



Abschlussbericht

Geschlossener Wasserkreislauf in der Industrie

—

Abwasserfreie Industrieproduktion

Projektlaufzeit:

Mai 2020 bis Mai 2022



Impressum

Abschlussbericht: Geschlossener Wasserkreislauf in der Industrie – Abwasserfreie Industrieproduktion

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)

Bürgermeister-Ulrich-Straße 160

86179 Augsburg

Tel.: 0821 9071-0

Fax: 0821 9071-5556

E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de

Internet: www.lfu.bayern.de/

Angaben zum Auftragnehmer:

Technische Universität München, Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft, Am Coulombwall 3, 85748 Garching

Dr.-Ing. Thomas Lippert, Prof. Dr. rer. nat. habil. Brigitte Helmreich, Prof. Dr.-Ing. Jörg E. Drewes

DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., Fachbereich Wassermanagement,

Theodor-Heuss-Allee 25, 60486 Frankfurt am Main

Dr. Daniel Frank, Dr. Thomas Track

Stand:

Mai 2022

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
1 Einleitung und Projekthintergrund	7
2 Ergebnisse Arbeitspaket 1: Darstellung der verfügbaren Plattformtechnologien und des Standortmanagements	7
2.1 Arbeitspaket 1.1: Charakterisierung ausgewählter Produktionsstoffströme, Abwasserqualitäten sowie Anforderungen an Betriebswasserqualitäten	7
2.2 Arbeitspaket 1.2: Charakterisierung typischer Industrierwassermanagementszenarien in der Prozessindustrie	8
2.3 Arbeitspaket 1.3: Zusammenstellung geeigneter Plattformtechnologien	10
2.3.1 PFAS-haltige Abwasserströme	11
2.3.2 Heterogene Abwasserströme	12
2.3.3 Hochbelastete Abwasserströme	13
2.3.4 Trockenlaufende Vakuumerzeugung	14
2.4 Fazit zu Arbeitspaket 1	15
3 Ergebnisse Arbeitspaket 2: Bewertung von Plattformtechnologien	15
3.1 Arbeitspaket 2.1: Darstellung möglicher Vermeidungs- und Einsparpotenziale betroffener Dritter	15
3.2 Arbeitspaket 2.2: Ökonomische und gesamtökologische Kriterien zur Bewertung der Plattformtechnologien	17
3.3 Arbeitspaket 2.3: Erstellung einer Bewertungsmatrix zur Einordnung unterschiedlicher Plattformtechnologien	18
3.4 Arbeitspaket 2.4: Bewertung der Plattformtechnologien und Kosten-/Nutzenbilanz	23
3.4.1 Bestimmung unternehmensspezifischer Anforderungen	24
3.4.2 Initiation von Vortests und Pilotversuchen unter Einbeziehung von verschiedenen Herstellern für Plattformtechnologien	27
3.4.3 Ranking der Behandlungstechnologien mittels MCDA-Analyse	28
3.5 Fazit zu Arbeitspaket 2	30
4 Ergebnisse Arbeitspaket 3: Festlegung und Charakterisierung eines Industriestandorts zur Durchführung der Potentialanalyse	31
5 Ergebnisse Arbeitspaket 4: Potentialanalyse	31
5.1 Arbeitspaket 4.1: Stakeholder-Prozess	31
5.1.1 Bilaterale Stakeholder-Treffen	32
5.1.2 Abwasserzuständigen-Treffen	32

5.1.3	Stakeholder-Treffen	32
5.2	Arbeitspaket 4.2: Evaluierung der Plattformtechnologien und der Vorgehensweise aus Arbeitspaket 1 und 2 für den ausgewählten Standort	33
5.2.1	Behandlung heterogener Abwasserströme	33
5.2.2	Kreislaufschließung für hochbelastete Waschwässer	33
5.2.3	Behandlung PFAS-haltiger Abwässer	38
5.2.4	Management salzhaltiger Abwässer	38
5.3	Fazit zu Arbeitspaket 4	42
6	Fazit, Empfehlungen und Ausblick	42
7	Quellenverzeichnis	45
8	Anhang	47
8.1	Anhang 1 – Fragebogen an Industriestandorte der chemischen Industrie	47
8.2	Anhang 2 - Informationsbroschüren	51
8.2.1	Anhang 2.1 – Leitfaden zur Behandlung PFAS-haltiger Industrieabwässer	51
8.2.2	Anhang 2.2 – Leitfaden zur Behandlung hochbelasteter und heterogener Industrieabwässer	51
8.2.3	Anhang 2.3 – Leitfaden zum Austausch von Vakuumpumpen	51
8.3	Anhang 3 – Fragebogen zu den Key Performance Indicators (KPIs)	51

Kurzfassung

Das Ziel des Forschungsprojekts „Geschlossener Wasserkreislauf in der Industrie – Abwasserfreie Industrieproduktion“ war die Erarbeitung von Entscheidungshilfen zur Etablierung von möglichst geschlossenen Wasserkreisläufen für Industriestandorte. Das Gesamtprojekt gliederte sich in zwei Phasen:

1. Darstellung und Bewertung von verfügbaren Technologien zur Abwasserbehandlung
2. Charakterisierung eines Industriestandorts zur Durchführung einer Potentialanalyse und deren Durchführung

Das Projekt wurde von der Corona-Pandemie überschattet, welche physische Treffen bis auf wenige Ausnahmen unmöglich machte. Die Stakeholdertreffen fanden ausschließlich virtuell statt, umfassende Begehungen am Standort konnten nur in Einzelfällen durchgeführt werden. Die laufende Kommunikation mit den Partnern und Unternehmen erfolgte ebenfalls virtuell. Dennoch konnte das Projekt die im Rahmen der Aufgabenstellung vorgegebenen Maßnahmen unter Mitwirkung der Standortunternehmen umsetzen.

Basierend auf der gegebenen Aufgabenstellung und den vorliegenden Abwasserströmen konnte ein zielgerichteter Überblick über großtechnisch verfügbare Verfahren, Hersteller bzw. Technologiegeber sowie über aktuelle Produktportfolios gewonnen werden. Sämtliche erlangte Ergebnisse wurden in drei Informationsbroschüren zusammengefasst, die die Themen

1. Abwässer mit poly- und perfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS)
2. Hochbelastete und heterogene Industrieabwässer und
3. Abwasserfreie Vakuumherzeugung

behandeln. Die Informationsbroschüren dienen sowohl der Unterstützung der Standortunternehmen und ermöglichen ferner, technologische Handreichungen zu generieren, die einer breiten Fachöffentlichkeit über die Projektgrenzen hinaus zur Verfügung gestellt werden können.

Im Rahmen des Vorhabens konnte eine ganzheitliche und standortunabhängige Bewertungsmatrix erstellt werden, die von Entscheidungsträgern als Leitfaden zur Identifizierung geeigneter Behandlungsverfahren genutzt werden kann. Es wurde gezeigt, dass es schlussendlich neben der generellen Eignung der Technologie vor allem auf die wirtschaftlichen Kriterien (Investitionskosten, Betriebskosten und Personal) ankommt. Nachrangig sind dann Verfahrensparameter, wenn diese keinen gravierenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens haben sollten.

Anhand einer *Multi-Criteria-Decision-Aid* (MCDA) Analyse konnte zudem ein objektiver, computer-gestützter Prozess zur Entscheidungsfindung aufgezeigt werden, der präzise auf verschiedenste unternehmensspezifische oder regulatorische Anforderungen angepasst werden

kann. Gleichwohl ist die Bewertung nur dann sinnvoll, wenn die Eingabewerte in die Bewertungsmatrix zuverlässig durch Vortests bzw. Pilotversuche bestätigt werden. Im weiteren Verlauf des Vorhabens wurden auf der MCDA aufbauend im Rahmen der Potentialanalyse exemplarisch Lösungsansätze erarbeitet, die dann als konkretes Fallbeispiel die Zielsetzung einer abwasserfreien Industrieproduktion befördern können.

Durch die Bereitschaft der Unternehmen, auf Initiative und im Rahmen des Projekts auch Pilotversuche durchzuführen, konnten externe Drittanbieter für Plattformtechnologien in den Stakeholder-Prozess miteinbezogen werden. Mithilfe der vorliegenden Ergebnisse aus Vortests konnte im Rahmen der Potentialanalysen eine aussagekräftige Bewertung der angedachten Verfahrensalternativen zur Abwasserbehandlung vorgenommen werden.

Fazit ist, dass eine abwasserfreie Produktion kein fernes Zukunftsziel sein muss. Es bedarf aber sowohl kommunikativer Voraussetzungen (z.B. Dialog zwischen Technologiegebern und Produktionsbetrieben) und technischer Anreize, als auch begleitender regulatorischer Rahmenbedingungen, um Wasser effizienter im Kreislauf zu führen und Inhaltsstoffe frühestmöglich aus dem zu behandelnden Abwasser zu entfernen. Eine ausschließliche zentrale Behandlung des gesammelten Abwassers am Ende der Produktion kann, gerade wenn verschiedene Teilströme zusammenfließen, hohe Kosten und geringe Steuerbarkeit verursachen. Mit Blick auf Ökonomie und Ökologie sind daher Teilstrombehandlungen das Mittel der Wahl, um das Ziel einer abwasserfreien Industrieproduktion zu erreichen.

1 Einleitung und Projekthintergrund

Das Ziel des Forschungsprojekts „Geschlossener Wasserkreislauf in der Industrie – Abwasserfreie Industrieproduktion“ war die Erarbeitung wesentlicher Grundlagen und Entscheidungshilfen zur Etablierung möglichst geschlossener Wasserkreisläufe am Beispiel eines realen Standortes der chemischen Industrie in Bayern.

Das Gesamtprojekt gliederte sich in fünf Arbeitspakete zur Darstellung der verfügbaren Plattformtechnologien und des Standortmanagements (Arbeitspaket 1), zur Bewertung von Plattformtechnologien (Arbeitspaket 2), zur Festlegung und Charakterisierung eines Industriestandorts zur Durchführung einer Potentialanalyse (Arbeitspaket 3), zur Potentialanalyse (Arbeitspaket 4) und zum Berichtswesen (Arbeitspaket 5). Die im Projekt erlangten Ergebnisse werden im vorliegenden Schlussbericht im Detail diskutiert und abschließend bewertet.

2 Ergebnisse Arbeitspaket 1: Darstellung der verfügbaren Plattformtechnologien und des Standortmanagements

2.1 Arbeitspaket 1.1: Charakterisierung ausgewählter Produktionsstoffströme, Abwasserqualitäten sowie Anforderungen an Betriebswasserqualitäten

Im Rahmen der Stakeholder-Analyse wurden folgende Stoffströme identifiziert, die in eine engere Auswahl für die Charakterisierung infrage kommen:

- Fluorchemie (poly- und perfluorierte Alkylsubstanzen, PFAS)
- Ethylenoxidchemie
- Dioxan
- Adsorbierbare organisch gebundene Halogene (AOX-Verbindungen)
- Zinnorganische Verbindungen (auch Flächen und atmosphärische Deposition)
- Quecksilber (aus Altlasten)
- Mikroplastik
- Quaternäre Ammoniumverbindungen
- Schwerabbaubare Tenside

Im weiteren Verlauf des Projekts und auch nach Rücksprache mit den Unternehmen innerhalb sogenannter „Ansatzpunkt-Meetings“ konnten die zu betrachtenden Stoffströme weiter präzisiert werden. Somit haben sich insgesamt vier Prozessströme als geeignet erwiesen, um in die weitere Ausarbeitung der Potentialanalysen zu gehen:

- Heterogene Abwasserströme
- Hochbelastete Abwasserströme
- PFAS-haltige Abwasserströme

- Salzhaltige Abwasserströme

Die Ergebnisse der vier betrachteten Stoffströme sind in Arbeitspaket 1.3 weiter erläutert. Ein grundsätzliches Ziel, das im Rahmen der Gespräche mit den Unternehmen immer wieder genannt wurde, war entweder die potentielle Wiederverwendung der Ströme, mindestens aber eine Reduzierung der Belastung, was dann final auch zu einer geringen Eintragung von Störstoffen in das aufnehmende Gewässer führt, bzw. zu einer Reduzierung des Reinigungsaufwandes in der Kläranlage.

2.2 Arbeitspaket 1.2: Charakterisierung typischer Industrierwassermanagementszenarien in der Prozessindustrie

Es wurden praktizierte Industrierwassermanagementstrategien der Prozessindustrie am Beispiel der chemischen Industrie für mehrere Standorte in Deutschland zusammengestellt. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus der Umfrage, die mittels Fragebögen durchgeführt wurde, konnten wesentliche Parallelen der Betreiber von Chemieparcs ermittelt werden, um darauf aufbauend Plattformtechnologien für die Behandlung relevanter Abwasserströme am betrachteten Standort in Bayern zu identifizieren. Die Technologien sollten einen gewissen technologischen Reifegrad aufweisen, um zumindest im Pilotmaßstab ohne weitere Prozessentwicklungen getestet werden zu können.

Die Auswertung der ausgefüllten Fragebögen gestaltete sich als herausfordernd, da die erhaltenen Daten ausschließlich in anonymisierter Form verwendet werden durften. Dazu kam, dass einige der Unternehmen wesentliche Teile des Fragebogens nicht beantworteten. Beides hatte zur Folge, dass Interpretationen aufbauend auf dem Fragebogen nur schwer zu einer Vergleichbarkeit mit dem hier betrachteten Standort, bzw. der Abwasseraufbereitung getroffen werden konnten. Der grundsätzliche Aufbau der zentralen Abwasserbehandlung ist bei allen Betrieben ähnlich, er unterscheidet sich aber oftmals in Details, sei es verwendete Chemikalien oder Ausbau der einzelnen Stufen. Das Schema in Abbildung 1 zeigt am Beispiel der Abwasserbehandlung der Infraseriv Höchst, wie eine industrielle Kläranlage aufgebaut ist:

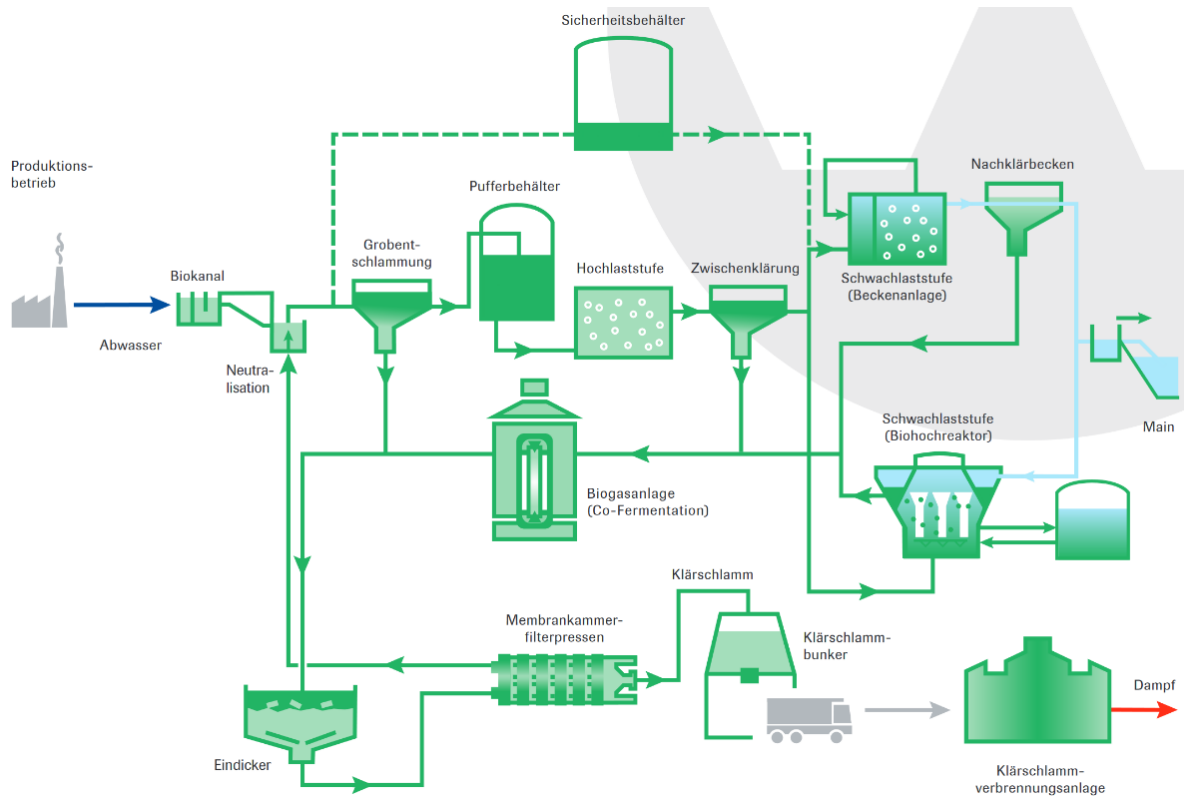


Abb. 1: Schema der Abwasserbehandlung der Infraseriv Höchst, (Broschüre: „INDUSTRIELLE ABWASSERREINIGUNG: EINE EFFIZIENTE ALTERNATIVE“, Februar 2020).

Wesentliche Erkenntnisse, die sich aus den Antworten der Standortbetreiber zum Industriewassermanagement ableiten ließen, sind nachfolgend dargestellt. Der im Projekt erstellte Fragebogen ist Anhang 1 zu entnehmen:

- Mehrfache Kühlwassernutzung wird angestrebt und ist auf einigen Standorten bereits praktiziert, z.T. zur Erwärmung von Frischwasser. Da die meisten Standorte der chemischen Industrie in Deutschland an Fließgewässern liegen, wird dieses auch überwiegend als Kühlwasserquelle verwendet. Brauchwasser kommt hingegen nur in geringem Ausmaß zum Einsatz
- Eine Regenwassernutzung findet überwiegend nicht statt; je nach Standort wird das Niederschlagswasser der befestigten Flächen über die Kanalisation abgeleitet und in der zentralen Abwasserreinigungsanlage (ZARA) mitbehandelt
- Alle Standortbetreiber sind im ständigen Austausch mit den jeweiligen Standortunternehmen, um eine grundlegende bzw. verbesserte Teilstrombehandlung zu erreichen. Es war auffällig, dass sich die Vorbehandlung von Stoffströmen je nach Standort gravierend unterscheidet. Generell konnte festgestellt werden, dass vornehmlich dann

aufwändige Vorbehandlungen implementiert wurden, wenn werthaltige Komponenten wieder für die Produktion zurückgewonnen werden können, oder aber es sich um Komponenten handelt, deren Aufbereitung in der zentralen Kläranlage des Standortes mit hohen Kosten verbunden ist

- Viele der angefragten Standorte haben Unternehmen angesiedelt, deren wasserabhängige Produktion deutlich über 80% der Gesamtproduktion liegt, was auch bedeutet, dass Wasser-Wiederverwendung ein angestrebtes Gesamtziel ist. Die Betriebe arbeiten oftmals im Chargenbetrieb. Vor dem Hintergrund von klimatischen Extremereignissen sowie der grundsätzlichen Klimaveränderung wird angeregt, Technologien zur Teilstrombehandlung und damit der grundsätzlichen Ermöglichung der Wiederverwendung für die jeweiligen Standorte in regelmäßigen Abständen zu evaluieren, um einen Einsatz mittelfristig flächendeckend einzuführen
- Die Abwasserbehandlung wird an den Standorten überwiegend online überwacht, zusätzlich werden 24h Mischproben auf die vom Gesetzgeber geforderten Parameter hin untersucht

Es hat sich bei der Befragung herauskristallisiert, dass die meisten Standorte in Deutschland gewachsene Strukturen sind. Eine dezentrale Vorbehandlung des Abwassers ist damit nur möglich, wenn die Infrastruktur dies zulässt und die Produktionsstätten eines Unternehmens nicht über den gesamten Standort verteilt sind. Weiterhin ist der direkte Vergleich verschiedener Standorte nur schwer möglich, da jeder Standort aufgrund seiner Lage und der angesiedelten Unternehmen individuelle Herausforderungen zu meistern hat, die sich nur im Einzelfall betrachten und bewerten lassen.

Somit gilt auch, dass die innerhalb des Projekts definierten *Key Performance Indicators* (KPIs) nicht universell zum Einsatz kommen können, sondern im Einzelfall immer wieder neu ermittelt werden müssen, wenn man von kostengetriebenen Faktoren absieht (siehe Kapitel 3.4)

2.3 Arbeitspaket 1.3: Zusammenstellung geeigneter Plattformtechnologien

Die Zusammenstellung geeigneter Plattformtechnologien orientierte sich an den in Arbeitspaket 1.1 identifizierten vier Prozessströmen, die für das vorliegende Projekt die höchste Relevanz aufwiesen.

Einen Sonderfall bildet hierbei die Behandlung von salzhaltigen Abwasserströmen. Hier handelt es sich vordergründig um die Entwicklung alternativer Nutzungskonzepte qualitativ hochwertiger Restströme und nur zum Teil um technologische Betrachtungen der Abwasseraufbereitung. Darüber hinaus gibt dieses Kapitel Hinweise auf den Einsatz von trockenlaufenden Vakuumpumpen, die im Vergleich zu den am Standort vorwiegend eingesetzten Wasserringpumpen eine signifikante Reduzierung des anfallenden Abwassers ermöglichen.

Im Rahmen der Zusammenstellung geeigneter Plattformtechnologien wurde eine umfassende Marktanalyse durchgeführt, die eine aktuelle Übersicht über am Markt befindliche Technologiegeber im Bereich der Industrieabwasserreinigung bietet. Um dieses Wissen an alle Projektteilnehmer, aber auch an weitere Akteure innerhalb der herstellenden und verarbeitenden Industrie, weitergeben zu können, wurden im Rahmen des Projektes drei Informationsbroschüren erstellt:

- Leitfaden zur Behandlung PFAS-haltiger Industrieabwässer
- Leitfaden zur Behandlung hochbelasteter und heterogener Industrieabwässer
- Leitfaden zum Austausch von Vakuumpumpen

Ziel der Broschüren ist es, am Markt befindliche Verfahren und relevante Technologiegeber vorzustellen, um den Unternehmen einen einfachen Zugang zum *State-of-the-Art* in der Abwasserbehandlung an die Hand geben zu können. In den erstellten Informationsbroschüren sind insgesamt 30 Verfahren und Kontaktdaten zu über 90 Herstellerfirmen zusammengestellt, welche konkrete Lösungen für eine abwasserfreie Industrieproduktion anbieten können. Die Volltexte aller drei Broschüren sind in den Anhängen 2.1, 2.2 und 2.3 einsehbar.

Prozessspezifische Einordnungen der ermittelten Verfahrensoptionen sind im Folgenden für jeden der vier ermittelten Abwasserströme ausgeführt.

2.3.1 PFAS-haltige Abwasserströme

Die Behandlung PFAS-haltiger Industrieabwässer gewinnt immer mehr an Bedeutung und hat Anteil an öffentlichen Diskussionen. Es existieren zahlreiche Ansätze, wie man diese Stoffgruppe behandeln kann, wobei generell zwischen separierenden und destruktiven Verfahren unterschieden wird. Wie aus Abbildung 2 hervorgeht, gibt es zwar einerseits eine relativ große Verfahrensvielfalt zur Behandlung PFAS-haltiger Abwasserströme, andererseits ist die Verfügbarkeit großtechnisch anwendbarer Verfahren bislang noch stark limitiert. Insbesondere bei den destruktiven Verfahren existiert de facto nur die Hochtemperaturverbrennung als (voraussichtlich) effektives, großtechnisch einsetzbares Verfahren (Stoiber et al., 2020).

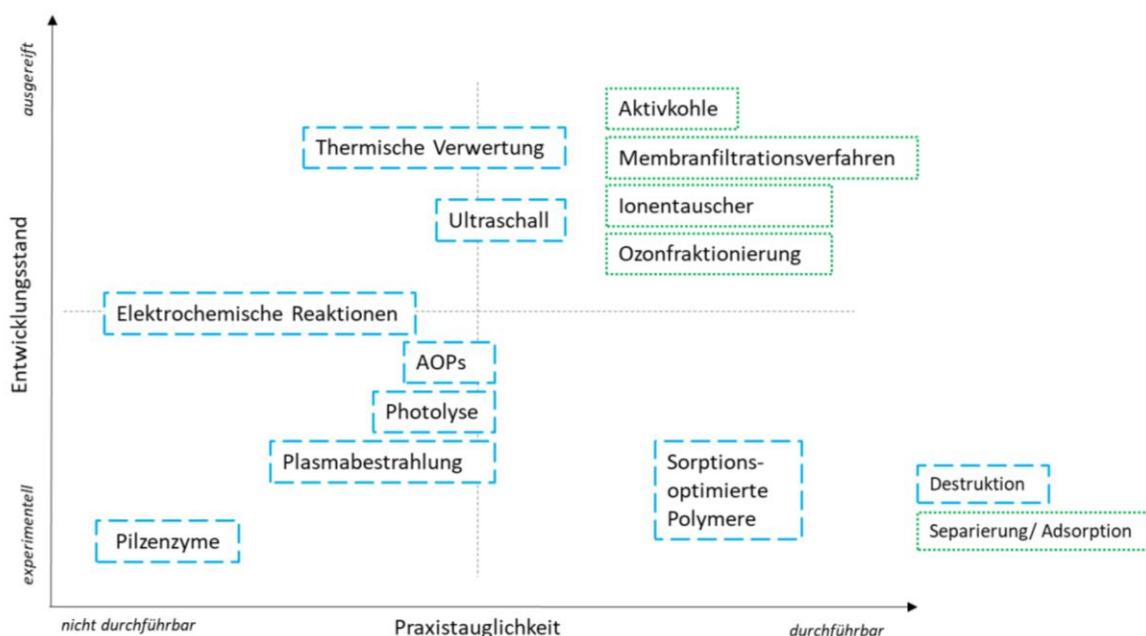


Abb. 2: Verfahren zur Behandlung von PFAS-haltigen Abwässern, dargestellt unter den Aspekten ihres Entwicklungsstandes und ihrer Praxistauglichkeit (abgeleitet von Ross et al., 2018).

Mit dem Ziel, im Projekt erarbeitete Konzepte rasch in die Anwendung überführen zu können, wurde die Technologierecherche vornehmlich auf den relativ kleinen Kreis marktreifer Verfahren fokussiert. Evaluiert wurden bislang also beispielsweise die separativen Verfahren der Aktivkohle-Adsorption, der Membranfiltration, des Ionenaustausches, der Ozon- und Schaumfraktionierung sowie der Druckentspannungsflotation. Aufgrund der voraussichtlichen stofflichen Eignung einzelner Abwasserströme mit leichtflüchtigen PFAS wurde zusätzlich der Option einer Abwasserstrippung nachgegangen. In Bezug auf die destruktiven Verfahren wurde vornehmlich nach Alternativen zur kostenintensiven Hochtemperaturverbrennung gesucht. Hierbei wurden die Verfahren des ultraschall-basierten PFAS-Abbaus, der elektrochemischen Oxidation und der superkritischen Nassoxidation berücksichtigt. Die drei Verfahren scheinen derzeit die am weitesten entwickelten Alternativen zur Verbrennung zu sein und konnten in Labor- und Pilotstudien bereits vielversprechende Ergebnisse generieren. Ausführliche Beschreibungen der innovativen Verfahren und Hinweise zu Herstellern können der Broschüre „Leitfaden zur Behandlung von PFAS-haltigen Industrieabwässern“ (Anhang 2.1) entnommen werden.

2.3.2 Heterogene Abwasserströme

Für den konkreten Fall eines großvolumigen Abwasserstroms mit einer *Total Organic Carbon* (TOC) Konzentration von 500 - 2.000 mg/L, sowie schwankender Abwasserzusammensetzung und hoher Foulinganfälligkeit galt es, Technologien zu ermitteln, die diesen Anforderungen

entsprechen können. Das Ziel dieser Betrachtung sollte ein „*minimal liquid discharge*“-Konzept sein, welches zudem eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber den Schwankungen in Menge und Zusammensetzung des Abwassers aufweist.

Als konkrete Möglichkeit stellt sich die Behandlung der anfallenden Ströme mittels keramischer Nanofiltration dar, gekoppelt mit einer Umkehrosmose und einer Konzentratbehandlung (z.B. Vakuumdestillation). Keramische Membranen eignen sich für das Anforderungsprofil, da sie eine höhere Robustheit sowie eine höhere Druck- und Temperaturbeständigkeit als Polymermembranen aufweisen (Amin et al., 2016; Kramer et al., 2015; Zhao et al., 2018). Damit geht ein höherer Anschaffungspreis einher, der aber durch die sinkenden operativen Kosten im Betrieb oftmals ausgeglichen werden kann. Es gibt zahlreiche Studien und auch großtechnische Anwendungsbeispiele, bei denen sich keramische Nanofiltrationsmembranen durch eine grundsätzlich höhere Prozessstabilität als besser geeignet erwiesen haben als Polymermembranen (Beery et al., 2020; Fujioka et al., 2014; Motta Cabrera et al., 2021). Grundsätzlich gilt aber auch hier, dass die Membranen in einem Testbetrieb mit den anfallenden Abwasserqualitäten und -quantitäten untersucht werden müssen. Hier eignen sich Batchtests zur Bestätigung der Trenngrenze, gefolgt von Pilotversuchen, um mittel- und langfristiges Foulingverhalten abzubilden und die großtechnische Anwendung sicherzustellen. Ausführliche Verfahrensbeschreibungen und Hinweise zu Herstellern können der Broschüre „Leitfaden zur Behandlung hochbelasteter und heterogener Industrieabwässer“ (Anhang 2.2) entnommen werden.

2.3.3 Hochbelastete Abwasserströme

Bei einem Standortunternehmen fällt Washwasser mit TOC-Frachten von bis zu 90.000 mg/L an. Dieses Wasser ist komplex zusammengesetzt und enthält verschiedenste Anteile des gesamten Produktionsablaufs sowohl auf Edukt- als auch auf Produktseite. Daraus resultieren hohe Entsorgungskosten und gleichzeitig Herausforderungen bei der biologischen Abbaubarkeit in der Kläranlage. Ziel muss es also sein, die biologische Belastung deutlich zu reduzieren und dabei gleichzeitig das aufbereitete Wasser wieder dem Produktionsprozess zuzuführen, auch um weitere Entsorgungskosten einzusparen.

Die durchgeführte Technologierecherche konnte zwei prinzipiell geeignete Verfahrensansätze aufzeigen: Separative Ansätze wie die Vakuumdestillation oder die Membrandestillation und destruktive Ansätze wie die elektrochemische Oxidation oder die Nassoxidation. Separative Verfahren sind in der Regel verfahrenstechnisch weniger aufwändig und prinzipiell auch kostengünstiger, sofern eine ausreichend hohe Aufkonzentrierung erreicht werden kann, sodass verbleibende Retentate kosteneffizient verwertet werden können. Ein entscheidender Vorteil der destruktiven Prozesse ist, dass sie von ihrer Auslegung bereits für hohe Frachten an Chemischen Sauerstoffbedarf (CSB) konzipiert sind. Als Beispiel kann die Hochdruck- und Hochtemperatur-Nassoxidation (*Wet Air Oxidation*) genannt werden, die in Bereichen von

10.000 – 100.000 mg/L CSB arbeitet. Als Oxidationsmittel wird Sauerstoff oder Luft verwendet (Luan et al., 2017; Tungler et al., 2015). Ausführliche Beschreibungen zu beiden Verfahrensvarianten und Hinweise zu Herstellern können ebenfalls der Broschüre „Leitfaden zur Behandlung hochbelasteter und heterogener Industrieabwässer“ (Anhang 2.2) entnommen werden.

Im Laufe der Recherche konnte zudem festgestellt werden, dass die Abwasserzusammensetzung keinem „Standard“ entspricht, sondern auch hier, aufbauend auf einer Literaturrecherche, Vorsondierungen mit Technologiegebern und Laborversuche durchgeführt werden müssen, um mögliche Verfahren auf ihre Eignung hin untersuchen und evaluieren zu können. Innerhalb der Projektlaufzeit wurden zur Behandlung hochbelasteter Waschwässer umfangreiche Diskussionen mit Technologiegebern angestoßen, die zu einer konkreten Erprobung der Vakuumdestillation führten. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe sind in Kapitel 5.2.2 erläutert.

2.3.4 Trockenlaufende Vakuumerzeugung

Wie aus dem Projekt ersichtlich wurde, ist innerhalb der chemischen Industrie ein nennenswerter Anteil der Abwassererzeugung auf die Vakuumerzeugung zurückzuführen. Durch die Entwicklung trockenlaufender Vakuumpumpen ist dieser Abwasseranfall nach heutigem Stand der Technik jedoch vermeidbar.

Die Modernisierung von Vakuumpumpen bzw. der Austausch wasserführender zugunsten trockenlaufender Vakuumpumpen geht allgemein mit einer komplexen Planung einher. Neben der erforderlichen Vakuumqualität und Saugleistung spielen weitere Parameter wie Wasserdampfverträglichkeit oder Explosionsschutz eine Rolle.

Zudem stellt sich bei der Modernisierung bzw. Neuplanung einer Vakuumversorgung immer die Frage nach der Zentralisierung einer Anlage. Werden viele kleine Anlagen nur selten benutzt, ist es schwer, die einzelnen Komponenten zusammenzuschließen und passend für eine große Pumpe zu dimensionieren. Als Lösung kann die Produktvielfalt der Trockenläufer dienen. Diese zeichnen sich besonders durch die Einsparung von Betriebsmitteln wie Öl und Wasser aus und sind daher in vielen Bereichen mittlerweile Stand der Technik. Somit lohnt sich ein Austausch alter zugunsten neuer Pumpen in der Regel immer. Einige Pumpenhersteller bieten in Fällen, in denen bereits eine sparsame Pumpe im Betrieb ist, zusätzlich Nachrüstungen an. Dadurch können weitere Kosteneinsparungen im Betrieb ohne den Neukauf einer Pumpe erreicht werden. Insgesamt lässt sich allgemein ein deutliches Einsparungspotential durch den Austausch von alter Pumpentechnik feststellen.

Um den Unternehmen den Umstieg auf die abwasserfreie Vakuumproduktion zu erleichtern, wurde im Rahmen des Projekts die Informationsbroschüre „Leitfaden zum Austausch von Va-

kuumpumpen“ (Anhang 2.3) erstellt. Die Broschüre beinhaltet Verfahrensbeschreibungen aller aktueller und relevanter Pumpentypen und schließt mit einer Übersicht über derzeit am Markt befindliche Pumpenhersteller.

2.4 Fazit zu Arbeitspaket 1

Basierend auf der gegebenen Aufgabenstellung und den vorliegenden Abwasserströmen konnte in Arbeitspaket 1 ein zielgerichteter Überblick über großtechnisch verfügbare Verfahren, Hersteller bzw. Technologiegeber sowie über aktuelle Produktportfolios gewonnen werden. Sämtliche erlangte Ergebnisse wurden in drei Informationsbroschüren zusammengefasst. Ziel hierbei war es, einen leicht zugänglichen Überblick über die Funktionsweisen generell geeigneter Verfahren, den aktuellen *State-of-the-Art*, und über mögliche Technologiegeber zu bieten. Da solch ein Dokument bislang nicht existiert, wird der Mehrwert einer solchen Technologie- und Produktübersicht als hoch eingeschätzt. Des Weiteren ermöglichte die Erstellung der Informationsbroschüren, übertragbare Ergebnisse zu generieren, die einer breiten Fachöffentlichkeit über die Projektgrenzen hinaus zur Verfügung gestellt werden können.

3 Ergebnisse Arbeitspaket 2: Bewertung von Plattformtechnologien

Das übergeordnete Ziel von Arbeitspaket 2 war die qualitative Bewertung der in Arbeitspaket 1 identifizierten Plattformtechnologien. Hierzu wurde zunächst ein ganzheitliches Bewertungsprotokoll in Form einer Bewertungsmatrix erarbeitet, das eine Einordnung der Technologien hinsichtlich

- ihres Wirkungsspektrums
- der Vermeidungs- und Einsparpotenziale betroffener Dritter
- der ökonomischen und gesamtökologischen Auswirkungen

zulässt.

3.1 Arbeitspaket 2.1: Darstellung möglicher Vermeidungs- und Einsparpotenziale betroffener Dritter

Aufbauend auf den Plattformtechnologien, die im Rahmen der Stakeholder-Meetings besprochen und unter Arbeitspaket 1.3 und in den erstellten Informationsbroschüren weiter ausgeführt wurden, ergaben sich entsprechende Vorteile gegenüber dem Status-quo der aktuellen Abwasserbehandlung. Diese Vorteile fließen auch in die Betrachtung der KPIs mit ein, da diese Zielgrößen auch projektübergreifend gelten:

- Stoffliche Entlastung der ZARA
- Hydraulische Entlastung der ZARA

Daraus ergaben sich potenzielle Ansatzpunkte für weitere Standorte der (chemischen) Industrie in Bayern und darüber hinaus:

- ZARA: Steigerung der Kapazität, Reduktion der Kosten, bessere Reinigungsleistung
- Erhöhung der Wasserqualität der aufnehmenden Gewässer

Alle Plattformtechnologien, KPIs und Ansatzpunkte, die im Verlauf des Projekts entwickelt wurden, tragen entweder direkt, aber mindestens indirekt zu den oben genannten Zielgrößen bei, sodass eine weitere ausführliche Betrachtung dieses Arbeitspakets im Rahmen der Bearbeitung der anderen Arbeitspakete mitintegriert wird.

Entlastungen der ZARA – herbeigeführt durch eine Teilstrombehandlung in den Betrieben am Standort – können sich beispielsweise durch folgende Berechnungen quantifizieren lassen:

- Verlängerung der Verweilzeit im Belebungsbecken über die Verringerung der hydraulischen Last
- Prozentuale Verminderung der Schmutzfracht (Eingesparte Kohlenstoff- bzw. Stickstofffracht vs. gesamte Schmutzfracht)
- Messung der globalen CSB-Abbauraten der ZARA (vorher/nachher)

Es kann also eine direkte Verknüpfung erstellt werden zwischen der dezentralen Vorbehandlung der zugeführten Abwasserteilströme und der Behandlungseffektivität der ZARA im Gesamten.

Der betrachtete Standort weist dahingehend eine Besonderheit auf, als dass auch PFAS-haltige Abwässer in der ZARA behandelt werden. In Abschnitt 2.3.1 wurde bereits auf die Problematik der aktuellen Entwicklungen hingewiesen. Wenn man als Gesetzgeber die Entlastung der ZARA durch diese Stoffbelastung erzielen und gleichzeitig eine Entlastung des aufnehmenden Oberflächengewässers erreichen möchte, ist es eine Möglichkeit, Grenzwerte zu verschärfen. Standortunternehmen in Chemieparks haben bei allen Behandlungs- und Aufbereitungsschritten die Finanzierbarkeit der jeweiligen Verfahren im Blick. Werden Grenzwerte nicht verschärft, bzw. die Produktion von bestimmten Stoffgruppen nicht eingeschränkt besteht für die Unternehmen wenig Anreiz, ihre Vorbehandlung anzupassen bzw. auszubauen.

In der aktuellen politischen Diskussion sind – was PFAS betrifft – allerdings vermehrt Maßnahmen in der Vorbereitung, die eine Vorbehandlung relevant machen kann, so dass hier auch der Betreiber der ZARA entsprechend vorbereitend agieren kann. So hat die Umweltministerkonferenz (UMK) die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) um eine Prüfung zu bitten, ob die bisherige Datengrundlage in Deutschland für eine konsistente Ableitung von Bewertungskriterien ausreicht. Hintergrund ist eine neue Risikobewertung der EFSA (Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit) vom September 2020, die zu einer weiteren Absenkung der gesundheitsbezogenen Bewertungskriterien mit noch nicht abgeklärten Folgen für

die Höhe von Beurteilungswerten (wie Trinkwasserleitwerte, Gesundheitliche Orientierungswerte (GOW), Umweltqualitätsnormen (UQN)) oder auch Grenzwerten führen wird (Schrenk et al., 2020).

Eine Arbeitsgruppe aus LAWO und LABO (Bund-/Länder AG Bodenschutz) hat aus dem UMK-Auftrag die folgenden Schlüsse erarbeitet¹:

- Minimierung der PFAS-Freisetzung
- Die Bewertungskriterien für alle betroffenen Umweltbereiche und Nutzungsarten müssen aneinander angepasst und aktualisiert werden
- Sinnvolle Summenparameter für die Emissionen aller relevanten PFAS-Verbindungen und die betroffenen Umweltbereiche sowie für alle Nutzungsarten von Wasser und Boden einschließlich rechtssicherer Analysenverfahren sind weiterzuentwickeln

Die UMK hat diesem Bericht zugestimmt, weiterhin hat sich der Bundesrat in Drucksache 626/20 wie folgt zu PFAS geäußert²:

„Es wird begrüßt, dass die Kommission sicherstellen will, dass die Verwendung von PFAS in der EU schrittweise eingestellt wird, es sei denn, dass dies für die Gesellschaft unverzichtbar ist. Der Bundesrat unterstützt daher das geplante PFAS-Verbot hinsichtlich verbrauchernaher Produkte und umweltoffener Anwendungen.“

Diese Aussagen, verbunden mit den angekündigten Maßnahmen einer Grenzwertschaffung bzw. -verschärfung geben auch Standortbetreibern die Möglichkeit, vorausschauend zu agieren und die PFAS-produzierenden Unternehmen dahingehend zu unterstützen, Vorbehandlungsstufen zur gezielten PFAS-Entfernung aus Abwasserteilströmen umzusetzen. Dies kann entweder über die Einbindung externer Technologiegeber oder über innerbetriebliche Verfahrensoptimierungen und Technologieentwicklungen erfolgen.

3.2 Arbeitspaket 2.2: Ökonomische und gesamtökologische Kriterien zur Bewertung der Plattformtechnologien

Ziel von Arbeitspaket 2.2 war die Bereitstellung von Kriterien, die eine ökonomische und gesamtökologische Bewertung der in Arbeitspaket 1.3 ermittelten Plattformtechnologien ermöglichen. Eine ausführliche Diskussion der identifizierten KPIs zur ökologischen und ökonomischen Beurteilung ist im nachfolgenden Kapitel 3.3 aufgeführt.

Hintergrund für die Bewertung ist die grundsätzliche Annahme, dass sich Technologien, die ähnliche Zielkriterien erreichen, anhand standardisierter Kriterien vergleichen lassen. Dieses

¹ <https://www.labo-deutschland.de/Veroeffentlichungen-Persistente-Schadstoffe--PFAS.html>

² <https://www.bundesrat.de/SharedDocs/beratungsvorgaenge/2020/0601-0700/0626-20.html>

Vorgehen wird genutzt, um den Stand der Technik abbilden zu können, dient aber auch der Aufzeigung der möglichen notwendigen Entwicklungspotentiale bekannter Technologien. Hier wird der Markt dann zu einem Treiber von Entwicklungen.

Die Auswahl von Kriterien ist allerdings stark von den diskutierten individuellen Zielen abhängig. Eine rein ökonomische Betrachtung mag ausreichen, wenn die ökologischen Faktoren bei allen Technologien identisch sind, verliert aber im speziellen Fall recht komplexer Medien und Inhaltsstoffe ihre Basis. Somit sind die vier Stoffströme, die einer engeren Betrachtung unterzogen werden, auch unterschiedlich zu betrachten:

- Ökologische und ökonomische Kriterien im Fokus:
 - Heterogene Abwasserströme
 - Hochbelastete Waschabwässer
 - Salzhaltige Abwasserströme
- Vorwiegend ökologische Kriterien im Fokus:
 - PFAS-haltige Abwasserströme

Gleichzeitig muss mit den Unternehmen besprochen werden, welche Gewichtung potentiellen Kriterien zukommen soll. So können beispielsweise operative Kosten stärker gewichtet werden als der Anschaffungspreis. Bei der ökologischen Herangehensweise wären dafür Faktoren wie Robustheit, Reinigungsgrad und der technologische Reifegrad (wenn es sich um noch in der Entwicklung befindliche Technologien handelt) von entscheidender Bedeutung, genauso wie mögliche Referenzen. Die Einordnung der zugehörigen KPIs erfolgt in den nachfolgenden Kapiteln.

3.3 Arbeitspaket 2.3: Erstellung einer Bewertungsmatrix zur Einordnung unterschiedlicher Plattformtechnologien

Ziel von Arbeitspaket 2.3 ist die Erstellung einer umfassenden Bewertungsmatrix für die in Arbeitspaket 1.3 identifizierten Plattformtechnologien. Mithilfe der Matrix soll ein standardisiertes und ganzheitliches Bewertungsprotokoll bereitgestellt werden, welches erlaubt, verschiedenste Verfahren und Verfahrenskombinationen hinsichtlich ihrer Behandlungseffektivität, Wirtschaftlichkeit und gesamtökologischen Auswirkungen zu beurteilen. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden KPIs definiert, welche über (i) die Recherche einschlägiger Fachliteratur (*Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* von Tchobanoglous et al., 2003), (ii) die Berücksichtigung vorherig durchgeführter, themenverwandter Projekte (z.B. Wencki et al., 2020, aus *WAVE – Wassertechnologien: Wiederverwendung*), sowie über den Austausch mit den Standortfirmen (z.B. auf dem Stakeholder-Meeting am 26.10.2020 und in bilateralen Einzelmeetings) ermittelt wurden. Die daraus resultierende Bewertungsmatrix, bestehend aus 20 individuellen KPIs, ist in Abbildung 3 dargestellt:

Prozesseignung	Marktreife	Anschaffungskosten	Betriebskosten	Personalaufwand
Wartungsaufwand	Behandlungseffektivität	Robustheit / Zuverlässigkeit	Komplexität	Platzbedarf
Logistik- /Infrastrukturaufwand	Nachrüstbarkeit	Dynamische Betriebsführung	Klimatische Aspekte	Direkte Emissionen
Indirekte Emissionen	Wasser-Reuse-Potential	Unveränderte Produktqualität	Stoffliche Entlastung	Hydraulische Entlastung

Abb. 3: Ermittelte *Key Performance Indicators* (KPI) zur Bewertung der Plattformtechnologien. Grundlegende KPIs sind die generelle *Prozesseignung* und die *Marktreife*.

Die im Projekt entwickelten Bewertungskriterien sind nachfolgend ausgeführt und erläutert:

Prozesseignung Der KPI Prozesseignung nimmt eine Sonderrolle ein, da die generelle Eignung eines Verfahrens die Voraussetzung für eine sinnvolle Bewertung ist. Selbst die Frage der Prozesseignung kann jedoch oftmals nicht ohne Weiteres beantwortet werden. So liegen beispielsweise für die Behandlung bestimmter Abwasserinhaltsstoffe bislang keine Fallstudien oder Fachartikel vor, womit eine klare Aussage zur Prozesseignung bestimmter etablierter Behandlungsstrategien ohne Vortest schwerfällt. Des Weiteren können komplexe Abwasserzusammensetzungen dazu führen, dass eine generell geeignete Technologie aufgrund verfahrenstechnischer Hürden doch nicht angewendet werden kann. Fazit ist, dass sich selbst die Prozesseignung oftmals nur über Vorversuche mit der vorliegenden Abwassermatrix klären lässt.

Marktreife: Für großtechnische Anwendungen nimmt der KPI der Marktreife ebenfalls eine Sonderrolle ein und ist Grundvoraussetzung für die Auswahl der Plattformtechnologie. Der KPI sollte über den Dialog mit Herstellern bzw. über Fallstudien bewertet werden. Hier gilt es, auch den konkreten Anwendungsfall zu prüfen. So bedeutet ein hoher Entwicklungsstand für Anwendungsfall A nicht zwingend einen ebenso hohen Entwicklungsstand für Anwendungsfall B.

Anschaffungskosten: Neben den eigentlichen Kosten für die Plattformtechnologie sollten auch die Kosten für die baulichen Maßnahmen, die technische Gebäudeausstattung (z.B. Verrohrung) und die Elektrotechnik (z.B. Verkabelung und Anschluss der neuen Technologie) berücksichtigt werden. Baunebenkosten (z.B. Planungskosten) sollten ebenfalls in die Bewertung miteinbezogen werden.

Betriebskosten: Fassen Kosten für Energie, Ressourcen (z.B. Wasser) und Verbrauchsmittel (z.B. Öl, Additive, Prozesschemikalien) zusammen und werden typischerweise in EUR pro m³ behandeltes Abwasser angegeben. Falls möglich, sollten auch zukünftige Preisentwick-

lungen (z.B. für Energie oder Chemikalien) antizipiert werden. Für den Fall, dass eine Technologie lediglich angemietet wird, müssen auch die Mietkosten mitberücksichtigt werden. Ebenfalls miteinbezogen werden Kosten zum Management und zur Beseitigung von Reststoffen (z.B. Entsorgung von Konzentraten), falls dies nicht innerhalb der vorgeschlagenen Verfahrenskombination geschieht. Personalkosten werden nicht miteinbezogen.

Personalaufwand: Bezieht sich auf die Arbeitszeit, welche die Verfahrenstechnologie im Normalbetrieb bindet. Je nach der benötigten Qualifizierung für die Bedienung der Anlage können hieraus die monatlichen Personalkosten bzw. die Personalkosten pro behandeltem m³ Abwasser abgeleitet werden. Wird die Bedienung der Anlage vollständig durch externe Dienstleister bzw. den Hersteller übernommen, müssen Personalaufwand bzw. zugehörige Kosten beim Dienstleister/Hersteller angefragt werden.

Wartungsaufwand: Es werden sämtliche Kosten zusammengefasst, die ausschließlich während der erforderlichen Wartungsarbeiten anfallen. Hierzu zählen Personalkosten (intern oder extern), sowie benötigte Sach- und Prozessmittel (z.B. neue Aktivkohle für Aktivkohlefilter), die nur während der Wartung anfallen. Kosten für den routinemäßigen Austausch von Verschleißteilen werden ebenfalls unter Wartungskosten mitberücksichtigt und sollten unbedingt bei den Herstellern abgefragt werden. Die zukünftige Verfügbarkeit von Verschleißteilen sollte ebenfalls mit den Herstellern abgeklärt werden.

Behandlungseffektivität: Gibt an, wie effektiv eine Plattformtechnologie eine Zielsubstanz aus dem Abwasserstrom entfernen kann. Effektivität bezieht sich hierbei auf die mögliche prozentuale Entfernung relativ zur Zulaufkonzentration in Prozent bzw. auf erreichbare Zielkonzentrationen z.B. in mg/L. Die Behandlungseffizienz (also die erforderliche Behandlungszeit bzw. der Energie-, Rohstoff-, oder Platzbedarf für die Behandlung) fließt in den KPI der Behandlungseffektivität nicht mit ein, sondern wird über ökonomische KPIs (z.B. Anschaffungskosten, Betriebskosten, Personalaufwand, Wartungsaufwand, Infrastrukturaufwand, Platzbedarf) sowie über den *Carbon Footprint* der Behandlung (KPI „Indirekte Emissionen“) mitberücksichtigt.

Robustheit / Zuverlässigkeit: Sollte im Vorfeld unter Einbeziehung der konkreten unternehmensspezifischen Gegebenheiten mit den Herstellern oder über Erfahrungsberichte bzw. Fallstudien geklärt werden. Beispielsweise sollte ermittelt werden, wie ein Prozess auf Störstoffe, schwankende Abwasserzusammensetzungen und -mengen oder auf andere, unerwartete Einflüsse reagiert und wie zuverlässig die geforderten Zielkonzentrationen im Ablauf eingehalten werden können. Zudem sollte abklärt werden, welche Standzeiten unter den gegebenen Betriebsbedingungen erwartet werden können. Es sollte diskutiert werden, wie ein denkbares *Worst-Case-Scenario* (z.B. durch eine falsche Bedienung der Anlage oder eine technische Störung) aussehen könnte bzw. wie fehlertolerant ein System arbeitet.

Komplexität: Bei gleicher Eignung und Leistungsfähigkeit ist es i.d.R. empfehlenswert, weniger komplexe Systeme zu bevorzugen. Hochkomplexe Verfahren können unter anderem einen erhöhten Personalaufwand, erhöhten Verschleiß und eine erhöhte Störanfälligkeit nach sich ziehen. Damit überlappt der KPI Komplexität auch indirekt mit KPIs wie Personalaufwand oder Wartungsaufwand.

Platzbedarf: Setzt sich aus dem Platzbedarf der Plattformtechnologie selbst sowie der notwendigen Peripherie (z.B. Verrohrung, Vorlagebehälter, Speicherbehälter, Installationen für mögliche Vor- bzw. Nachbehandlungen) zusammen. Je nach Sensitivität des Verfahrens gegenüber klimatischen Einwirkungen kommt ggf. noch der Platzbedarf für eine Isolation bzw. Einhausung hinzu. Mögliche Erweiterungen der Anlage in der Zukunft sollten ebenfalls berücksichtigt werden.

Logistik-/Infrastrukturaufwand: Sind für die Implementierung einer Plattformtechnologie z.B. extensive Verrohrungsarbeiten vonnöten oder muss zur Behandlung eines Konzentratstroms ein externer, weit entfernter Dienstleister beauftragt werden, kann die Eignung eines an sich gut funktionierenden Verfahrens eingeschränkt sein. Der KPI des Logistik- und Infrastrukturaufwands überlappt mit den KPIs Anschaffungskosten, Betriebskosten, Platzbedarf und Indirekte Emissionen.

Nachrüstbarkeit: Insbesondere für stark wachsende Produktionsstandorte ist die Nachrüstbarkeit einer Technologie von entscheidendem Interesse. Modulare Anlagen (z.B. Aktivkohlefilter, Membranverfahren) sind beispielsweise leicht nachrüst- bzw. erweiterbar, während fest-installierte Prozesse (wie z.B. die biologische Stufe einer Kläranlage) in ihrer Kapazität nicht ohne Weiteres erhöht werden können.

Dynamische Betriebsführung: Die Möglichkeit, einen Prozess schnell an- und wieder abzuschalten, ist insbesondere für diskontinuierliche Produktionsprozesse von Bedeutung, wenn keine ausreichenden Speichermöglichkeiten vorliegen. Des Weiteren ermöglicht eine dynamische Betriebsführung, Produktionsschwankungen abzufedern.

Klimatische Aspekte: Bei Außeninstallationen müssen klimatische Aspekte berücksichtigt werden. Beispielsweise sind etliche Verfahren temperatursensitiv oder können zumindest nicht unter dem Gefrierpunkt betrieben werden.

Direkte Emissionen: Direkte Emissionen sind beispielsweise Lärm, Wärme, Abgase oder Reaktionsnebenprodukte, welche vom Verfahren nicht zurückgehalten werden können. Welche direkten Emissionen durch die Plattformtechnologie entstehen, sollte unbedingt im Vorfeld abgeklärt werden, da sich hieraus weitere Maßnahmen ergeben können (z.B. eine Abgasnachbehandlung, Schallschutz, etc.).

Indirekte Emissionen: Indirekte Emissionen entstehen über den Energie- oder Rohstoffbedarf des angewendeten Verfahrens und werden als *Carbon Footprint* mitberücksichtigt. Insbesondere für die gesamtökologische Bewertung der Plattformtechnologien sind die indirekten Emissionen von zentraler Wichtigkeit.

Wasser-Reuse-Potential: Die Möglichkeit einer Wasserwiederverwendung ist insbesondere für die Zielsetzung eines geschlossenen Wasserkreislaufs von Bedeutung. Membranverfahren (z.B. Umkehrosmose) können beispielsweise eine exzellente Wasserqualität für die Wiederverwendung bereitstellen, während oxidative Verfahren oftmals lediglich eine verbesserte biologische Abbaubarkeit eines Abwasserstroms erreichen, sodass eine direkte Wiederverwendung nicht möglich ist.

Unveränderte Produktqualität: Bei Aufbereitungstechnologien, die eine Wiederverwendung des Abwassers ermöglichen, ist eine unveränderte Produktqualität von maßgebender Bedeutung. Es sei jedoch zu erwähnen, dass auch bei gegebener technischer Machbarkeit regulatorische Hürden zu überwinden sind, um einen aufbereiteten Abwasserstrom wieder in der Produktion einzusetzen. Dies trifft insbesondere dann zu, wenn der behandelte Strom am Anfang der Prozesskette eingesetzt wird und sich somit die Produktionsbedingungen für eine Vielzahl an Produkten ändern.

Stoffliche Entlastung: Der KPI der stofflichen Entlastung betrifft sowohl das Unternehmen selbst (Minimierung der Abwassergebühr) als auch die angeschlossene Kläranlage bzw. das aufnehmende Oberflächengewässer. Kann beispielsweise durch eine Frachtreduktion die Abwassergebühr herabgesetzt werden, sollte dies in der ökonomischen Betrachtung mitberücksichtigt und den Investitions- und Betriebskosten gegenübergestellt werden. Die Kläranlage profitiert durch die stoffliche Entlastung beispielsweise durch eine erhöhte biologischen Abbaubarkeit der eingeleiteten Stoffe, eine Reduzierung der Salzfracht oder die Vermeidung des Eintrags von persistenten Stoffen, die in der konventionellen Abwasserreinigung nicht abgebaut werden können.

Hydraulische Entlastung: Im Falle stark hydraulisch belasteter Kläranlagen kann insbesondere die Volumenreduzierung der Abwasserströme zu einer Entlastung bzw. Kapazitätssteigerung führen. Für das Unternehmen selbst kann eine Reduktion der Abwassermenge ebenfalls eine Reduzierung der Abwassergebühr bedeuten und sollte in der ökonomischen Betrachtung mitberücksichtigt und den Investitions- und Betriebskosten gegenübergestellt werden.

Die Bewertungsmatrix aus den KPIs wurde den teilnehmenden Unternehmen in Form eines Fragebogens am 07.12.2021 übermittelt. Der Bogen ist in Anhang 3 einsehbar.

3.4 Arbeitspaket 2.4: Bewertung der Plattformtechnologien und Kosten-/Nutzenbilanz

Ziel von Arbeitspaket 2.4 war die qualitative Bewertung bzw. ein Ranking der Plattformtechnologien im Hinblick auf deren Wirkungsspektrum, die Vermeidungs- und Einsparpotentiale betroffener Dritter sowie den ökonomischen und gesamtökologischen Auswirkungen. Die Bewertungsmatrix, die in Arbeitspaket 2.3 erstellt wurde, dient hierbei als Ausgangspunkt.

Die große Zahl an Bewertungskriterien, die je nach unternehmensspezifischen Anforderungen zudem unterschiedlich gewichtet sind, macht eine Identifizierung der besten Technologie zu einer herausfordernden Aufgabe. Die größte Hürde ist jedoch der Umstand, dass eine zuverlässige Bewertung der unterschiedlichen KPIs ohne Vortests oder Pilotversuche de facto nicht möglich ist. Es lässt sich beispielsweise keine klare Aussage darüber treffen, wie gut PFAS mittels innovativer Verfahren wie z.B. der Ozonfraktionierung aus einer hochkomplexen Industrieabwassermatrix entfernt werden können, da das Verfahren bislang vornehmlich für Feuerlösch- und Deponiesickerabwässer sowie für Oberflächen- und Grundwässer getestet wurde (EVO CRA, 2016; EVO CRA & ARCADIS, 2020; Held & Reinhard, 2020; Ross et al., 2018). Das hat zur Folge, dass auch KPIs wie Anschaffungskosten, Betriebskosten, Platzbedarf, Emissionen etc. nur grob abgeschätzt werden können. Ähnlich verhält es sich auch mit heterogenen, polyethylenglykol-haltigen Abwasserströmen, für die aufgrund ihrer nur geringen Umweltrelevanz bislang nur wenig Literatur und wenige Verfahrensempfehlungen vorliegen (Pietrelli et al., 2021). Damit ist an dieser Stelle festzuhalten, dass eine valide Bewertung verschiedener Plattformtechnologien und Verfahrenskombination durch eine Literaturrecherche allein nicht erfolgen kann und dass Pilotversuche in Zusammenarbeit mit Ingenieurbüros bzw. Herstellern der Plattformtechnologien in den meisten Fällen unabdingbar sind. Wie aus unserer Recherche hervorging, erfolgt ohne Vortests oftmals nicht einmal eine Angebotserstellung.

Nichtsdestotrotz wurde im Rahmen des Projekts eine Vorauswahl unterschiedlicher Plattformtechnologien durchgeführt. Ziel war hierbei, aus der Vielzahl möglicher Behandlungsmöglichkeiten (und insbesondere der vielen möglichen Verfahrenskombinationen) die vielversprechendsten zu selektieren, um die zu realisierende Pilotierungsphase möglichst (kosten)effizient zu gestalten. Maßgeblich für diese Vorauswahl waren die KPIs der Prozesseignung sowie der Marktreife. Basierend hierauf wurde intensiv mit den Unternehmen und Herstellern zusammengearbeitet, um die notwendigen Vortests zu initiieren und die zur Bewertung benötigten Daten zu erheben.

Zur Etablierung eines möglichst objektiven und standardisierten Verfahrens zur Identifizierung der geeignetsten Verfahrenskombination wurde (insbesondere im Hinblick auf die Potentialanalysen) eine Vorgehensweise entwickelt, welche (i) die unternehmensspezifischen Anforderungen mittels Bewertungsmatrix genau abfragt, (ii) die Leistungsmerkmale der verfügbaren Behandlungstechnologien mittels Fachliteratur und Herstellerbefragungen so gut wie

möglich abschätzt und (iii) die ermittelten Informationen computergestützt mittels *Multi Criteria Decision Aid* (MCDA) Analysen auswertet.

3.4.1 Bestimmung unternehmensspezifischer Anforderungen

Die Ermittlung standortspezifischer Gegebenheiten ist eine Grundvoraussetzung für eine adäquate Technologieauswahl. Die erstellte Bewertungsmatrix diente hierbei als nützliche „Checkliste“, die zusammen mit den Stakeholdern individuell diskutiert werden konnte. Für die Ermittlung präziser Anforderungsprofile wurde den Unternehmen die Möglichkeit gegeben, sämtliche KPIs hinsichtlich ihrer spezifischen Wichtigkeit zu bewerten. Hierzu wurde ein Fragebogen erstellt, der in Tabellen 1 und 2 exemplarisch mit den Antworten eines Standortunternehmens dargestellt ist. Der Fragebogen selbst kann Anhang 3 entnommen werden.

Tab. 1: Exemplarische Gewichtung der Key Performance Indicators (KPIs) durch **Unternehmen X**.

KPI	Sehr wichtig	Wichtig	Neutral	Unwichtig	Sehr unwichtig
Prozesseignung	✓				
Marktreife	✓				
Anschaffungskosten	✓				
Betriebskosten	✓				
Personalaufwand	✓				
Wartungsaufwand	✓				
Behandlungseffektivität		✓			
Robustheit/Zuverlässigkeit		✓			
Komplexität		✓			
Platzbedarf		✓			
Logistik-/Infrastrukturaufwand			✓		
Nachrüstbarkeit				✓	
Dynamische Betriebsführung			✓		
Klimatische Aspekte		✓			
Direkte Emissionen	✓				
Indirekte Emissionen			✓		
Wasser-Reuse Potential	✓				
Unveränderte Produktqualität		✓			
Stoffliche Entlastung				✓	
Hydraulische Entlastung		✓			

Tab. 2: Exemplarische Bewertung einzelner Key Performance Indicators (KPIs) durch **Unternehmen X**.

KPI	Niedrig	Mittel	Hoch
Behandlungseffizienz [%]	60	80	100
Anschaffungskosten [€]	100.000	500.000	1.000.000
Betriebskosten [€/Monat]	1.000	3.000	5.000
Personalaufwand [h/d]	0,1	0,5	1,0
Platzbedarf [m ²]	5	15	30

Um die Kriterien auch für die Zukunft verwenden zu können, sei es, um neu Technologien anhand dieser Kriterien zu bewerten, oder aber um eine Gesamtstrategie mit dem Standortbetreiber zu definieren, wurden die Unternehmen am Standort in Einzelinterviews befragt, welche der als „sehr wichtig“ oder „wichtig“ bewerteten Kriterien nochmals von besonderer Bedeutung sind. Dies war vor allem dahingehen relevant, um für den gesamten Standort allgemeingültige Kriterien zu definieren. Die erste Rückmeldung der Fragebögen ergab das folgende Ergebnis, das in Abbildung 4 auf der nächsten Seite dargestellt ist.

Es fällt auf, dass kein einheitliches Bild vorliegt, was die Einordnung der KPIs für das jeweilige Unternehmen betrifft und wie anhand von diesen Parametern eine Gesamtentwicklung für den Standort erfolgen könnte. Wie bereits erwähnt sind solche gesamtheitlichen Betrachtungen schwierig und oftmals nur für den jeweiligen Einzelfall valide. Interessant ist der Aspekt, dass klimatische Aspekte bei keinem der Unternehmen eine Rolle spielen, wenn es um die Auswahl einer Technologie geht. Ein ähnlich diverses Bild bietet sich für die Frage nach dem *Technology Readiness Level* (TRL) der einzusetzenden Technologien (Tabelle 3):

Tab. 3: Rückläufe der Standortunternehmen zu den Technology Readiness Levels (TRLs) der einzusetzenden Technologien.

Unternehmen	1	2	3	4	5
Marktreife	> TRL 6	> TRL 6	TRL 9	TRL 6	TRL 4

	Unternehmen				
	1	2	3	4	5
Anschaffungskosten	Sehr wichtig	Neutral	Wichtig	Marginal	Sehr wichtig
Betriebskosten	Sehr wichtig	Wichtig	Neutral	Marginal	Sehr wichtig
Personalaufwand	Wichtig	Neutral	Sehr wichtig	Sehr wichtig	Sehr wichtig
Wartungsaufwand	Neutral	Wichtig	Sehr wichtig	Marginal	Wichtig
Behandlungseffektivität	Neutral	Sehr wichtig	Sehr wichtig	Marginal	Wichtig
Robustheit /Zuverlässigkeit	Sehr wichtig	Wichtig	Sehr wichtig	Marginal	Wichtig
Komplexität	Neutral	Wichtig	Neutral	Neutral	Wichtig
Platzbedarf	Neutral	Neutral	Wichtig	Marginal	Sehr wichtig
Infrastrukturaufwand	Marginal	Neutral	Wichtig	Neutral	Wichtig
Nachrüstbarkeit	Wichtig	Marginal	Wichtig	Marginal	Wichtig
Dyn. Betriebsführung	Sehr wichtig	Wichtig	Neutral	Neutral	Wichtig
Klimatische Aspekte	Neutral	Neutral	Marginal	Neutral	Neutral
Direkte Emissionen	Sehr wichtig	Wichtig	Wichtig	Marginal	Sehr wichtig
Indirekte Emissionen	Sehr wichtig	Wichtig	Marginal	Sehr wichtig	Wichtig
Wasser-Reuse-Potential	Wichtig	Wichtig	Wichtig	Sehr wichtig	Neutral
Produktqualität	Sehr wichtig	Neutral	Sehr wichtig	Marginal	Sehr wichtig
Stoffliche Entlastung	Neutral	Sehr wichtig	Wichtig	Marginal	Wichtig
Hydraulische Entlastung	Marginal	Wichtig	Wichtig	Marginal	Neutral

Sehr wichtig Wichtig Neutral Marginal

Abb. 4: Rückläufe der Standortunternehmen zur Gewichtung der Parameter.

Während die Mehrzahl der Unternehmen einen TRL von mindestens 6 einem Einsatz zugrunde legt (entspricht einem Prototypen), so ist für jeweils ein Unternehmen relevant, dass die Technologie bereits Referenzen aufweisen kann (TRL 9), bzw. lediglich erst im Labor erfolgreich getestet werden musste (TRL 4). Alle Unternehmen waren sich hingegen einig, dass unabhängig von der eingesetzten Technologie, zunächst Testläufe mit dem relevanten Teilstrom durchgeführt werden müssen, sei es vor Ort, oder beim Technologiegeber selbst.

Die Standortunternehmen wurden in Telefoninterviews im Nachgang dahingehend befragt, welche der Parameter, die von allen als „sehr wichtig“ und „wichtig“ deklariert wurden, eine übergeordnete Rolle spielen, bzw. eine Entscheidung für/gegen eine Technologie maßgeblich beeinflussen. Die Rückmeldungen zu dieser Frage waren deutlich homogener (Abbildung 5):

	Unternehmen				
	1	2	3	4	5
Anschaffungskosten					
Betriebskosten					
Personalaufwand					
Platzbedarf					
Indirekte Emissionen					

Sehr wichtig
 Wichtig

Abb. 5: Rückläufe der Standortunternehmen im Hinblick auf übergeordnete Parameter, die maßgeblich über die Anschaffung entscheiden.

So haben alle Unternehmen geäußert, dass sie nur dann Technologien in die nähere Betrachtung aufnehmen, wenn diese eine grundsätzliche Effektivität erreichen, also eine Eignung für die individuelle Fragestellung gegeben ist. Ist das gegeben, sind es preisliche Faktoren, die die Entscheidung über einen Einsatz maßgeblich beeinflussen und hier eher die operativen Kosten, zu denen auch die Personalkosten gehören. Personal spielt aus zweierlei Gründen eine wesentliche Rolle: so ist kein Unternehmen gewillt, zusätzliches Personal einzustellen und die Technologie zur Aufbereitung muss durch das vorhandene Personal mitbedient werden können. Dies hat auch zur Folge, dass komplexe Verfahren eher nicht in die engere Auswahl genommen werden. Weiterhin wurde von zwei der fünf befragten Unternehmen geäußert, dass es aktuell schwierig sei, geeignetes Personal zu finden, es herrsche ein tatsächlich regionaler Fachkräftemangel. Die Unternehmen äußerten sich übereinstimmend, wenn die grundsätzliche technische Machbarkeit gegeben sei, ist es die „Rechenbarkeit“, die eine Auswahl regelt.

Platzbedarf und indirekte Emissionen sind zwar nachrangig bewertet worden, sind aber die Kriterien, die dann als wesentliche, zusätzliche Faktoren mit in die Bewertung einfließen können.

3.4.2 Initiation von Vortests und Pilotversuchen unter Einbeziehung von verschiedenen Herstellern für Plattformtechnologien

Nach Identifizierung eines konkreten Anforderungsprofils erfolgte die Bewertung der einzelnen Verfahren bzw. Verfahrenskombinationen gemäß der Bewertungsmatrix. Wie bereits erwähnt ist jedoch für nahezu keinen KPI eine zuverlässige Bewertung „auf dem Papier“ möglich. Die beträchtlichen Unsicherheiten in der Bewertung ergeben sich unter anderem aus:

- Der komplexen Zusammensetzung und „Einzigartigkeit“ von industriellen (*end-of-pipe*) Abwässern, die zudem starken temporären Schwankungen unterworfen ist
- Der oftmals nur unzureichenden Charakterisierung vorliegender Abwasserströme
- Dem Mangel an publizierten, qualitativ hochwertigen und detaillierten Fallstudien zur industriellen Abwasserbehandlung

- Dem Vorhandensein „neuer“ Abwasserinhaltsstoffe, für deren Behandlung es bislang nur wenige oder oftmals gar keine Erfahrungen gibt

All diese Faktoren machen eine rein literaturbasierte Vorhersage der Behandlungseffektivität nahezu unmöglich. Ein standortunabhängiges Ranking einzelner Technologien ohne Vor- und Pilottests und ohne Einbeziehung konkreter Abwassermatrizes und unternehmensspezifischer Rahmenbedingungen ist damit nur bedingt sinnvoll.

Ein wesentlicher Bestandteil von Arbeitspaket 2 war daher die Integration verschiedenster Technologiegeber in den Stakeholder-Prozess und die Initiation von Vortests und Pilotversuchen. Hierbei wurde folgendermaßen vorgegangen:

- Bilateralen Austausch mit den Unternehmen zu Ansatzpunkten und Zielsetzungen, die durch den Einsatz von Plattformtechnologien erreicht werden sollen
- Literatur- und Webrecherche zu geeigneten Technologien (über wissenschaftliche Artikel, Berichte zu Fallstudien, Herstellerangaben) durch das Team TUM+DECHEMA; die Ergebnisse sind in den Broschüren zur Behandlung der 4 identifizierten Stoffströme zusammengefasst (siehe Anhänge 2.1, 2.2 und 2.3)
- Vorstellung und Diskussion der angedachten Verfahrensansätze mit den Standortunternehmen
- Kontaktaufnahme mit den vielversprechendsten Herstellern und Anfordern von Fragebögen und Produktbroschüren
- Vermittlung der erhaltenen Informationen an die Standortfirmen und Anbahnung von Vorbesprechungen mit Technologiegebern und Vortests

Es sei zu erwähnen, dass das Interesse der Standortfirmen am Austausch mit Technologiegebern generell sehr hoch war. Die Anbahnung von Vortests erwies sich jedoch als sehr zeitintensiv, da hierfür seitens der Standortunternehmen erst Geld- und Personalmittel bereitgestellt werden müssen. Das Team TUM+DECHEMA begleitete diesen Prozess daher lediglich in vermittelnder Position.

3.4.3 Ranking der Behandlungstechnologien mittels MCDA-Analyse

Nach der Erstellung eines konkreten Anforderungsprofils und der Erhebung relevanter Daten durch Vortests sollten die bestmöglichen Verfahrenskombinationen identifiziert werden. Um die Entscheidungsfindung möglichst faktenbasiert und transparent zu begleiten, ist ein leistungsfähiges Analysesystem unverzichtbar. Aus diesem Grund wurde das Ranking der unterschiedlichen Verfahrensoptionen mittels MCDA-Tools durchgeführt. Die Nutzung solcher Verfahren bietet eine Reihe von Vorteilen:

- Beliebige viele Verfahrenskombinationen können anhand beliebig vieler KPIs miteinander verglichen werden

- Die Bewertung der KPIs kann sowohl quantitativ (z.B. in Form von Anschaffungskosten in €) als auch qualitativ in Form von „gut bis schlecht“-Bewertungen bzw. Ja/Nein-Aussagen vorgenommen werden
- Die KPIs können in ihrer Relevanz gewichtet werden, d.h. die Stakeholder entscheiden, wie wichtig ein spezifisches KPI relativ zu den anderen KPIs ist. Diese Einordnung kann z.B. über Prozentangaben realisiert werden (siehe Abbildung 6). Setzt ein Stakeholder (z.B. ein Wirtschaftsunternehmen) auf maximale Wirtschaftlichkeit, begünstigt das vor allem kostengünstige Verfahren und das Ranking fällt ggf. anders aus als wenn ein anderer Stakeholder (z.B. eine Behörde) vor allem auf eine hohe Behandlungseffizienz und niedrige Emissionen setzt. Damit lässt sich gut abschätzen, welche Verfahren für welche Zielsetzungen geeignet sind und ob es ggf. auch Ansätze gibt, welche beiden Anforderungsprofilen genügen
- Zur Verfeinerung der Bewertung können zudem Indifferenz- und Präferenz-Bereiche definiert werden. Liegt z.B. der Unterschied in den Anschaffungskosten unterhalb einer vorher definierten „Indifferenz-Schwelle“ (z.B. ein verhältnismäßig kleiner Betrag von 1.000 €), so können zwei Alternativen als gleichwertig behandelt werden. Sobald der Unterschied die „Präferenz-Schwelle“ erreicht hat (z.B. ein bereits bedeutsamerer Betrag von 50.000 €), wird der KPI Anschaffungskosten jedoch mit der vollen, vorab definierten Relevanz gewichtet. Im Bereich zwischen den beiden Schwellenwerten wird die relative Wichtigkeit des KPIs Anschaffungskosten linear interpoliert
- Neben einem Ranking der eingegebenen Behandlungsalternativen bieten viele Tools grafische Darstellungsmöglichkeiten an, um das berechnete Ranking transparent und nachvollziehbar darzustellen. Beispielsweise kann das ermittelte Ranking der Verfahrensoptionen grafisch in 2D-Plots dargestellt werden, aus denen über Cluster-Bildung entnommen werden kann, welche Verfahren qualitativ nah beieinander liegen und welche sich grundlegend unterscheiden. Zudem können fallspezifische Korrelationen (z.B. „ein robustes Verfahren führt auch zu niedrigen Wartungskosten“) und Antagonismen (z.B. „je kleiner die Anlage, desto schlechter wird die Qualität des Ablaufs“) aufgezeigt werden. MCDA-Analysen eröffnen damit ggf. neue Blickwinkel auf die Verfahrensoptionen und sind durch die transparenten Darstellungsmöglichkeiten sehr gut für Stakeholder-Prozesse geeignet
- Über die Variation von Eingabewerten und Anforderungsprofilen kann zudem die Stabilität des ermittelten Rankings ermittelt werden. Beispielsweise kann bestimmt werden, wie stark Anschaffungskosten steigen bzw. Behandlungseffizienzen fallen dürfen, bis ein anderes Verfahren als besser geeignet erscheint

Eine exemplarische Eingabematrix, sowie das resultierende Ranking sind in Abbildung 6 schematisch dargestellt.

Obgleich das vorgestellte Verfahren rein faktenbasierte Empfehlungen ermöglicht und somit eine geeignete Plattform für die gegebene Aufgabenstellung darstellt, ist zu beachten, dass

die Aussagekraft des Rankings nur so gut ist wie die vorher ermittelten Eingabewerte. Ein Ranking, das rein auf Literaturangaben basiert ohne Ergebnisse aus Vortests miteinzubeziehen, ist damit zweifelsfrei fehlerbehaftet und kann ggf. auch zu einer falschen bzw. irreführenden Bewertung der Verfahrensalternativen führen. Eine sinnvolle Anwendung von MCDA-Verfahren kann demnach erst nach Abschluss der Vortests erfolgen.



Abb. 6: Schematische Darstellung der Eingabematrix für ein Outranking-Verfahren und der resultierenden Bewertung der drei Verfahren.

3.5 Fazit zu Arbeitspaket 2

Innerhalb des Arbeitspakets konnte eine ganzheitliche und standortunabhängige Bewertungsmatrix erstellt werden, die von Entscheidungsträgern als Leitfaden zur Identifizierung geeigneter Behandlungsverfahren genutzt werden kann. Es wurde gezeigt, dass eine Vielzahl von Parametern bei oberflächlicher Betrachtung in Frage kommen, eine Technologie für ihren Einsatz auszuwählen, es aber schlussendlich neben der generellen Eignung der Technologie vor allem auf die wirtschaftlichen Kriterien (Investitionskosten, Betriebskosten und Personal) ankommt. Nachrangig sind dann Verfahrensparameter, wenn diese keinen gravierenden Einfluss auf die Finanzierbarkeit des Verfahrens haben sollten.

Über die vorgestellte MCDA-Analyse konnte zudem ein objektiver, computer-gestützter Prozess zur Entscheidungsfindung aufgezeigt werden, der nicht nur die große Zahl unterschiedlicher KPIs berücksichtigen, sondern auch präzise auf verschiedenste unternehmensspezifische oder regulatorische Anforderungen angepasst werden kann. Nichtsdestotrotz muss festgehalten werden, dass die Bewertung der einzelnen Plattformtechnologien mittels der vorgeschlagenen KPIs und der MCDA-Analyse nur dann sinnvoll ist, wenn die Eingabewerte in die Bewertungsmatrix zuverlässig durch Vortests, bzw. idealerweise sogar durch (Langzeit-)Pilotversuche bestätigt wurden. Ein standortunabhängiges Ranking ohne Testergebnisse und ohne Ein-

beziehung konkreter Abwassermatrizen wird hingegen als nicht zielführend erachtet. Vielmehr wurden im Rahmen der vier angedachten Potentialanalysen exemplarisch Lösungsansätze erarbeitet, die dann als konkretes Fallbeispiel die Zielsetzung einer abwasserfreien Industrieproduktion befördern können (siehe Kapitel 5.3)

4 Ergebnisse Arbeitspaket 3: Festlegung und Charakterisierung eines Industriestandorts zur Durchführung der Potentialanalyse

Im Rahmen von Arbeitspaket 3 erfolgte in enger Abstimmung mit dem Auftraggeber eine Auswahl von Teilprojekten für eine vertiefte Potentialanalyse. Es wurden im Rahmen von bilateralen Projektbesprechungen mit den Standortunternehmen insgesamt 12 Themenbereiche ermittelt, die für eine Bearbeitung im Rahmen des Projekts generell infrage kommen. Für eine zielgerichtete Projektbearbeitung mit dem Ziel, vornehmlich Konzepte für eine geschlossenen Kreislaufführung in der Chemieindustrie zu etablieren, wurden besonders relevante Ansatzpunkte für eine weitere Bearbeitung selektiert.

Die Bereitschaft von insgesamt fünf Standortunternehmen, aktiv an einer Potentialanalyse mitzuwirken, war gegeben. Unabhängig davon war konkrete Sacharbeit am Standort aufgrund der immer noch anhaltenden Corona-Pandemie sowie der umfangreichen und zeitintensiven Geheimhaltungsvereinbarungen nur in eingeschränktem Maße möglich. Die Mitarbeitenden des Projektteams waren deutlich weniger bei Unternehmen vor Ort, als dies ursprünglich geplant war, so dass die Ergebnisse, die in AP 4 vorgestellt werden, vor allem durch Videokonferenzen, Telefon-Interviews und Mailverkehr ermittelt wurden.

5 Ergebnisse Arbeitspaket 4: Potentialanalyse

5.1 Arbeitspaket 4.1: Stakeholder-Prozess

Für das Gelingen des Projektes und die Sicherstellung der späteren Anwendbarkeit seiner Ergebnisse war es essenziell, alle betroffenen Stakeholder (Standortfirmen, Standortbetreiber, Behörden, Technologiegeber) für die Entwicklung konsensorientierter Lösungsansätze fortwährend in den Prozess miteinzubeziehen. Daher wurde als ein begleitendes Element ein Stakeholder-Prozess etabliert, in dem die Vertreter*innen der Unternehmen vor Ort mit dem Projektteam die Erwartungen und die sich entwickelnden Erkenntnisse und Lösungsansätze des Vorhabens diskutierten. Der Stakeholder-Prozess gliederte sich dabei in

- Bilaterale Treffen zwischen einzelnen Standortunternehmen und dem Projektteam sowie mit Herstellern

- Abwasserzuständigen-Treffen aller am Projekt beteiligter Standortunternehmen zusammen mit dem Projektteam
- Stakeholder-Meetings im Plenum zusammen mit den Auftraggebern

5.1.1 Bilaterale Stakeholder-Treffen

Innerhalb des Projekts fanden insgesamt 39 bilaterale Stakeholder-Treffen statt.

5.1.2 Abwasserzuständigen-Treffen

Als weiteres Element des Stakeholder-Prozesses wurden sog. Abwasserzuständigen-Treffen ins Leben gerufen. Ziel der Treffen war es, die unternehmensübergreifende Kommunikation am Standort zu fördern und Themen zu diskutieren, die für alle ansässigen Unternehmen relevant sind. Das Projektteam aus TUM-DECHEMA trat hierbei vorwiegend als Moderator auf. Eine Übersicht zu den individuellen Themensetzungen der drei durchgeführten Treffen ist in Tabelle 4 dargestellt:

Tab. 4: Übersicht zu den durchgeführten Abwasserzuständigen-Treffen.		
Datum	Teilnehmer	Thema
20.01.21	Alle Standortfirmen, Projektteam TUM+DECHEMA	Abwasseranfall in der Vakuumerzeugung
26.02.21	Alle Standortfirmen, Projektteam TUM+DECHEMA	Dezentrale Kreislaufschließung
28.04.21	Alle Standortfirmen, Projektteam TUM+DECHEMA	Wasserführende Prozesse – Steuerung und Überwachung der Parameter

5.1.3 Stakeholder-Treffen

Die Stakeholder-Treffen fanden aufgrund der Corona-Pandemie ausschließlich online statt:

Tab. 5: Übersicht zu den durchgeführten Stakeholder-Meetings.		
Datum	Teilnehmer	Thema
13.07.20	Alle Standortfirmen, LfU, StMUV, Projektteam TUM+DECHEMA	Kick-Off Meeting
26.10.20	Alle Standortfirmen, LfU, StMUV, Projektteam TUM+DECHEMA	1. Stakeholder-Meeting
18.05.21	Alle Standortfirmen, LfU, StMUV, Projektteam TUM+DECHEMA	2. Stakeholder-Meeting

25.11.21	Alle Standortfirmen, LfU, StMUV, Projektteam TUM+DECHEMA	3. Stakeholder-Meeting
26.04.22	Alle Standortfirmen, LfU, StMUV, Projektteam TUM+DECHEMA	4. Stakeholder-Meeting (Projektabschluss)

5.2 Arbeitspaket 4.2: Evaluierung der Plattformtechnologien und der Vorgehensweise aus Arbeitspaket 1 und 2 für den ausgewählten Standort

Ziel von Arbeitspaket 4.2 war es, für die in Arbeitspaket 3 ausgewählten Abwasserströme konkrete Lösungsansätze für eine möglichst abwasserfreie Industrieproduktion zu entwickeln. Die Bewertung geeigneter Behandlungsverfahren soll durch die in Arbeitspaket 2 entwickelte Vorgehensweise erfolgen. Gemäß Projektzeitplan wurde die Bearbeitung von Arbeitspaket 4.2 im Mai 2021 begonnen. Die entwickelten Zielsetzungen und Ansätze sind im Folgenden kurz zusammengefasst.

5.2.1 Behandlung heterogener Abwasserströme

Für die Behandlung heterogener Abwasserströme ist eine robuste Vorbehandlung mittels keramischer Membranfiltration angedacht. Ziel ist es, den relativ großvolumigen Abwasserstrom in ein idealerweise direkt wiederverwendbares Permeat und einen volumenreduzierten Konzentratstrom aufzuteilen. Zu diesem Ziel wurde ein Technologiegeber-Meeting zwischen einem Standortunternehmen und dem Hersteller keramischer Membranfiltration abgehalten, die benötigten Vortests vor Ort konnten jedoch aufgrund von restriktiven Corona-Beschränkungen nicht durchgeführt werden.

Im Sinne eines ganzheitlichen Konzepts wurde weiterhin an Strategien für die Konzentratbehandlung gearbeitet. Hierbei sollten entweder eine Vakuum- oder Membrandestillation zum Einsatz kommen. Ein wichtiges Ziel war hierbei die Nutzung der vorhandenen Abwärme, um neben einer stofflichen auch eine energetische Integration zu erreichen. Eine Liste mit Herstellern destillativer Verfahren wurde an den Projektpartner übergeben, ein Technologiegeber-Meeting wurde allerdings noch nicht realisiert, da die für eine sinnvolle Diskussion benötigten Ergebnisse aus Vortests mit der keramischen Membranfiltration pandemie-bedingt nicht verfügbar waren.

5.2.2 Kreislaufschließung für hochbelastete Waschwässer

In der betrachteten Potentialanalyse stellte die Komplexität der Abwasserzusammensetzung eine besondere Herausforderung dar. Vor allem die im Abwasser enthaltene hohe organische Fracht (TOC), verursacht durch die Wäsche organischer Phasen während eines chemischen Syntheseprozesses, stellte hohe Anforderungen an die Technologie zur Abwasserreinigung. Darüber hinaus bildet die Anlagenwirtschaftlichkeit ein wichtiges Entscheidungskriterium für

das Standortunternehmen. Die durchgeführte Potentialanalyse umfasste verschiedene Methoden der Entscheidungsunterstützung, in der die Interessen und Bedürfnisse des Projektpartners berücksichtigt wurden.

Aktuell wird das Wasser über einen Puffertank schubweise der zentralen Abwasserreinigungsanlage des Industrieparks zugeführt, wodurch hohe Abwasserabgabegebühren verursacht werden. Zudem birgt die hohe organische Belastung das Risiko eines Rückstaus im Puffertank in Phasen, in denen nicht ausreichend Abwasser an die ZARA abgegeben werden darf. Es galt, Technologien zu ermitteln, die mit der hohen organischen Belastung ($\text{TOC} > 70.000 \text{ mg/L}$) des Waschwassers umgehen können.

Im Rahmen einer Potentialanalyse zu dezentralen Lösungen der Industrieabwasserreinigung ist eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung insbesondere dann sinnvoll, wenn sich einzelne Behandlungsvarianten im Projektkontext bereits als technologisch geeignet erwiesen haben. Die Kostenvergleichsrechnung stellt somit nach einer inhaltlichen Recherche zum Stand der Technik, einer KPI-Identifizierung und deren Analyse mit Bezug auf potenziell geeignete Technologien, die nächste Ebene der ganzheitlichen Eignungsprüfung dar. Um das Potential der Technologiealternativen auch wirtschaftlich kalkulier- und vergleichbar machen zu können, wurden im ersten Schritt Informationen zu Kostenpositionen, die im Ist-Zustand anfallen, in Erfahrung gebracht. Sie wurden den Kosten, die mit der dezentralen Behandlungsalternative einhergehen, gegenübergestellt. Berücksichtigt wurden bei der Vergleichsrechnung lediglich diejenigen Kosten, die für eine der Entscheidungsalternativen tatsächlich relevant sind. Kosten, die unabhängig von den betrachteten Varianten in derselben Höhe anfallen, sind nicht entscheidungsrelevant und können vernachlässigt werden.

Zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der dezentralen Abwasserreinigung wurde ein statisches Berechnungsverfahren herangezogen. Hierbei wurde auf jährliche Durchschnittswerte, etwa bei den Betriebskosten [€/Jahr] zurückgegriffen und die unterschiedlichen Zeitpunkte für Ein- und Auszahlungen vernachlässigt. Zudem wurde auf die Berücksichtigung der Positionen zu Abschreibungen, kalkulatorischen Zinsen und Annuitäten verzichtet.

Für die Durchführung der Kostenvergleichsrechnung wurden Kosten aus drei Bereichen unterschieden:

- Investitionskosten (z.B.: Planungs- & Grundstückskosten, Anschaffungskosten von Bauteilen und Anlagen, Einbau und Inbetriebnahme)
- Laufende Kosten (z.B. Personal- oder Sachkosten, Energie, regelmäßige Wartung)
- Reinvestitionskosten (z.B. Anlagenteile, deren Nutzungsdauer kürzer als die geplante Gesamtnutzungsdauer sind, wie Pumpen, Verdichter etc.)

Wird ein Kostenvergleich zwischen dem Ist-Zustand (Abwasserentsorgung durch Weitergabe an die ZARA) und einer dezentralen Reinigungstechnologie angestrebt, so sind für den Ist-Zustand auch diejenigen Kosten zu berücksichtigen, die durch die Implementierung einer Anlage wegfallen oder hinzukommen würden. Ziel der Kostenvergleichsrechnung war in diesem Fall die Ermittlung der Amortisationsdauer. Sie gibt die Zeitdauer bis zur Wiederfreisetzung von Kapital an, das durch eine Investition gebundenen wurde. So kann der Zeitpunkt bestimmt werden, ab dem eine dezentrale Abwasserreinigung für das Unternehmen wirtschaftlich rentabel ist.

Individuelle Gewichtung von KPIs

Die individuelle Bewertung der KPIs, mit Bezug auf vorliegende Rahmenbedingungen, Bedürfnisse, finanzielle Mittel und Kapazitäten des Chemieunternehmens ist in den Tabellen 6 und 7 dargestellt.

Tab. 6: Ergebnisse der relativen Gewichtung von ausgewählten KPIs durch den Projektpartner.

		Sehr wichtig	Wichtig	Neutral	Marginal
Anschaffungskosten					
Betriebskosten					
Personalaufwand					
Wartungsaufwand					
Behandlungseffektivität					
Robustheit /Zuverlässigkeit					
Komplexität					
Platzbedarf					
Infrastrukturaufwand					
Nachrüstbarkeit					
dyn. Betriebsführung					
Klimatische Aspekte					
Direkte Emissionen					
indirekte Emissionen					
Wasser-Reuse-Potential					
Produktqualität					
stoffliche Entlastung					
hydraulische Entlastung					

Als „sehr wichtig“ wurden die beiden KPIs „Behandlungseffektivität“ und „stoffliche Entlastung [der ZARA]“ eingestuft. Die detaillierte Einordnung der Behandlungseffektivität (vgl. Tabelle 7) gibt Aufschluss über die Anforderungen, die an Anlagen zur dezentralen Abwasserreinigung gestellt werden. Werte um 70% wurden demnach als „mittel“, eine Effektivität ab 90% als „hoch“ eingestuft. Da die stoffliche Entlastung der ZARA eng mit der Behandlungseffektivität verknüpft ist, wurde auch ihr eine große Bedeutung („sehr wichtig“) beigemessen. Als

„wichtig“ wurden die Betriebskosten, der Wartungsaufwand, die Robustheit und die Komplexität der Technologie, der dynamische Betrieb, die hydraulische Entlastung der ZARA sowie das Wiederverwendungspotential des Wassers eingestuft, neben den Emissionen (direkt/indirekt). Die genannten Parameter wurden quantifiziert und zusätzlich zu den Betriebskosten eingegrenzt. Die Betriebskosten wurden ab 10.000 €, Anschaffungskosten ab 1.000.000 € als „hoch“ angegeben und als obere „Schmerzgrenze“ verstanden. Der mittlere, benötigte Platzbedarf für die Anlagentechnik wurde bei 20 m² eingeordnet.

Tab. 7: Ergebnisse zur quantitativen Einordnung von ausgewählten KPIs durch den Projektpartner.

Bewertung KPIs	Niedrig	Mittel	Hoch
Behandlungseffektivität [%]	50	70	90
Anschaffungskosten [€]	100.000	500.000	1.000.000
Betriebskosten [€/Monat]	1.000	5.000	10.000
Platzbedarf [m ² bzw. m ³]	5	20	50

Auf Grundlage der Literaturrecherche rückten destruktive, oxidative Technologien, die seit Jahren im Fokus der wissenschaftlichen Betrachtung stehen und beste Ergebnisse hinsichtlich ihrer Behandlungseffektivität erzielen, zunächst in den Vordergrund. Der Übertritt in die angewandte Phase und der Kontakt zu Herstellern verdeutlichte jedoch eine Diskrepanz zwischen wissenschaftlichen, häufig im Labormaßstab erzielten Reinigungsergebnissen und der Anlageneignung für komplexe, reale Anwendungsfälle. Von ursprünglich 15 kontaktierten Technologiegebern kam es daher nur in einigen Fällen zu einem weiterführenden Dialog, und manche Herstellerfirmen gaben an, dass die Kombination aus geringer Abwassermenge und der verhältnismäßig hohen organischen Belastung wirtschaftlich nicht rentabel sei. Insgesamt kamen vier Besprechungstermine mit Herstellern verschiedener (oxidativer und nicht-oxidativer) Produktvarianten und dem Industriepartner zustande. Nach Abschluss der Technologiegebermeetings und gründlicher Erwägung aller Handlungsalternativen erschien die Nutzung einer Vakuumdestillation als am vielversprechendsten.

Nach Fokus auf diese Technologie und einem durchgeführten Vortest zeigte sich, dass die Vakuumverdampfung des Anbieters technologisch für das vorliegende Abwasser geeignet war. Da die Voraussetzung der allgemeinen technologischen Eignung erfüllt war und auch die stoffliche Belastung der ZARA durch die Anlage deutlich reduziert werden konnte, rückte eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Technologie in den Vordergrund.

Kostenvergleichsrechnung zur Vakuumdestillation

Die Kostenvergleichsrechnung erfolgt auf Grundlage der Vortest-Ergebnisse der Vakuumdestillation. Durch die Bestätigung der Prozesseignung und die Empfehlung für einen speziellen Anlagentyp konnten Kosten für die Anlage, die Wartung, und zusätzliches Material (Entschäumer, Strom etc.) beziffert werden.

Die Gesamtkosten für einen erfolgreichen Betrieb setzen sich aus einmaligen Investitionskosten und laufenden, variablen Kosten zusammen. Die Investitionskosten ergaben sich aus Kosten für die Anlagentechnik, zusätzlichen Bauteilen für eine automatische pH-Korrektur sowie für einen (optionalen) Wartungsvertrag. Die variablen Kosten berücksichtigten den Energieverbrauch, Personalkosten, Ersatz- und Verschleißteilkosten sowie die Entsorgung des Konzentrats.

Zur Auswahl der Kriterien, die innerhalb der MCDA-Analyseherangezogen wurden, wurde auch die individuell gewichtete KPI-Tabelle durch den Projektpartner berücksichtigt. Die Durchführung der MCDA und eine anschließende Sensitivitätsanalyse zeigten, dass sich die Handlungsempfehlung zum Einsatz der Vakuumdestillation auch bei verschiedensten Anpassungen von Präferenzparametern und der Kriteriengewichtung nicht veränderte.

Die Ergebnisse der MCDA im Kontext dieser Potentialanalyse sind unter Vorbehalt zu interpretieren. Sie enthalten Unsicherheiten durch die subjektive Wirksamkeit der gewählten Parameter. Insbesondere die Kriteriengewichtung und die Wahl der Präferenzkurve können wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisdarstellung nehmen. Dennoch bleibt festzuhalten, dass eine MCDA-Analyse den Entscheidungsprozess sinnvoll und effektiv unterstützen kann.

Während der Kontaktaufnahme mit den Herstellern unterschiedlicher Behandlungstechnologien zeigte sich, dass auch für die Technologiegeber ein Anreiz geschaffen werden muss, um an der Konzeption für einen nicht-alltäglichen Anwendungsfall mitzuwirken. Der Auswahlprozess kann bereits in dieser Projektphase viel Zeit und Energie erfordern und mitunter nicht sofort zu den gewünschten Ergebnissen führen.

Eine erste Einschätzung des Standortbetreibers machte deutlich, dass das Einsparpotential durch die dezentrale Behandlung eines Abwasserteilstroms deutlich größer sein könnte als in der statischen Investitionsrechnung angenommen, da durch die erreichbare Reduzierung der Kohlenstofffracht eine signifikante Senkung der Abwasserreinigungskosten einhergehen würde. Zusätzlich entfernter Stickstoff kann zu einer Entlastung der biologischen Reinigungsstufe führen, und damit zu einer Entlastung der gesamten Abwasserbehandlung. Wirtschaftlich profitieren würde davon nicht nur der gesamte Industriepark, sondern auch - und explizit - das Standortunternehmen.

5.2.3 Behandlung PFAS-haltiger Abwässer

Da am Standort zwei Fluorpolymerhersteller angesiedelt sind, ist auch die Potentialanalyse zur Behandlung PFAS-haltiger Abwässer zweigeteilt. Für den ersten Hersteller wurde konkret an der Aufbereitung eines Abwasserstroms vor der Übergabe an die ZARA gearbeitet. Hierzu wurden drei Verfahrensalternativen untersucht:

- Ozonfraktionierung, ggf. gekoppelt mit elektrochemischer Oxidation
- Abwasserstrippung für die Abscheidung volatiler PFAS
- Aktivkohle-Adsorption für die Abluft der Abwasserstrippung bzw. für die Behandlung von vorgereinigtem Abwasser

Zur Erarbeitung einer konkreten Behandlungsstrategie wurden insgesamt drei Hersteller von Plattformtechnologien in den Stakeholder-Prozess miteingebunden. Die Durchführung von Vortests wurde jedoch aufgrund innerbetrieblicher Prozesse auf Mai 2022 verschoben, sodass innerhalb der Projektlaufzeit keine Vortestergebnisse erhalten wurden.

Da für den zweiten Hersteller die Datenfreigabe erst zur Mitte des Projekts erteilt wurde, konnte mit der Bearbeitung erst verzögert begonnen werden. Aufgrund bereits bestehender Pilotanlagen sollte hier insbesondere auf eine Verbesserung, Weiterentwicklung und großtechnische Umsetzung der Piloten hingewirkt werden. Auch zu diesem Ziel wurde die Informationsbroschüre „Leitfaden zur Behandlung PFAS-haltiger Industrieabwässer“ erstellt, um das Standortunternehmen bei seinem innerbetrieblichen Engagement, PFAS-haltige Abwasserströme zu vermeiden bzw. zu minimieren, zu unterstützen. Es wird darauf hingewiesen, dass solch interne Maßnahmen eine weitere Möglichkeit darstellen, Anforderungen der Abwasserbehandlung zu begegnen. Die hier vorgestellten Maßnahmen und Technologien sind lediglich als Handreichung zu verstehen, es bleibt den Unternehmen freigestellt, eigene Maßnahmen voranzutreiben und diese initiativ in Kooperation mit weiteren Standortunternehmen umzusetzen.

5.2.4 Management salzhaltiger Abwässer

Die Potentialanalyse zu den salzhaltigen Abwässern gliedert sich ebenfalls in zwei Teilbereiche. Für ein Standortunternehmen sollte ermittelt werden, mit welchen Plattformtechnologien eine Aufbereitung von Regenerationsabwässern der Ionenaustauscher realisiert werden kann, sodass eine Direkteinleitung in das aufnehmende Oberflächengewässer möglich wird. Vordergründiges Ziel war hierbei die hydraulische Entlastung der ZARA. Die Miteinbeziehung von Technologiegebern war für das dritte Quartal 2021 vorgesehen, es erfolgte Anfang 2022 ein Probenversand an eins der Unternehmen. Obwohl die Technologie der Druckentspannungsflotation erfolgsversprechende Ergebnisse lieferte, wird das Thema nunmehr bis auf weiteres unternehmensintern gelöst, um die Ursache der problemverursachenden Stoffe zu ermitteln und zu minimieren.

Für ein weiteres Standortunternehmen sollten die Möglichkeiten einer Umwidmung salzhaltiger Abwasserströme diskutiert werden. Aufgrund einer hervorragenden chemischen Qualität der „Abwässer“ schien beispielsweise ein Einsatz als Salzsole im Winterdienst eine attraktive Möglichkeit. Im Rahmen der Potentialanalyse sollte die chemische Eignung nochmals im Detail überprüft werden. Bei bestätigter Eignung soll die Bedarfsituation, das Vorhandensein benötigter Infrastruktur (z.B. ausreichende Lagerkapazitäten, Kombistreuer für die Ausbringung der Sole) und die wirtschaftliche Umsetzbarkeit geprüft werden.

Um die überschüssige NaCl-Sole des Standortunternehmens als Streumittel im Winterdienst einsetzen zu können, müssen ökologische und ökonomische Gesichtspunkte betrachtet werden. So muss die Sole eine Zertifizierung durch das bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) für ihren Einsatz auf der Straße erhalten.

Eine mögliche Zertifizierung erfolgt nach folgendem Schema:

- Schritt 1: Schaffen eines Interesses der bundesdeutschen Autobahn GmbH an einem Soleeinsatz als Streumittel
- Schritt 2: Kontaktierung des bayerischen Ministeriums für Wohnen, Bau und Verkehr, das sich zur Einschätzung der Situation an das Umweltministerium wendet. Das LfU kann dann durch das Umweltministerium wieder mit dem Projekt beauftragt werden und eine Untersuchung der Sole und damit einhergehend Zertifizierung veranlassen

Alternativ könnte die Sole im privaten Auftrag analysiert werden. Nach Rückmeldung eines Labors sollten weder REACH noch das Abfallrecht ein Hindernis für die Zertifizierung der Sole als Streumittel darstellen. Die Anforderungen nach REACH seien durch die Verwendung von natürlichem Steinsalz höchstwahrscheinlich erfüllt. Hinzu komme, dass die Verwendung der Sole als Streumittel laut Abfallrecht ordnungsgemäß sei. Sole wird, insbesondere als Bestandteil von Feuchtsalz, sowohl in Deutschland als auch in Österreich bereits als Streumittel genutzt.

Es wurde betont, dass im Zuge der Untersuchung der Sole auf verwendete Fällmittel und organische Prozesshilfsstoffe geachtet werden müsste, da es sich bei der Sole um ein Überschussprodukt handelt. Die eingesetzten Chemikalien sind für den Fall des Standortunternehmens in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8: Übersicht der Prozesshilfsstoffe.	
Stoff	Zweck
Natriumsulfid (Na ₂ S)	Chemische Entchlorung
Bariumcarbonat (BaCO ₃)	Fällmittel für Sulfat
Soda (Na ₂ CO ₃) (entsteht im Prozess)	Fällmittel für Calcium
NaOH	Alkalisierungsmittel
Nalco-Polymer	Flockungsmittel vor 1. FS*
FeCl ₃	Flockungsmittel vor 2. FS*
Salzsäure (HCl)	Ansäuerungsmittel
*Filterstufe des Solereinigungsprozesses	

Bereits zu Beginn des Projekts, wurde durch das Standortunternehmen eine Übersicht erstellt, in der die zu diesem Zeitpunkt als relevant erscheinenden Fremdstoffe in der Sole erfasst wurden.

Wie aus Tabellen 9 und 10 ersichtlich, können alle relevanten Grenzwerte für NaCl-Sole als Streumittel nach DIN EN 16811-1 erreicht werden, was eine gute Voraussetzung für ein erfolgreiches Zertifizierungsverfahren ist. Der Anteil an Chlorat in der Sole kann durch verschiedene Prozesse gesenkt bis entfernt werden, u.a. durch Adsorption an Aktivkohle, oder durch Abbaureaktionen mit Wasserstoff.

Tabelle 9: Vergleich der erforderlichen Konzentrationen durch DIN EN 1681-1 mit den Konzentrationen der Sole.		
Parameter	Grenzwert, [% Massenanteil]	Erreichter Wert [% Massenanteil]
NaCl	18-26	14-16*
Sulfat	≤ 0,6	0,4-0,5
Wasserunlösliche Stoffe	≤ 0,03**	≤ 0,001
*Erforderliche Konzentration durch Standortunternehmen herstellbar		
**10 l Sole müssen nach der Norm rückstandslos ein 0,5 mm-Prüfsieb passieren.		

Tabelle 10: Vergleich der erforderlichen Konzentrationen durch DIN EN 1681-1 mit den Konzentrationen der vorhandenen Sole		
Parameter	Grenzwert [mg/kg Trocken-substanz]	Erreichter Wert [mg/kg Trocken-substanz]
pH-Wert von 10%iger Lösung	Zwischen 5 und 10	Zwischen 7 und 9
Aluminium	≤ 50	< 1
Arsen	$\leq 2,5$	$< 0,2$
Cadmium	≤ 2	$< 0,1$
Kobalt	≤ 2	$< 0,1$
Chrom	≤ 5	$< 0,1$
Kupfer	≤ 5	$< 0,1$
Quecksilber	$\leq 0,5$	$< 0,05$
Nickel	≤ 5	$< 0,1$
Blei	≤ 5	$< 0,2$
Zink	≤ 20	$< 0,1$
Kohlenwasserstoffe	≤ 100	< 60

Die für die chemisch-biologische Untersuchung der im deutschen Winterdienst einzusetzenen NaCl-Sole umfassen:

- DIN EN 16811-1
- DIN EN 16811-3 (ggf. bei hohem Fremdstoffaufkommen)
- Registrierung nach REACH
- Abfallrecht

Damit sich der Aufwand durch die Zertifizierung und Planung für den Einsatz der überschüssigen Sole für das Standortunternehmen wirtschaftlich lohnt, müssen sich Käufer für das Produkt finden. Mögliche Abnahmestellen für das Produkt sind Straßen- und Autobahnmeistereien, sowohl in Bayern als auch in den österreichischen Bundesländern Oberösterreich, Salzburg und Tirol. Eine größere Distanz wurde aufgrund der dann hohen anfallenden Transportkosten nicht berücksichtigt. Sowohl Autobahn-, als auch Straßenmeistereien produzieren ihre Sole, die flächendeckend für die Streuung mit Feuchtsalz FS30 (70% Trockensalz, 30% Sole)

verwendet wird, im Normalfall nach Bedarf selbst. Deshalb sind auch ihre Lagerkapazitäten mit ca. 120 m³ je Autobahnmeisterei und 30-50 m³ je Straßenmeisterei, die sich nach dem Tagesbedarf richten, eher gering.

Sollte die Zertifizierung der Sole abgeschlossen sein und sich für die interessierten Institutionen der Ankauf der Sole und die Errichtung einer logistischen Infrastruktur als vorteilhaft erweisen, könnte die gesamte jährlich produzierte Menge der NaCl-Sole von ca. 12.000 m³ im Winterdienst eingesetzt werden. Somit wäre der Eintrag des salzhaltigen Abwassers in das aufnehmende Fließgewässer deutlich reduziert.

5.3 Fazit zu Arbeitspaket 4

Wie aus der großen Zahl an bilateralen und gemeinschaftlichen Veranstaltungen hervorgeht, konnte der Stakeholder-Prozess erfolgreich und in vertrauensvoller Zusammenarbeit durchgeführt werden. Die Initiative, allseits relevante Themen in Form von Abwasserzuständigen-Treffen zu diskutieren, wurde von den Unternehmen sehr begrüßt und konnte die firmenübergreifende Kommunikation stärken. Durch die Bereitschaft der Unternehmen, im Rahmen bzw. auf Initiative des Projekts auch Pilotversuche durchzuführen, konnten zudem in fünf Teilprojekten externe Hersteller für Plattformtechnologien in den Stakeholder-Prozess miteinbezogen werden. Nach Abschluss der Vortests in zumindest einem Fall konnte die Bewertungsmatrix aus Arbeitspaket 2 sinnvoll angewendet werden, sodass im Rahmen der Potentialanalysen eine aussagekräftige Bewertung der angedachten Verfahrensalternativen vorgenommen werden konnte. Die Ergebnisse aus den Vortests versprechen eine signifikante Abwassereinsparung für den gesamten Standort und sollten in Abstimmung mit dem Standortbetreiber weiter vorangetrieben werden.

6 Fazit, Empfehlungen und Ausblick

Ziel des Projektes war es, wesentliche Grundlagen und Entscheidungshilfen zu entwickeln, den Abwasseranfall und die Emission von (Schad)stoffen in der industriellen Produktion am Beispiel der Prozessindustrie (Schwerpunkt chemische Industrie) zu vermindern und eine weitestgehende Kreislaufführung und somit eine möglichst abwasserfreie Industrieproduktion zu ermöglichen. Dabei sollten bereits bekannte Verfahren und Vorgehensweisen zusammengestellt und bewertet werden. Am Beispiel der Prozessindustrie sollten verfügbare Plattformtechnologien für die Aufbereitung und Wiederverwendung von Betriebsabwasser vergleichend dargestellt werden. Des Weiteren sollte am Beispiel eines realen Standortes einer ausgewählten Prozessindustrie und den dort insbesondere gewässerrelevanten Produktionen eine allgemein anwendbare Vorgehensweise und Entscheidungshilfe für die Identifizierung von relevanten Produktionsprozessen entwickelt werden, bei denen Aufbereitung und/oder Kreislaufführung von Betriebsabwasser sinnvoll angewendet werden kann (Potenzialanalyse).

Die Ergebnisse dieser Untersuchung wurden in Form von Handlungsempfehlungen an relevante Industriebetriebe übermittelt.

Das Projekt wurde von der Corona-Pandemie überschattet, die physische Treffen bis auf wenige Ausnahmen unmöglich machte. Die Stakeholdertreffen fanden ausschließlich virtuell statt, umfassende Begehungen am Standort konnten nur in Einzelfällen durchgeführt werden. Die laufende Kommunikation mit den Partnern und Unternehmen erfolgte ebenfalls virtuell. Dennoch konnte das Projekt die im Rahmen der Aufgabenstellung vorgegebenen Maßnahmen, unter der Bereitschaft der Standortunternehmen an dem Vorhaben mitzuwirken, umsetzen.

Die Charakterisierung relevanter Abwasserströme sowie die Recherche zu geeigneten, gegenwärtig verfügbaren Plattformtechnologien konnte erfolgreich abgeschlossen werden. Da die meist unternehmensspezifischen Recherchen jedoch auch für andere Standortunternehmen bzw. andere Industriebetriebe von Interesse sein könnten, wurden die erlangten Informationen in Form von Informationsbroschüren aufbereitet. Ziel der Broschüren ist die kompakte Darstellung der verschiedenen Verfahrensprinzipien und deren Anwendungsfelder sowie die zugehörige Auflistung am Markt befindlicher Behandlungsverfahren, Verfahrensoptimierungen und Hersteller. Die Broschüren sollen es Industriebetrieben ermöglichen, einen leicht zugänglichen Blick auf den *State-of-the-Art* der Behandlungsverfahren und die zugehörigen Hersteller zu erhalten.

Es konnte eine Vorgehensweise etabliert werden, die mittels einer ganzheitlichen Bewertungsmatrix aus 20 KPIs und einer computergestützten MCDA-Analyse eine transparente und objektive Identifikation geeigneter Verfahrensalternativen ermöglicht. Zugleich wurde in der Projektbearbeitung sehr deutlich, dass eine verlässliche Bewertung der verfügbaren Handlungsalternativen stets individuell erfolgen muss und es der Durchführung von Vortests bedarf.

Es wurden im Rahmen des Vorhabens verschiedene Chemieparks in Deutschland zu ihren Behandlungsweisen befragt und eine Übertragbarkeit auf den im Rahmen dieses Projekts untersuchten Standort analysiert. Auch hier war die wesentliche Erkenntnis, dass eine generelle Übertragbarkeit von erarbeiteten Ergebnissen nicht ohne Weiteres gegeben ist, da zu viele individuelle Parameter im jeweiligen Fall einfließen und zu betrachten sind.

Viele der angefragten Standorte haben Unternehmen angesiedelt, deren wasserabhängige Produktion deutlich über 80% der Gesamtproduktion liegt, was auch bedeutet, dass Wasserwiederverwendung ein angestrebtes Gesamtziel ist. Vor dem Hintergrund klimatischer Extremereignisse sowie der grundsätzlichen Klimaveränderung wird angeregt, Technologien zur Teilstrombehandlung und damit der grundsätzlichen Ermöglichung der Wiederverwendung für die jeweiligen Standorte in regelmäßigen Abständen zu evaluieren, um mittelfristig einen

flächendeckenden Einsatz einzuführen. Standortbetreiber sollten mit den angesiedelten Unternehmen einen „Masterplan Wasserwiederverwendung“ entwickeln, der auch Ressourcen für die Planung und die Ermittlung möglicher Technologien und Strategien vorsieht.

Hierzu ist es äußerst wichtig, eine kontinuierliche Kommunikation zwischen dem Standortbetreiber und den Unternehmen zu etablieren und zu pflegen. Viele Standorte sind über Jahrzehnte gewachsen und haben ihre individuellen Herausforderungen, die nur durch gemeinsame Ideen und Diskussionen gemeistert werden können. Die in diesem Projekt etablierten Treffen aller Abwasserzuständigen am Standort konnten merklich dazu beitragen, dass z.B. die Diskussion zur Einführung neuer Pumpentechnologien zur Vakuumerzeugung begonnen wurde. Auch was den Kühlwasserverbrauch angeht konnten wertvolle Anregungen durch die Treffen gegeben werden, die in zukünftige Zusammenarbeit münden kann.

Grundsätzlich ist es eine Kostenfrage, ob und zu welchem Zeitpunkt Technologien eingeführt werden. Wenn die grundsätzliche Machbarkeit gegeben ist, obliegt es den Unternehmen, sich anhand von betriebswirtschaftlichen Berechnungen für oder gegen den Einsatz neuer Abwasserbehandlungstechnologien zu entscheiden. Die den Unternehmen vorgestellten Technologien für die ermittelten Teilströme sollen im Anschluss an dieses Vorhaben im Rahmen von Pilotstudien weiter untersucht werden – hier ist es Aufgabe der Unternehmen, eng mit den Technologiegebern zusammenzuarbeiten, um idealerweise eine Umsetzung in den nächsten 5 Jahren zu realisieren. Das gilt auch für den möglichen (Wieder)Einsatz von werthaltigen Stoffen, die aus den behandelten Teilströmen extrahiert werden können. Auch hier spielt im Wesentlichen die Wirtschaftlichkeit eine Rolle und erst in zweiter Folge Gedanken zum Umweltschutz.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine abwasserfreie Produktion kein fernes Zukunftsziel sein muss. Es müssen aber sowohl kommunikative Voraussetzungen (z.B. Dialog zwischen Technologiegebern und Produktionsbetrieben) und technische Anreize, als auch begleitende regulatorische Rahmenbedingungen geschaffen werden, um Wasser effizienter im Kreislauf zu führen und Inhaltsstoffe frühestmöglich aus dem zu behandelnden Abwasser zu entfernen. Eine alleinige zentrale Behandlung des gesammelten Abwassers am Ende der Produktion kann, gerade wenn verschiedene Teilströme zusammenfließen, hohe Kosten und geringe Steuerbarkeit verursachen. Ziel von Standortbetreibern und Unternehmen sollte es daher sein, nach bestmöglichen Technologien zu suchen, die eine vollumfängliche Teilstrombehandlung sowohl ökologisch als auch ökonomisch umsetzen können.

7 Quellenverzeichnis

- Amin, S. K., Abdallah, H. A. M., Roushdy, M. H., & El-Sherbiny, S. A. (2016). An overview of production and development of ceramic membranes. *International Journal of Applied Engineering Research*, *11*(12), 7708–7721.
- Beery, M., Pflieger, C., & Weyd, M. (2020). Sustainable industrial wastewater reuse using ceramic nanofiltration: Results from two pilot projects in the oil and gas and the ceramics industries. *Journal of Water Reuse and Desalination*, *10*(4), 462–474. <https://doi.org/10.2166/wrd.2020.029>
- EVO CRA. (2016). *OCRA removes PFAS from contaminated water to below USA EPA drinking water criteria*. https://evocra.com.au/source-assets/images/pdf/evocra-pfas-removal-case-study_v3.pdf
- EVO CRA, & ARCADIS. (2020). *Global PFAS Remediation Experts*. <https://indd.adobe.com/view/5cb5ddea-b803-4d6d-be60-f3f9496fd664>
- Fujioka, T., Khan, S. J., McDonald, J. A., & Nghiem, L. D. (2014). Nanofiltration of trace organic chemicals: A comparison between ceramic and polymeric membranes. *Separation and Purification Technology*, *136*, 258–264. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.08.039>
- Held, T., & Reinhard, M. (2020). *Sanierungsmanagement für lokale und flächenhafte PFAS-Kontaminationen - Abschlussbericht*. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/sanierungsmanagement-fuer-lokale-flaechenhafte-pfas>
- Kramer, F. C., Shang, R., Heijman, S. G. J., Scherrenberg, S. M., Van Lier, J. B., & Rietveld, L. C. (2015). Direct water reclamation from sewage using ceramic tight ultra- and nanofiltration. *Separation and Purification Technology*, *147*, 329–336. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.04.008>
- Luan, M., Jing, G., Piao, Y., Liu, D., & Jin, L. (2017). Treatment of refractory organic pollutants in industrial wastewater by wet air oxidation. *Arabian Journal of Chemistry*, *10*, 769–776. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2012.12.003>
- Motta Cabrera, S., Winnubst, L., Richter, H., Voigt, I., & Nijmeijer, A. (2021). Industrial application of ceramic nanofiltration membranes for water treatment in oil sands mines. *Separation and Purification Technology*, *256*, 117821. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117821>
- Pietrelli, L., Ferro, S., Reverberi, A. P., & Vocciante, M. (2021). Removal of polyethylene glycols from wastewater: A comparison of different approaches. *Chemosphere*, *273*, 129725. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129725>
- Ross, I., Houtz, E., McDonough, J., Quinnan, J., & Burdick, J. (2018). *Characterization and Treatment of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs)*. https://www.researchgate.net/publication/325273851_Characterization_and_Treatment_of_Poly-_and_Perfluoroalkyl_Substances_PFASs

- Schrenk, D., Bignami, M., Bodin, L., Chipman, J. K., Grasl-Kraupp, B., Hogstrand, C., Hoogenboom, L. R., Leblanc, J.-C., Nebbia, C. S., Nielsen, E., Ntzani, E., Petersen, A., Sand, S., Vleminckx, C., Wallace, H., Barreg, L., Ceccatelli, S., Knutsen, H. K., Rose, M., ... Schwerdtle, T. (2020). Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food. *EFSA Journal*, 18. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.6223>
- Stoiber, T., Evans, S., & Naidenko, O. V. (2020). Disposal of products and materials containing per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A cyclical problem. *Chemosphere*, 260, 127659. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127659>
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2003). *Wastewater engineering: Treatment and reuse* (4th edition). New York: McGraw-Hill.
- Tungler, A., Szabados, E., & Hosseini, A. M. (2015). Wet Air Oxidation of Aqueous Wastes. *Intech*, 153–178. <http://www.intechopen.com/books/trends-in-telecommunications-technologies/gps-total-electron-content-tec-prediction-at-ionosphere-layer-over-the-equatorial-region%0AInTec%0Ahttp://www.asociatiamhc.ro/wp-content/uploads/2013/11/Guide-to-Hydropower.pdf>
- Wencki, K., Thöne, V., Ante, A., Hogen, T., Hohmann, C., Tettenborn, F., Pohl, D., Preiss, P., & Jungfer, C. (2020). Approaches for the evaluation of future-oriented technologies and concepts in the field of water reuse and desalination. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 10(4), 269–283. <https://doi.org/10.2166/wrd.2020.022>
- Zhao, Y. Y., Wang, X. M., Yang, H. W., & Xie, Y. F. F. (2018). Effects of organic fouling and cleaning on the retention of pharmaceutically active compounds by ceramic nanofiltration membranes. *Journal of Membrane Science*, 563, 734–742. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.06.047>

8 Anhang

8.1 Anhang 1 – Fragebogen an Industriestandorte der chemischen Industrie

I) Frischwassernutzung

- 1. Haben Sie Wasseraufbereitungstechnologie für ihr Prozesswasser und Kühlwasser installiert?**
 - wenn ja, können Sie diese grob skizzieren (inkl. welche Arten/Qualitäten und Volumina von Wässern Sie bereitstellen)?
 - Prozesswasser:
 - Kühlwasser:
- 2. Verwenden Sie überwiegend: Grundwasser, Flusswasser, ...?**
- 3. Findet eine Regenwassernutzung statt? Wenn ja, in welcher Form?**
- 4. Wasserabhängige Produktionsprozesse**
 - Wie hoch ist der Anteil wasserabhängiger Produktionsprozesse
 - Welcher Anteil dieser Prozesse arbeitet im Batchbetrieb, welcher kontinuierlich?
- 5. Steuerung der Behandlungsprozesse**
 - Welche Parameter werden überwacht?
 - Wo, wie und in welcher Häufigkeit?
 - Wie fließen sie in die Anlagensteuerung ein (manuell, Dashboard, volldigital?)

II) Kühlwassernutzung

1. Aus welchem Frischwasserstrom beziehen Sie Kühlwasser?

2. wird der Kühlwasserstrom geregelt?

- Wenn ja, wie?
- Findet eine Kreislaufführung des Kühlwassers statt?

3. Wird das Kühlwasser noch anderweitig verwendet und wenn ja, wie? (Alternativ: Einleitung in Fluss/Kläranlage?)

III) Abwasseranfall in der Produktion

1. Abwasseranfall in den Produktionsprozessen /-betrieben

- Findet ein (Teilstrom)behandlung am Anfallort statt? Wenn ja, in welcher Form und welchem Umfang?

2. Mengen- und Qualitätskontrolle von Abwasser, das direkt bei der Produktion anfällt

- Schwanken die Mengen, Belastungen stark? Wenn ja, wie hoch liegt dieser variable Anteil in Relation zu den Gesamtmengen?
- Wo, wie und in welcher Häufigkeit werden einzelne Parameter (welche?) der prozesseigenen Abwässer überwacht (falls überhaupt?)

3. Steuerung der Behandlungsprozesse

- Welche Parameter werden überwacht?
- Wo, wie und in welcher Häufigkeit?
- Wie fließen sie in die Anlagensteuerung ein (manuell, Dashboard, volldigital?)

IV) Abwassersammlung

1. Charakterisieren Sie Ihr Abwassersammelsystem

- Direkte Kläranlagen-Anbindung der einzelnen Betriebe, zentrales Sammelsystem oder andere zu benennende Form?

- Gibt es eine Überwachung im System? Wenn ja, was sind die Überwachungspunkte?

- Überwachungsparameter & Frequenz?

- Gibt es Puffer-/Ausgleichs-/Rückhaltebecken oder Vorrichtungen?

2. Wie ist die Regenwasserbewirtschaftung in das Abwassersammel- und -behandlungssystem integriert?

V) Abwasserbehandlung

1. Zweck der Behandlung?

- Wird die Wiederverwendung von Wasser angestrebt?
- Einleitung in öffentliche Kanalisation, Fluss, See, Meer?

2. Welche Technologien zur Abwasserbehandlung sind im Einsatz?

- Bitte charakterisieren Sie: Art der Technologien und wie hoch ist die Kapazität?
- Laufen sie kontinuierlich oder im Batch-Betrieb?

3. Welche Hilfsmaterialien werden benötigt?

- Chemikalien zur Abwasserbehandlung
- Chemikalien für die Anlagenreinigung

4. Steuerung der Behandlungsprozesse

- Welche Parameter werden überwacht?
- Wo, wie und in welcher Häufigkeit?
- Wie fließen sie in die Anlagensteuerung ein (manuell, Dashboard, volldigital?)

5. Abflussmenge und Qualitätskontrolle

- Genehmigte Menge [m³/h] und Schwankung/Bandbreite
- Genehmigte Qualität (nach Möglichkeit bitte relevante Parameter und Schwankung/Bandbreite auflisten, auch Temperatur)
- Wo, wie und mit welcher Häufigkeit werden die Abwasserparameter überwacht

6. Werden Stoffdatenbanken über alle relevanten Wasser-Inhaltsstoffe geführt?

VI) Wasser-Kreislaufführung am Standort

1. Welche Wasserströme werden am Standort wiederverwendet, bzw. innerhalb verschiedener Produktionsprozesse unterschiedlich genutzt (Wärmeausgleich, Prozesswasserkreisläufe)

- Grobe Charakterisierung hinsichtlich der Menge in Relation zum Gesamtwasserbedarf

2. Gibt es eine standortbezogene Rückführung von Stoffen, die aus der AW-Behandlung rückgewonnen werden?

- Grobe Charakterisierung hinsichtlich der Menge und Qualitätsanforderungen

8.2 Anhang 2 - Informationsbroschüren**8.2.1 Anhang 2.1 – Leitfaden zur Behandlung PFAS-haltiger Industrieabwässer****8.2.2 Anhang 2.2 – Leitfaden zur Behandlung hochbelasteter und heterogener Industrieabwässer****8.2.3 Anhang 2.3 – Leitfaden zum Austausch von Vakuumpumpen****8.3 Anhang 3 – Fragebogen zu den Key Performance Indicators (KPIs)**



Vertraulich – Nur für Projektbeteiligte bestimmt.
 „Geschlossener Wasserkreislauf in der Industrie – Abwasserfreie Industrieproduktion“



**Bewertung der Behandlungstechnologien im Rahmen einer Potentialanalyse
 Key Performance Indicators (KPIs) und deren Gewichtung**

Unternehmen:

Bearbeiter*in:

Tabelle 1: Gewichtung der Key Performance Indicators (KPIs)*					
KPIs (Voraussetzung)	Ja				
1) Prozesseignung	<input type="checkbox"/>	Nein**	**Falls eine volle Marktreife keine Voraussetzung ist, welcher Technologie-Reifegrad (TRL) wird benötigt? TRL 7: "Prototype demonstrated in operational environment" -1		
2) Marktreife	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
KPIs	Sehr wichtig	Wichtig	Neutral	Unwichtig	Sehr unwichtig
3) Anschaffungskosten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4) Betriebskosten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5) Personalaufwand	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6) Wartungsaufwand	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7) Behandlungseffektivität	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

1

KPIs	Sehr wichtig	Wichtig	Neutral	Unwichtig	Sehr unwichtig
8) Robustheit / Zuverlässigkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9) Komplexität	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10) Platzbedarf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11) Logistik-/Infrastrukturaufwand	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12) Nachrüstbarkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13) Dynamische Betriebsführung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14) Klimatische Aspekte	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15) Direkte Emissionen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16) Indirekte Emissionen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
17) Wasser-Reuse-Potential	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
18) Unveränderte Produktqualität	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
19) Stoffliche Entlastung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
20) Hydraulische Entlastung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

* Ausführliche Erklärungen zu den einzelnen KPIs sind auf den Seiten 4-7 einsehbar.

2

Tabelle 2: Bewertung quantifizierbarer Key Performance Indicators (KPIs)***				
KPI	Auswahl der Einheit	Niedrig	Mittel	Hoch
3) Anschaffungskosten	EUR			
4) Betriebskosten	EUR pro m ³ behandeltes Abwasser ▾			
5) Personalaufwand	EUR pro m ³ behandeltes Abwasser ▾			
6) Wartungsaufwand	EUR pro m ³ behandeltes Abwasser ▾			
7) Behandlungseffektivität	%-Abbau relativ zur Eingangskonzentration ▾			
10) Platzbedarf	Benötigte Fläche in m ² ▾			

*** In Tabelle 2 wird um die Einordnung quantifizierbarer KPIs gebeten. Beispielsweise könnte Unternehmen XY Anschaffungskosten von 10.000 EUR als niedrig, Anschaffungskosten von 50.000 EUR als mittel (bzw. als noch akzeptabel) und Anschaffungskosten von 100.000 EUR als hoch (bzw. als zu hoch) empfinden. Durch diese erste unternehmensspezifische Einordnung kann oftmals bereits eine Eingrenzung verfügbarer Plattforttechnologien vorgenommen werden.