anteil, gilt als grosse Herausforderung der HTC-Technologie. Für die Wirtschaftlichkeit, aber auch für die Umweltbilanz des Gesamtprozesses ist eine hohe Kohlenstoff-Effizienz essenziell.
- Die konsequente Verwertung des Prozesswassers verfolgt die vollständige Rückgewinnung der chemisch gebundenen Energie durch anaerobe Vergärung und Membranfiltration, gefolgt von der Bereitstellung von gereinigtem Wasser als Ressource.
- Eine Membranfiltration (Kombination Ultrafiltration mit Umkehrosmose) hat auch die Funktion einer Sicherheitsbarriere für umweltproblematische Stoffe (z.B. PFAS, Mikro- & Nanoplastik, etc.).
- Das neuartige Verfahrenskonzept kann auch die Dekarbonisierung in anderen Sektoren (z.B. Abwasserreinigung, Landwirtschaft, etc.) vorantreiben und lässt sich gut mit einer Nährstoffrückgewinnung (Stickstoff, Phosphor) kombinieren.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Résumé.....	4
Summary	5
Kernbotschaften («Take-Home Messages»).....	6
Inhaltsverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	9
1 Einleitung und Problemstellung	10
1.1 Hintergrund und Motivation	10
1.2 Allgemeines Verfahrenskonzept VARESI	11
1.3 Zielsetzung	12
1.4 Vorgehen.....	12
1.5 Anwendungsfall Papierfabrik TELA	13
1.6 Spezifisches Verfahrenskonzept.....	15
2 Prozessentwicklung.....	16
2.1 Zusammenfassung.....	16
2.2 Charakterisierung der HTC-Produkte aus repräsentativem Material.....	17
2.2.1 Kurzbeschreibung der Carbonisierung	17
2.2.2 Ausgangsmaterialien	18
2.2.3 Filtrierbarkeit der Biokohlen	19
2.2.4 Trockensubstanz – organischer Trockensubstanzgehalt in Biokohlen	20
2.2.5 Massenbilanz Biokohle - Prozesswasser	20
2.2.6 Heizwert Biokohle	21
2.3 Anaerober Abbau von relevanten Prozesswässern.....	22
2.3.1 Chemische Charakterisierung von Prozesswässern	22
2.3.2 Anaerobe Abbauversuche zu Prozesswasser aus Papier- und Bioschlamm (Batchansätze).....	24
2.3.3 Kontinuierlicher anaerober Abbau von Prozesswasser aus Papier- und Bioschlamm	28
2.4 Weitere Verfahren zur vollständigen Prozesswasserverwertung	35
2.4.1 Aerober Abbau von anaerob behandeltem Prozesswasser	35
2.4.2 Ozonierung	37
2.4.3 Membranfiltration	38
3 Schlussfolgerungen.....	39
3.1 Einfluss der HTC-Prozessparameter	39
3.2 Modellierung des Anwendungsfalles TELA	40
3.3 Verbesserte Gesamtenergiebilanz der TELA durch VARESI	43
3.4 Kritische Beurteilung des Berechnungsmodells	45
3.5 Beurteilung VARESI-Gesamtkonzept	46
3.5.1 Biokohle als energieeffizienter, lagerbarer Brennstoff.....	47
3.5.2 Anaerobe Vergärung des Prozesswassers zur Energiegewinnung	48



3.5.3	Vollständige Verwertung des Kohlenstoffes	48
3.5.4	Optimierung Wasserhaushalt und -rückgewinnung.....	50
3.5.5	Reduktion von Treihausgasemissionen.....	51
4	Ausblick und nächste Schritte.....	52
5	Sozio-ökonomische Analyse	53
6	Literaturverzeichnis.....	56
7	Anhang	58
A1.1	Berechnung Severity Factor.....	58
A1.2	Berechnung Energiebilanz Wet Oxidation	58
A1.3	Berechnung Energieverbrauch ARA Tela.....	58



Abkürzungsverzeichnis

HTC	Hydrothermale Carbonisierung
AD	Anaerobic Digestion, anaerobe Vergärung
PW	Prozesswasser
PPS	Papierschlamm
TS	Trockensubstanzgehalt
oTS	organischer Trockensubstanzgehalt
TOC	Total Organic Carbon = Gehalt an Gesamtkohlenstoff
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
GC-MS	Gaschromatographie gekoppelt mit Massenspektroskopie
SF	Severity Faktor
NL	Norm-Liter (Gas bei Standardbedingungen: 0°C, 1013 mbar)
WRG	Wärmerückgewinnung
MF	Membranfiltration
WO	Wet Oxidation
PFAS	Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen



1 Einleitung und Problemstellung

1.1 Hintergrund und Motivation

Das Netto-Null-Ziel 2050 ist Gegenstand des «Bundesgesetz über die Ziele im Klimaschutz, die Innovation und die Stärkung der Energiesicherheit» («Klima- und Innovationsgesetz») welches in der Volksabstimmung vom 18. Juni 2023 angenommen wurde. Das Netto-Null-Ziel ist damit gesetzlich verankert und ist gemeinsam mit der dazugehörigen Verordnung per 1. Januar 2025 in Kraft getreten.

Die Schweiz soll ab 2050 nicht mehr Treibhausgase in die Atmosphäre ausstossen, als durch natürliche und technische Speicher aufgenommen werden. (BAFU Bundesamt für Umwelt, 2023). Neben dem Netto-Null-Ziel für das Jahr 2050 sieht das Gesetz Zwischenziele für das Jahr 2040 vor und es enthält Richtwerte für die Sektoren Gebäude, Verkehr und Industrie.

Weiter schreibt das Gesetz vor, dass alle Unternehmen spätestens im Jahr 2050 Netto-Null-Emissionen aufweisen müssen.

Parallel dazu zeigt die langfristige Klimastrategie auf, wie das Netto-Null-Ziel bis 2050 erreicht werden kann. CO₂-intensive Industrien in den Wirtschaftszweigen Zement, Keramik, Papier und Chemie nehmen am Emissionshandelssystem (EHS) teil und sind dadurch von CO₂-Abgaben befreit. Das Handeln von Emissionsrechten soll grossen Emittenten den Anreiz bieten, Massnahmen zur Verminderung ihrer Treibhausgasemissionen zu ergreifen. Die Gesamtmenge an Emissionsrechten ist begrenzt und wird jährlich um 2.2% gesenkt, wodurch das langfristige Netto-Null-Ziel erreicht werden soll. Massnahmen zur Emissionsverminderung wie z.B. durch Carbon Capture and Storage (CCS) oder Negativemissionstechnologien (NET) können im EHS angerechnet werden.

Insbesondere das Ausschöpfen nachhaltig nutzbarer Biomassepotenziale ist in den Szenarien der EP2050+ explizit erwähnt. Auch auf europäischer Ebene wird mit der Schaffung eines Rahmens für Massnahmen zur Stärkung der europäischen Wirtschaft für die Herstellung von Netto-Null-Technologieprodukten (Netto-Null-Industrie-Gesetz) vorangetrieben. Am 6. Februar 2024 haben das Europäische Parlament und der Rat eine politische Einigung über das Netto-Null-Industrie-Gesetz, engl. «Net Zero Industry Act» (NZIA) erzielt und die Verordnung ist am 1. Juli 2024 in Kraft getreten (Europäische Kommission, 2024).

Im Rahmen des ERA-NET Bioenergy Netzwerkes wurde 2022 das Projekt «VARESI» - Valorisation of industrial residues for a sustainable industry durchgeführt. Das Projekt zielt darauf ab, industrielle organische Reststoffe vor Ort zu verwerten, um Wärme für den industriellen Produktionsprozess bereit zu stellen. Um dieses Ziel zu erreichen, kombiniert das Projektteam anaerobe Behandlungstechnologien AD mit der hydrothermalen Carbonisierung HTC. Zusätzlich zu den energetischen Aspekten spielt im Projekt die Wasserrückgewinnung eine wichtige Rolle.

Ziel dieser Forschungsaktivität ist es, ein Gesamtkonzept zu erarbeiten, mit welchem organische industrielle Reststoffe und Abwässer unter dem Aspekt der Kreislaufwirtschaft und der CO₂-Neutralität behandelt und gleichzeitig dem Industrieunternehmen Prozesswärme oder die hydrothermale Kohle als stoffliches Produkt zur Verfügung zu stellen.



1.2 Allgemeines Verfahrenskonzept VARESI

Um einer Industrieunternehmung Prozesswärme und Wasser aus deren biogenen Reststoffen verfügbar zu machen, soll die in Abbildung 1 dargestellte Prozesskaskade angewandt werden.

- In einer ersten anaeroben Vergärungsstufe (Anaerobic Digestion 1, AD1) wird einfach verwertbarer Kohlenstoff in Biogas bzw. Biomethan umgewandelt.
- Der resultierende Gärrest (komplexer, für Mikroorganismen nicht zugänglicher Kohlenstoff) wird mittels hydrothermaler Carbonisierung (HTC) in Biokohle und Prozesswasser umgewandelt. Aus dieser Stufe soll auch aufgereinigtes Wasser für industrielle Prozesse zur Verfügung gestellt werden.
- In einer zweiten Vergärungsstufe (AD2) wird gelöster und mikrobiell verfügbarer Kohlenstoff im HTC-Prozesswasser ebenfalls zu Biogas bzw. Biomethan verwertet.

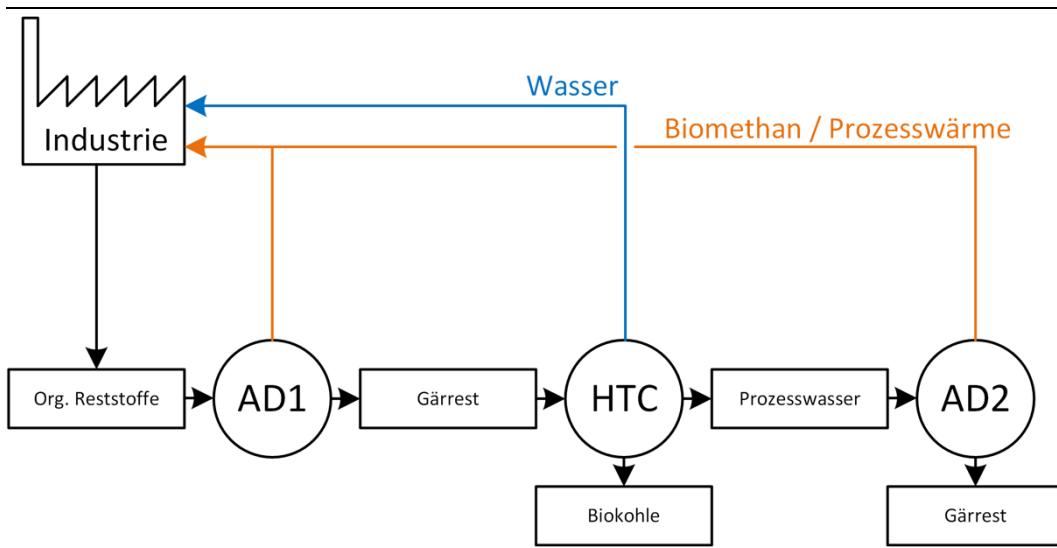


Abbildung 1: Allgemeines Verfahrenskonzept VARESI

Neben Wasser und Prozesswärme in Form von Biomethan steht eine Biokohle zur Verfügung, welche durch Verbrennung ebenfalls als Prozesswärme oder stofflich zur CO₂ Sequestrierung genutzt werden kann.

Komplexer Kohlenstoff welcher mikrobiell nicht zu verwerten ist, kann durch HTC gleichzeitig separiert (Biokohle) und weiter verfügbar (Prozesswasser) gemacht werden. In diesem Sinne funktioniert HTC dann als Vorbehandlungsstrategie, um schwer verwertbare Biomasse in erhöhtem Masse in Biomethan umzuwandeln.



1.3 Zielsetzung

Detaillierte Anforderungen an den Gesamtprozess sind in den nachfolgenden Ziele definiert:

Aufwertung organischer Rückstände aus der Industrie:

Valorisierung organischer Reststoffe zur Erzeugung von gasförmigen, speicherbaren Energieträgern, Mehrwertprodukten wie Biokohle zur CO₂-Sequestrierung, Bodenverbesserung und Wasserrückgewinnung.

Energieerzeugung aus organischen Reststoffen in der Produktionsanlage

Ein Ziel ist die Entwicklung eines Verfahrens, das direkt in der Anlage eingesetzt werden kann, um den Transport von Rückständen an andere Standorte zu vermeiden und erneuerbare Energiequellen vor Ort bereitzustellen.

Null-Abfall-Konzept für industrielle Prozesse

Das vorgeschlagene Konzept umfasst ein Wasseraufbereitungs- und -rückgewinnungssystem zur Rückgewinnung von Prozesswasser und zur Herstellung von Mehrwertprodukten wie Biokohle. Auf diese Weise wird ein Null-Abfall-Konzept realisiert.

Optimale Integration von Energie in den industriellen Prozess

Hier geht es darum, die Wärmeströme und den Wärmebedarf bei ausgewählten industriellen Prozessen zu optimieren und den Prozess im Hinblick auf die Null-Kohlenstoff-Wirtschaft der Europäischen Union zu optimieren.

CO₂-neutrale Produktionsprozesse

Ein ehrgeiziges Ziel ist es, durch die entwickelten Prozesse einen CO₂-neutralen Produktionsprozess zu realisieren, indem fossile Brennstoffe ersetzt und der Energiebedarf der industriellen Prozesse reduziert wird.

1.4 Vorgehen

Um die vielschichtige Thematik erfolgreich zu einem Gesamtkonzept weben zu können, wurde im Projekt auf einen konkreten Anwendungsfall fokussiert und die Struktur dieses Berichtes entsprechend dieser Entwicklung ausgelegt. Dies mit der zentralen Frage, was erforscht werden müsse, damit das nachfolgend postulierte Verfahrenskonzept erfolgreich bestätigt werden kann.

Die relevanten Prozessteile sollen mit Ergebnissen aus Versuchen und Recherchen untermauert werden. Dazu wurden folgende Aspekte experimentell geprüft:

- Herstellung und Charakterisierung von relevantem Material (Biokohle und Prozesswasser) insbesondere für längere Versuchsreihen zur Prozesswasserverwertung
- Evaluation geeigneter Strategien zur vollständigen Verwertung von Prozesswasser
- Anwendung geeigneter Bedingungen zur längerfristig stabilen anaeroben Prozesswasserverwertung
- Massen- & Energiebilanz zur Bewertung des Gesamtprozesses



1.5 Anwendungsfall Papierfabrik TELA

Die Papierfabrik TELA GmbH in Niederbipp stellt Hygieneprodukte aus Zellstoff her und betreibt eine der schweizweit grössten Altpapier-Aufbereitungsanlagen. Verbrauchte Papierfasern werden mit frischem Zellstoff ergänzt und der hohe Wasserbedarf wird soweit möglich mit interner Kreislaufführung abgedeckt oder entsprechend mit Frischwasser ergänzt.

Sowohl die aus der Altpapieraufbereitung anfallenden Papierschlämme (verbrauchte Fasern) als auch Klärschlämme aus der Abwasserbehandlung (Bioschlamm) werden nach Entwässerung in einem betriebseigenen Wirbelschichtofen zur Dampferzeugung verbrannt (Abbildung 2). Die Abwasserbehandlung erfolgt in einer betriebsinternen Kläranlage, wobei bis 2028 auch noch die kommunalen Abwässer aus der Gemeinde Niederbipp mitverwertet werden.

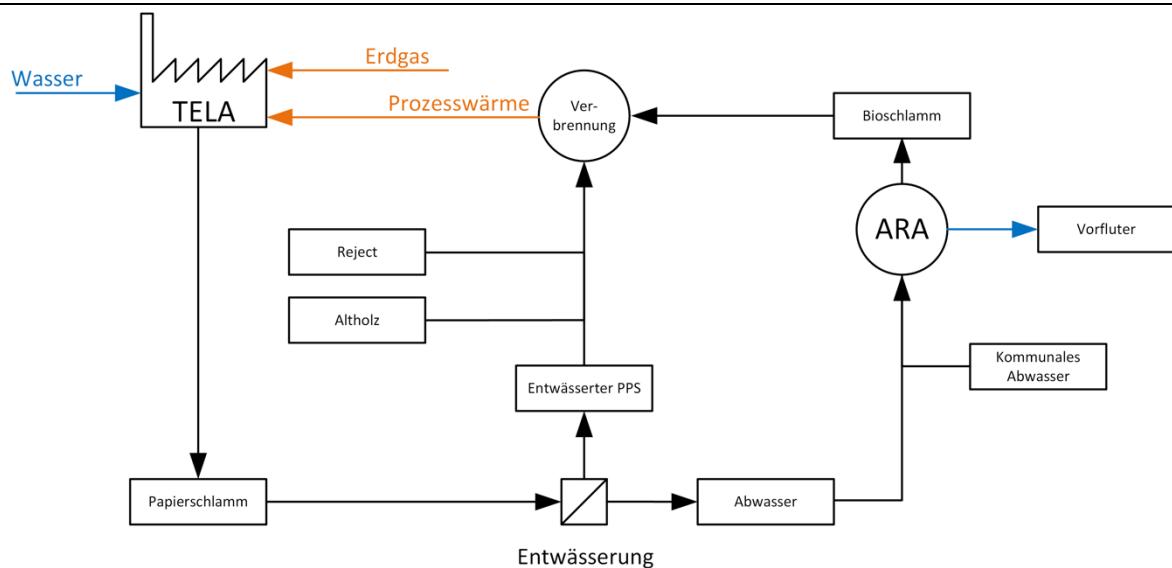


Abbildung 2: Aktuelle Verwertungsprozesse von Reststoffen in der Papierfabrik TELA.

Trotz aufwändiger Entwässerung des Papierschlammes (Abbildung 3) auf Trockensubstanzgehalte von 55-60% muss die Verbrennung mit zusätzlichen Brennstoffen unterstützt werden. Dies sind Energieholz und Kunststoff-Reject, d.h. abgetrennte Kunststoffverunreinigungen aus der Altpapierverwertung (Abbildung 4).

Erdgas wird in den Produktionsstrassen hauptsächlich zur direkten Trocknung von Papier eingesetzt und nur zeitweise, beispielsweise während Revisionen, zur Befeuerung des Wirbelschichtofens genutzt. Pro Woche werden etwa 1.100 Tonnen Reststoffe beziehungsweise Festbrennstoffe energetisch verwertet. Dabei werden insbesondere Energie-Altholz sowie wesentliche Anteile des Rejects zugekauft.

Tabelle 1: Eckdaten zu den aktuell umgeschlagenen Materialmengen

Substrat	Wochenmenge	Bemerkungen
Papierschlamm	900 t	TS-Gehalt ca. 55%
Bioschlamm	14 t	
Energie-Altholz	40 t	
Kunststoff-Reject	130 t	



Abbildung 3: Entwässerter Papierschlamm aus der Altpapieraufbereitung



Abbildung 4: Zusatzbrennstoffe Energieholz-Altholz (hinten), Kunststoff-Reject (vorne rechts)

1.6 Spezifisches Verfahrenskonzept

Der im Anwendungsbeispiel genannte hohe Bedarf an Prozesswärme und Wasser sowie die Nutzung von lokal anfallenden Reststoffen kann mit dem VARESI Konzept ideal adressiert werden.

Die verbesserte Entwässerung von Schlämmen durch HTC bietet Vorteile gegenüber der aktuellen Handhabung der Papierschlämme. Durch die Einsparung signifikanter Mengen fossiler Brennstoffe und der damit verbundenen Reduktion von Treibhausgasen sollen letztendlich auch Kosten eingespart werden. Ein auf den Anwendungsfall adaptiertes Verfahrenskonzept ist in der nachfolgenden Abbildung 5 ersichtlich. Spezifische Gegebenheiten erfordern eine Anpassung des allgemeinen Konzeptes.

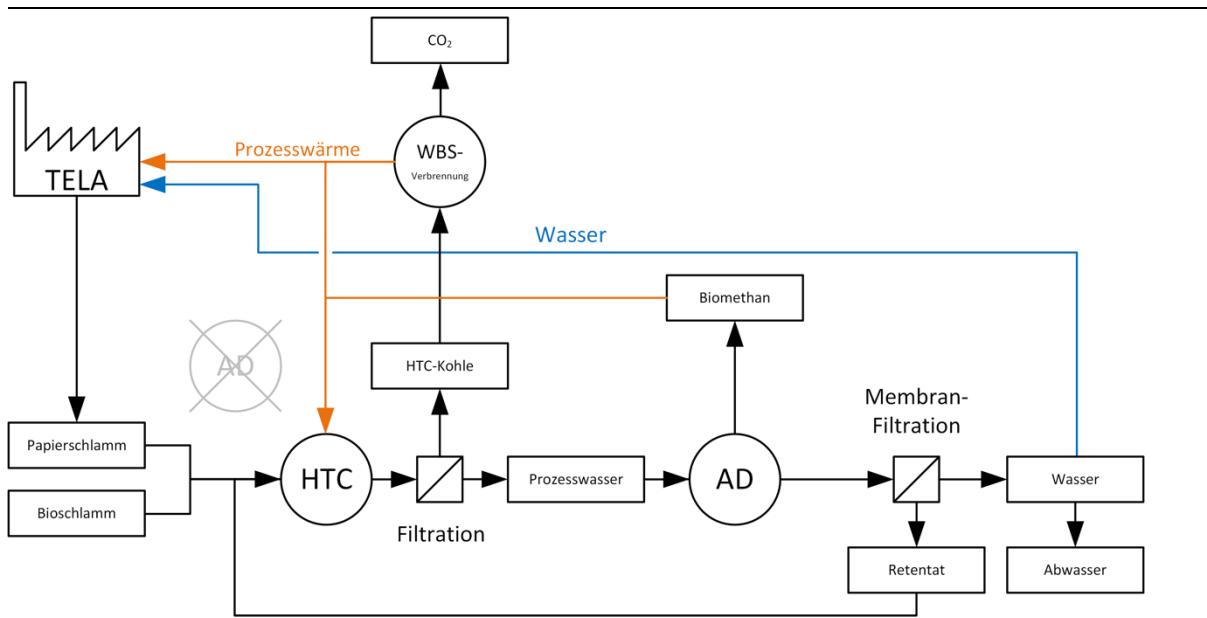


Abbildung 5: Spezifisches Verfahrenskonzept für den Anwendungsfall TELA Papierfabrik

Die angepasste Verfahrenskaskade sieht von einer vorgeschalteten Vergärungsstufe (AD1) ab, da Papierschlämme nicht als geeignete Substrate (tiefes Biomethanpotential und hoher Schwefelgehalt) gelten. Stattdessen sollen die verdünnten Schlämme zur Carbonisierung nur teilweise entwässert werden, um den Effekt der verbesserten Entwässerbarkeit durch HTC maximal auszunutzen.

Bioschlamm entsteht als Überschusschlamm in der betriebsinternen ARA, gilt aber aufgrund der geringen Menge nicht als Hauptsubstrat. Aufgrund hoher Anforderungen an die Wasserqualität für die Fertigungsprozesse ist eine Membranfiltration nach der anaeroben Stufe vorzusehen. Der im Retentat abgetrennte Kohlenstoff und die Mineralien gehen in konzentrierter Form zurück in die HTC.



2 Prozessentwicklung

2.1 Zusammenfassung

- Die angewandten Temperaturen und Verweilzeiten von 200-220°C bzw. 3.6 h bis 4.5 h resultierten in hydrothermalen Severity Faktoren von 5.4 bis 5.9. Es besteht ein nicht linearer Zusammenhang von Severity Faktor (SF) und Heizwert, der bei SF 5.7 ein Minimum durchfährt und mit harscheren Bedingungen wieder ansteigt. Bei einem SF von 5.4 ist im Vergleich zum Ausgangsmaterial 90% des Heizwertes zu erzielen und auch der Massenanteil Biokohle bleibt mit 13% hoch.
- Mit steigendem Heizwert der Biokohle sinkt deren Ausbeute, da sich die Massenverteilung des Kohlenstoffs in Richtung Prozesswasser verschiebt.
- Mit knapp 2 kWh/kg TS besitzt Papierschlamm im Vergleich zu verholzter Biomasse (ca.5 kWh/kg TS) einen eher tiefen Heizwert.
- Im Vergleich zum unbehandelten Schlamm zeigt die Biokohle ein deutlich schnelleres Absetzverhalten und eine verbesserte Filtrierbarkeit.
- Bei gleichem SF von 5.4 hat der TS-Gehalt in der Reaktionsmischung einen deutlichen Einfluss auf die Massenverteilung. Ein 5% höherer TS-Gehalt resultiert in einer doppelten Kohleausbeute.
- Umgekehrt sinkt bei gleichem TS-Gehalt von 15% und steigendem SF von 5.4 auf 5.9 die Kohleausbeute auf die Hälfte.
- Der Prozesswasseranteil steigt ebenfalls mit höherem SF und variiert zwischen 75 – 87% bzw. 86 – 92% wenn die Kohlefeuchte berücksichtigt wird.
- Die spezifischen Methanerträge im Batch-Ansatz betrugen für Prozesswasser aus Bioschlamm 126 NL / kg CSB, für PW Papierschlamm 104 NL / kg CSB.
- Von den verschiedenen getesteten Abbaukonzentrationen (Hemmtest) zeigten sich bei PW Bioschlamm ab 14.3 g CSB/kg(Gärmasse) und bei PW Papierschlamm ab 12.8 g CSB/kg(Gärmasse) eine deutliche Verzögerung in der Gasbildung, wobei trotzdem ein vollständiger Abbau stattfand.
- PW Bioschlamm ist im Vergleich zu PW Papierschlamm etwas besser abbaubar, die anaerobe Verwertbarkeit bezogen auf das theoretische Methanpotential liegt bei 36% bzw. 30%.
- Für die kontinuierlichen anaeroben Abbauversuche (Stabilitätstest) wurde für das Hauptsubstrat PW Papierschlamm eine organische Raumbelastung von knapp 8 g CSB/L*d und eine Verweilzeit von 85 Tagen gewählt. Damit ist keine Verdünnung des Prozesswassers notwendig und eine weitgehende Verwertung des Substrates gewährleistet.
- Der durchschnittliche spezifische Methanertrag im kontinuierlichen Ansatz betrug für Prozesswasser aus Papierschlamm 257 L / kg CSB, d.h. 73% vom maximalen theoretischen Methanertrag.
- Die Expanded Granular Sludge Bed (EGSB) Fermentertechnologie gilt als robust gegenüber Hemmstoffen. Weiter begünstigt die in der Schwebe gehaltene pelletierte Biomasse eine Fest-Flüssig-Trennung zur effizienten Abscheidung von nicht umgesetztem Kohlenstoff, was im Hinblick auf eine Entlastung der nachgeschalteten Membranfiltration von Vorteil ist.
- Bezogen auf den gelösten Kohlenstoff im Ablauf lag die Abbauleistung im kontinuierlich betriebenen EGSB grösstenteils über 80%. So müssen ca. 20% Restkohlenstoff im anaerob behandelten PW anderweitig aufbereitet werden.
- Das aerobe Belebtschlamm-Verfahren kann den Restkohlenstoff aus anaerob behandeltem Prozesswasser nicht in nennenswertem Umfang abbauen.
- Eine Ozonierung von anaerob abgebautem Material kann die TOC-Elimination nicht wesentlich verbessern.
- Durch eine Membranfiltration (Kombination Ultrafiltration mit Umkehrosmose) kann der Restkohlenstoffgehalt im Abwasserstrom weitestgehend eliminiert bzw. rückgewonnen werden.



2.2 Charakterisierung der HTC-Produkte aus repräsentativem Material

2.2.1 Kurzbeschreibung der Carbonisierung

Der Einfluss unterschiedlicher Prozessbedingungen auf die Massenverteilung und Produkteigenschaften von Biokohle bzw. Prozesswasser wurde mit verschiedenen Batch-Ansätzen evaluiert. Dazu wurde entwässerter Papierschlamm mit Trinkwasser so suspendiert, dass sich ein TS von 10 bzw. 15% einstellte. Die Carbonisierung erfolgte in einem 25 Liter Rührkessel (Abbildung 6) welcher für die entsprechenden Bedingungen (ca. 200 °C, ca. 25 bar Überdruck) ausgelegt ist. Eine Übersicht der angewandten Bedingungen ist in Tabelle 2 zusammengefasst.

Die jeweils resultierende Biokohle-Suspension (Slurry, Abbildung 8) wurde mittels Vakuumfiltration (Abbildung 7) in Biokohle (Abbildung 13) und Prozesswasser (Abbildung 9) getrennt.



Abbildung 6: 25-Liter HTC Rührkessel-Reaktor

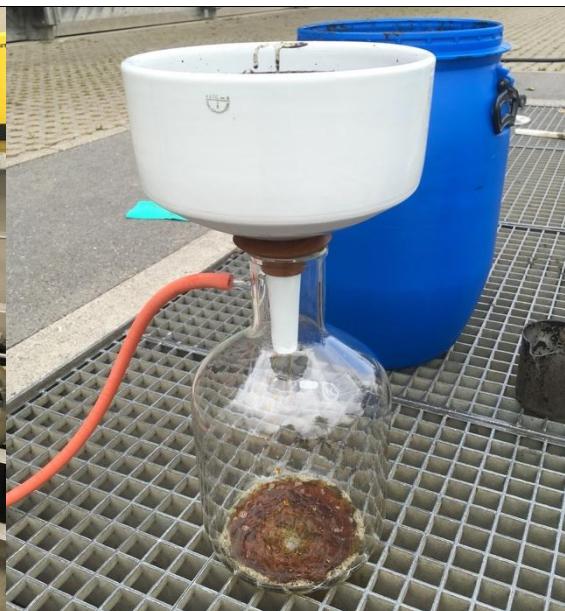


Abbildung 7: Fest-Flüssig-Trennung Slurry mit Saugnutsche



Abbildung 8: typischer HTC-Slurry

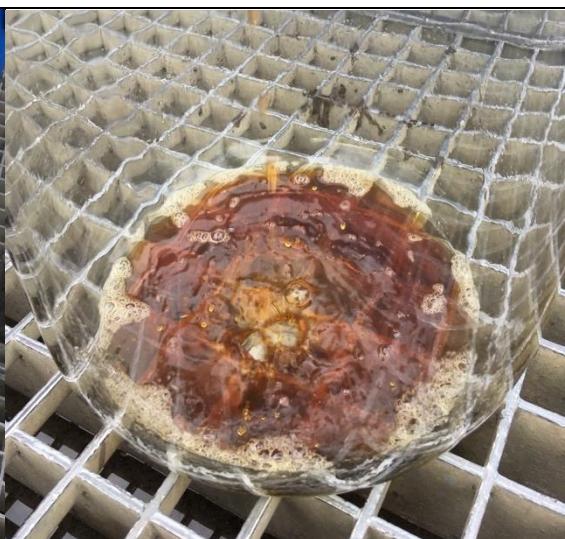


Abbildung 9: typisches Prozesswasser

Die unterschiedlichen Prozessbedingungen zur Carbonisierung können als hydrothermaler Severity Faktor zusammengefasst werden. Dieser berechnet sich aus angewandter Reaktionstemperatur und -



zeit (Formel siehe Methodenteil im Anhang). Je höher dieser Faktor, desto harscher sind die Reaktionsbedingungen.

Tabelle 2: Übersicht Prozessbedingungen der durchgeführten HTC-Batch-Ansätze

Chargen Nr.	Substrat	TS-Gehalt Reaktionsmasse [%]	Reaktions-temperatur [°C]	Aufheizzeit [Min]	Reaktionszeit [Min]	Severity Faktor
05V001	eingedickt. Bioschlamm	10	205	86	220	5.4
05V002	eingedickt. Bioschlamm	10	205	86	220	5.4
05V003	entw. Papierschlamm	10	205	86	220	5.4
05V004	entw. Papierschlamm	15	205	86	220	5.4
05V005	entw. Papierschlamm	15	211	107	268	5.7
05V006	entw. Papierschlamm	15	214	108	264	5.8
05V007	entw. Papierschlamm	15	217	114	260	5.9

2.2.2 Ausgangsmaterialien

Entwässerter Papierschlamm (aussortierte Fasern, nicht mehr zur Papierproduktion geeignet) besitzt eine krümelige, faserige Struktur und einen relativ geringen organischen bzw. hohen mineralischen Anteil von 40 bzw. 60% (siehe Tabelle 3).

Eingedickter Überschussschlamm der betriebsinternen ARA, welche interne Abwässer und einen Anteil kommunalem Abwasser aufreinigt, wird als Bioschlamm bezeichnet. Der Trockensubstanzgehalt von unbehandeltem Bioschlamm variiert zwischen 1 bis 2%.

Der in Abbildung 11 eingedickte Bioschlamm (TS ca. 7%) konnte im Rahmen einer Revision entnommen werden, denn normalerweise wird dieser direkt mit Papierschlamm vermischt und entwässert. Bioschlamm enthält deutlich mehr Organik (56%) als Papierschlamm.



Abbildung 10: Optik entwässerter Papierschlamm,



Abbildung 11: Optik eingedickter Bioschlamm

Tabelle 3: TS / oTS Gehalte der Ausgangsmaterialien

Substrat	TS [kg/kg]	oTS [kg/kg]	Anteil Organik vom TS
entwässerter Papierschlamm TELA	0.604	0.240	39.6%
eingedickter Bioschlamm ARA TELA	0.067	0.037	55.8%

2.2.3 Filtrierbarkeit der Biokohlen

Die gute Filtrierbarkeit von carbonisiertem Papierschlamm wird anhand der nachfolgenden zwei Abbildungen deutlicher. Auf der Filternutsche setzt sich die Biokohle-Suspension spontan ab und baut einen gut durchlässigen Filterkuchen auf. Mit wenig Aufwand lässt sich ein relativ trockener Filterkuchen erzielen. Im Labor konnten so nach 5 Min filtrieren durchwegs TS-Gehalte von 55 % erzielt werden.



Abbildung 12: Absetzverhalten von Slurry aus Papierschlamm, Abbildung 13: Filterkuchen Biokohle aus PPS

Der Einfluss der Carbonisierungsbedingungen auf die Materialstruktur in der Biokohle ist in der nachfolgenden Abbildung 14 sichtbar. Bei tieferem Severity Factor bleibt die ursprüngliche, faserige Struktur eher erhalten. Mit steigendem SF nimmt auch die vereinfachte Filtrierbarkeit zu (Daten nicht gezeigt).



Abbildung 14: Einfluss der Carbonisierungs-Bedingungen auf die Substratstruktur, v.l.n.r. entwässerter Papierschlamm, gemahlene Biokohle mit steigender Severity 5.4, 5.4, 5.7, 5.8, 5.9

2.2.4 Trockensubstanz – organischer Trockensubstanzgehalt in Biokohlen

Der TS ist bei den gemessenen Biokohlen sehr ähnlich (Tabelle 4), mit einer leicht steigenden Tendenz entsprechend den SF-Bedingungen. Eine stärkere Carbonisierung verbessert die Filtrationseigenschaften, was sich in einem höheren TS niederschlägt. Der TS der Reaktionsmischung zeigt keinen grossen Einfluss. Ab SF 5.7 sinkt der Anteil der Organik, wenn auch nur in geringem Masse. Generell weisen diese Biokohlen einen relativ tiefen organischen Anteil aus, was mit dem hohen mineralischen Anteil im Ausgangsmaterial zusammenhängt.

Tabelle 4: Zusammenfassung TS – oTS-Gehälter in den erzeugten Biokohlen

Substrat	TS / SF	TS [kg/kg]	oTS [kg/kg]	Anteil Organik vom TS
Biokohle Papierschlamm V003	10%, 5.4	0.538	0.182	33.8%
Biokohle Papierschlamm V004	15%, 5.4	0.537	0.180	33.5%
Biokohle Papierschlamm V005	15%, 5.7	0.545	0.160	29.3%
Biokohle Papierschlamm V006	15%, 5.8	0.547	0.160	29.1%
Biokohle Papierschlamm V007	15%, 5.9	0.554	0.167	30.1%

2.2.5 Massenbilanz Biokohle - Prozesswasser

Von den durchgeföhrten Versuchen wurde eine detaillierte Massenbilanz erstellt, welche dann später in die Bilanzierung des Gesamtprozesses (Kapitel 3.2) einfließt. Der Slurry aus der Carbonisierung wurde in Prozesswasser und Biokohle getrennt, wobei die technischen Verluste weniger als 2.2 % betragen. Das in der feuchten Kohle enthaltene Prozesswasser wurde ebenfalls separat ausgewiesen.

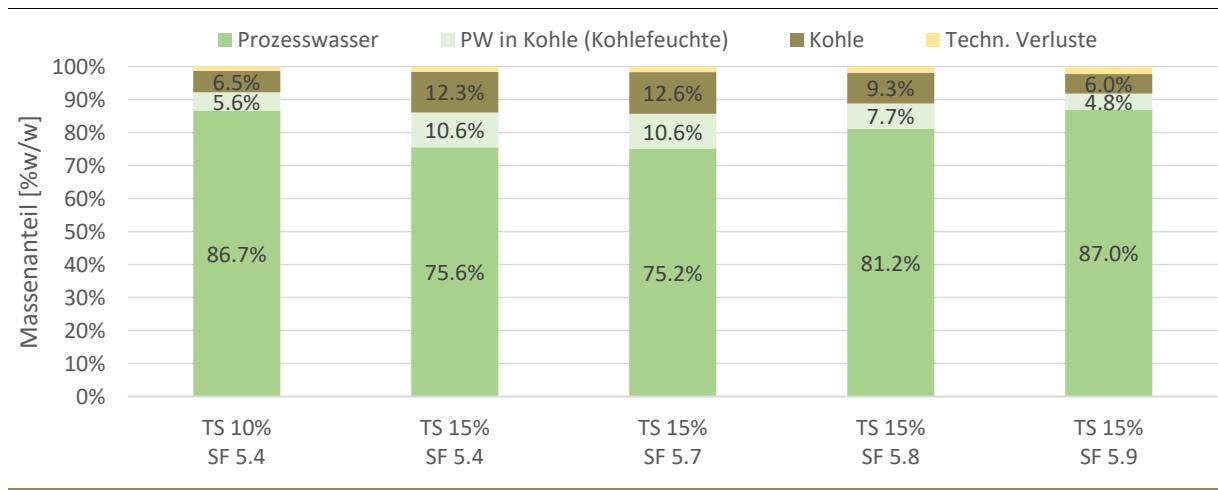


Abbildung 15: Einfluss Trockensubstanzgehalt und Severity Faktor auf Massenbilanz von carbonisiertem Papier-Schlamm

Bei gleichem SF von 5.4 hat der TS-Gehalt in der Reaktionsmischung einen deutlichen Einfluss auf die Massenverteilung. Ein 5% höherer TS-Gehalt resultiert in einer doppelten Kohleausbeute. Umgekehrt sinkt bei gleichem TS-Gehalt von 15% und steigendem SF von 5.4 auf 5.9 die Kohleausbeute auf die Hälfte. Der Prozesswasseranteil steigt ebenfalls mit höherem SF und variiert zwischen 75 – 87% bzw. 86 – 92% wenn die Kohlefeuchte berücksichtigt wird (Abbildung 15).



2.2.6 Heizwert Biokohle

Vom Ausgangsmaterial und den verschiedenen Biokohlen wurde der obere Heizwert bestimmt (Abbildung 16). Mit knapp 2 kWh/kg TS besitzt Papierschlamm im Vergleich zu allgemeiner Biomasse (ca. 5 kWh/kg TS) einen eher tiefen Heizwert.

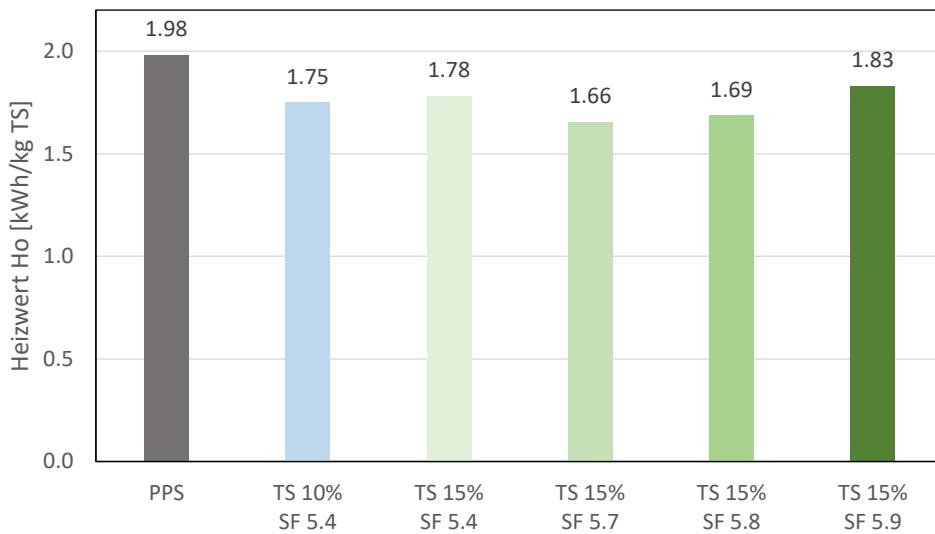


Abbildung 16: Übersicht obere Heizwerte von Papierschlamm und den unter verschiedenen Bedingungen carbo-nisierten Biokohlen.

Bei gleichem SF von 5.4 ist kein nennenswerter Einfluss des TS-Gehaltes auf den Heizwert ersichtlich. Bei gleichem TS von 15% durchläuft der Heizwert ein Minimum bei SF 5.7. Unter den getesteten Be-dingungen konnte der höchste Heizwert von Biokohle bei SF 5.9 erzielt werden, welcher 92% des ur-sprünglichen Wertes von uncarbonisiertem Material entspricht.



2.3 Anaerober Abbau von relevanten Prozesswässern

Der grosstechnische Betrieb einer anaeroben Stufe muss über lange Zeiträume stabil funktionieren. Den Autoren ist bis dato kein grosstechnischer Betrieb mit relevantem Material bekannt. Im Labormassstab sind nur wenige kontinuierliche Langzeitversuche beschrieben (siehe Kapitel 2.3.3 Gasbildung) und / oder die verwendeten Substrate lassen sich mit diesem Anwendungsfall nur schwer vergleichen.

Für ein besseres Verständnis zur Machbarkeit des anaeroben Abbaus von Prozesswässern aus Biomassen der Papierindustrie wurde ein zweiteiliges Vorgehen verfolgt; Einerseits wurden Batch Ansätze mit verschiedenen Konzentrationen getestet und andererseits kontinuierlich beschickte Versuche im grösseren Labormassstab durchgeführt. Eine chemische Charakterisierung bietet eine grundlegende Einschätzung der Eignung und zeigt allfällige Hemmstoffe auf.

2.3.1 Chemische Charakterisierung von Prozesswässern

Summenparameter TS, oTS, TOC und CSB

Prozesswasser aus Bioschlamm zeigt selbst bei tiefem SF von 5.4 erhöhte organische Anteile, insbesondere die TOC- und CSB-Werte sind hoch. Mit steigendem TS-Gehalt und Severity Faktor steigt auch der TS- bzw. TOC-Gehalt im Prozesswasser von Papierschlamm, wobei der organische Anteil konstant bei etwas über 60% verbleibt. Harschere Bedingungen erhöhen also den relativen mineralischen Anteil nicht (Tabelle 5).

Tabelle 5: Chemische Summenparameter der Prozesswässer aus Bio- und Papierschlamm (kursive Werte mit Faktor 2.66 CSB/TOC umgerechnet)

Substrat	TS / SF	TS [kg/kg]	oTS [kg/kg]	Anteil Organik vom TS	TOC [mg/L]	CSB [mg O ₂ /L]
PW Bioschlamm V002	10%, 5.4	0.023	0.020	86.6%	11'900	36'250
PW Papierschlamm V003	10%, 5.4	0.012	0.007	61.1%	4'880	12'800
PW Papierschlamm V004	15%, 5.4	0.017	0.010	62.2%	6'940	18'450
PW Papierschlamm V005	15%, 5.7	0.024	0.015	62.5%	8'520	22'650
PW Papierschlamm V006	15%, 5.8	0.025	0.016	62.5%	9'830	26'130
PW Papierschlamm V007	15%, 5.9	0.028	0.017	62.8%	10500	27'910

Chemische Zusammensetzung der eingesetzten Prozesswässer

Grundsätzlich kann mittels GC-MS nur der flüchtige Anteil einer Probe analysiert werden. Hochmolekulare Substanzen wie Huminstoffe, HTC-Kohle-Monomere beziehungsweise Polymere sowie grössere Partikel können auf diesem Weg nicht erfasst werden. In der wissenschaftlichen Literatur sind bisher keine nennenswerten Erkenntnisse zur Molekülgrössenzusammensetzung von Prozesswasser verfügbar. Eigene Untersuchungen zeigten, dass etwa 80-90% vom CSB hochmolekular, d.h. nicht GC-messbar sind (Treichler & Baier, 2022).

Es kann davon ausgegangen werden, dass der hochmolekulare, kohleähnliche Anteil mikrobiell nicht wesentlich abgebaut werden kann. Einerseits können die chemischen Strukturen zur Metabolisierung nicht ins Zellinnere geschleust werden, andererseits sind Strategien zum extrazellulären Abbau mit Enzymen eher unwahrscheinlich. Die diesbezüglich bekannten Strategien sind auf Lignocellulose adaptiert, wovon sich die chemische Struktur der Biokohle jedoch deutlich unterscheidet. Die Klärung dieser Aspekte sind Gegenstand zukünftiger Forschung.

Die äusserst komplexe Zusammensetzung von Prozesswasser macht eine belastbare Quantifizierung der Mehrzahl der Analyten sehr anspruchsvoll, weshalb die nachfolgende Beurteilung über eine semi-quantitative Bestimmung erfolgt. Die einheitenlose GC Area berücksichtigt ein proportionales Detektor-Signal und lässt bei gleicher Messmethodik innerhalb der Probenreihe einen zuverlässigen Vergleich zu (Abbildung 17).

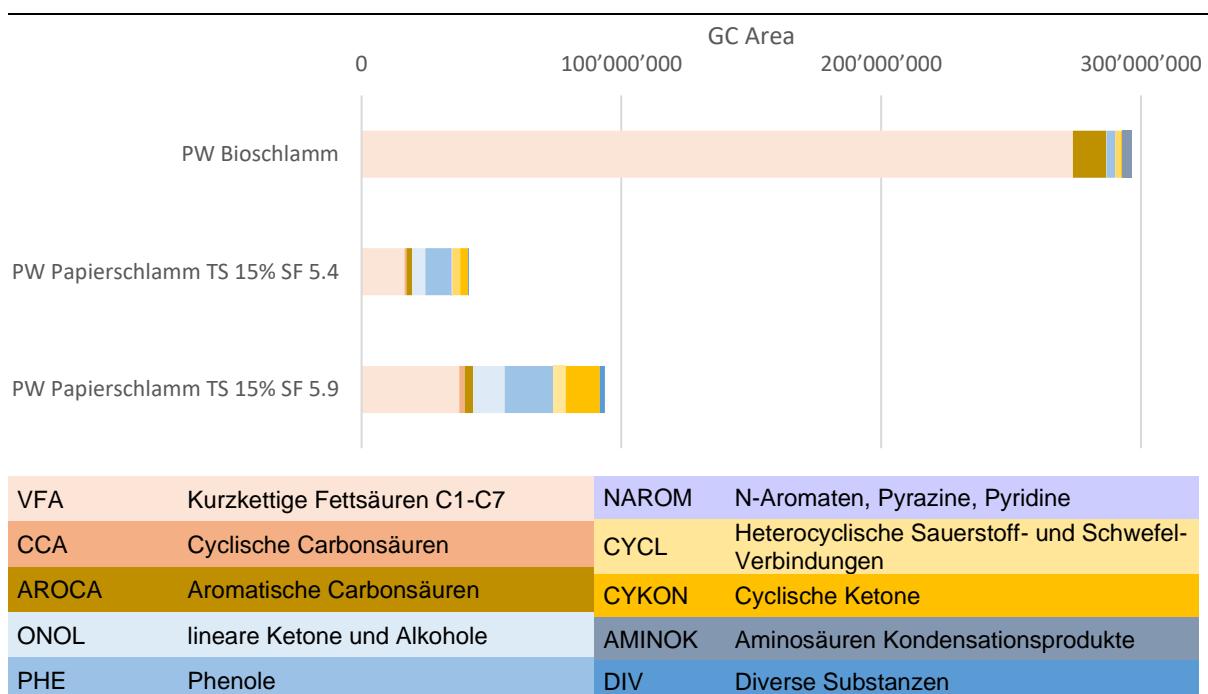


Abbildung 17: Chemische Zusammensetzung (GC Area) der eingesetzten Prozesswässer. Zur Vereinfachung sind die gemessenen Analyten in eigens definierten Stoffklassen zusammengefasst.

Der im Prozesswasser vorhandene niedermolekulare Anteil ist bzgl. der chemischen Zusammensetzung gut für die anaerobe Vergärung geeignet. Stoffklassen wie kurzkettige Fettsäuren (VFA), cyclische Carbonsäuren (CCA), aromatische Carbonsäuren (AROCA) sind sehr gut abbaubar, zeigen aber in hohen Konzentrationen eine hemmende Wirkung (Wagner et al., 2019). Die restlichen Substanzen können grundsätzlich anaerob verwertet werden, besitzen aber eine höhere Toxizität für die Mikroorganismen.

Die unterschiedliche Zusammensetzung entsprechend den Ausgangsmaterialien ist deutlich. So sind im Prozesswasser des proteinreichen Bioschlammes verhältnismässig grosse Anteile kurzkettige Fettsäuren nachzuweisen, während sich im cellulosereichen Papierschlamm bedeutend mehr Alkohole, Ketone und Phenole bilden. Aufgrund der Zusammensetzung ist eine bessere Abbaubarkeit des Prozesswassers aus Bioschlamm zu erwarten, was sich in den nachfolgend beschriebenen Abbauversuchen auch bestätigt.

Mit höherem Severity Faktor steigen auch die Anteile niedermolekularer Substanzen im Prozesswasser an. Beim Papierschlamm steigen die cyclischen Ketone überproportional an.



2.3.2 Anaerobe Abbauversuche zu Prozesswasser aus Papier- und Bioschlamm (Batchansätze)

Kurzbeschreibung der Durchführung

Zur Evaluation der anaeroben Abbaubarkeit der Prozesswässer (nach VDI 4630 und Laborstandard) wurden jeweils Triplikat-Ansätze in verschiedenen Konzentrationen angesetzt. Die jeweilige Konzentration an organischer Substanz bezieht sich auf die aktive Gärmasse (aktiver Faulschlamm der ARA Wädenswil). So wurden für PW Papierschlamm Konzentrationen von 0.13% bis 0.76% organischer Massenanteil in aktiver Gärmasse bzw. für PW Bioschlamm 0.14% bis 1.12% getestet. Der Abbau erfolgte während 42 Tagen bei 39°C. Für chemische Analysen wurden zusätzliche Ansätze parallel mitgeführt.

Da die getesteten Prozesswässer einen erhöhten Anteil flüchtiger Stoffe enthalten, sind die nachfolgenden Angaben zur organischen Trockensubstanz hinsichtlich der flüchtigen Stoffe korrigiert. Im Gegensatz dazu stellt der Vergleich anhand des CSB-Gehalts eine weniger fehleranfällige Methode dar und ermöglicht eine bessere Vergleichbarkeit mit der wissenschaftlichen Literatur.

Übersicht spezifische Methanerträge

Neben den spezifischen Methanerträgen der unbehandelten Ausgangssubstrate sind in Tabelle 6 auch deren Prozesswässer bzgl. den verschiedenen Abbau-Konzentrationen zusammengestellt. Ab der mittleren Konzentration steigt mit der Konzentration das Biomethanpotential und die Streuung nimmt ab. Unter den gegebenen Versuchsbedingungen konnten aus PW Papierschlamm 30% (104 NL/kg CSB) und aus PW Bioschlamm 36% (126 NL/kg CSB) vom maximalen theoretischen Methanpotential (350 NL/kg CSB) erzielt werden.

Tabelle 6: Zusammenstellung getesteter Abbau-Konzentrationen und jeweilige spezifische Methanerträge von Prozesswässern aus Papier- und Bioschlamm (nb = nicht bestimmt)

Substrat	Konzentra-tion Gärmasse [g oTS/kg]	Konzentra-tion Gärmasse [g CSB/kg]	Spez. Methanertrag bzgl. oTS [NL / kg oTS]	Spez. Methanertrag bzgl. CSB [NL / kg CSB]
Papierschlamm entwässert	-	-	150.0	± 12.8
Bioschlamm eingedickt	-	-	162.1	± 2.0
PW Papierschlamm TS 10% SF 5.4	3.7	3.4	86.2	± 11.6
PW Papierschlamm TS 15% SF 5.4	1.3	1.7	134.5	± 43.8
PW Papierschlamm TS 15% SF 5.4	2.5	3.4	107.8	± 13.3
PW Papierschlamm TS 15% SF 5.4	3.8	5.1	103.9	± 4.7
PW Papierschlamm TS 15% SF 5.4	5.1	6.8	120.6	± 6.2
PW Papierschlamm TS 15% SF 5.4	7.6	12.8	140.5	± 1.4
PW Bioschlamm TS 10% SF 5.4	1.4	1.8	137.2	± 33.5
PW Bioschlamm TS 10% SF 5.4	2.8	3.6	128.8	± 8.2
PW Bioschlamm TS 10% SF 5.4	5.6	7.2	151.0	± 11.9
PW Bioschlamm TS 10% SF 5.4	11.2	14.3	161.2	± 10.3

Verlauf der Gasbildung und korrespondierende chemische Zusammensetzung der Gärmasse von Prozesswasser aus Bioschlamm

In Abbildung 18 sind die zeitlichen Verläufe der spezifischen Methanbildung von PW Bioschlamm aufgetragen. Die Ansätze mit den Konzentrationen 1.8 - 7.2 g CSB/kg (0.18 – 0.72%) zeigen einen spontanen Abbau welcher nach 10 Tagen praktisch vollständig abgeschlossen ist. Ein möglicher Einfluss der Partikelgrösse auf den Methanertrag wurde niederschwellig geprüft. Dazu wurde von der Konzentration 3.6 g CSB/kg das native Prozesswasser mit dessen partikelarmen, zentrifugierten Überstand verglichen, was aber keinen signifikanten Unterschied hervorbrachte.

Die höchste gemessene Konzentration von 14.3 g CSB/kg (1.4%) zeigte eine deutliche Verzögerung in der Gasbildung. Nach dem Adaptieren der Mikrobiologie an die erhöhten Anteile flüchtiger Fett- und aromatischen Carbonsäuren setzte die Gasbildung ein, wobei nach ca. 20 Tagen rund 80% abgebaut und letztendlich sogar ein leicht erhöhter Gasertrag bestand. Der Vergleich von Methanbildung- und Substanzumsatz (chemische Zusammensetzung) zeigt zwar eine hohe Dynamik, eine Korrelation ist aber aufgrund eines Messfehlers am Tag 9 (Extraktionsfehler, Werte zu tief) nicht vollständig.

Ein grosser Unterschied zum PW Papierschlamm (Abbildung 19/Abbildung 21) zeigt sich in der hohen Konzentration aromatischer Carbonsäuren (49 Mio vs. 9.4 Mio GC-Area) und Phenolen (5.8 Mio vs. 2.3 Mio GC-Area). Beide Stoffgruppen stehen im Zusammenhang mit der proteinreichen Zusammensetzung des Bioschlammes.

Im Gegensatz zum PW Papierschlamm sind cyclische Ketone nur in geringen Konzentrationen messbar. Die Gruppe der Stickstoffaromaten (NAROM) nimmt von Beginn an ab und ist nach 21 Tagen praktisch vollständig abgebaut. Dies deutet darauf hin, dass diese Substanzgruppe bezüglich Hemmungen als eher unkritisch einzustufen ist.

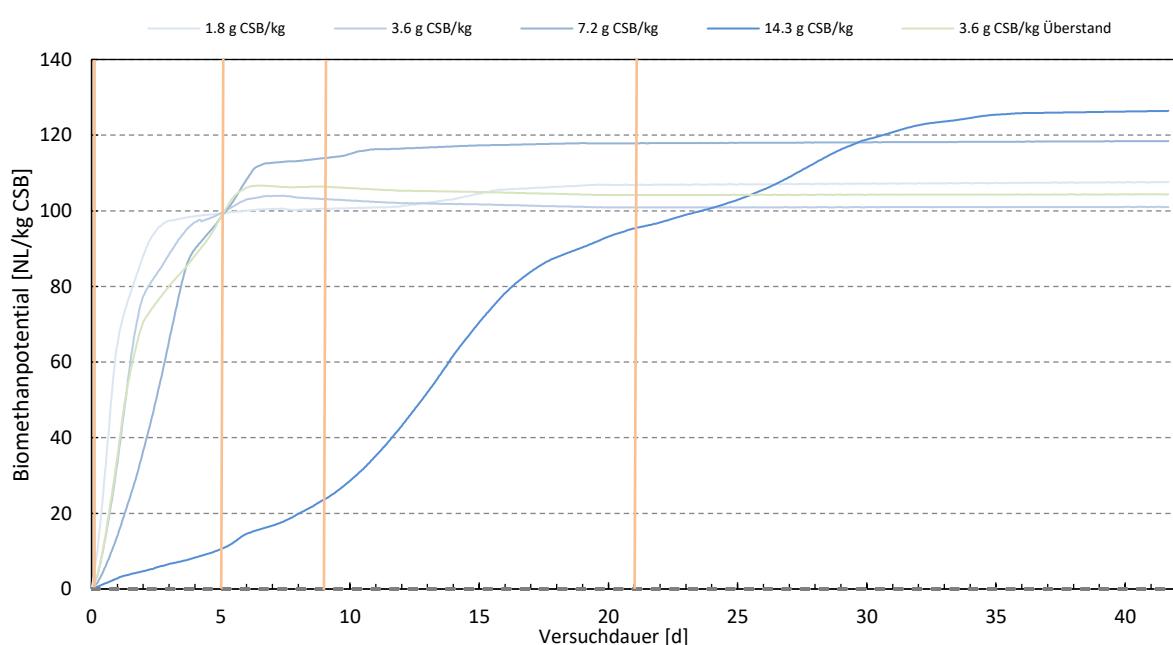


Abbildung 18: Verlauf Biomethanbildung von Prozesswasser Bioschlamm mit verschiedenen Konzentrationen (g CSB/ kg Gärmasse), orange Markierungen = Probenahmezeitpunkte für GC-MS Analysen

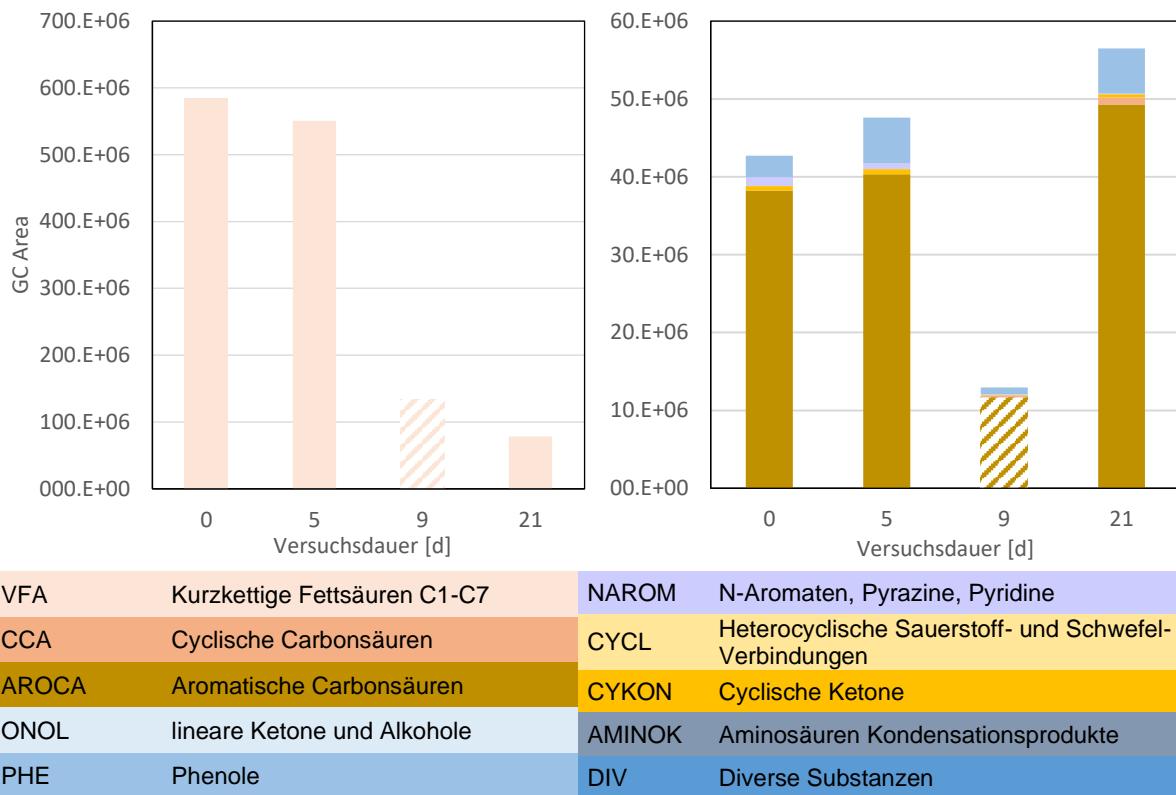


Abbildung 19: Zeitlicher Verlauf der chemischen Zusammensetzung des Biomethan-Bildungs-Versuches von Prozesswasser Bioschlamm in der Konzentration 14.3 g CSB/kg. Die Werte bei Versuchsdauer 9 Tage sind aufgrund eines Messfehlers zu tief.

Verlauf der Gasbildung und korrespondierende chemische Zusammensetzung der Gärmasse von Prozesswasser aus Papierschlamm

Auch die Versuchsansätze zum Prozesswasser aus Papierschlamm zeigen grundsätzlich einen spontanen Abbauverlauf, im Vergleich zu denjenigen des PW Bioschlamm jedoch etwas abgeschwächt (Abbildung 20). Die höchste Konzentration von 12.8 g CSB/kg reagierte jedoch verzögert, denn erst ab Tag 5 begann eine nennenswerte Gasbildung.

Ab der Konzentration 5.1 g CSB/kg zeigen die Verläufe ein deutliches diauxisches Verhalten, welches entsprechend der Konzentration umso stärker ausgeprägt ist. Dieses wellenartige Abbauverhalten widerspiegelt die Adaption der Mikroorganismen an die stetig ändernde chemische Zusammensetzung. Während bis zum Tag 5 nur wenig Methan gebildet wird, ist der chemische Umbau des Substrates in vollem Gange. In dieser Zeit ist ein starker Anstieg der kurzkettigen Fettsäuren zu verzeichnen, wobei die erhöhten Konzentrationen die Methanbildung beeinträchtigen (Abbildung 21, links). Nach der Anpassung der Mikroorganismen findet aber eine zügige Umsetzung statt.

Von den übrigen Stoffgruppen werden die Phenole gut, die linearen Ketone und Alkohole sehr gut abgebaut. Der Anteil heterocyclischer Sauerstoff- und Schwefelverbindungen und zyklischen Carbonsäuren schwankt zwischenzeitlich und nimmt dann aber auch ab. Von den zyklischen Ketonen bleibt ein wesentlicher Anteil bestehen, was deren schwierige mikrobielle Verwertung im anaeroben Milieu verdeutlicht. Die aromatischen Carbonsäuren steigen an und stehen vermutlich im Zusammenhang mit dem diauxischen Abbauverhalten. Im Gegensatz zum PW Bioschlamm sind zu keinem Zeitpunkt Verbindungen der Klasse Stickstoffaromataten zu finden.

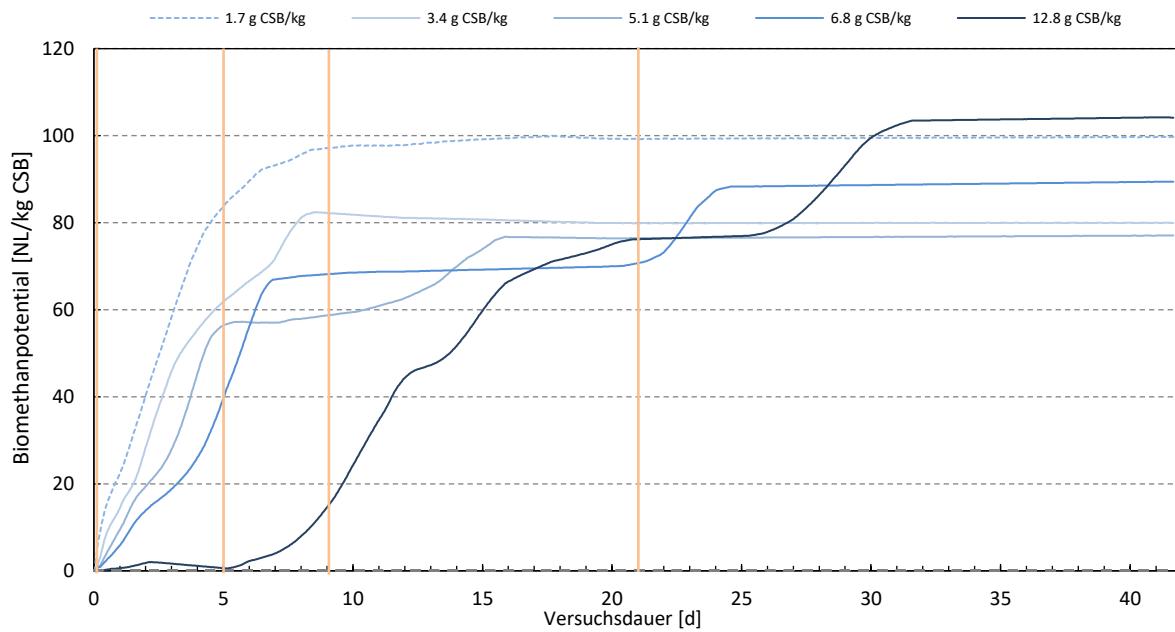
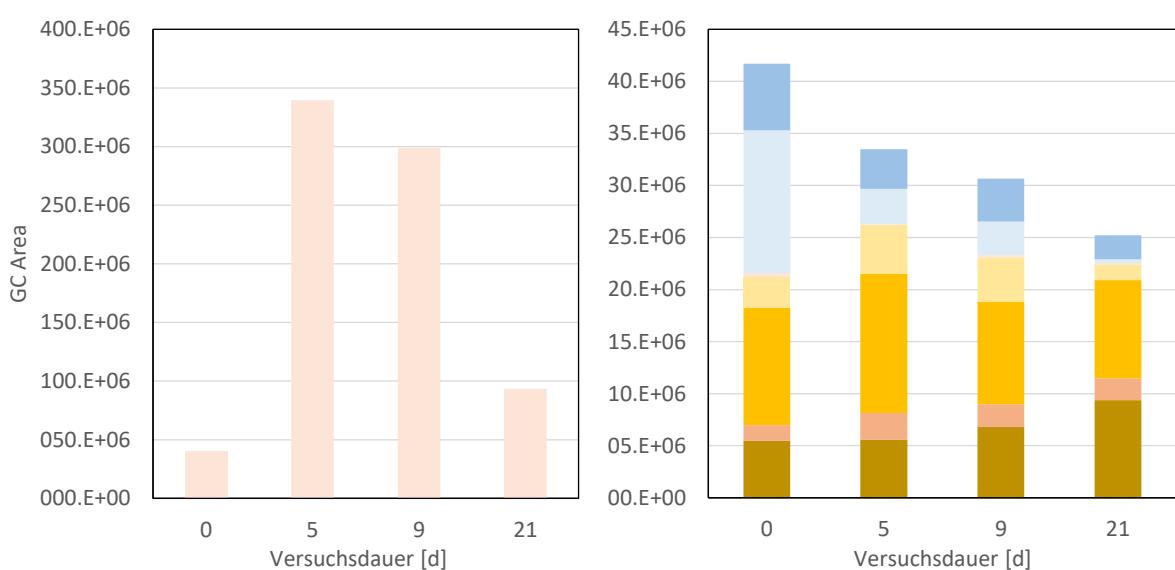


Abbildung 20: Verlauf Biomethanbildung von Prozesswasser Papierschlamm mit verschiedenen Konzentrationen (g CSB/ kg Gärmasse), orange Markierungen = Probenahmezeitpunkte für GC-MS Analysen



VFA	Kurzkettige Fettsäuren C1-C7	NAROM	N-Aromaten, Pyrazine, Pyridine
CCA	Cyclische Carbonsäuren	CYCL	Heterocyclische Sauerstoff- und Schwefel-Verbindungen
AROCA	Aromatische Carbonsäuren	CYKON	Cyclische Ketone
ONOL	lineare Ketone und Alkohole	AMINOK	Aminosäuren Kondensationsprodukte
PHE	Phenole	DIV	Diverse Substanzen

Abbildung 21: Zeitlicher Verlauf der chemischen Zusammensetzung des Biomethan-Bildungs-Versuches von Prozesswasser Papierschlamm in der Konzentration 12.8 g CSB/kg



2.3.3 Kontinuierlicher anaerober Abbau von Prozesswasser aus Papier- und Bioschlamm

Kurzbeschreibung der Durchführung

Die kontinuierliche anaerobe Verwertung von Prozesswasser über längere Zeiträume wurde in einem Expanded granular sludge bed Fermenter (EGSB) durchgeführt, welcher 60 Liter Nennvolumen, 57 Liter effektives Gärvolumen ausweist. Die pelletierte Startkultur stammte aus einem Fermenter, welcher Abwasser aus der Kartonproduktion aufreinigt (Model AG, Niedergösgen). Die Gärbiologie wurde über insgesamt 260 Tage bei 41 °C betrieben (Abbildung 21). Der Wechsel von einer Membrankolben- auf eine Schlauchquetschpumpe führte nach 120 Tagen Versuchszeit zu einer deutlich gleichmässigeren Substratdosierung

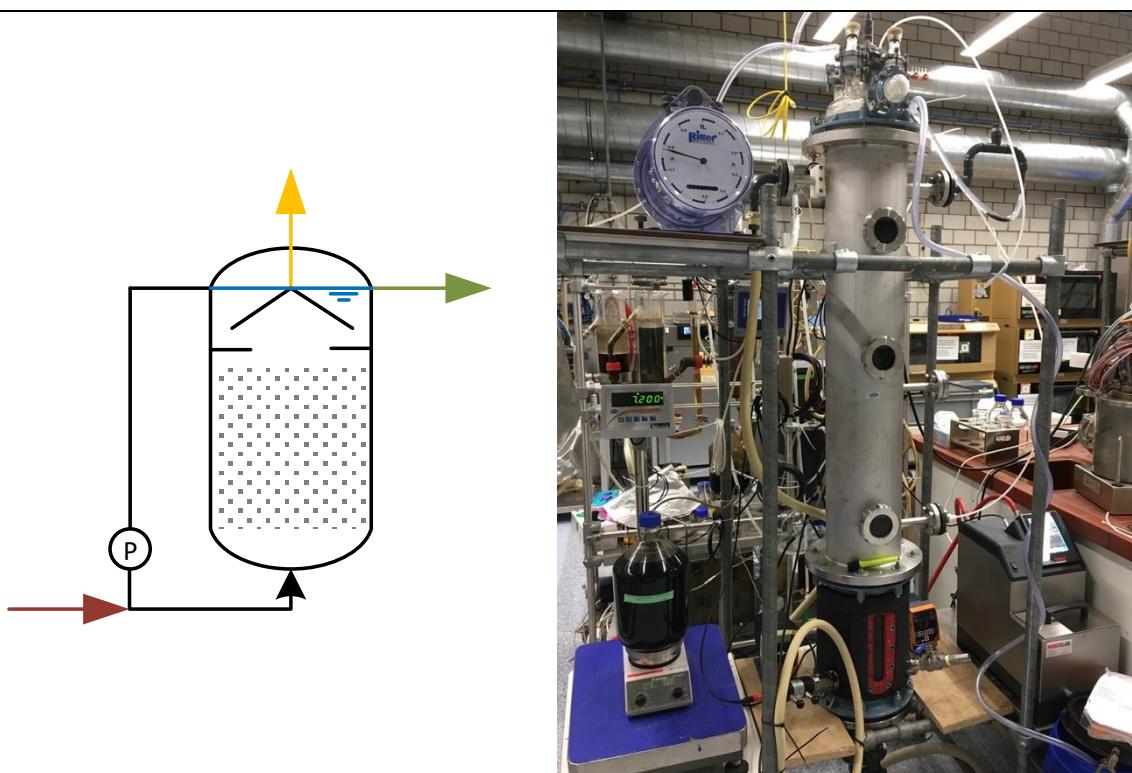


Abbildung 22: (links) Prinzip EGSB Expanded granular sludge bed (rot = Substratzufuhr, grün = Ablauf Gärrest, gelb = Biogas, P = Pumpe), (rechts) kontinuierlich betriebener 60 Liter EGSB



Gasbildung

Die angewandten Bedingungen während den verschiedenen Versuchphasen sind in Tabelle 7 zusammengefasst und die spezifische Gasbildung in Abbildung 23 dargestellt.

Tabelle 7: Zusammenstellung org. Raumbelastung, Verweilzeit und Methanbildungsrate während den verschiedenen Versuchphasen

Phase	Substrat, Chargennummer	Organische Raumbelastung [g CSB/L*d]	Verweilzeit [d]	Durchschnittliche Biomethanbildung [L/kg Substrat]
1	PW Bioschlamm TS15% T200°C, V001&2	0.14	225	24.5
2	PW Papierschlamm TS10% T200°C, V003	0.05	280	8.8
3	PW Papierschlamm TS15% T200°C, V004	0.22	80	4.8
4	PW Papierschlamm TS15% T215°C, V005-9	0.22	85	7.7

Die anfangs sehr hohen Verweilzeiten von über 200 Tagen sowie die in Phase 3 und 4 weiterhin hohen Verweilzeiten von etwa 80 Tagen wurden aus folgenden Gründen gezielt gewählt:

- Eine langsame Adaptation der mikrobiellen Gemeinschaft an die neuen Substrate sollte ermöglicht werden.
- Eine Verdünnung des Prozesswassers konnte dadurch vermieden werden.
- Hohe Abbauraten organischer Kohlenstoffverbindungen sowie eine maximale Substratausnutzung wurden angestrebt.
- Der Aufwand zur Herstellung von Prozesswasser konnte durch diese Betriebsweise begrenzt werden.

Mit dem Wechsel auf das Hauptsubstrat in Phase 4 und der regelmässigen Dosierung stellte sich ein praktisch linearer anaerober Abbau des Substrates ein. Nach knapp 100 Tagen zuverlässigem Abbau wurde die Dosierung gestoppt und nach weiteren 42 Tagen mit aktiver Temperierung wurde der Versuch ganz gestoppt (Laborumzug).

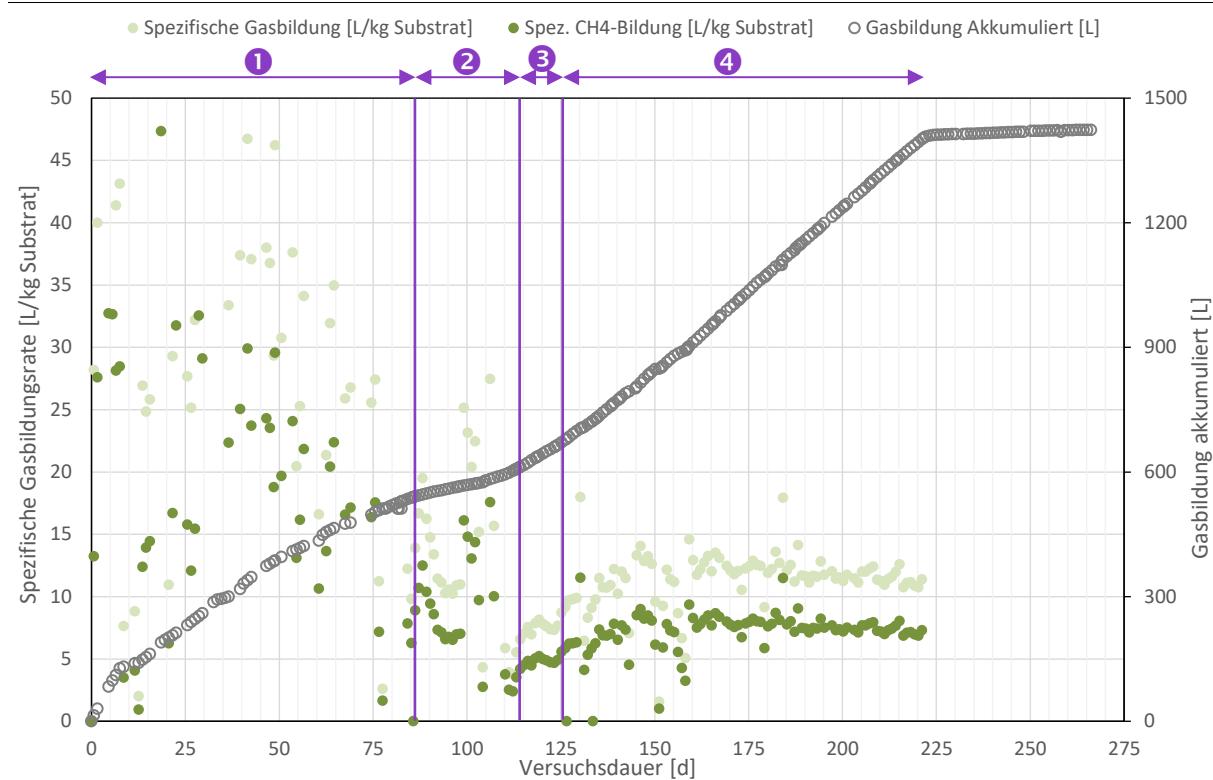


Abbildung 23: Verlauf der spezifischen Gasbildungsraten und akkumulierter Gasbildung im EGSB, Versuchssphasen siehe Tabelle 7

Während der Einfahrphase unter Verwendung von Prozesswasser aus Bioschlamm traten erhebliche Unregelmässigkeiten im Anlagenbetrieb auf, was zu einer schwankenden Gasproduktion führte. Dennoch konnten in dieser Versuchssphase im Durchschnitt knapp 25 Liter Methan pro Kilogramm eingesetztem Substrat erzeugt werden. Dieser vergleichsweise hohe Methanertrag ist vor allem auf die erhöhten Konzentrationen flüchtiger Fettsäuren (VFA) im Prozesswasser des Bioschlams zurückzuführen.

Nach der Umstellung in Phase 2 & 3 auf das Hauptsubstrat Prozesswasser aus Papierschlamm mit TS 15% und Severity Faktor 5.7 bis 5.9 stellte sich in Phase 4 ein durchschnittlicher Methanertrag von 7.7 Liter/kg Substrat ein.

Bei einer durchschnittlichen CSB-Konzentration von 30 g/L im Substrat entspricht dies einem spezifischen Methanertrag von 257 L/kg CSB. Verglichen mit Werten von 150 L/kg CSB aus Langzeitversuchen von Prozesswasser Faulschlamm unter ähnlichen Bedingungen (0.44 g CSB / L*d, 73d VWZ) (Weide et al., 2019) sind die aktuellen Werte deutlich höher. Dies wird im wesentlichen auf die Zusammensetzung des Substrates zurückzuführen sein, denn auch die durchschnittliche CSB-Konzentration betrug in der Literaturquelle rund die Hälfte. Basierend auf diesen Messwerten, wird in den Modellen zur Energiebilanzierung mit spezifischen Energieinhalten der Prozesswässer von 7.7 kWh/t bei SF 5.9 bzw. 4.8 kWh/t bei SF 5.4 gerechnet.

Gaszusammensetzung

Während der Einfahrphase (bis Tag 42) führten verschiedene Betriebsstörungen – wie Schaumbildung und unregelmässige Substratdosierung – zu starken Schwankungen der Methan- und Schwefelwasserstoffkonzentrationen. Zudem wird ein Zusammenhang mit der noch unvollständigen Adaptation der Fermenterbiologie an die neuen Substratbedingungen vermutet. Im Anschluss an diese Phase stabilisierten

sich die Gaskomponenten mit Methangehalten von etwa 67 % und Kohlendioxidanteilen von rund 23 % (Abbildung 24).

Mit dem Wechsel auf Prozesswasser aus Papierschlamm mit einem Trockensubstanzgehalt von 15 % (ab Tag 114) begann der Methangehalt sukzessive zu sinken und stabilisierte sich schliesslich bei knapp über 60 %. Im Gegensatz dazu stieg der Kohlendioxidegehalt auf durchschnittlich etwa 40 %. Ab dem 180. Versuchstag wurde ein erneuter deutlicher Anstieg der Schwefelwasserstoffkonzentration beobachtet, was auf eine veränderte oder gestörte mikrobiologische Zusammensetzung hinweisen könnte. Insbesondere eine verstärkte Aktivität sulfatreduzierender Bakterien, die in Konkurrenz zu methanogenen Archaeen stehen, könnte hierfür verantwortlich sein.

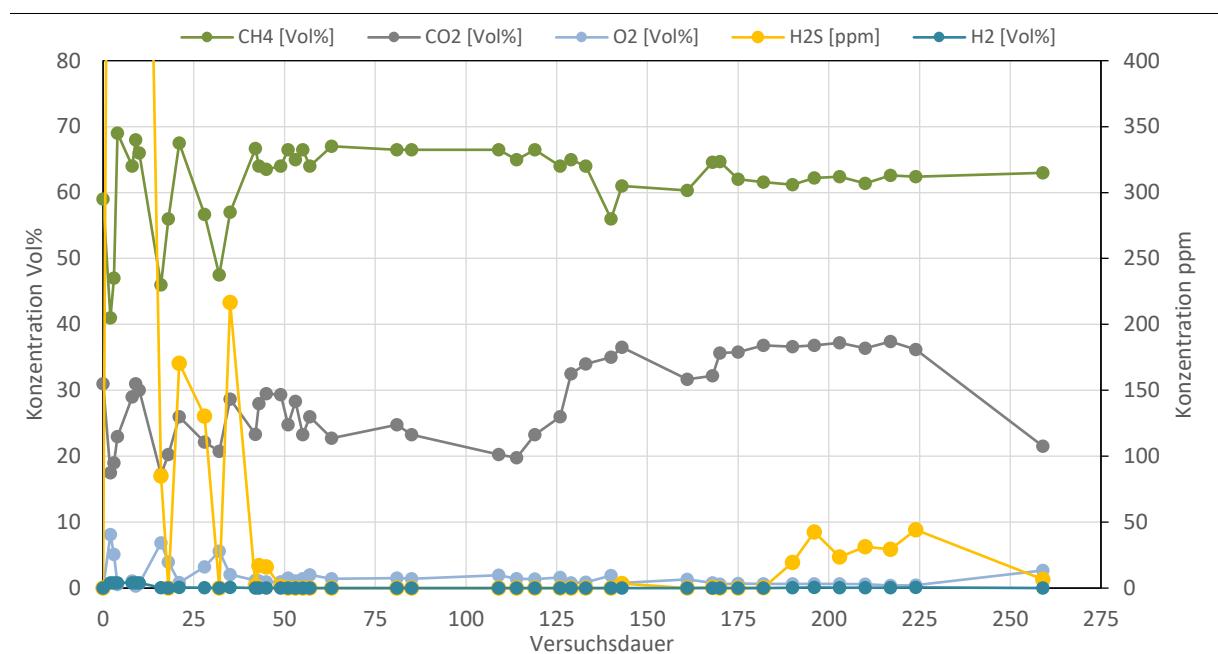


Abbildung 24: Verlauf Gaszusammensetzung im EGSB

Summenparameter Carbonsäuren / Alkalinität (FOSTAC)

In der Abbildung 25 sind der zeitliche Verlauf flüchtiger organischer (Carbon-) Säuren (FOS) und der Alkalinität bzw. Pufferkapazität (TAC) vom dosierten Substrat dargestellt. Die während der ersten Versuchsphase hohen Säurewerte sinken mit dem Substratwechsel von PW Bioschlamm auf PW Papierschlamm (Tag 80) deutlich ab. Die Alkalinität sinkt von durchschnittlich 2000 mg/L auf etwa 1000 mg/L.

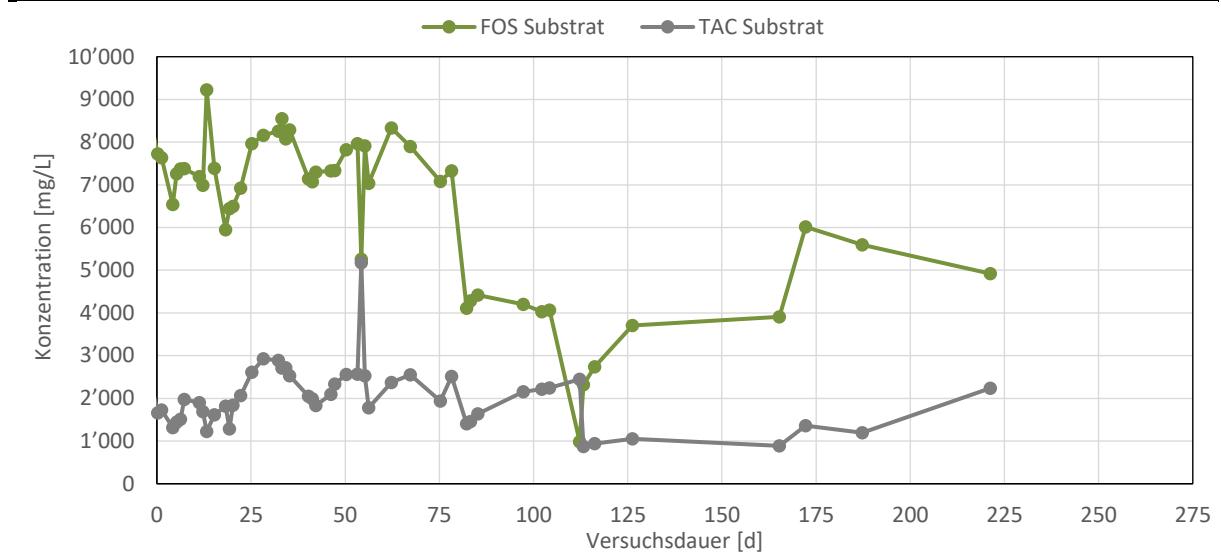


Abbildung 25: Zeitlicher Verlauf Carbonsäuren / Alkalinität (FOS/TAC) der dosierten Substrat PW Bio- bzw. Papierschlamm

Die Werte des Fermenterinhaltes (Abbildung 26) zeigen im Gegensatz zum Substrat ein gleichmässigeres Bild. Nach dem Messmethodenwechsel nach Versuchstag 42 steigen die Säurewerte (FOS) im Fermenter langsam, aber stetig an. Erst nach dem Stopp der Dosierung am Tag 221 sinken die Säurewerte wieder leicht ab. Die Alkalinität (TAC) steigt bis zum Versuchstag 116 an und mit dem Wechsel auf PW Papierschlamm TS 15% sinkt diese dann bis zum Dosierstopp kontinuierlich ab.

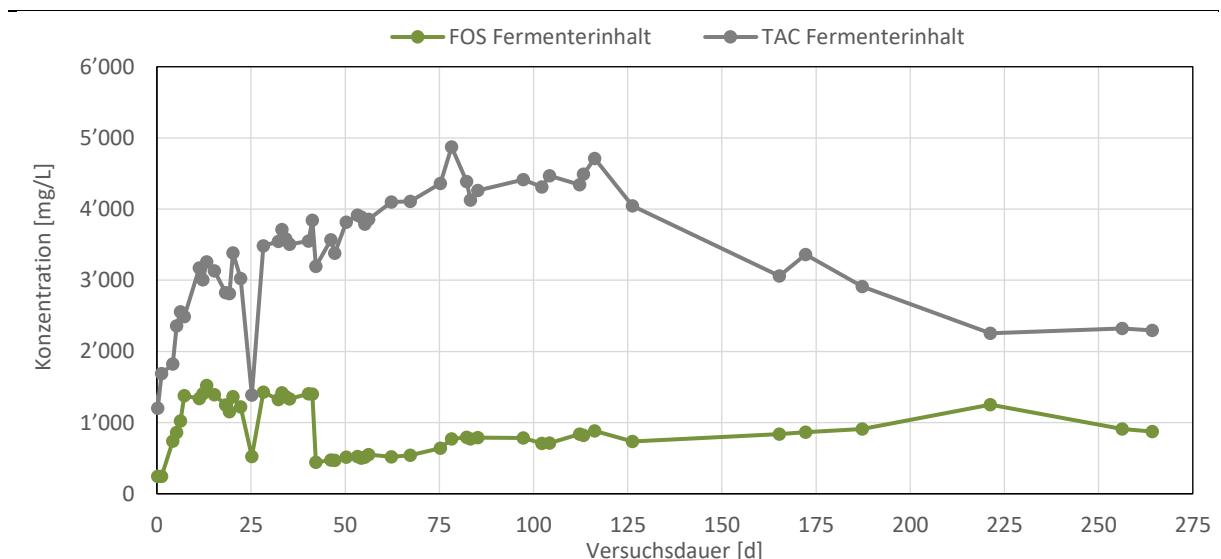


Abbildung 26: Zeitlicher Verlauf Carbonsäuren / Alkalinität (FOS/TAC) des Fermenterinhaltes EGSB

Summenparameter Gesamtkohlenstoff und gelöster Gesamtkohlenstoff (TOC / DOC)

Die Effektivität der Substratverwertung kann mittels Verhältnis des in den Fermenter eingetragenen Kohlenstoffs zum Kohlenstoff im Auslauf beurteilt werden. Aus verfahrenstechnischer Sicht ist insbesondere die Abbaurate von gelöstem Kohlenstoff (DOC, <0.2 µm Partikelgröße) im Ablauf relevant, da dies die biologisch verfügbare Fraktion darstellt. Der TOC-Gehalt ist stark von z.B. Probenahme, Biomassewachstum (feine Biomasseflocken tragen zu erhöhtem Wert bei), Lagerdauer Prozesswasser (nachträgliche Bildung von Kohlepartikeln) beeinflusst und kann deshalb stark vom DOC-Wert abweichen.

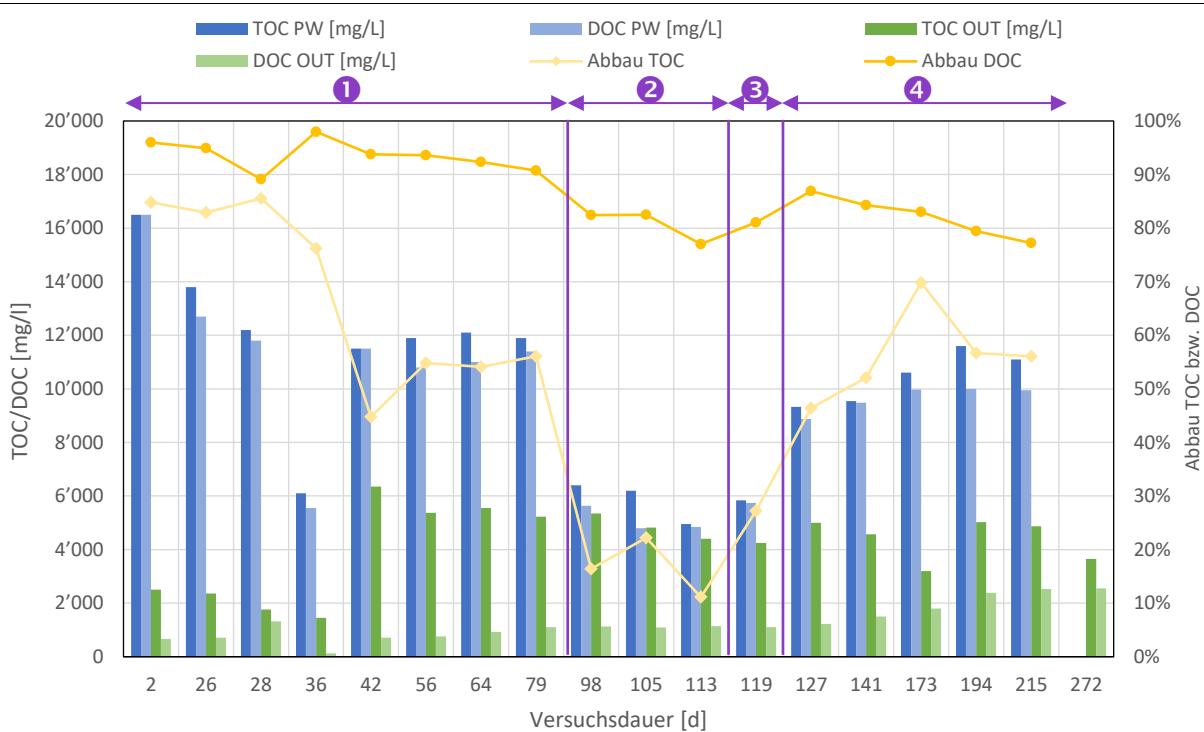


Abbildung 27: Zeitlicher Verlauf Konzentration Gesamtkohlenstoff (TOC) und gelöster Gesamtkohlenstoff (DOC) von Substrateintrag (TOC bzw. DOC PW) und Ablauf EGSB (TOC bzw. DOC OUT), Versuchsphasen (violett) siehe Tabelle 7.

Während der Versuchsphase 1 mit PW Bioschlamm (Abbildung 27) wurden durchschnittlich 12'000 mg/L TOC eingetragen. Der DOC schwankt während dieser Zeit, jedoch mit steigender Tendenz. In Phase 1 konnten durchwegs sehr hohe DOC-Abbauraten von 90% und darüber erzielt werden.

Der Einbruch der Werte am Tag 36 ist vermutlich einem Fehler in der Substrat-Handhabung geschuldet, d.h. ungenügender Durchmischung des Prozesswassers vor dem Überführen in die (gerührte) Dosiervorlage.

Ab Tag 42 - nach der Einfahrphase - stabilisiert sich der TOC-Gehalt im Fermenter (ca. 5000 mg/L) und verbleibt während der gesamten Versuchszeit etwa auf diesem Niveau.

Mit dem Substratwechsel in Phase 2 & 3 sinkt der TOC-Eintrag auf ca. 6000 mg/L und auch die Abbauleistung sinkt auf ca. 80%. Der DOC stabilisiert sich bei etwa 1100 mg/L und steigt ab Tag 141 an.

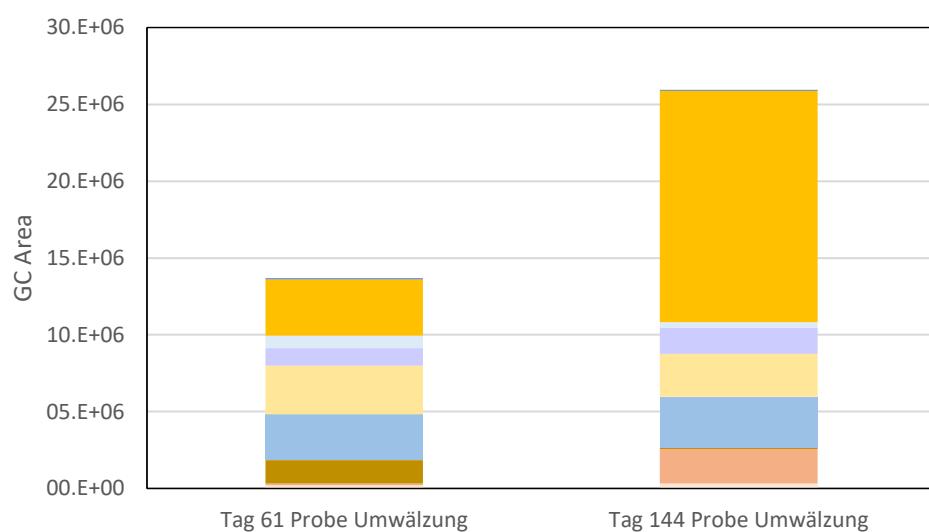
Während der Versuchsphase 4 steigt der TOC-Eintrag auf rund 10'000 mg/L, die Abbauleistung steigt kurzfristig auf 87% an und sinkt dann stetig. Es bleibt offen, ob sich mit der Zeit ein Gleichgewichtszustand eingestellt hätte, denn nach 215 Tagen wurde die Fütterung gestoppt (bevorstehender Laborumzug) die Temperierung verblieb weiterhin aktiviert. Es zeigt sich ein Rückgang des TOC-Gehaltes im Fermenter, der DOC verbleibt aber bei 2'500 mg/L.



Chemische Zusammensetzung

Die chemische Analyse des Fermenterinhaltes bietet eine Möglichkeit die Ursache(n) für steigende DOC-Werte bzw. sinkende Abbauraten aufzuklären. Nachfolgend sind zwei Messungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten dargestellt: Eine erste Probe gegen Ende der Phase 1 mit PW Bioschlamm und eine zweite Probe nach 2 Monaten Dosierung von PW Papierschlamm (Abbildung 28).

Schon während Phase 1 besteht ein deutlicher Anstieg von cyklischen Ketonen (CYKON), obwohl diese Stoffgruppe im PW Bioschlamm nur wenig vorhanden ist (ca. 5% im Vergleich zu PW Papierschlamm TS 15%). Die Stoffgruppe der aromatischen Carbonsäuren ist im PW Bioschlamm deutlich vorhanden und deshalb auch im Fermenterinhalt präsent.



VFA	Kurzkettige Fettsäuren C1-C7	NAROM	N-Aromaten, Pyrazine, Pyridine
CCA	Cyclische Carbonsäuren	CYCL	Heterocyclische Sauerstoff- und Schwefel-Verbindungen
AROCA	Aromatische Carbonsäuren	CYKON	Cyclische Ketone
ONOL	lineare Ketone und Alkohole	AMINOK	Aminosäuren Kondensationsprodukte
PHE	Phenole	DIV	Diverse Substanzen

Abbildung 28: Zeitlicher Verlauf der chemischen Zusammensetzung im Fermenterinhalt EGSB während Phase 1 (Tag 61) und Phase 4 (Tag 144).

Auch in der zweiten Messung nach 144 Tagen Betriebszeit des Fermenters zeigen sich nur sehr geringe Anteile kurzkettiger Fettsäuren (VFA), was ein Zeichen für einen gut funktionierenden anaeroben Abbau ist.

Die aromatischen Carbonsäuren (AROCA) sind mittlerweile überwiegend in deren Metaboliten der cyclischen Carbonsäuren (CCA) umgewandelt worden, welche nun weiter zu Fettsäuren und schliesslich zu Biogas umgewandelt werden. In der Stoffgruppe der Phenole ist grösstenteils Kresol vorhanden (Daten nicht gezeigt), einem häufig beobachteten und gut verwertbaren Abbauprodukt. Die übrigen Stoffgruppen zeigen eine Abnahme der Konzentration, nur die Stickstoffaromaten steigen leicht an. Dabei handelt es sich insbesondere um Thymin; Pyrazine werden abgebaut (Daten nicht gezeigt).

Auffällig ist der deutliche Anstieg an cyklischen Ketonen, welcher auch schon im Batchtest beobachtet werden konnte. Der Eintrag dieser Stoffgruppe ist durch die erhöhten Konzentrationen im PW Papierschlamm weiter verstärkt. Die steigenden DOC-Konzentrationen werden vermutlich zu einem beträchtlichen Anteil diesen Substanzen geschuldet sein. Aus der Literatur ist bekannt, dass cyklische Ketone im anaeroben Milieu schwer bis gar nicht abbaubar, aerob aber sehr gut verwertbar sind (Wu et al., 2024).



2.4 Weitere Verfahren zur vollständigen Prozesswasserverwertung

Zur vollständigen Aufbereitung von anaerob vorbehandeltem Prozesswasser, welches ca. 20% Restkohlenstoff beinhaltet, wurden folgende Verfahren auf deren Leistungsfähigkeit geprüft:

- Die technisch etablierte Behandlung mit dem Belebtschlammverfahren
- Die chemisch aggressivere Variante durch Ozonierung
- Die technisch aufwändigeren, aber versatilen Aufbereitung durch Membranfiltration

Die in diesem Kapitel beschriebenen Versuche wurden mit Prozesswasser aus Faulschlamm durchgeführt, da diese zu einem frühen Projektzeitpunkt erfolgten.

2.4.1 Aerober Abbau von anaerob behandeltem Prozesswasser

Die Kohlenstoffeliminierung mittels technisch ausgereiftem Belebtschlammverfahren wurde im Labormassstab geprüft. Der gesammelte Ablauf der anaeroben Stufe wurde in einer Labor-Kläranlage kontinuierlich behandelt. Im Hinblick auf eine verbesserte Gesamtenergiebilanz wurde kein zusätzliches, leichtverfügbares Co-Substrat zugegeben.



Abbildung 29: Labor-Kläranlage mit Belüftungsstufe, Schlammabscheider, Nachklärung.

Nach zweimonatigem Betrieb der Labor-Kläranlage wurden die Grenzen der biologischen Verwertbarkeit offensichtlich; Alle drei Stufen sind nach dieser Zeit durch den stetigen Eintrag von Prozesswasser stark verfärbt (Abbildung 29). Die Belebtschlamm-Biologie schaffte es nicht, den eingebrachten Kohlenstoff in nennenswertem Umfang aufzuschliessen.

Während der Versuchszeit sinkt der TOC-Gehalt in der Belüftungsstufe von 1300 mg/L auf 800 mg/L und der gelöste Kohlenstoff (DOC < 0.2 µm) steigt von 200 mg/L auf 600 mg/L kontinuierlich an (Abbildung 30). Messmethodisch wird für die TOC-Bestimmung der Schlammanteil nicht vollständig berücksichtigt, weshalb der TS grundsätzlich höher liegt und gegen Versuchsende weiter ansteigt.

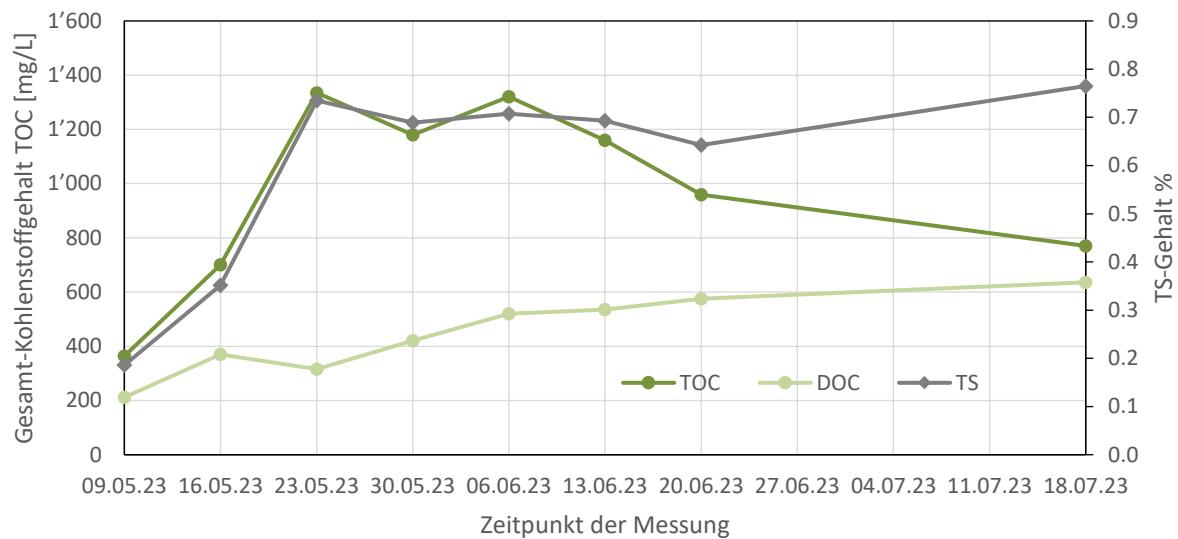


Abbildung 30: Verlauf Kohlenstoff- und Trockensubstanzgehalt in der Belüftungsstufe der Labor-Kläranlage

Durch Zugabe von Aufwuchskörper konnte der Trockensubstanzgehalt in der Belüftungsstufe auf niedrigem Niveau stabil gehalten werden. Das Wachsen von Biofilm deutet auf eine gewisse mikrobiologische Verwertbarkeit der zugeführten Organik hin. Es besteht die Vermutung, dass das Absinken des TOC-Gehaltes primär aufgrund der Adsorption von Makromolekülen aus dem PW an die Schlammflocken erfolgt. So würde der refraktäre Kohlenstoffanteil durch physikalische Effekte aus dem Wasser entfernt.

Der gelöste Kohlenstoffgehalt kann mit diesem biologischen Reinigungsverfahren in dieser Konstellation nicht vermindert werden, weshalb für den Gesamtprozess andere Reinigungsverfahren in Betracht gezogen werden müssen.



2.4.2 Ozonierung

Um den Restkohlenstoffgehalt von anaerob behandeltem Prozesswasser abzusenken wurde die chemische Methode der Ozonierung getestet. Unter Rühren wurde gasförmiges Ozon durch die Flüssigkeit strömen gelassen (Reaktionsvolumen 1 Liter, 22°C, 2.3 g O₃/h während 2 h).

Durch die Einwirkung von Ozon auf das ausgefaulte Material ist eine deutliche Entfärbung sichtbar (Abbildung 31). Allerdings ist die TOC-Elimination nicht in gleichem Masse effektiv wie der optische Effekt. Durch 120 Minuten Ozonierung kann das bereits anaerob behandelte Material nur um 16% von Restkohlenstoff befreit werden (Abbildung 32).

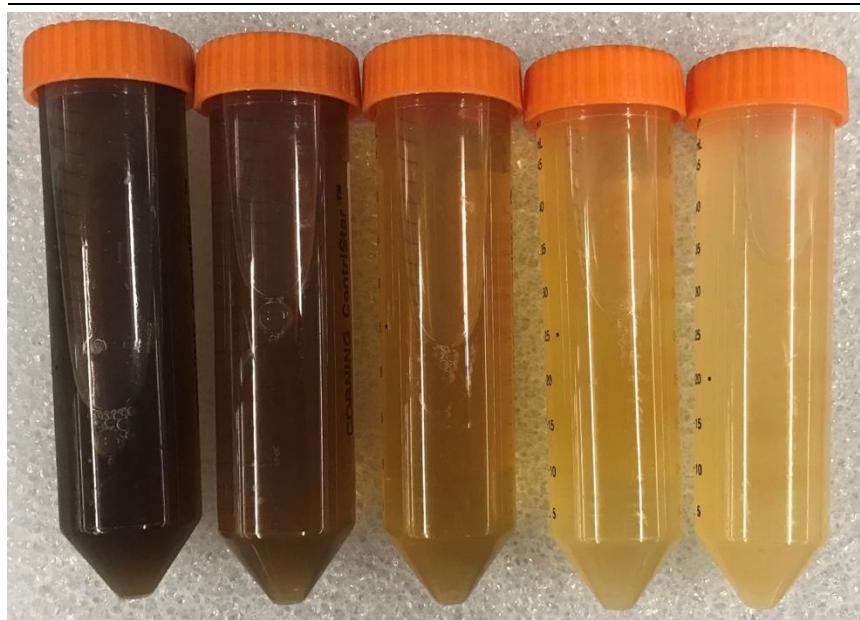


Abbildung 31: v.l.n.r. Proben von anaerob vorbehandeltem PW nach 0, 15, 30, 60, 120 Minuten Behandlung mit Ozon

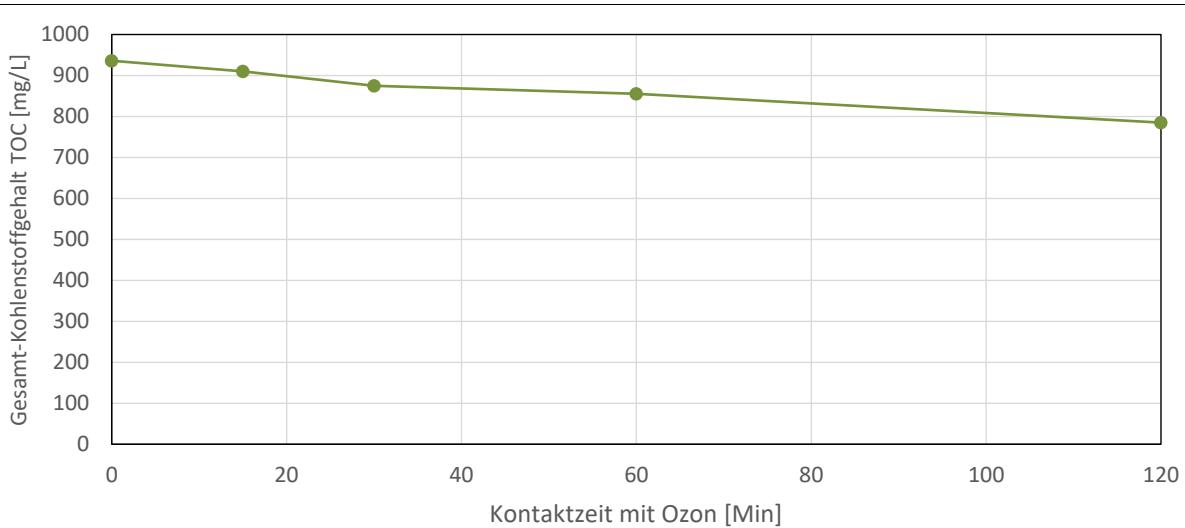


Abbildung 32: TOC-Elimination in anaerob vorbehandeltem Prozesswasser durch Ozonierung



2.4.3 Membranfiltration

Die Membranfiltration des anaerob vorbehandelten Prozesswassers erfolgte gemäss dem nachfolgend abgebildeten Schema.

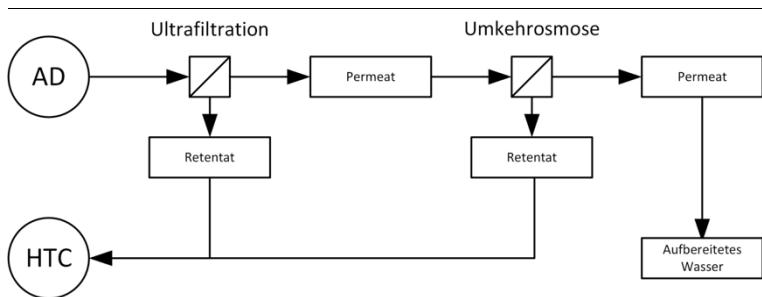


Abbildung 33: Verfahrenskaskade Membranfiltration

Die im Projektantrag vorgesehene Bereitstellung von Wasser für die industriellen Prozesse kann durch eine Ultrafiltration (UF) in Kombination mit Umkehrosmose (UO) bewerkstelligt werden. Versuche zeigen, dass 80% des anaerob behandelten Prozesswassers als aufgereinigtes Wasser mit sehr niedrigen Restkohlenstoffgehalten in industrielle Prozesse rückgeführt oder als gereinigtes Abwasser abgegeben werden könnte (Tabelle 8).

Tabelle 8: Massenbilanz und TOC-Gehalte von membranfiltriertem, anaerob vorbehandeltem Prozesswasser

Fraktion	Menge [g]	TOC [mg/L]	Massenanteil
Ablauf Fermenter zentrifugiert	4'923		100%
Permeat Ultrafiltration Trenngrenze 100 kDa	4'891.5	1'038	99%
Permeat Umkehrosmose «gereinigtes Wasser»	3'953	17	80%
Rückstände zu HTC	970.1		20%
Retentat Ultrafiltration 100 kDa	31.5	1'480	
Retentat Umkehrosmose	938.6	7'050	

Die bisher durchgeföhrten Versuche bestätigen die Reinigungswirkung, das in Abbildung 34 dargestellte Permeat aus der Umkehrosmose ist praktisch klar. Auch der TOC-Gehalt von 17 mg/L bestätigt die Tauglichkeit zur Aufreinigung von sonst schwierig zu verwertendem Prozesswasser. Es kann davon ausgegangen werden, dass durch Optimierung, die Restbelastung noch weiter gesenkt werden kann. Durch eine Membranfiltration (Kombination Ultrafiltration mit Umkehrosmose) kann der Restkohlenstoffgehalt im Abwasserstrom weitestgehend eliminiert werden.



Abbildung 34: V.l.n.r. Retentat aus Umkehrosmose, Permeat aus Ultrafiltration, Permeat aus Umkehrosmose

3 Schlussfolgerungen

In diesem Kapitel werden zuerst die wesentlichen Erkenntnisse aus der Prozessentwicklung zusammengefasst, danach erfolgt die Beurteilung des Gesamtkonzeptes im Hinblick auf den Anwendungsfall, wobei auch allgemeine Schlüsse zur HTC-Technologie gezogen werden.

Die während der Prozessentwicklung gesammelten Messdaten bilden die Grundlage des Berechnungsmodells, mit welchem dann die möglichen Verbesserungen in der Energiebilanz aufgezeigt werden.

3.1 Einfluss der HTC-Prozessparameter

Wie schon in Kapitel 2.1 erwähnt, wurde Papierschlamm in Chargen mit unterschiedlichen Prozessbedingungen carbonisiert. Die angewandten Temperaturen und Verweilzeiten von 200-220°C bzw. 220 bis 270 Minuten resultierten in hydrothermalen Severity Faktoren von 5.4 bis 5.9.

In Abbildung 35 wird ersichtlich, dass sowohl Heizwert als auch die organische Trockensubstanz bei SF 5.7 ein Minimum durchfahren und mit harscheren Bedingungen wieder ansteigen.

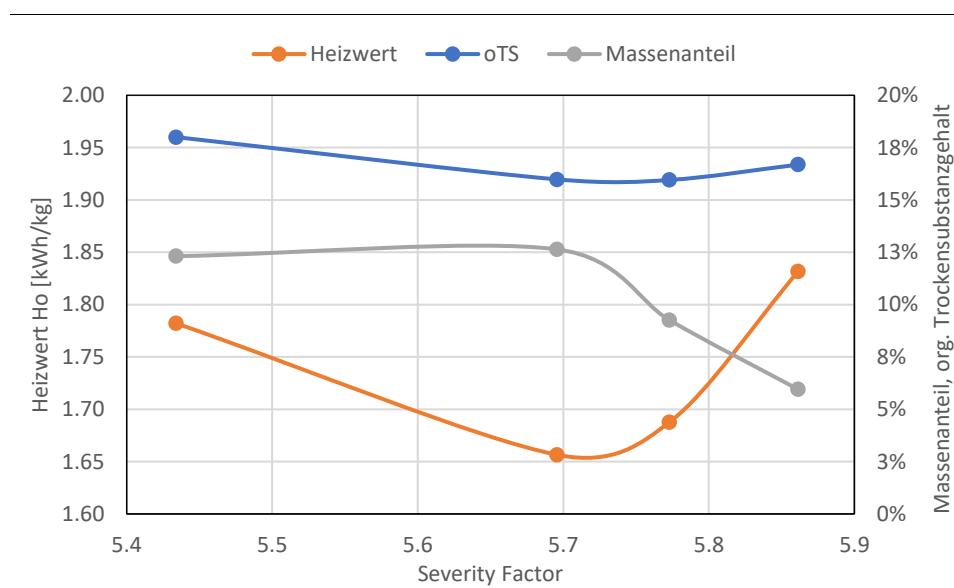


Abbildung 35: Einfluss des Severity Faktors auf den Heizwert, org. Trockensubstanzgehalt und Massenanteil von Biokohle aus Papierschlämmen.

Ein hoher Severity Faktor resultiert zwar in einem erhöhten Heizwert, dabei sinkt der Massenanteil und damit die Ausbeute von Biokohle beträchtlich. Umgekehrt ist bei einem SF von 5.4 im Vergleich zum Ausgangsmaterial (1.98 kWh/kg TS) 90% des Heizwertes zu erzielen und der Massenanteil der Biokohle (13%) bleibt trotzdem hoch.

Es gilt also die Prozessbedingungen für den jeweiligen Anwendungszweck zu optimieren. Dabei sind genügend starke Carbonisierungsbedingungen zu wählen, sodass zufriedenstellende Entwässerungseigenschaften gewährleistet bleiben.

Die getesteten Biokohlen wurden im Labor mittels Saugnutsche (Vakuumfiltration, 1.2 µm Porengröße) abfiltriert, einer relativ simplen Filtrationstechnik. Ohne grossen Aufwand konnten durchwegs hohe Trockensubstanzgehalte von ca. 55% erreicht werden (Abbildung 36). Mit steigendem SF und gleichbleibenden Filtrationsbedingungen sind leicht höhere TS-Gehalte zu verzeichnen.

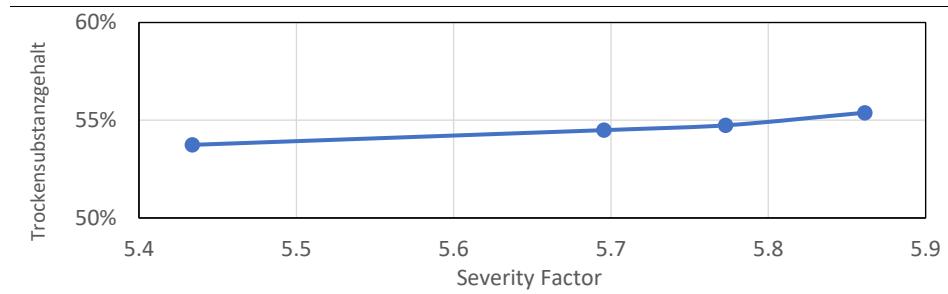


Abbildung 36: Einfluss des Severity Faktors auf den Trockensubstanzgehalt von Biokohle aus Papierschlämmen

Auch im Hinblick auf die anaerobe Verwertbarkeit von Prozesswasser sind die Bedingungen zu optimieren. Die anaerobe Abbaubarkeit ist stark von den thermochemischen Bedingungen in der HTC abhängig, denn obwohl mit erhöhter Temperatur der niedermolekulare Anteil gut verwertbarer Substanzen (z.B. Carbonsäuren) ansteigt (Abbildung 17), sinkt die generelle anaerobe Verwertbarkeit. Anders ausgedrückt entstehen bei harscheren Carbonisierungsbedingungen zwar vermehrt niedermolekulare Substanzen, diese sind aber aufgrund der veränderten chemischen Zusammensetzung schlechter abbaubar (Chen et al., 2017).

3.2 Modellierung des Anwendungsfalles TELA

Um den Einfluss der einzelnen Prozessschritte zu verdeutlichen, wurde ein Berechnungsmodell aufgestellt, mit welchem die konkreten Energiegewinne quantifizierbar werden.

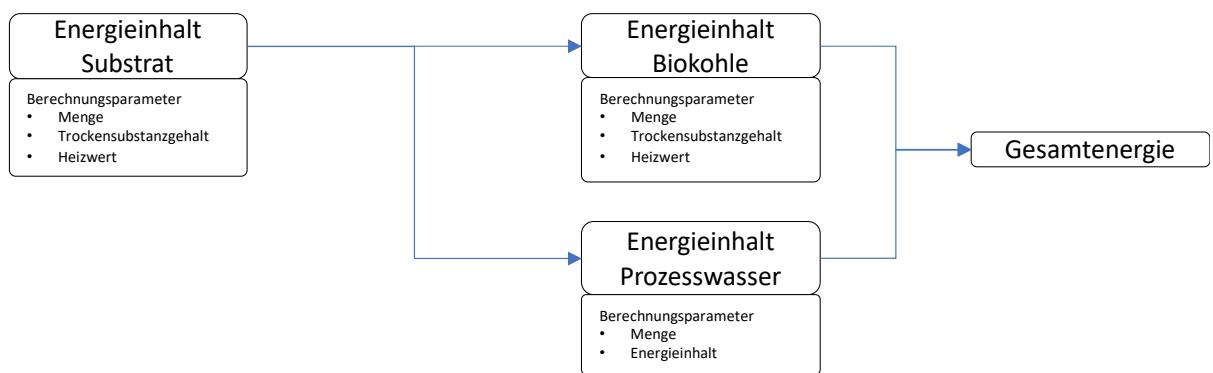


Abbildung 37: Schema Berechnungsmodell

Im modellierten Verfahrenskonzept wurden zwei Behandlungsstrategien - Carbonisierung mit den hydrothermalen Severity Faktoren 5.9 (V1) und 5.4 (V2) - evaluiert und in Tabelle 9 zusammengefasst. Dabei flossen die Daten zu Massenbilanz Biokohle – Prozesswasser (Kapitel 2.2.5), Heizwert (Kapitel 2.2.6) und der spezifische Gasertrag (Kapitel 2.3.3) in die Berechnung ein. Als Berechnungsgrundlage diente die jährliche (biogene) Trockensubstanzmenge von Papier- und Bioschlamm welche im Jahr 2023 20'420 t betrug.

Zur Vereinfachung und aufgrund geringer Datenlage wurden die Membranfiltration und die Trocknung in der Energiebilanz nicht berücksichtigt. Deren Energieaufwendungen werden jedoch im Kapitel 3.4 diskutiert.

2023 wurden in der Papierfabrik TELA mit den Festbrennstoffen im Wirbelschichtofen etwa 23'000 MWh Energie in Form von Sattdampf erzeugt. Dies soll in der nachfolgenden Energiebetrachtung als Referenzszenario (Tabelle 9, R) dienen.



Prinzipiell kann der entwässerte Papierschlamm direkt zu Biogas verwertet werden. Mit den im Labor gemessenen Gaserträgen, könnten so knapp 9'000 MWh/a in Form von Biomethan (notwendige Gasreinigung nicht berücksichtigt) rückgewonnen werden (Tabelle 9, Variante AD1).

Es kann davon ausgegangen werden, dass Papierschlamm zu ca. 50% umgesetzt wird und der restliche Anteil Kohlenstoff, bzw. die chemisch gespeicherte Energie im Gärrest verbleiben. Eine weitere thermische Verwertung wäre in diesem Fall sinnvoll, jedoch würde dazu eine zweite Entwässerung notwendig, welche anspruchsvoller als diejenige des faserigen Papierschlammes zu bewerten ist. Auch mit nachgeschalteter Carbonisierung des Gärrestes wären grössere Fermentervolumen mit entsprechend hohen Investitionen notwendig, was dieses Szenario wirtschaftlich unattraktiv macht und hier nicht weiter verfolgt werden soll.

Stattdessen gilt es die verbesserten Entwässerungseigenschaften durch HTC zu nutzen, d.h. dünne Papierschlämme konventionell von ca. 3% auf 15% TS einzudicken, zu carbonsieren und erst danach auf Trockensubstanzgehalte von ca. 55 bis 75% zu entwässern.

In beiden Varianten wird die verbesserte Energieausbeute aus Biokohle durch die Erhöhung des TS von 75 auf 95% deutlich. Im grosstechnischen Massstab sind TS-Werte der Biokohle von 75% mit geeigneter Filtrationstechnologie gut zu erreichen (Mehli et al., 2021). Durch Trocknung der Biokohle können die TS-Werte auf ca. 95% erhöht werden.

Tabelle 9: Vergleich der Varianten des Energiemodells

ID	Beschreibung der Variante	Jahres Energie-aus-beute Bio-kohle [MWh/a]	Jahres Energie-aus-beute Prozesswas-ser [MWh/a]	Jahres Energie-aus-beute ge-samt [MWh/a]	Vergleich zu Referenz
R	Wirbelschichtverbrennung von entw. PPS & BS			22'133	100%
AD1	Anaerobe Vergärung von entw. PPS & BS			8'706	39%
V 1.0	SF 5.9, TS Kohle 55%, BMP 77 kWh/t PW	10'235	8'889	19'123	86%
V 1.1	SF 5.9, TS Kohle 75%, BMP 77 kWh/t PW	12'789	8'889	21'678	98%
V 1.2	SF 5.9, TS Kohle 95%, BMP 77 kWh/t PW	14'310	8'889	23'198	105%
V 1.3	SF 5.9, TS Kohle 75%, BMP 100 kWh/t PW	12'789	11'554	24'343	110%
V 1.4	SF 5.9, TS Kohle 95%, BMP 100 kWh/t PW	14'310	11'554	25'863	117%
V 2.0	SF 5.4, TS Kohle 55%, BMP 47 kWh/t PW	19'573	4'756	24'329	110%
V 2.1	SF 5.4, TS Kohle 75%, BMP 47 kWh/t PW	25'435	4'756	30'192	136%
V 2.2	SF 5.4, TS Kohle 95%, BMP 47 kWh/t PW	28'555	4'756	33'311	151%
V 2.3	SF 5.4, TS Kohle 75%, BMP 62 kWh/t PW	25'435	6'183	31'618	143%
V 2.4	SF 5.4, TS Kohle 95%, BMP 62 kWh/t PW	28'555	6'183	34'738	157%

Die Behandlungsstrategie mit harscheren Bedingungen in Variante 1 (SF 5.9) führt zwar zu einem höheren Heizwert aber auch zu geringerer Ausbeute von Biokohle. So ist in der Grundvariante (V1.0) mit einem nicht weiter optimierten TS der Biokohle (55%) der Referenzenergieertrag (R) nur zu 86% zu erreichen. Erst ab erhöhten TS-Gehalten von 75 bzw. 95% liegen die Werte in etwa gleich auf oder etwas höher.

Die um 30% optimierten Gaserträge (100 kWh/t Prozesswasser gegenüber Messwert 77 kWh/t) erhöhen die Energieausbeute der Varianten V 1.3 und V 1.4 um 10% bzw. 17% gegenüber der Referenz.



Vielversprechender ist die Strategie mit weniger harschen Bedingungen in der HTC (V 2.0). Im Vergleich zum Referenzszenario kann ohne weitere Massnahmen 10% mehr Energie rückgewonnen werden.

In dieser Strategie wird der positive Effekt der TS-Erhöhung durch Trocknung der Biokohle (V2.2) noch deutlicher (+51%). In Kombination mit 30% verbessertem Gaspotential (62 kWh/t Prozesswasser gegenüber Messwert 47 kWh/t) kann gegenüber dem Referenzszenario insgesamt 57% zusätzliche Energie erzeugt werden.

Zur Quantifizierung des tatsächlichen Nutzens im Hinblick auf die Gesamtenergiebilanz wird im folgenden Kapitel mit den beiden leistungsstärksten Varianten – V 2.2 und V 2.4 – weitergerechnet, die eine zusätzliche Energieausbeute von 11'178 MWh/a bzw. 12'605 MWh/a erzielen.

3.3 Verbesserte Gesamtenergiebilanz der TELA durch VARESI

Die TELA-Papierfabrik benötigte im Jahr 2023 knapp 188'000 MWh Gesamtenergie, 36% davon als elektrische Energie (Diagramm 37). 64% der Gesamtenergie wurden für die Wärmebereitstellung aufgewendet, gesamthaft 47% waren fossilen Ursprungs, d.h. Erdgas und Kunststoffabfälle (Reject).

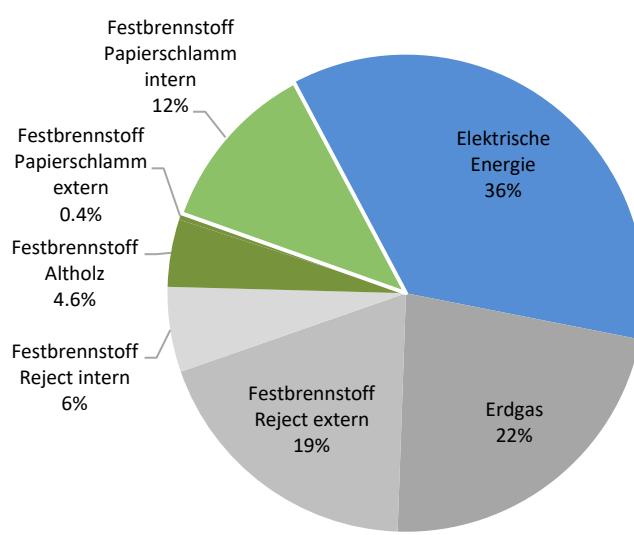


Abbildung 38: Relative Anteile der Energieträger vom Gesamtenergiebedarf in der TELA Papierproduktion (grün = biogen, grau = fossilen Ursprungs)

In Tabelle 10 sind die Daten zur Energiebereitstellung zusammengestellt. Knapp 18% der Gesamtenergie entstammen interner Abfallströme, ca. 12% sind biogen, d.h. aus nachwachsenden Ressourcen (Papier- und Bioschlamm).

Tabelle 10: Energiebereitstellung TELA Papierproduktion 2023 (Referenzszenario), aufgeschlüsselt nach Energieträger

Energieträger	Energie [MWh/a]	Mengen [m³ bzw t]	Anteil bzgl. Festbrennstoffen	Anteil bzgl. Gesamtenergie
Elektrische Energie	67'415	-	-	36%
Erdgas	42'205	3'686'047	-	22.5%
Biomethan	-	-	-	-
Festbrennstoff Reject extern	35'894	9'164	46%	19.1%
Festbrennstoff Reject intern	10'838	1'660	14%	5.8%
Festbrennstoff Altholz	8'583	2'042	11%	4.6%
Festbrennstoff Papierschlamm extern	842	1'516	1%	0.4%
Festbrennstoff Papierschlamm intern	22'133	20'420	28%	11.8%
Gesamtenergiebedarf	187'910		100%	100%



Gemäss den Berechnungen können aus 20'420 t Papier- und Bioschlamm im Referenzszenario 22'133 MWh Energie gewonnen werden. Durch Anwendung des VARESI-Konzepts erhöht sich die Energieausbeute auf 33'311 MWh (Variante 2.2) bzw. 34'738 MWh (Variante 2.4). Der daraus resultierende zusätzliche Energiegewinn beträgt somit rund 11'200 MWh bzw. 12'600 MWh. Bezogen auf den Gesamtenergiebedarf entspricht dies einem energetischen Mehrwert von 5,9 % bis 6,7 %.

In der nachfolgenden Betrachtung (Tabelle 11) wird mit dem zusätzlichen Energiebudget 6.7% Erdgas substituiert. Im Vergleich zum Referenzszenario erhöht sich der Energieanteil um 3.4% beim Festbrennstoff Papierschlamm (neu in Form von Biokohle) und um 3.3% durch zusätzliches Biomethan. Mit der weniger optimierten Variante (V2.2) liessen sich 5.9% Energie aus Erdgas einsparen.

Tabelle 11: Variante 2.4 verminderter Einsatz fossiler Energie durch Substitution von Erdgas

Energieträger	Energie [MWh]	Mengen [m³ bzw t]	Anteil bzgl. Festbrennstoffen	Anteil bzgl. Gesamtenergie	Veränderung
Elektrische Energie	67'415			35.9%	0.0%
Erdgas	29'600	2'585'172		15.8%	-6.7%
Biomethan	6'183	620'157		3.3%	3.3%
Festbrennstoff Reject extern	35'894	9'164	42%	19.1%	0.0%
Festbrennstoff Reject intern	10'838	1'660	13%	5.8%	0.0%
Festbrennstoff Altholz	8'583	2'042	10%	4.6%	0.0%
Festbrennstoff Papierschlamm extern	842	1'516	1%	0.4%	0.0%
Festbrennstoff Papierschlamm intern	28'555	20'420	34%	15.2%	3.4%
Gesamtenergiebedarf	187'910		100%	100%	0.00%

Aufgrund der zukünftig erhöhten Nachfrage nach klimaneutralen Energieträgern kann davon ausgegangen werden, dass Alt- bzw. Energieholz schlechter verfügbar und teurer wird. Als Alternative zur obigen Variante kann auch das Altholz substituiert werden. Gemäss den Berechnungen in Tabelle 12 liesse sich das Altholz vollständig (8'583 MWh) und ein kleiner Teil Erdgas (4'022 MWh) ersetzen.

Tabelle 12: Variante 2.4 ohne Altholz und verminderter Einsatz fossiler Energie

Energieträger	Energie [MWh]	Mengen [m³ bzw t]	Anteil bzgl. Festbrennstoffen	Anteil bzgl. Gesamtenergie	Veränderung
Elektrische Energie	67'415			35.9%	0.0%
Erdgas	38'183	3'334'780		20.3%	-2.1%
Biomethan	6'183	620'157		3.29%	3.3%
Festbrennstoff Reject extern	35'894	9'164	47%	19.1%	0.0%
Festbrennstoff Reject intern	10'838	1'660	14%	5.8%	0.0%
Festbrennstoff Altholz		2'042	0%	0.0%	-4.6%
Festbrennstoff Papierschlamm extern	842	1'516	1%	0.4%	0.0%
Festbrennstoff Papierschlamm intern	28'555	20'420	38%	15.2%	3.4%
Gesamtenergiebedarf	187'910		100%	100%	±0.0%



3.4 Kritische Beurteilung des Berechnungsmodells

In den Modellberechnungen sind Varianten mit 30% optimiertem Gaspotential (Schätzwert) berücksichtigt.

Die folgenden Gründe sprechen für das Erreichen dieses zusätzlichen Gas potentials:

- Optimierung TS-Gehalt der HTC-Reaktionsmischung auf 20-25%

Die aktuelle Berechnung basiert auf Messwerten, welche mit 15% TS-Gehalt durchgeführt wurde. Durch eine Erhöhung des TS wird der Mengenanteil Prozesswasser geringer, gleichzeitig birgt dieses ein höheres Methanpotential. Auch bei der Biokohle sind Verbesserungen bzgl. des Heizwertes zu erwarten.

- In der Energieberechnung sind Verluste in der Massenbilanz nicht berücksichtigt

Bei der Filtration von Biokohle entstehen im Labor technische Verluste (Abbildung 15), welche im grossen Betrieb bedeutend geringer ausfallen. Auch die Kohlefeuchte wurde im Energiemodell nicht weiter berücksichtigt. In dieser Studie bewegen sich die Werte zwischen 7 - 12% Massenanteil, wenn diese Verluste wegfallen, erhöht sich die Energieausbeute weiter.

- Rückführung Retentat aus Membranfiltration in die HTC-Reaktionsmischung

Das Recycling des kohlenstoffreichen Retentates, welches ca. 20% des nicht anaerob verwerteten Kohlenstoffs enthält, wird sich auf die Massenbilanz auswirken. Zurzeit ist nicht bekannt, ob daraus vermehrt Biokohle oder Methanpotential im Prozesswasser resultiert.

- Optimierung der anaeroben Vergärungsstufe

Die Biomethanproduktion kann bezüglich Temperatur, Verweilzeit, Kombination mit Austragung von hochmolekularem, nicht abbaubarem Kohlenstoff, etc. weiter optimiert werden.

- Verwertung vom Substrat Bioschlamm

Die reale Mischung der Substrate Papier- und Bioschlamm konnte im Rahmen dieser Untersuchung nicht genau abgebildet werden, wobei der Bioschlammanteil ca. 1.5% beträgt. Je nach weiterer Auslegung des Gesamtkonzeptes (Reduktion bis Stilllegung der betrieblichen ARA) ist dieser energiereiche Biomassenstrom detaillierter zu betrachten. Bioschlamm kann auch direkt in eine anaerobe Verwertung gegeben werden.

Die Energieaufwände für den Betrieb der HTC, der anaeroben Stufe und der Membranfiltration sind in der aktuellen Energieberechnungen nicht berücksichtigt. Insbesondere der Wärmebedarf der HTC hat grosse Auswirkungen auf die Energiebilanz. Durch effiziente Wärmerückgewinnung kann der Bedarf jedoch stark reduziert werden, wie aktuelle Erfahrungswerte von ca. 80% Wärmerückgewinnung zeigen (Mehli et al., 2021).

Die anaerobe Stufe benötigt weder grosse Wärmemengen, noch hohe Temperaturniveaus und kann gut mit Niedertemperaturabwärme aus der Papierproduktion betrieben werden. Eine Gasaufbereitung des Biogas zu Biomethan kann energetisch bedeutend grössere Auswirkungen haben.

Die Membranfiltration hat praktisch keinen Wärmebedarf, dafür aber einen erhöhten Bedarf an elektrischer Energie. Für eine einfache Abschätzung des Einflusses auf die Energiebilanz wurde ein Wert von 4 kWh/t Prozesswasser angenommen. In der Wassergewinnung durch Meerwasser-Entsalzung werden heutzutage typische Werte von 3.7 - 4.4 kWh/m³ aufgewendet (Horstmeyer et al., 2017).

Je nach Menge Prozesswasser beläuft sich der Minderertrag durch Membranaufbereitung auf 1 - 2%, bezogen auf die Gesamtenergiebilanz. Auch aus dieser Perspektive erweist sich ein tieferer Severity Faktor mit entsprechend geringeren Prozesswassermengen als vorteilhaft.



3.5 Beurteilung VARESI-Gesamtkonzept

Die thermische Nutzung von nasser Biomasse ist mit hohen energetischen Verlusten verbunden, da die chemisch gespeicherte Energie aufgrund der Verdampfungswärme des Wassers nicht vollständig genutzt werden kann.

Innerhalb des VARESI-Konzeptes nimmt der Einsatz der HTC-Technologie eine Schlüsselrolle ein, denn die effektivere Entwässerbarkeit der carbonisierten Biomasse ermöglicht erst eine verbesserte Ausnutzung des Energiepotentials.

Das Proof-of-Principle der postulierten Verfahrenskaskade (Abbildung 5 auf Seite 15) konnte im Labormaßstab bestätigt werden. Zur effektiven Verwertung von nasser Biomasse wurde eine mehrschichtige Behandlung in folgenden Teilschritten geprüft:

- Hydrothermale Carbonisierung von Papierschlamm mit nachfolgender
- Separation und Massen-Bilanzierung von Biokohle und Prozesswasser
- Unverdünnte und kontinuierliche anaerobe Vergärung des Prozesswassers zur Rückgewinnung von Methan als Energieträger
- Membranfiltration zur Abscheidung des Kohlenstoffs im Restmaterial der anaeroben Vergärung sowie zur Bereitstellung von gereinigtem Wasser

Die Innovation dieses Verfahrenskonzeptes ist die Kombination von technisch etablierten Prozessen, die zu einer umfassenden Verwertung von Teilströmen und letztendlich zu einer positiven Gesamtbilanz führen.

Die Vorteile werden in der spezifischen Anwendung am Beispiel der TELA Papierfabrik deutlich. Gemäss den Modellrechnungen können aus der aktuell genutzten Schlammmenge Zusatz-Energiegewinne von 5.9% bzw. 6.7% des aktuellen Gesamtenergiebedarfes erzielt werden.

Mit diesem zusätzlichen Energiebudget können Energieträger substituiert werden; Altholz (vollständig), Kunststoffabfälle (teilweise), Erdgas (teilweise).

Ein wesentlicher Anteil Erdgas wird zum Befeuern von Haubentrocknern in der Papierproduktion gebraucht und die Energieeffizienz ist vom Stand der Anlagentechnik abhängig. Die (teilweise) Nutzung von Biogas bzw. Biomethan sollte möglich sein, da der Einsatz von Bio-Synthesegas schon angewendet wird (Andritz, 2022). Ob die bestehenden Produktionsprozesse direkt mit Biogas oder mit Biomethan (nach Aufbereitung von Biogas) zu betreiben sind, ist für den jeweiligen Anwendungsfall zu prüfen.

Der verminderte Bedarf an fossilen Brennstoffen und die damit verbundenen reduzierten Treibhausgas-Emissionen unterstützen die Bestrebungen die 2050 gesetzlich geforderten Netto-Null-Emissionen zu erreichen.

Eine ökonomische Beurteilung ist im Rahmen dieser Untersuchung nicht möglich, da für die Dimensionierung entscheidende Prozessparameter wie z.B. TS-Gehalt in der Carbonisierung noch nicht abschliessend evaluiert sind. Ohne die genauere Eingrenzung von Parametern wie TS-Gehalt, hydrothermalem Severity Faktor ist es schwierig eine belastbare Wirtschaftlichkeitsrechnung aufzustellen.

Die für eine erfolgreiche Anwendung des Gesamtverfahrens wesentlichen Aspekte sind nachfolgend genauer erläutert.



3.5.1 Biokohle als energieeffizienter, lagerbarer Brennstoff

Die Modellberechnungen in Kapitel 3.2 zeigen die energetischen Vorteile der HTC-Behandlung auf, mit welcher die effiziente thermische Nutzung von ursprünglich nasser Biomasse ermöglicht wird.

In einem Wirbelschichtofen kann der entwässerte Papierschlamm ab einem TS-Gehalt von etwa 55% ohne Zusatzbrennstoffe verfeuert werden. Der technische Aufwand zur Entwässerung von Papierschlamm und insbesondere Bioschlamm kann mit dem neuen Konzept verringert werden, da für den Carbonisierungsprozess geringere Eingangs-TS von ca. 15-20% nötig sind und das carbonisierte Material aufgrund der hydrophoben Eigenschaften bedeutend einfacher zu entwässern ist (siehe Filtrationsexperimente Kapitel 2.2.3).

Durch eine Trocknung der entwässerten Biokohle mit konsequent genutzter Abwärme kann der Energieinhalt nochmals deutlich verbessert werden. Da der Heizwert von Biomasse stark von dessen Wassergehalt abhängig ist, kann so eine bedeutend höhere Energieausbeute aus einer bestehenden Menge Material erzielt und der Bedarf an Zusatzbrennstoffen gesenkt werden. Diesbezüglich ist eine Energiebilanz sorgfältig zu prüfen, Versuchsdaten sind jedoch vielversprechend (Mehli et al., 2021).

Getrocknete und pelletierte Biokohle lässt sich hervorragend lagern und bietet eine bessere Regelbarkeit der Wirbelschichtverbrennung. Mit Biokohle ist grundsätzlich ein gleichmässigerer Betrieb zu erwarten. Zwar muss der erhöhte Ascheschmelzpunkt von Biokohle berücksichtigt werden, jedoch sollte deren Nutzung mit dem bestehenden Wirbelschichtofen kompatibel sein, da dieser bereits auf hohe mineralische Anteile im Brennstoff ausgelegt ist. So sind bereits getätigte Investitionen auch längerfristig gesichert.



3.5.2 Anaerobe Vergärung des Prozesswassers zur Energiegewinnung

Grundsätzlich geht durch die Carbonisierung ein signifikanter Anteil Kohlenstoff ins Prozesswasser über, welcher je nach Prozessbedingungen und Art des Ausgangsmaterials mehr oder minder ausfallen kann.

Nur die vollständige, energetische Nutzung des Kohlenstoffs im Prozesswasser über Biomethan lässt die Energiebilanz des Gesamtverfahrens positiv werden (Remy et al., 2015). Durch die anaerobe Verwertung von Prozesswasser eröffnet sich die Möglichkeit einer lokalen Gasproduktion, die für das Substrat Papierschlamm bis zu 20% der Gesamtenergie aus HTC-Produkten bereitstellt. Mit einem höherem Trockensubstanzgehalt in HTC-Reaktionsmischung fällt bedeutend weniger Prozesswasser zur Verwertung an, was wesentlich dazu beiträgt, die notwendigen Fermentervolumen zu verringern.

Die durchgeföhrten Versuche (Kapitel 2.3.2 und 2.3.3) zeigen die Machbarkeit, aber es zeichnen sich auch gewisse Aspekte ab, die genauer geprüft werden müssen. Eine langfristige Prozessstabilität ist entscheidend für einen robusten Gesamtprozess. Die sinkende Tendenz der Abbaurate des Gesamtkohlenstoffs muss genauer beobachtet und verstanden werden. Möglicherweise steht die Akkumulation chemischer Substanzen aus der Gruppe der cyklischen Ketone im Zusammenhang.

Ein Expanded Granular Sludge Bed (EGSB) ist eine geeignete Fermenter-Technologie und kann allenfalls mit einer Membranfiltration kombiniert werden. Aus Gründen der vollständigen Verwertung ist dem Abscheiden von partikulären bzw. adsorbiertem Kohlenstoff, welcher von der Biologie nicht weiter verwertet werden kann, verstärkt Beachtung zu schenken.

3.5.3 Vollständige Verwertung des Kohlenstoffes

Nach der anaeroben Vergärung verbleiben rund 20% des Kohlenstoffs im Prozesswasser (Kapitel 2.3.3 Summenparameter Gesamtkohlenstoff). Einerseits kann dieses Prozesswasser nicht ohne Aufreinigung in die Umwelt abgegeben werden, andererseits enthält dieser Restkohlenstoff chemisch gebundene Energie.

Während der Prozessentwicklung wurde versucht diesen Restkohlenstoff mit aerobem Belebtschlammverfahren und Ozonierung bei Raumtemperatur abzubauen. Beide Methoden zeigten keine ausreichende Wirkung. Ein weiteres Verfahren um die Kohlenstoffbelastung zu verringern ist die nasse Oxidation oder «Wet Oxidation». Unter Reaktionsbedingungen von 200-350°C und Sauerstoffdrücken von 20-90 bar kann Kohlenstoff oxidiert und die dabei entstehende Wärme zum Erhitzen der Biomasse genutzt werden.

In der nachfolgenden Tabelle ist der spezifische Energiebedarf bzw. -ertrag zur Aufreinigung von Prozesswasser durch Wet Oxidation der Verfahrenskombination anaerobe Vergärung mit Membranfiltration (AD/MF) gegenübergestellt. Die Datengrundlage von (Silva Thomsen et al., 2022) basiert zwar auf Prozesswässern aus hydrothermaler Verflüssigung, jedoch ist die chemische Zusammensetzung mit Prozesswässern aus HTC gut vergleichbar.



Tabelle 13: Vergleich spezifischer Energiebedarf bzw. -ertrag Wet Oxidation und Kombination Vergärung / Membranfiltration zur Aufreinigung Prozesswasser, Datenquelle Wet Oxidation: Silva Thomsen et al., 2022) kursive Werte eigene Berechnung mit Daten aus Publikation, Berechnung im Anhang

	TOC PW [mg/L]	CSB PW [mg/L]	Reinigungs- effizienz	Energiebedarf/ertrag [kWh/kg CSB entfernt]	Energiebedarf/ertrag inkl. WRG 80% [kWh/kg CSB entfernt]
WO 200°C, 20 bar, 180 Min	11'900	28'300	55%	-9.6	1.09
WO 350°C, 90 bar, 180 Min	11'900	28'300	98%	-15.8	0.65
AD / MF	11'600	30'160	98%	2.56	-

Die Verfahrenskombination AD / MF ist mit 2.56 kWh pro kg entferntem CSB grundsätzlich energiepositiv (Aufwand Membranfiltration eingerechnet). Falls die zusätzliche Wärme zum Aufheizen des Substrates vor der HTC durch Biogas gedeckt werden sollte, verringerte sich der Energieertrag noch etwas.

Die Aufbereitung von Prozesswasser durch Wet Oxidation wird erst bei signifikanter Wärmerückgewinnung energiepositiv (0.65 – 1.09 kWh/kg CSB eliminiert). Der apparative Aufwand ist beträchtlich, denn nur unter extremen Bedingungen (350°C und 90 bar) erfolgt eine praktisch vollständige Aufbereitung des PW (Restkohlenstoff <2%), wobei auch dann noch eine Nachreinigung notwendig ist. Die Energie zur Komprimierung des Sauerstoffs, der Energiebedarf zum Halten der Reaktortemperatur, sowie das zusätzlich benötigte Reaktorvolumen um notwendige Verweilzeiten zu halten sind nachteilig bzw. kostspielig.

Anaerobe Vergärung ist Stand der Technik und auch die Membranfiltration ist mittlerweile eine ausgereifte und kostenoptimierte Technologie, welche z.B. in der Meerwasserentsalzung vielfach angewendet wird. Die im VARESI-Verfahren vorgesehene Membranfiltration ist in einem weiteren Schritt in der Gesamt-Energierechnung genauer zu betrachten, da dies im Rahmen dieser Studie noch nicht berücksichtigt werden konnte.

Durch die Rückführung des nicht verwerteten Kohlenstoffes, sind Benefits in Form von höheren Ausbeuten an Biokohle und/oder Biomethan zu erwarten. Auch die verminderte Verdünnung des HTC-Einsatzmaterials durch das in konzentrierter Form rückgeführte Retentat ist von Vorteil.

Ein weiterer positiver Aspekt der Membranfiltration insb. der Umkehrosmose liegt in der Funktion als Sicherheitsbarriere für problematische Stoffe, wie z.B. PFAS welche in vielen Klärschlamm industrialisierter Gesellschaften vorhanden sind und die nicht durch Carbonisierung entstehen.

Grundsätzlich ist eine Membranfiltration auch zur Behandlung des Prozesswassers vor der anaeroben Stufe denkbar, sodass die schlechte Verwertbarkeit von hochmolekularen Stoffen im nativen Prozesswasser umgangen werden kann. Die hohe organischen Belastung und das Foulingpotential der hydrophoben Substanzen erhöhen aber den Aufwand für einen zuverlässigen Betrieb der Membranfiltration.

Darum erscheint es vorteilhafter, die anaerobe Stufe als Kohlenstoff-Senke mit ihren physikalischen Effekten der Partikelanlagerung / -absetzung zu nutzen und so hochmolekulare TOC abzuscheiden, um die nachgeschaltete Membranfiltration zu entlasten. So kann voraussichtlich eine erhöhte Reinigungswirkung mit geringerem Aufwand erzielt werden. Solange der hochmolekulare Anteil den anaeroben Abbauprozess nicht wesentlich stört, kann dieser relativ einfach aus der anaeroben Stufe abgeschieden und ausgetragen werden. Dieser «Überschusschlamm» kann dann in die HTC rückgeführt und dort weiter umgesetzt werden.



3.5.4 Optimierung Wasserhaushalt und -rückgewinnung

Wasser stellt bis heute den wichtigsten Hilfsstoff in der Papierherstellung dar (Kepplinger et al., 2006). Hierbei wird Wasser als Suspensionsmittel (gleichzeitig Prozesschemikalie), Transport- und Kühlmittel, eingesetzt. Der Produktionsprozess von Papier ist auf sehr reines Wasser angewiesen.

In der deutschen Papier- und Zellstoffproduktion wurden in den letzten Jahren wesentliche Anstrengungen unternommen, um einerseits den spezifischen Wasserbedarf auf etwa 8,6 Liter pro Kilogramm Produkt zu senken (Labusch & Preid, 2024) aber auch um Wasserkreisläufe komplett zu schliessen. So konnten etwa 5 % der Produktionsmenge auf geschlossene Wassernutzung umgestellt werden (Erlewein, 2022), was jedoch nur für bestimmte Papiersorten möglich ist und oft einen höheren Einsatz an Prozesschemikalien erfordert.

Durch die Einbindung von HTC in den Aufbereitungsprozess bieten sich ganz neue Möglichkeiten die Energie- und Ressourceneffizienz zu optimieren. Die Entwässerung von Papierschlamm erzeugt grosse Wassermengen, welche organisch belastet sind und in der betrieblichen Abwasserreinigungsanlage aufbereitet werden müssen.

Mit der im neuen Konzept vorgesehenen Rückführung von Wasser fallen nicht nur der reduzierte Frischwassereinsatz, sondern auch Einsparungen elektrischer Energie und Prozesschemikalien zur Abwasseraufbereitung monetär ins Gewicht. Im konkreten Fall der TELA sind durch den Wegfall der Belüftungsenergie (exkl. Anteil kommunales Abwasser) Einsparungen elektrischer Energie von schätzungsweise 940'000 kWh zu erwarten (Berechnung siehe Anhang).

Ein weiterer Aspekt ist die aktuell bestehende Wärmeabgabe über den Abwasserstrom in die Aare. Mit einer Rückführung grosser Wassermassen gehen auch entsprechende Wärmemengen zurück in den Produktionsbetrieb. Zukünftige, durch klimatische Extremereignisse hervorgerufene, angespannte Situationen können sowohl hinsichtlich Wasserversorgung als auch Wärmeabgabe entschärft werden.



3.5.5 Reduktion von Treibhausgasemissionen

Die angestrebte Erreichung von Netto-Null-Emissionen in der Industrie bis zum Jahr 2050 erfordert unter anderem den konsequenten Ersatz fossiler Energieträger durch CO₂-neutrale Alternativen.

Das VARESI-Konzept trägt durch die verbesserte energetische Nutzung der vorhandenen Biomasse wesentlich dazu bei. Durch die gesteigerte Energieausbeute können fossile Energieträger substituiert und damit die Treibhausgasemissionen signifikant reduziert werden.

Die gemäss Modellrechnung und in Tabelle 14 aufgeführten erwarteten zusätzlichen Energieerträge von 40,241 TJ bzw. 45,378 TJ pro Jahr führen – bei Substitution von Kunststoffabfällen – zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen um rund 2'600 bis 2'900 t jährlich (basierend auf einem Emissionsfaktor von 64,7 t CO₂_fossil/TJ gemäss BAFU, 2025). Wird stattdessen Erdgas ersetzt, ergibt sich eine potenzielle Emissionsminderung von etwa 2'200 bis 2'500 t CO₂ pro Jahr.

Tabelle 14: Übersicht Zusatzenergie und Reduktion von CO₂-Emissionen

	Jahres Energie-ausbeute gesamt [MWh/a]	Zusatzenegie netto [MWh/a]	Zusatzenegie netto [TJ/a]	Emissionsfaktor [t CO ₂ , fossil / TJ]	Reduktion CO ₂ -Emissionen pro Jahr [t/a]
V 2.2	33'311	11'178	40.241	64.7 (Kunststoff)	2'604
V 2.2	33'311	11'178	40.241	55.9 (Erdgas 2023)	2'249
V 2.4	34'738	12'605	45.378	64.7 (Kunststoff)	2'936
V 2.4	34'738	12'605	45.378	55.9 (Erdgas 2023)	2'537

Mit dem neuen Konzept könnten rund 15% der Gesamtemissionen von 2023 (20'000 t CO₂/a) reduziert werden.

Aus aktueller Perspektive ist es sinnvoller, Erdgas statt Kunststoffabfälle zu substituieren, da Versorgungssicherheit und Annahmegebühren die ökonomischen Rahmenbedingungen wesentlich mitbestimmen. Eine Strategie zur Verbesserung der CO₂ Bilanz durch zusätzliche Nutzung von Energieholz, z.B. Pellets ist kritisch zu hinterfragen. Zukünftig ist eine starke Konkurrenz durch die chemische bzw. stoffliche Nutzung von Holz zu erwarten, aber auch Bestrebungen andere Sektoren zu dekarbonisieren verschärfen die Situation.

Das HTC-Verfahren bietet die ideale technologische Plattform, um das gesamte chemische bzw. energetische Potential in den vorhandenen, nassen Reststoffen zu nutzen und zukünftige Konkurrenzsituationen bzgl. Energiressourcen zu entschärfen.



4 Ausblick und nächste Schritte

Das innovative VARESI-Konzept weist ein hohes Potenzial auf und bietet eine vielversprechende Lösung. Als nächster zentraler Schritt ist die Durchführung einer Machbarkeitsstudie erforderlich, um die wirtschaftliche Tragfähigkeit des Verfahrens fundiert zu bewerten.

Im Rahmen von Laborexperimenten sollen die Parameter des HTC-Prozesses gezielt für die spezifischen Substrate optimiert werden, mit dem Ziel, sowohl die Ausbeute und den Heizwert der erzeugten Biokohle als auch den Biomethanertrag aus dem Prozesswasser zu maximieren. Auf Grundlage dieser experimentellen Ergebnisse kann anschliessend eine belastbare Prozessauslegung erfolgen, die wiederum die Basis für eine fundierte Bewertung relevanter ökonomischer Kennzahlen bildet.

Das seit 2025 in Kraft getretene «Klima- und Innovationsgesetz, KIG» sieht eine [Förderung](#) für neuartige Technologien und Prozesse vor, die Unternehmen auf dem Weg zur Dekarbonisierung unterstützen. Die Massnahmen müssen neuartig sein, zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen führen und die definierten [Kriterien](#) erfüllen. Als zentrales Element arbeiten Unternehmen Netto-Null Fährpläne aus, die Massnahmen zur Verminderung und Anwendung von Negativemissionstechnologien (NET) vorsehen. Die Finanzhilfen sollen zur Unterstützung der Umsetzung dieser Fahrpläne eingesetzt werden. Die Finanzhilfe kann bis 2030 beantragt werden und beträgt höchstens 50% der anrechenbaren Kosten.

Die geografisch günstige Lage der TELA bietet sich an, um die Zusammenarbeit mit anderen Industrien zu prüfen und durch Mitverwertung weiterer Biomasse Kosten zu senken und Emissionszertifikate entsprechend zu teilen.

Das neuartige Verfahrenskonzept kann auch die Dekarbonisierung des Abwassersektors vorantreiben und ist dort besonders im Zusammenhang mit der zukünftig gesetzlich vorgeschriebenen Rückgewinnung der Nährstoffe Phosphor und Stickstoff aus Klärschlämmen vielversprechend.

Auch im landwirtschaftlichen Sektor besteht die Chance, Nährstoffe unabhängig vom organischen Teil zu verwerten und so Umweltbelastungen und Emissionen zu mindern.



5 Sozio-ökonomische Analyse

Im Rahmen des VARESI-Projekts wurde ein Konzept erarbeitet, welches die Aufwertung industrieller Rückstände der Papierproduktion sowie der Integration verschiedener Energievektoren in den Produktionsprozess berücksichtigt. Die vorgeschlagene Lösung kombiniert anaerobe Behandlungstechnologien (AD), hydrothermale Carbonisierung (HTC), energetische Prozessintegration und Wasserwiederaufbereitung (PW-Behandlung). Durch die vollständige Verwertung lokal anfallender Restbiomassen verfolgt das VARESI-Konzept einen Zero-Waste-Ansatz, der letztendlich auch zur verbesserten Wert schöpfung verschiedener Industrien beitragen kann. Im Rahmen von WP6 werden der aktuelle Stand der Entwicklung, der Verbreitung der im Projekt betrachteten technologischen Konfigurationen (AD, HTC, PW-Behandlung) evaluiert sowie sozio-technische Entwicklungspfade mit Fokus auf die HTC-Technologie – die zentrale Innovation des Projekts – in Form einer Roadmap erarbeitet.

Die HTC-Technologie befindet sich weltweit in einem mittleren Entwicklungsstadium (Technology Readiness Level 6 bis 9, je nach Anwendung). Einige Unternehmen beschäftigen sich derzeit mit Forschung und Entwicklung in diesem Bereich. Im Jahr 2024 existieren 14 funktionsfähige HTC-Anlagen, insbesondere grosstechnische Demonstrationsanlagen, mehrere Pilotanlagen, einige Produktionsanlagen. Folgende Unternehmen sind in Europa aber auch Nord- & Südamerika, China aktiv (alphabetische Ordnung): Antaco (UK), C-Green (S), GRegio (CH), Ingelia (ES), HTCycle (D), TerraNova (D).

Die derzeitigen Geschäftsmodelle von HTC-Unternehmen umfassen typischerweise Dienstleistungen in den Bereichen Abfallmanagement, energiebezogene Anwendungen, Nährstoffrückgewinnung, Entwicklung und Lieferung von HTC-Anlagentechnologie, Produktion innovativer Materialien (z.B. Aktivkohle, Plattformchemikalien) sowie Massnahmen zur Kohlenstoffabscheidung und -speicherung. Die Vielfalt der Geschäftsmodelle verdeutlicht die hohe Flexibilität und breite Anwendbarkeit der HTC in unterschiedlichen Marktsegmenten. Die Möglichkeit, ein breites Spektrum an organischen, nassen Reststoffen zu verwerten, stellt für die Branche keinen limitierenden Faktor dar, sondern vielmehr einen potenziellen Wachstumstreiber.

Die Quantität und Qualität der bei der HTC entstehenden Produkte und Nebenprodukte sind massgeblich vom eingesetzten Ausgangsmaterial abhängig. Eine zunehmende Anzahl wissenschaftlicher Arbeiten befasst sich mit der Bewertung des Verwertungspotenzials in Abhängigkeit vom Substrat. Der Forschungsschwerpunkt lag bislang auf der energetischen Nutzung und der Herstellung von Hydrokohle. Andere Verwertungspfade und Nebenprodukte wie Prozesswasser sind bisher weniger intensiv untersucht worden. Darüber hinaus sind weitere Erprobungen unter realen Betriebsbedingungen in Demonstrationsanlagen erforderlich, um die Standardisierung der HTC-Produkte zu ermöglichen und deren Marktfähigkeit zu steigern.

Im Vergleich zu etablierten Verwertungsstrategien wie Kompostierung, Verbrennung oder Deponierung bietet die HTC das Potential einer besseren energetischen und stofflichen Nutzung bei gleichzeitig geringerer Umweltbelastung, niedrigerem Energieeinsatz und höherer Rohstoffflexibilität bereitzustellen.

Die Investitions- und Betriebskosten sind bezüglich der Wettbewerbsfähigkeit bei jeder neu zu etablierenden Technologie eine Herausforderung. In diesem Kontext sind Faktoren wie Abfallentsorgungs- und Energiekosten, Umweltvorschriften sowie die Verfügbarkeit von Verwertungsoptionen entscheidend für die ökonomische Tragfähigkeit und Akzeptanz der HTC im jeweiligen Anwendungsumfeld. Die Konkurrenz etablierter Verwertungspfade, die häufig mit langjährigen Beziehungen und Abnahmeverträgen einhergehen, könnte die Markteinführung der HTC insbesondere im Bereich der Behandlung von Siedlungsabfällen und Klärschlamm verzögern oder erschweren.

Die anaerobe Vergärung (AD) gilt nicht als direkte Konkurrenz, ganz im Gegenteil, die kaskadische Nutzung von Gärresten durch HTC bietet Potential zur verbesserten Gesamtverwertung. Zu den konkurrierenden innovativen Verfahren zählen die hydrothermale Verflüssigung (HTL), hydrothermale Ver-



gasung (HTG) und in gewissem Massen die Pyrolyse. Während sich HTL und HTG aktuell in der Übergangsphase vom Labor- zum Pilotmassstab befinden, bestehen insbesondere bei HTG immense technische Herausforderungen bezüglich den Prozessdruckbedingungen (bis ca. 300 bar). Die Pyrolyse ist ein erprobtes Verfahren zur Umwandlung trockener Biomasse in Pyrokohle, die Akquisition hochwertiger Einsatzmaterialien wie z.B. sauberes Holz stellen längerfristig eine Herausforderung dar.

Der Vorteil der HTC liegt in der Fähigkeit, feuchte Biomasse bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen und ohne komplexe Vorbehandlungen in Hydrochar umzuwandeln. Zudem kann Hydrochar zu geringeren Kosten und aus einer grösseren Vielfalt von Ausgangsstoffen hergestellt werden als Pyrochar, was es im Kontext von Carbon-Capture-and-Storage (CCS) wirtschaftlich attraktiver macht.

Die weitere Verbreitung der HTC hängt massgeblich von der Überwindung bestehender Implementierungsbarrieren ab. Diese wurden durch Sekundärforschung sowie Interviews mit Branchenexpert:innen, Unternehmensvertreter:innen und Innovationsforscher:innen identifiziert. Es ist jedoch zu beachten, dass aufgrund der begrenzten Transparenz innerhalb der Branche – insbesondere im Hinblick auf sensible Aspekte wie Wasseraufbereitung und Energiebilanzen – die Analyse nicht vollständig ist und sich rasch verändern kann.

Das zentrale technisch-ökonomische Hemmnis besteht in der derzeit begrenzten Rentabilität der Technologie, die stark vom jeweiligen Rohstoff, seiner Verfügbarkeit und den damit verbundenen Aufbereitungskosten abhängt – insbesondere an Standorten mit hohen Kosten für die Wasserbehandlung. Mögliche Lösungsansätze umfassen robuste HTC-Systeme im Pilotmassstab, die unter verschiedenen Bedingungen mit unterschiedlichen Rohstoffen arbeiten können, sowie Strategien zur Qualitätsanalyse und zur Rückgewinnung bzw. Nutzung von Prozesswasser (z. B. durch Kombination mit AD). Weitere Herausforderungen liegen in den aktuell niedrigen CO₂-Preisen und der geringen Marktfähigkeit einzelner HTC-Nebenprodukte wie z.B. Phosphordünger. Skalen- und Verbundeffekte, koordinierte Marktentwicklungsmassnahmen und Standardisierungsinitiativen sind wesentliche Hebel zur Überwindung dieser Hindernisse.

Auf institutioneller Ebene bestehen Hürden in Form mangelnden Wissens über die HTC-Technologie bei Behörden und Kunden, teilweise bedingt durch negative Erfahrungen mit früheren Projekten. Hinzu kommen eine starke Interessenvertretung etablierter Technologien, die von politischen Rahmenbedingungen profitieren, sowie langwierige und komplexe Genehmigungsverfahren. Zudem fehlen klare gesetzliche Regelungen für die Vermarktung von HTC-Produkten. Sensibilisierungs- und Informationskampagnen, die Förderung von Kooperationsplattformen innerhalb der HTC-Branche sowie die Vereinfachung und Standardisierung von Anlagendesign und Produktklassifizierung werden als vielversprechende Massnahmen zur Adressierung dieser Herausforderungen identifiziert.

Zu den wesentlichen Markttreibern für die HTC zählen regulatorische Anforderungen im Bereich erneuerbare Energien und Emissionskontrolle, steigende Energie- und Abfallentsorgungskosten, Regularien und Trends in Richtung Kreislaufwirtschaft, Vorschriften zur Bodenverbesserung und Nährstoffrückgewinnung sowie der wachsende Bedarf an Technologien zur Kohlenstoffbindung. Vor diesem Hintergrund formuliert die Branche folgende Vision: „Bis 2050 soll sich HTC zu einer wettbewerbsfähigen, kosten- und ressourceneffizienten Schlüsseltechnologie zur Verwertung feuchter Rückstände im Sinne einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft entwickeln, basierend auf einem breiten Spektrum an eingesetzten Rohstoffen.“

Die Analyse der von der Industrie definierten Entwicklungspfade zeigt, dass der Fokus stark auf der Positionierung von HTC im Kontext negativer Emissionstechnologien liegt, während andere relevante Verwertungsansätze wie die Nährstoffrückgewinnung bislang nur geringe Beachtung finden. Die Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit verstärkter Kooperation innerhalb der Branche, insbesondere im Hinblick auf gemeinsame Interessenvertretung, Öffentlichkeitsarbeit und Wissensaustausch. Trotz bereits bestehender Kooperationsansätze bleibt die Branche durch ausgeprägten Wettbewerb zwischen den Unternehmen fragmentiert, was einer koordinierten Entwicklung entgegenwirkt.



Eine belastbare Prognose über die technologische Entwicklung und Marktdurchdringung der HTC in Europa, der Schweiz oder global in den kommenden zwei Jahrzehnten erfordert die Berücksichtigung zahlreicher Einflussfaktoren wie technologische Reife, wirtschaftliche Tragfähigkeit, politische Rahmenbedingungen, ökologische Effekte und infrastrukturelle Voraussetzungen. Zur Strukturierung dieser komplexen Fragestellung wurde die von Markard et al. (2009) entwickelte Methodik zur Analyse technologischer Innovationssysteme (TIS) herangezogen, die vier Analyseschritte umfassen: Basisanalyse (1), Kontextanalyse (2), Variationsanalyse (3) und Pfadanalyse (4). Aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums der HTC kann eine vollständige Pfadanalyse derzeit nicht erfolgen. Es wurde jedoch eine vorläufige Analyse vorgenommen, basierend auf den Ergebnissen der Variations- und Kontextanalyse, die Hinweise auf wahrscheinliche Entwicklungspfade liefert.

Die Variationsanalyse identifiziert vier technologische Konfigurationen der HTC, die sich als dominante Designs etablieren könnten: HTC alleinstehend oder kombiniert mit AD sowie jeweils mit externer oder interner (teilweiser oder vollständiger) Wasseraufbereitung. Die Auswahl einer spezifischen Variante hängt stark von standortspezifischen Faktoren wie der Wasser- und Energiebilanz sowie den regulatorischen Anforderungen ab. Dennoch lässt sich feststellen, dass insbesondere der Bereich der Abwasserbehandlung – aufgrund der dort bestehenden Integration von Wasseraufbereitung – ein besonders geeignetes Anwendungsfeld darstellt.

Weitere potenzielle Anwendungsfelder umfassen die Verarbeitung von Siedlungsabfällen sowie Industriezweige mit hohen Mengen feuchter Biomasserrückstände, vor allem wenn eine Kombination mit AD vorgesehen ist. Weniger geeignet erscheinen hingegen Bereiche wie Energiepflanzen oder Gülleaufbereitung (ohne Biogasnutzung), da hier hohe Transportkosten für Substrate und Prozesswasser anfallen. Standortkonstellationen mit geringeren Logistikkosten könnten in Einzelfällen dennoch wirtschaftlich tragfähig sein.

Organisatorische Varianten entlang der gesamten Wertschöpfungskette lassen sich derzeit aufgrund des frühen Entwicklungsstands der Technologie nur bedingt bewerten, da die Mehrheit der HTC-Anlagen sich noch im Pilot- oder Demonstrationsstadium befindet und die Marktbildung für Nebenprodukte erst beginnt. Die vorliegende Pfadanalyse stützt sich daher auf die Erkenntnisse aus der Kontext- und Variationsanalyse.

Eine vertiefte Diskussion des wahrscheinlichsten Entwicklungspfads, der zugrunde liegenden Faktoren sowie Empfehlungen für Industriekräfte und politische Entscheidungsträger sind im Anhang dieses Berichts ausgeführt. Eine Übersicht über die durchgeführten Interviews befindet sich in gesonderten Bericht.

Tabelle 15: Zukünftig mögliche Verwertungspfade für HTC

Verwertungspfad	Beschreibung
(A) HTC setzt sich nicht durch	HTC wird innerhalb von 10 Jahren als technische Lösung aufgegeben, nachdem mehrere Pilotprojekte die Kompatibilität mit der industriellen Nutzung unter realen Betriebsbedingungen zu einem vernünftigen Preis nicht nachweisen konnten.
(B) HTC als Nischen-technologie für die Behandlung feuchter Biomasse	HTC ist nach wie vor teuer und komplex, kann aber eine Lösung für bestimmte Anwendungen sein (hauptsächlich in Kläranlagen in Ländern mit Phosphorrückgewinnungsvorschriften).
(C) HTC als Mainstream-Technologie für die feuchte Abfallströme	HTC wird billiger und seine Nebenprodukte werden dank der Zusammenarbeit zwischen der Industrie und den Größenvorteilen marktfähig. Standardisierte, aber flexible Prozessmodelle werden klarer und finden in verschiedenen Anwendungsfällen/Märkten und in verschiedenen Größenordnungen Anwendung, wodurch sie zu einer Mainstream-Technologie für die Behandlung von Nassabfällen wird.



6 Literaturverzeichnis

- Andritz. (2022). *ANDRITZ: Bio-Synthesegas für die Tissue-Trocknung*. <https://www.fibers-in-process.de/news/energiemanagement-energieeffizienz/ANDRITZ-Erstmalige-Verwendung-von-Bio-Synthesegas-fuer-die-Trocknung-in-der-Tissue-Industrie-26912>
- BAFU. (2025). *CO₂-Emissionsfaktoren des Treibhausgasinventars der Schweiz*.
- BAFU Bundesamt für Umwelt. (2023). *Netto-Null-Ziel 2050*. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-klima/klimawandel-stoppen-und-folgen-meistern/massnahmen-der-schweiz-zur-verminderung-ihrer-treibhausgasemissionen/ziele-der-schweiz-zur-verminderung-ihrer-treibhausgasemissionen/indikatives-ziel-2050.html>
- Chen, H., Zhang, C., Rao, Y., Jing, Y., Luo, G., & Zhang, S. (2017). Methane potentials of wastewater generated from hydrothermal liquefaction of rice straw: Focusing on the wastewater characteristics and microbial community compositions. *Biotechnology for Biofuels*, 10(1), 140. <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0830-0>
- Erlewein, M. (2022). *Papierherstellung benötigt immer weniger Wasser | VDI*. <https://www.technik-in-bayern.de/mehr-technik/standard-titelwasserversorgung/papierherstellung-benoetigt-immer-weniger-wasser>
- Europäische Kommission. (2024). *Netto-Null-Industrie-Gesetz*. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/green-deal-industrial-plan/net-zero-industry-act_de
- Horstmeyer, N., Weißbach, M., Koch, K., & Drewes, J. E. (2017). A novel concept to integrate energy recovery into potable water reuse treatment schemes. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 8(4), 455–467. <https://doi.org/10.2166/wrd.2017.051>
- Kepplinger, W., Draxler, J., Friedacher, A., Hollauf, B., & Weiß, C. (2006). Wasserbilanz des Papier- und Zellstoffproduktionsstandortes Kematen. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 151(7), 283–286. <https://doi.org/10.1007/BF03165443>
- Labusch, C., & Preid, M. (2024). *Die Papierindustrie: Ein Leistungsbericht*. https://www.papierindustrie.de/fileadmin/0002-PAPIERINDUSTRIE/99_Publikationen/240516-Wasser-in-der-Papierindustrie.pdf



- Mehli, A., Gerner, G., Treichler, A., Garcia, A., Kaiser, S., Kühni, M., Winkler, D., Griffin, T., Kulli, B., & Baier, U. (2021). *HTC Innovationscampus Rheinmühle Pilotanlage zur Hydrothermalen Karbonisierung—Prozessoptimierung & Verfahrenserkenntnisse*. BFE.
- Remy, C., Warneke, J., & Lesjean, B. (2015). Hydrothermale Carbonisierung: Eine neue Option der Klärschlammbehandlung? *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 62(4), 354–362.
<https://doi.org/10.3242/kae2015.04.005>
- Silva Thomsen, L. B., Anastasakis, K., & Biller, P. (2022). Wet oxidation of aqueous phase from hydro-thermal liquefaction of sewage sludge. *Water Research*, 209, 117863.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117863>
- Treichler, A., & Baier, U. (2022). *CarbonValue—Nutzbarmachung des energetischen und des stofflichen Potentials von Prozesswasser aus der hydrothermalen Karbonisierung (unveröffentlicht)*.
- Wagner, A. O., Prem, E. M., Markt, R., Kaufmann, R., & Illmer, P. (2019). Formation of phenylacetic acid and phenylpropionic acid under different overload conditions during mesophilic and thermophilic anaerobic digestion. *Biotechnology for Biofuels*, 12(1), 26.
<https://doi.org/10.1186/s13068-019-1370-6>
- Weide, T., Brügging, E., & Wetter, C. (2019). Anaerobic and aerobic degradation of wastewater from hydrothermal carbonization (HTC) in a continuous, three-stage and semi-industrial system. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(1), 102912.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.102912>
- Wu, Y.-J., Wu, J.-Y., Hsieh, C.-W., Chang, B.-C., & Whang, L.-M. (2024). Biological treatment of N-methylpyrrolidone, cyclopentanone, and diethylene glycol monobutyl ether distilled residues and their effects on nitrogen removal in a full-scale wastewater treatment plant. *Chemosphere*, 362, 142585. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142585>



7 Anhang

A1.1 Berechnung Severity Factor

Der hydrothermale Severity Faktor wurde nach der folgenden Formel berechnet, wobei t die Reaktionszeit in Minuten und T die Reaktionstemperatur in °C definiert:

$$SF = \log \left[t * \exp \left(\frac{T - 100}{14.75} \right) \right]$$

A1.2 Berechnung Energiebilanz Wet Oxidation

				without heat recovery	with heat recovery
Variante WO bei 200°C					
Energy requirement to heat water (kWh/L)				0.21	0.21
effective heat demand with/without heat recovery				100%	20%
Energy release @200°C, 180Min (kWh)/L				0.059	0.059
COD removal (g/L)				15.575	15.575
Variante WO bei 350°C					
Energy requirement to heat water (kWh/L)				0.43	0.43
effective heat demand with/without heat recovery				100%	20%
Energy release @350°C, 180Min (kWh)/L				0.104	0.104
COD removal (g/L)				27.61	27.61

	TOC mg/L	COD Start mg/L	Removal Effic.	Energie	Energie 80% WRG
WO 200°C, 20 bar, 180 Min	11900	28300	55	-9.70	1.09
WO 350°C, 90 bar, 180 Min	11900	28300	98	-15.8	0.65
AD/MF	11600	30160	98	2.56 na	

Berechnungsbeispiel:

$$\text{Energie} = \text{ABS}((0.21 * 0.2) - 0.059) * 1000 / 15.575 = 1.09 \text{ kWh/kg COD removed}$$

A1.3 Berechnung Energieverbrauch ARA Tela

Elektrischer Energiebedarf ARA TELA (2023) = 1.3 Mio kWh

Verhältnis CSB-Fracht TELA zu CSB-Fracht Gemeinde = 80 : 20

Annahme Energieanteil Belüftung des Gesamtenergieverbrauches ARA = 90%

$$\text{Energieverbrauch Belüftung} = 1'300'000 \text{ kWh} * 0.8 * 0.9 = 940'000 \text{ kWh}$$

