

Diplomarbeit

# Vergleich von Verfahrenstechnik und Potential zur Salzrückgewinnung sowie Entfernung organischer Spurenstoffe anhand des Betriebs einer Pilotanlage mit Elektrodialyse und Umkehrosmose

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads  
Diplom-Ingenieurin  
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

---

Diploma Thesis

## Comparison of process engineering and potential for salt recovery as well as removal of organic trace substances based on the operation of a pilot plant with electrodialysis and reverse osmosis

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of  
Diplom-Ingenieurin  
of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

von

**Ines Marie Schuster**

Matrikelnummer: 11801045

Betreuung: Ass. Prof. Mag. rer. nat. Dr. rer. nat. **Norbert Kreuzinger**  
Projektass. Dipl.-Ing. **Maximilian Wukovits** BSc  
Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement  
Forschungsbereich Wassergütewirtschaft  
Technische Universität Wien,  
Karlsplatz 13/ 226-1, 1040 Wien, Österreich

Wien, im April 2025

---



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

## Eidesstattliche Erklärung über die Eigenständigkeit der Arbeit

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

### Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im April 2025

---

Ines Schuster

## Danksagung

Ich möchte mich herzlich bei meinen Betreuern Ass. Prof. Mag. rer. nat. Dr. rer. nat. Norbert Kreuzinger und Projektass. Dipl.-Ing, Maximilian Wukovits BSc für ihre großartige Unterstützung während der gesamten Arbeit bedanken. Ihre wertvollen Hinweise, Anregungen und die Zusammenarbeit haben mir nicht nur bei der Durchführung der Diplomarbeit geholfen, sondern auch dazu beigetragen, dass ich mich fachlich weiterentwickeln konnte. Besonders während der Inbetriebnahme der Anlage in Guntramsdorf konnte ich viele wichtige Erfahrungen sammeln und tiefe Einblicke in den praktischen Bereich gewinnen, die mir in meiner beruflichen Zukunft sehr hilfreich sein werden.

Ein weiterer Dank gilt der gesamten Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen an der Technischen Universität Wien. Die gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen sowie das vermittelte Wissen haben einen entscheidenden Beitrag zu meiner fachlichen Ausbildung geleistet und bilden eine stabile Grundlage für meine berufliche Laufbahn.

Abschließend möchte ich mich von ganzem Herzen bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken. Ihre andauernde Unterstützung, ihre Ermutigungen und ihre Motivation, besonders in stressigen Prüfungszeiten, haben mir geholfen, nicht aufzugeben, auch wenn die Herausforderungen manchmal groß waren.

## Kurzfassung

Das Ziel der Diplomarbeit ist es, die Verfahrenstechnik und das Potential zur Rückgewinnung von Salz aus dem Straßenabwasser des Winterdienstes sowie Entfernung organischer Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser anhand des Betriebs einer Pilotanlage mit Elektrodialyse und Umkehrosmose zu vergleichen und herauszufinden, welche Methode bessere Ergebnisse in Bezug auf die resultierende Qualität der gereinigten Abwässer zeigt. Die Arbeit war in ein wissenschaftliches Projekt eingebunden, dessen erster Schritt im Abtesten der Funktionsfähigkeit der einzelnen verfahrenstechnischen Bestandteile der Pilotanlage bestand. Die Ergebnisse dieser Arbeit wurden im Rahmen dieser Testphase erhalten. Dazu wurde das Wasser des Ablaufs der Kläranlage in Guntramsdorf als Rohwasser für die technische Pilotanlage herangezogen und nach der Behandlung in den einzelnen Verfahrensschritten analysiert.

Sowohl die Umkehrosmose als auch die Elektrodialyse sind Membranverfahren, die zur Wasseraufbereitung (zum Beispiel Entsalzung) verwendet werden. Sie unterscheiden sich im verfahrenstechnischen Ansatz, in ihrer Funktionsweise und in der Betriebsführung. Beide Entsalzungstechnologien können in ähnlichen Anwendungsbereichen eingesetzt werden, differieren jedoch im grundsätzlichen Trennmechanismus. Die Umkehrosmose ist ein druckbetriebenes Verfahren basierend auf Abtrennung über Partikel-/Molekülgröße, die Elektrodialyse nutzt ein elektrisches Feld und damit die Ladung der Stoffe für die Trennung.

Das Potential der Pilotanlage in Bezug auf die Entsalzung (Diluat) und Salzurückgewinnung bzw. Aufkonzentration (Konzentrat) ist definitiv gegeben. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Entsalzung bzw. die Aufkonzentration in der Anlage funktioniert, jedoch muss darauf hingewiesen werden, dass die Versuche mit dem Ziel der technischen Austestung der Versuchsanlage im Sommer und im Ablauf einer Kläranlage durchgeführt wurden und nicht mit jenem Rohwasser (salzhaltiges, in Retentionsbecken gesammeltes Wasser aus dem Winterdienst) betrieben wurde, das letztendlich behandelt werden soll.

In Hinblick auf eine Entfernung organischer Spurenstoffe aus dem Kläranlagen Ablauf hat sich gezeigt, dass diese effektiv durch beide Verfahren - die Umkehrosmose und Elektrodialyse - entfernt werden können. Das Permeat der Umkehrosmose ist nahezu

frei von Spurenstoffen, während die Anteile der Spurenstoffe im Konzentrat viel höher sind, als in jenem der Elektrodialyse. Die Qualität der Diluate in der Elektrodialyse weisen jedoch ähnlich gute Ergebnisse in Bezug auf die Entfernung der Spurenstoffe auf.

Abschließend ist festzuhalten, dass sich die Diplomarbeit mit der Inbetriebnahme der neu hergestellten Pilotanlage am Standort der Kläranlage in Guntramsdorf auseinandersetzt. Aufgrund von Ausfällen war ein kontinuierlicher Betrieb nur begrenzt möglich.

## Abstract

The aim of the diploma thesis is to compare the process technology and the potential for salt recovering from road wastewater from winter road clearance services and removing organic trace substances from municipal wastewater by operating a pilot plant with electrodialysis and reverse osmosis and to find out which method shows better results in terms of the resulting quality of the treated wastewater. The work was part of a scientific project, the first step of which was to test the functionality of the individual process engineering components of the pilot plant. The results of this work were obtained during this test phase. For this purpose, the water from the effluent of the wastewater treatment plant in Guntramsdorf was used as raw water for the technical pilot plant and analyzed for its components and quality by sampling after treatment in the individual process steps.

Both reverse osmosis and electrodialysis are membrane processes that are used for water treatment (e.g. desalination). They differ in their process engineering approach, their mode of operation and their operational management. Both desalination technologies can be used in similar areas of application, but differ in their basic separation mechanism. Reverse osmosis is a pressure-driven process based on separation via particle/molecule size, while electrodialysis uses an electric field and thus the charge of the substances for separation.

The potential of the pilot plant in terms of desalination (diluate) and salt recovery/concentration (concentrate) is definitely given. The results have shown that desalination and concentration work in the plant, but it must be pointed out that the tests were carried out with the aim of technically testing the pilot plant in summer and in the effluent of a wastewater treatment plant and were not operated with the raw water (saline water collected in retention basins from winter road maintenance) that is ultimately to be treated.

With regard to the removal of organic trace substances from the wastewater treatment plant effluent, it has been shown that these can be effectively removed by both processes - reverse osmosis and electrodialysis. The permeate from reverse osmosis is almost free of trace substances, while the proportion of trace substances in the concentrate is much higher than in that from electrodialysis. However, the quality of

the diluates in electrodialysis shows similarly good results with regard to the removal of trace substances.

In conclusion, it should be noted that the thesis deals with the commissioning of the newly manufactured pilot plant at the Guntramsdorf wastewater treatment plant. Due to breakdowns, continuous operation was only possible to a limited extent.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
2	Fragestellungen und Zielsetzung .....	6
3	Definitionen und Grundlagen .....	8
3.1	Membranverfahren .....	8
3.1.1	Nanofiltration.....	8
3.1.1.1	Betriebsweisen der Nanofiltration.....	9
3.1.2	Umkehrosmose.....	10
3.1.3	Elektrodialyse.....	12
3.1.3.1	Stromdichte.....	15
3.1.3.2	Anwendungen der Elektrodialyse.....	16
3.1.3.3	Betriebsweisen der Elektrodialyse.....	16
3.2	Spurenstoffe .....	17
4	Methodik .....	20
4.1	Standort der Pilotanlage .....	20
4.2	Aufbau der Anlage.....	21
4.2.1	Parallelbetrieb.....	22
4.2.2	Serienbetrieb.....	23
4.3	Anlagenbeschreibung.....	24
4.3.1	Zulauf der Anlage (Rohwasser) .....	24
4.3.2	Rohwasser-Vorwärmer und Oxidator.....	24
4.3.3	Vorfiltration: Scheibenfilter und Beutelfilter .....	25
4.3.3.1	Grobfilter .....	25
4.3.3.2	Feinfilter .....	26
4.3.4	Nanofiltration.....	27
4.3.5	Umkehrosmose.....	30
4.3.6	Elektrodialyse.....	33
4.3.6.1	Parallelbetrieb .....	35
4.3.6.2	Serienbetrieb.....	36
4.3.6.3	CIP (Cleaning in Place): Reinigung der ED-Stacks mit Chemikalien .....	37
4.3.6.4	Elektrolyt .....	38
4.4	Probenahmen .....	39
4.4.1	Diluat-, Permeat- und Konzentrat-Probenahmen.....	41

4.4.2	Chlorid-Küvetten-Tests .....	44
4.5	Formeln für Berechnungen .....	45
4.5.1	Stofffracht – Berechnung .....	45
4.5.2	NaCl - Konzentration Berechnung .....	45
4.5.3	HUO-Reinwasserausbeute .....	46
4.5.4	Salzpassage / Salzurückhalterate in der HUO .....	46
5	Auswertung / Ergebnisse .....	47
5.1	Probenahmen-Ergebnisse .....	47
5.1.1	Nährstoff – Entfernung .....	48
5.1.2	Spurenstoff-Entfernung .....	68
5.2	Entsalzung .....	86
5.2.1	Verhältnis Konzentrat zu Permeat Fluss (HUO) .....	104
5.2.2	Verhältnis Salzpassage und Salzurückhalterate in der HUO .....	105
5.3	Erkenntnisse und Optimierungen des Anlagenbetriebs .....	107
5.3.1	Beschickung ED1 und HUO .....	107
5.3.2	Automatisierung .....	107
5.3.3	Ansaugung .....	108
5.3.4	Sedimentation im Vorlagebehälter .....	109
6	Diskussion / Schlussfolgerung .....	111
6.1	Vergleich der beiden Entsalzungstechnologien (Forschungsfrage 1) .....	111
6.1.1	Verfahrenstechnischer Vergleich .....	111
6.1.2	Steuerungstechnische Unterschiede .....	112
6.1.3	Unterschiede der Betriebseinstellungen .....	114
6.2	Entsalzung und Salzurückgewinnung (Forschungsfrage 2) .....	114
6.2.1	Aufkonzentration des Konzentrats .....	115
6.2.2	Entsalzung und Entfernung von Nährstoffen im Diluats .....	116
6.3	Organische Spurenstoffe (Forschungsfrage 3) .....	117
6.3.1	Entfernung organischer Spurenstoffe im Konzentrat .....	117
6.3.2	Entfernung organischer Spurenstoffe im Diluat .....	119
6.4	Limitierungen der Arbeit .....	120
7	Synopse .....	121
8	Literaturverzeichnis .....	122

---

9	Abbildungsverzeichnis .....	131
10	Tabellenverzeichnis .....	134
11	Formelverzeichnis.....	136
12	Abkürzungsverzeichnis .....	137

# 1 Einleitung

„Der Klimawandel ist die größte Bedrohung der Zukunft. Jeder Staat muss mitwirken, die Ursachen zu bekämpfen und die Folgen zu mindern“ (Töpfer, 2016). Der Klimawandel und dessen Folgen zählen zu den größten Herausforderungen für unsere heutige Gesellschaft. Die Konzentration von Treibhausgasen nimmt zu und ist global deutlich spürbar. Zunehmende Naturkatastrophen, schmelzendes Eis an den Polen und dadurch steigende Meeresspiegel sowie häufigere Wetterextreme sind Folgen der Klimakrise. Hitze- und Dürreperioden sowie Starkregen und daraus resultierende Hochwasserereignisse treten immer häufiger auf. Die verfügbar stehenden Wasserressourcen geraten daher immer mehr unter Druck. Die Auswirkungen sind nicht nur im täglichen Leben der Menschen sichtbar, sondern auch in der Landwirtschaft, der Industrie, im Transport und im Handel sowie der Umwelt (BMUV, 2024).

Wasser gilt als die Grundlage allen Lebens, es ist unverzichtbar für den Menschen und die Natur. Die Erdoberfläche ist etwa zu zwei Drittel mit Wasser bedeckt. Das entspricht ungefähr 1,4 Milliarden km<sup>3</sup> Wasser. Den größten Anteil des Wasservorkommens stellt Salzwasser dar, welches etwa 97,5 % des Wassers auf der Erde ausmacht. Etwa 1 % davon befindet sich als salziges Grundwasser unter der Erde. Nur etwa 2,5 % der Wasserressourcen sind Süßwasser. Ein großer Teil davon liegt in Form von Eis an den Polen vor. Jener Anteil des Süßwassers, der dem Menschen wirklich zugänglich ist (Oberflächengewässer), beträgt nur etwa 0,3 %. Ein geringer Anteil von 0,001 % ist in der Atmosphäre gespeichert (Lozán et al., 2005). Wasser ist jedoch keine unendliche Ressource. Aufgrund steigender Bevölkerungszahlen sowie Entwicklungen in Industrie, Gewerbe und Landwirtschaft, und des Klimawandels machen nutzbares Süßwasser kostbar. Umweltverschmutzungen, unregelmäßiger Niederschlag und übermäßiger Verbrauch führen zur Verknappung von Wasser (BMSGPK, 2025). Um dem Problem der Wasserverknappung entgegenzuwirken, kann eine zielgerechte Wiederverwendung von zuvor bereits genutztem Wasser implementiert werden. Abwasser aus Industrie und Privathaushalten wird, nachdem es in Kläranlagen gereinigt wurde, im Fall einer Wiederverwendung nicht ins Gewässer geleitet, sondern so aufbereitet, dass es etwa als Brauchwasser in der Industrie oder als Bewässerungswasser in der Landwirtschaft wieder verwendet werden kann (K. Schiller, 2022). Abwasser enthält sowohl Nährstoffe

wie z.B. Stickstoff und Phosphor, als auch andere, einer Wiederverwendung entgegenstehende Inhaltsstoffe, wie etwa organische Spurenstoffe (z.B. pharmazeutische Wirkstoffe, Haushaltschemikalien, Industriechemikalien), Metalle oder Mikroplastik. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass Kläranlagen meist nur primär darauf ausgelegt sind, die Nährstoffe (Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphat) zu entfernen. Schwermetalle, Antibiotika, Medikamente und andere organische Verunreinigungen, die sich im Abwasser befinden können, werden in der Kläranlage nicht vollständig zurückgehalten bzw. eliminiert. Daraus ergeben sich Risiken für den Menschen und die Umwelt, wenn dieses Abwasser wieder in den Wasserkreislauf zurückgeführt wird. Es ist daher ein ausreichendes Aufbereitungsverfahren einzusetzen, um Gefahren zu minimieren (A. Schiller, 2018). In der neuen EU-Kommunalabwasserrahmenrichtlinie (2024/3019), die Ende 2024 verabschiedet wurde, ist festgelegt, dass Kläranlagen ab einer Kapazität von 150.000 EW (Einwohnerwerten) mit einer vierten Reinigungsstufe ausgestattet werden müssen. Diese Stufe ermöglicht es, organische Spurenstoffe weitgehend zu entfernen (Almawatech GmbH, 2025). Verfahrenstechnisch gibt es mehrere Möglichkeiten, diese vierte Stufe umzusetzen, wobei adsorptive Verfahren (Aktivkohle), oxidative Verfahren (z.B. Ozonierung) oder „size exclusion“ Verfahren (Membranfiltration) zum Einsatz kommen können. Die Umkehrosmose zählt zu den letzteren Verfahren und wird bereits in der Meerwasserentsalzung angewendet.

Neben kommunalen Abwässern werden auch gesammelte Wässer aus der Entwässerung von Straßen in Gewässer eingetragen. Während im Sommer hauptsächlich Regenwasser anfällt, das mit z.B. Reifenabrieb, Bremsstaub und ähnlichen Stoffen belastet ist, fällt bei Salzstreuung im Winter auch Streusalz (meist in Form von Natriumchlorid, kurz NaCl) an. Aber auch auf kommunalen Kläranlagen kann Streusalz über die Mischkanalisation ins Abwasser und in weiterer Folge ins Gewässer gelangen. Streusalz besteht aus Natriumchlorid, das am häufigsten vertretene Metallchlorid. Chloride sind chemische Verbindungen des Elements Chlor mit Metallen, Halb- oder Nichtmetallen und stellen dessen negativ geladene Ionen dar (Nds.MUEK, o. J.). Chloride lösen sich gut im Wasser und werden im Boden kaum zurückhalten. Sie werden daher leicht ausgewaschen und gelangen in weiterer Folge ins Grundwasser und Gewässer, wo sie sich anreichern (Nds.MUEK, o. J.). Chloride aus Straßenabwässern und Haushalten dienen deshalb als Indikator für Verunreinigungen und Versalzungsprozesse im Grundwasser und werden daher für die Ermittlung des ökologischen Zustands von Oberflächengewässern herangezogen

(BML, 2014). In der Qualitätszielverordnung Ökologie Oberflächengewässer, in der Werte für die Einhaltung des sehr guten und guten ökologischen Zustandes eines Oberflächengewässers festgelegt wird, ist der Grenzwert von Chlorid bei einem Jahresmittel von 150 mg/l sowie einer maximal zulässigen Höchstkonzentration (ZHK) von 600 mg/l als Mittelwert über 72 Stunden geregelt (BMK, 2019). In Österreich liegt der natürliche Salzgehalt in Gewässern bei nur wenigen mg/l, mit der Ausnahme natürlicher Salzstandorte etwa rund um den Neusiedlersee. Erhöhte Chloridwerte in Gewässern und dem Grundwasser entstehen durch punktuelle Abwassereinleitungen, Belastungen durch Deponien und den Einsatz von Streusalz und Düngemittel (BML, 2014).

In der Chlorid-Studie „Chlorid: Auswirkungen auf die aquatische Flora und Fauna“ (BML, 2014) wird festgehalten, dass Änderungen des Chloridgehalts im Gewässer bei Algen und anderen Wasserpflanzen einen osmotischen Stress auslösen und zu einem Ungleichgewicht der Ionen in den Pflanzen führt, welches starke Auswirkungen auf die Photosynthese und andere Stoffwechselfvorgänge hat. Des Weiteren weisen Süßwasserfische in ihrem Körperinneren eine höhere Salzkonzentration auf als die Umgebung. Durch osmoregulatorische Anpassungsmechanismen wird der Konzentrationsunterschied ausgeglichen, da Wasser in Richtung der höheren Teilchenkonzentration fließt. Wasser dringt in die Zelle ein, welches dann wieder aktiv aus der Zelle ausgeschieden werden muss. Umgekehrt wird bei zu hohen Salzgehalten in der Umgebung der Zelle Wasser entzogen. Dies führt dazu, dass Süßwasserorganismen „austrocknen“. Bei Landpflanzen wirken sich Salzgehalte im Boden auf die osmotischen Vorgänge in den Wurzeln aus. Ein zu hoher Chloridgehalt verhindert die Wasseraufnahme, da die Ionenkonzentrationsdifferenz zu gering ist (BML, 2014).

Die Einträge von salzhaltigen Auftaumitteln im Winter haben Auswirkungen auf die Umwelt und Gewässer. Trotz der Problematik mit Chlorid ist der Einsatz von Streusalzen auf Straßen jedoch unverzichtbar. Mit der Salzstreuung kann im Winter nicht nur das Auftreten von Unfällen um 80% gesenkt, sondern auch die Schwere der Unfälle vermindert werden. Im Mittel werden pro Jahr etwa 271.000 t Streusalz verwendet (BML, 2014). Aufgrund der besseren Nutzbarkeit des Salzes wird im hochrangigen Straßennetz (Autobahnen und Schnellstraßen) nunmehr vermehrt auf Feuchtsalzstreuung mittels 20 %-iger Solelösung umgestellt, wobei heute im

Winterdienst etwa 70 % Solelösung + 30 % festes Salz eingesetzt werden (Dipl.-Ing. Reif et al., 2021). Neben der effizienteren und einfacheren Ausbringung hat die Solelösung den Vorteil, dass sie nicht zuerst mit Wasser aktiviert werden muss, um Schnee und Eis zu schmelzen. Sie ist bereits feucht und setzt den Gefrierpunkt des Wassers damit direkt herab. Des Weiteren werden Verwehverluste des Salzes durch den Wind und damit die Menge des Salzes, die aufgebracht werden muss, verringert. Die Verteilung des Salzes in die Umgebung ist somit deutlich reduziert (Visible GmbH, 2023).

Verunreinigtes Straßenabwasser von Autobahnen und Schnellstraßen (>15.000 Kraftfahrzeuge/Tag) enthält neben Chlorid von Streusalzen auch Reifen- und Bremsenabrieb, feste Aerosole wie Ruß, und vielen weiteren organischen Komponenten (z.B. PAK) (Tegethof, 1998). Das von den Straßen gesammelte Abwasser muss deshalb vor Einleitung in Fließgewässer oder Versickerung in den Boden gesammelt und gemäß dem Stand der Technik in Gewässerschutzanlagen gereinigt werden, da es sonst zu einer Veränderung der Wasserbeschaffenheit im Gewässer kommt. In den Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen RVS 04.04.11 „Gewässerschutz an Straßen“ (BMK, 2021), einem Erlass des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), werden Dimensionierung und technische Ausführungen von Gewässerschutzanlagen festgelegt (BMK, 2021). Gewässerschutzanlagen bestehen dabei meistens aus einem Absetzbecken mit Ölabscheider, wo Grobstoffe und Öle abgesondert werden, sowie einem nachgeschalteten Bodenfilter. Dieser hat hauptsächlich die Aufgabe anorganische Partikel, Plastikpartikel und partikulär gebundene Schadstoffe zu entfernen (ASFINAG, 2024). Allerdings weist der Bodenfilter keinen Rückhalt gegen Chlorid und andere gelöste Inhaltsstoffe auf. Um das Gewässer zu entlasten und keine hohen Salzfrachten in kurzer Zeit einzutragen, wird das Wasser nach dem Bodenfilter über einen gedrosselten Abfluss abgeleitet.

Im Bereich der Wasseraufbereitung zur Chlorid-Entfernung bzw. -Rückgewinnung gibt es grundsätzlich zwei etablierte Verfahren. Dies ist einerseits das bereits erwähnte Membranverfahren, die Umkehrosmose. Ein weiteres in der Praxis angewendetes Verfahren ist die Elektrodialyse, welches ebenfalls in der Lage ist, Wasser zu entsalzen, aufzukonzentrieren und von organischen Spurenstoffen zu reinigen. In beiden Fällen entstehen aus dem Rohwasser aus den Gewässerschutzanlagen ein

salzreduziertes Diluat und ein Konzentrat mit hohen Salzkonzentrationen. Das entfrachtete Diluat kann nun ungedrosselt ins Gewässer eingeleitet werden, das mit Salz angereicherte Konzentrat bietet sich für eine Wiederverwendung im Winterdienst an. Da wegen der Salzentfrachtung keine Chlorid Spitzen auftreten, können die Gewässerschutzanlagen kleiner und einfacher gebaut werden, was sich wesentlich auf die Errichtungskosten (Ablöse für Grund) als auch die Betriebskosten (keine Steuerung der eingeleiteten Mengen über Drosselklappen; Einsparung bei zugekaufter Salzmenge wegen der Wiederverwendung) auswirkt. Um eine effiziente Chlorid-Entfernung und -Rückgewinnung zu gewährleisten, ist eine Kombination der Entsalzungstechnologien und den bereits etablierten Gewässerschutzanlagen in Betracht zu ziehen.

## 2 Fragestellungen und Zielsetzung

Das Ziel der Diplomarbeit ist es die Verfahrenstechnik und das Potential zur Salzurückgewinnung sowie Entfernung organischer Spurenstoffe anhand des Betriebs einer aus Elektrodialyse und Umkehrosmose bestehenden Pilotanlage zu vergleichen und zu eruieren, welche Methode bessere Ergebnisse in Bezug auf die Qualität der gereinigten Abwässer zeigt. Die Beschaffenheit wird über die erreichte Qualität im Diluat (Salzentfrachtung, Reduktion organischer Spurenstoffe) definiert, das direkt ins Gewässer eingeleitet wird und für die Wiederverwendung als Auftaumittel über die erreichten NaCl-Konzentrationen im Konzentrat.

Im Rahmen der technischen Überprüfung der neu angefertigten Versuchsanlage wird das Wasser des Ablaufs der Kläranlage in Guntramsdorf mittels der beiden implementierten Technologien behandelt und durch wiederholte Probenahmen auf deren Bestandteile und Qualität analysiert.

Im Betrieb der Pilotanlage kommen die folgenden beiden Technologien zum Einsatz:

- Umkehrosmose
- Elektrodialyse.

Im Hinblick auf die Salzentfernung werden die beiden Prozesse hinsichtlich der Betriebseinstellungen und der Qualität der Solekonzentrationen miteinander verglichen und Optimierungsvorschläge erarbeitet. Als Richtwert für die Anforderung des Diluats soll das Kriterium für die Chlorid-Umweltqualitätsnorm (Jahresmittel der Chlorid-Konzentration) von 150 mg/l nicht überschritten werden. Um eine Wiederverwendung des Salzes für die Feuchtsalzstreuung im Winterdienst zu ermöglichen, ist ein Salzgehalt von 15-20 % erforderlich. Die Einhaltung der Qualität des gereinigten Diluats und des Solekonzentrats zur Wiederverwendung als Feuchtsalz auf den Straßen wird im Projekt als Validierungskriterium für die Technologien herangezogen.

Basierend auf diesen allgemeinen Fragestellungen bzw. Projektzielen lassen sich die konkreten Fragestellungen der Arbeit wie folgt skizzieren:

1. Wie unterscheiden sich die beiden Entsalzungstechnologien, Umkehrosmose und Elektrodialyse, hinsichtlich des Aufwands für die technische Implementierung und im Betrieb?

- Wie unterscheiden sich Umkehrosmose und Elektrodialyse im verfahrenstechnischen Ansatz?
  - Welche steuerungstechnischen Unterschiede bestehen zwischen den beiden Entsalzungstechnologien?
  - Wie beeinflussen die Betriebseinstellungen der Pilotanlage die Effizienz und die Effektivität der Entsalzung von Straßenabwässern?
2. Welches Potential hat die Pilotanlage in Bezug auf die Entsalzung und Salzurückgewinnung von Straßenabwässern und wie kann man dieses optimieren?
- Welchen Einfluss hat die unterschiedliche Technologie zur Aufkonzentration von Salz auf die Qualität des Konzentrats?
  - Welchen Einfluss hat die Technologie auf die Entsalzung und Entfernung von Nährstoffen im Diluat?
  - Welchen Einfluss hat die Aufkonzentration von Salz bzw. organischer Spurenstoffe auf den Energieverbrauch der Anlage?
3. Wie effektiv ist die Pilotanlage bei der Entfernung von organischen Spurenstoffen aus Kläranlagenabläufen?
- Welchen Einfluss haben die unterschiedlichen Technologien auf die Entfernung organischer Spurenstoffe und damit auf die Qualität des Konzentrats?
  - Welchen Einfluss haben die unterschiedlichen Technologien auf die Entfernung organischer Spurenstoffe und damit auf die Qualität des Diluats?
  - Welchen Einfluss haben die unterschiedlichen Technologien auf den Energieverbrauch der Anlage in Hinblick auf die Spurenstoffentfernung?

## 3 Definitionen und Grundlagen

In diesem Kapitel werden sämtliche theoretische Grundlagen und wissenschaftliche Grundprinzipien erläutert, die zur Erarbeitung und Lösung der Forschungsfragen dienen sollen.

### 3.1 Membranverfahren

Um beispielsweise Suspensionen in ihre Flüssigkeits- und Feststoffphase zu trennen, werden Membranen eingesetzt. Sie sind für Flüssigkeiten permeabel, Partikel bestimmter Eigenschaften werden jedoch von der Membran zurückgehalten. Die Charakterisierung der eingesetzten Membranen erfolgt durch die Größe der Partikel und des Trennprinzips (Melin & Rautenbach, 2007). Nachfolgend werden jene Membranverfahren beschrieben, die für diese Diplomarbeit relevant sind.

#### 3.1.1 Nanofiltration

Die Nanofiltration (kurz NF) ist ein druckbetriebenes Verfahren, welches Lösungs- und Diffusionsmembrane zur Aufbereitung wässriger Lösungen verwendet, bei dem Stoffe mit einer Porengröße zwischen 0,5 und 5 nm gefiltert werden können (Singh, 2015). Die Filtration erfolgt mit dem Prinzip der Diffusion, bei der Teilchen (Ionen und Moleküle) im Stoffgemisch einen Konzentrationsunterschied ausgleichen wollen und durch das Membranmaterial diffundieren. Ein Merkmal von Nanofiltrationsmembranen ist die Ionenselektivität. Es werden sowohl einwertige (Natrium, Kalium) als auch mehrwertige Ionen (Magnesium, Calcium, Sulfate), sowie größere organische Moleküle zurückgehalten. Die Ionenselektivität beruht auf negativen Ladungsgruppen auf oder in der Membran, die durch elektrostatische Wechselwirkungen mehrwertige Anionen an dem Durchdringen (Permeation) hindern (Melin & Rautenbach, 2007). Die Studien „Rejection rate and mechanisms of drugs in drinking water by nanofiltration technology” (Ge et al., 2017) und “Nanofiltration and reverse osmosis processes for the removal of micro-pollutants” (Song et al., 2020) haben gezeigt, dass die NF auch im Bereich der Spurenstoffentfernung (Herbizide, Pharmazeutika, etc.) eingesetzt werden kann und gute Ergebnisse beim Rückhalt erzielt.

Das Funktionsprinzip ist in Abbildung 1 dargestellt. Mittels hohen Drucks (3 - 30 bar) wird die Flüssigkeit (Wasser) gegen die Membran gedrückt. Der Druck, der gegen die

Membran in der Pilotanlage drückt, beträgt 3-5 bar, maximal 6 bar. Wie bereits erwähnt können Flüssigkeiten und einwertige Ionen nahezu ungehindert die Membran passieren, mehrwertige Ionen bleiben zurück. Das gefilterte/saubere Wasser wird als Permeat/Filtrat bezeichnet, der angereicherte Flüssigkeitsstrom als Konzentrat/Retentat (Melin & Rautenbach, 2007).

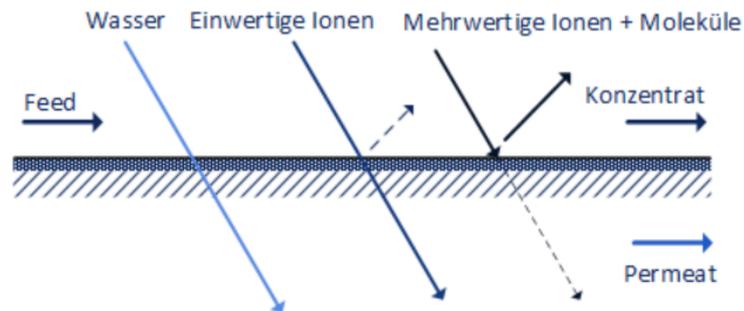


Abbildung 1: Funktionsprinzip der Nanofiltration [Nanofiltration - OSMO Membrane Systems, o. J.]

### 3.1.1.1 Betriebsweisen der Nanofiltration

Bei der Nanofiltration gibt es zwei verschiedene Filtrationsprozesse. Es werden die Cross-Flow-Filtration und die Dead-End-Filtration unterschieden. Die Filtrationsprozesse sind in Abbildung 2 dargestellt.

Bei einer Cross-Flow-Filtration wird die zu filtrierende Flüssigkeit mit einer Geschwindigkeit von 2 – 3 m/s parallel zur Membran gepumpt, wobei das Filtrat/Permeat quer zur Fließrichtung durch die Membran abgezogen wird. Aufgrund der hohen Geschwindigkeit bildet sich kein Filterkuchen (Fouling), der den Filtrationswiderstand und dadurch den Druckverlust am Filter erhöhen würde und in weiterer Folge mit einem höheren energetischen Aufwand verbunden wäre (Bhave, 1996).

Der Unterschied zwischen der Dead-End-Filtration und der Cross-Flow-Filtration besteht darin, dass in der Dead-End-Filtration die Filtration mittels Filterkuchen erfolgt. Die zu filtrierende Stoffe reichern sich an der Membranoberfläche an. Dadurch steigt der Druckverlust an und der Permeatfluss sinkt. Ist der Filtrationswiderstand zu hoch muss die Membran rückgespült werden (Bhave, 1996).

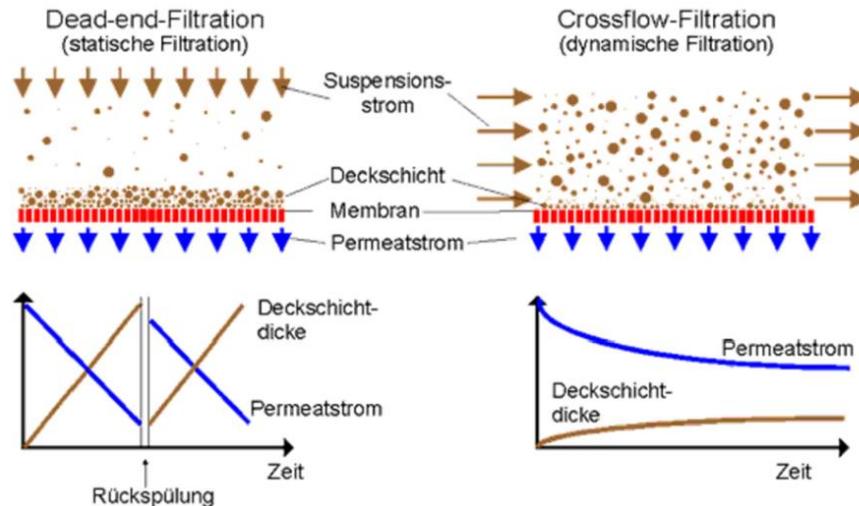


Abbildung 2: Dead-End-Filtration VS Cross-Flow-Filtration [Dynamische Cross-Flow-Anlage System BECA, o. J.]

### 3.1.2 Umkehrosmose

Die Umkehrosmose (kurz HUO) ist, wie die Nanofiltration, ein druckbetriebenes physikalischen Verfahren, bei dem der natürliche Osmose-Prozess umgekehrt wird. Es wird zur Aufkonzentrierung von in Flüssigkeiten gelöster Stoffe und damit zur Entsalzung von Flüssigkeiten verwendet. Die Umkehrosmose kann Teilchen zwischen  $0,0001 - 0,001 \mu\text{m}$  zurückhalten (Singh, 2015). Verunreinigungen wie Schwermetalle, Pestizide, Gifte, gelöste Salze und Chemikalien können dadurch entfernt werden (Egea-Corbacho Lopera et al., 2019).

Der natürliche Osmose-Prozess bezeichnet die Diffusion von Teilchen (meist Flüssigkeiten) durch eine semipermeable (teilweise durchlässige) Membran. Die Flüssigkeit strömt immer in die Richtung, in der die Konzentration der gelösten Teilchen höher ist. Die Flüssigkeit mit der höheren Anzahl an Teilchen, wird daher verdünnt. Durch den Verdünnungsprozess wird ein Druck erzeugt (hydrostatische Druck), der das Verdünnen verhindern möchte. Jener Druck, der die Bewegung der Flüssigkeit durch die Membran verursacht, wird osmotischer Druck genannt. Wenn diese beiden Drücke im Gleichgewicht sind, ist die Anzahl der Moleküle auf beiden Seiten der Membran ausgeglichen (Cath et al., 2006).

Um den natürlichen Osmose-Prozess umzukehren, wird ein hoher Druck (bis 200 bar) auf der Seite der semipermeablen Membran angewandt, bei der die Konzentration erhöht werden soll. Dieser Druck muss höher sein als der osmotische Druck. Dadurch werden die Moleküle an ihrer natürlichen Richtung gehindert, der osmotische Prozess

wird umgekehrt und die Ionen bzw. Moleküle diffundieren durch die Membran (Melin & Rautenbach, 2007).

Durch den Prozess der Umkehrosmose wird ein Konzentratstrom und ein Permeatstrom erzeugt. Das Konzentrat ist jener Anteil, der mehr Teilchen enthält und daher aufkonzentriert ist, während das Permeat stark verdünnt bzw. salzfrei ist (Melin & Rautenbach, 2007).

Der osmotische Druck nimmt mit zunehmendem Konzentrationsunterschied zu. Sobald der osmotische Druck den angelegten/eingestellten Druck erreicht, würde der Prozess stoppen. Um dies zu verhindern, wird das Konzentrat kontinuierlich abgeführt. Aufgrund von Ablagerungen bzw. Ausfällungen auf der Membran, kann die Umkehrosmose nur bis zu einer gewissen Maximalkonzentration des Konzentrats verwendet werden (Melin & Rautenbach, 2007).

Das Funktionsprinzip der Osmose bzw. der Umkehrosmose ist in Abbildung 3 erklärt, wobei unter „Feed“ Wasser und unter „Brine“ das Konzentrat in Form von z.B. Salzwasser gemeint ist.

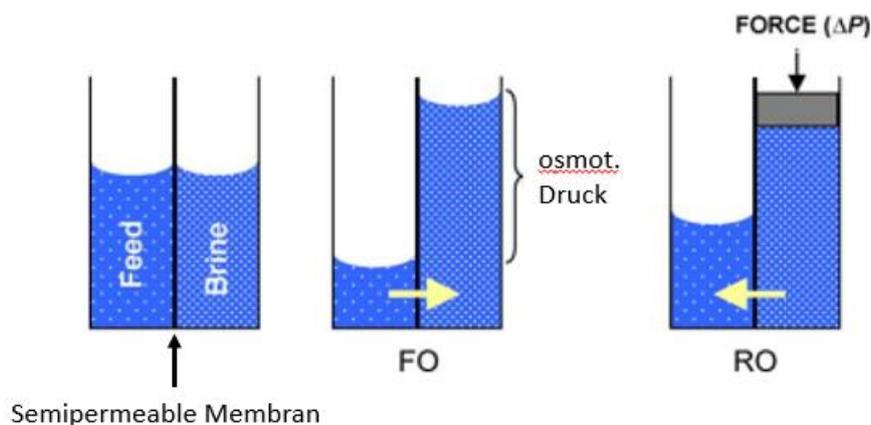


Abbildung 3: Unterschied Osmose (Mitte: forward osmosis, kurz FO) und Umkehrosmose (rechts: reverse osmosis, kurz RO) [In Anlehnung an Cath et al., 2006]

Je nachdem, welche Flüssigkeiten mit welchen Ionenkonzentrationen (Trinkwasser, Meerwasser, etc.) aufkonzentriert werden sollen, gibt es unterschiedliche Membranen und es müssen unterschiedlich hohe osmotische Drücke überwunden werden (Melin & Rautenbach, 2007).

Die Umkehrosmose wird in der Trinkwasseraufbereitung, der Abwasserbehandlung und der Meerwasserentsalzung angewendet. Des Weiteren findet sie auch Anwendung in der Deponiesickerwasserreinigung (Melin & Rautenbach, 2007).

### 3.1.3 Elektrodialyse

Die Elektrodialyse (kurz ED) ist ein elektrochemisch gesteuerter Membranprozess, bei dem Ionenaustauschermembranen zusammen mit einem elektrischen Feld eingesetzt werden, um Lösungen abzutrennen (Melin & Rautenbach, 2007). Es eignet sich besonders zur Entfernung von geladenen Ionen aus dem Wasser. Ungeladene Partikel (organische Partikel) werden konzeptionell nicht eliminiert/aufkonzentriert. Die ED bewirkt somit die Anreicherung bzw. Entfernung elektrisch geladener Ionen und Moleküle aus wässrigen Lösungen. Anionen (negativ geladene Ionen) und Kationen (positiv geladene Ionen) sind zwischen zwei Elektroden (Anode, Kathode) positioniert. Wird eine elektrische Gleichspannung angelegt, bewegen sich die unterschiedlich geladenen Ionen in entgegengesetzte Richtungen. Anionen wandern zur positiv geladenen Anode und Kationen bewegen sich zur negativ geladenen Kathode. Dieses Wanderprinzip ist in Abbildung 4 a) dargestellt (Melin & Rautenbach, 2007).

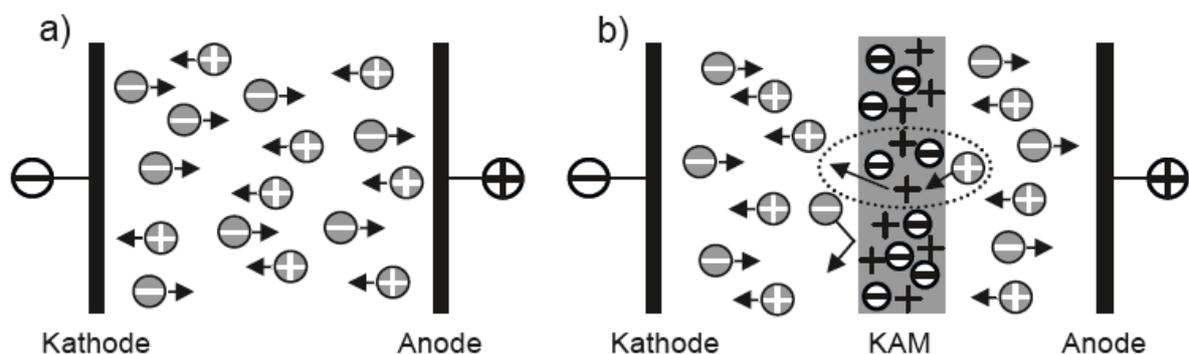


Abbildung 4: a) geladene Teilchen zwischen den Elektroden b) Ionenaustauschermembran: hier Kationenaustauschermembran (KAM) [Melin & Rautenbach, 2007]

Ionenselektive Membranen werden zwischen den Elektroden eingesetzt, um die Ionenwanderung besser steuern zu können. Es gibt sowohl Anionenaustauschermembranen (AAM) und Kationenaustauschermembranen (KAM). AAM sind permeabel für Anionen und halten Kationen zurück, während KAM Kationen passieren lassen und Anionen blockieren (sh. Abbildung 4 b)). Die Membranen befinden sich in einer Elektrolytlösung (Natriumsulfat / Natrium,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), damit eine stromleitende Flüssigkeit entsteht (Melin & Rautenbach, 2007).

In der Elektrodialyse werden AAM und KAM abwechselnd in einem Membranstapel, dem sogenannten „Stack“, angeordnet, welche das durchströmte Volumen in separate Abschnitte teilt. Zwischen den Ionenaustauschermembranen befinden sich Spacer, die als Abstandhalter fungieren und eine gleichmäßige Verteilung der Flüssigkeit über die

Membranfläche bewirken (unterschiedliche Strömungswege). Der Abstand zwischen den Membranen soll möglichst gering sein, damit der elektrische Widerstand minimiert wird. Des Weiteren wirken sich die Spacer positiv auf den Druckverlust an der Membran aus, da diese leicht durch Druck der Lösung beschädigt werden können. Der Kern des Stacks besteht aus einer Diluat- und einer Konzentratkammer (Melin & Rautenbach, 2007).

Das Funktionsprinzip der Elektrodialyse ist in Abbildung 5 dargestellt. Durch das Gleichspannungsfeld wandern Anionen durch die AAM, werden jedoch von der darauffolgenden KAM zurückgehalten. Dementsprechend können Kationen durch die KAM wandern, werden jedoch von der nächsten AAM blockiert. Durch diesen Prozess findet abwechselnd eine Verarmung und eine Aufkonzentrierung der Lösung statt. Der entsalzte zusammengeführte Strom wird als Diluat, der aufkonzentrierte Strom als Konzentrat bezeichnet. Beide Ströme werden separat gesammelt (Melin & Rautenbach, 2007).

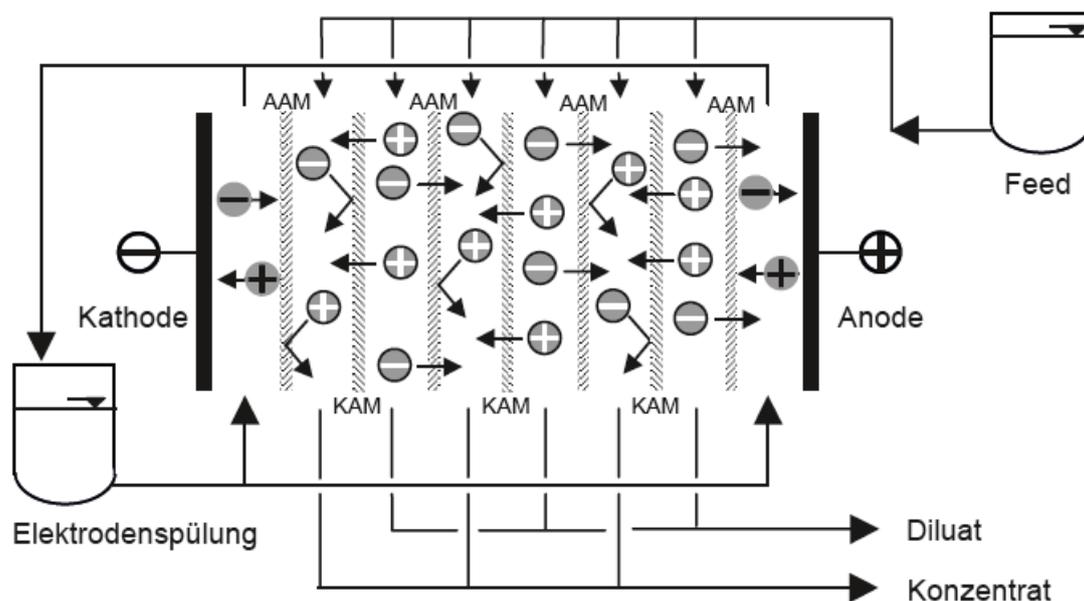


Abbildung 5: Funktionsprinzip der ED [Melin & Rautenbach, 2007]

Die beiden äußersten Kammern, die an die Elektroden angrenzen, sind für den Austausch von Ladungsträgern zwischen den Elektroden und dem Ionenfluss verantwortlich. Dieser Prozess stellt eine chemische Reaktion dar. Die jeweiligen Reaktionen werden dabei hauptsächlich durch die eingesetzte Lösung bestimmt (Melin & Rautenbach, 2007).

Folgende Anodenreaktionen können auftreten:

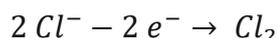
- Hypochloridbildung in NaCl-Lösung, pH > 7:

Formel 1: Hypochloridbildung [Membranverfahren, 2007]



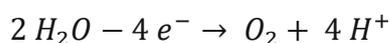
- Chlorgasbildung in NaCl-Lösung, pH < 7:

Formel 2: Chlorgasbildung [Membranverfahren, 2007]



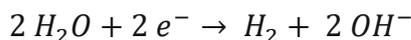
- Sauerstoffbildung in einer Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-Lösung:

Formel 3: Sauerstoffbildung [Membranverfahren, 2007]



An der Kathode findet meist eine Wasserstoffentwicklung statt:

Formel 4: Wasserstoffbildung [Membranverfahren, 2007]



Bei Formel 3 und Formel 4 handelt es sich um die Elektrolyse von Wasser, bei der Wasser durch elektrischen Strom in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten wird (sh. Formel 5). Eine Spaltung von Wasser ist unerwünscht, da die Energie nicht für diesen Prozess, sondern ausschließlich für den Ionentransport genutzt werden soll.

Formel 5: Elektrolyse von Wasser [Wendt & Plzak, 1991]



Um Elektrodengase und andere Reaktionsprodukte, die bei der Elektrodialyse entstehen, abführen zu können, werden die Elektrodenkammern durch einen separaten Kreislauf gespült (sh. Abbildung 5 „Elektrodenaspülung“). Hierfür wird die Elektrolytlösung (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) verwendet, um eine Chlorgasbildung zu verhindern und die ausgespülten Kationen durch H<sup>+</sup>-Ionen zu ersetzen. Sowohl der pH-Wert also auch die Salzkonzentration müssen konstant gehalten werden (Melin & Rautenbach, 2007).

Prinzipiell bestehen Elektrodialyseanlagen also aus drei internen Kreisläufen:

- Diluat-Kreislauf: Reduktion der Ionen, die durch das elektrische Feld in das Konzentrat transportiert werden

- Konzentrat-Kreislauf: Anreicherung der Ionen
- Elektrolyt-Kreislauf: Spülung der beiden äußersten Kammern → Abtransport der H<sup>+</sup>-Ionen

Abbildung 6 veranschaulicht den Stack-Aufbau und die Strömungsführung im Stack. Wie bereits erwähnt sind die Spacer dafür verantwortlich, dass Diluat und Konzentrat unterschiedliche Strömungswege aufweisen. Die Spacer enthalten Löcher, die Kanäle bilden und nur eine Fließrichtung für Diluat bzw. Konzentrat zulassen. Die Löcher steuern somit die Verteilung und Sammlung der Lösung zu bzw. aus den Kanälen (Campione et al., 2018).

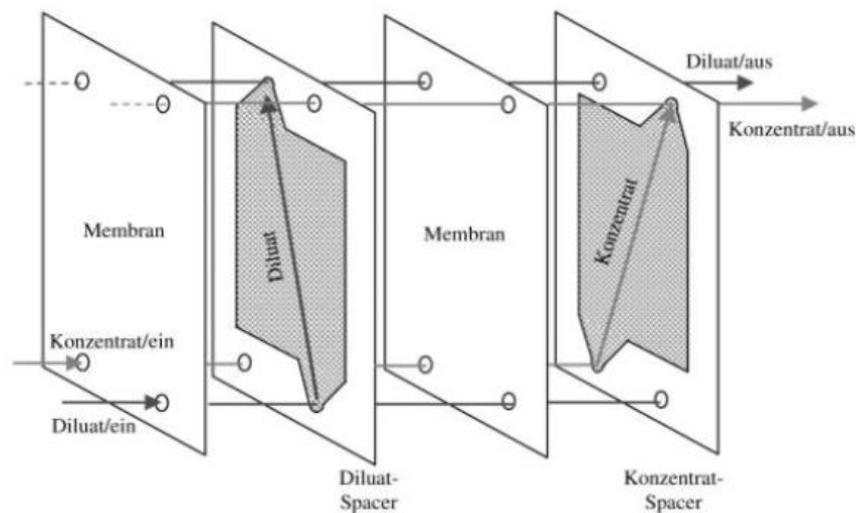


Abbildung 6: Stack-Aufbau / Strömungsführung im Stack [Rapp, 2006]

### 3.1.3.1 Stromdichte

Der wichtigste Prozessparameter für die Auslegung und den Betrieb in der Elektrolyse ist die Stromdichte. Die Stromdichte ist wie folgt definiert:

Formel 6: Stromdichte

$$\frac{\text{Stromstärke [A]}}{\text{Querschnittsfläche [m}^2\text{]}} = \text{Stromdichte} \left[ \frac{\text{A}}{\text{m}^2} \right]$$

Die Stromdichte beschreibt also die Intensität des elektrischen Stroms, der über eine Querschnittsfläche fließt. Die Querschnittsfläche bezeichnet jene Fläche, durch die der Strom senkrecht fließen kann. Sie ist die treibende Kraft für den Transport der Ionen im Stack. Mit dieser kann die Belastung eines Leiters durch den Strom angegeben werden (Lindner et al., 2004).

Die Stromdichte wird in Abhängigkeit der maximalen Grenzstromdichte (Limiting Current Density) festgelegt, also jene Stromdichte, die in einen Ionenfluss zwischen den beiden Kammern umgewandelt werden kann. In der Regel wird die maximale Grenzstromdichte durch die Konzentration der Ionen im Diluat, also in jenem Kreislauf, in dem die Ionen entfernt werden, angegeben. Wird die Grenzstromdichte überschritten, führt die überschüssige Energie zur Spaltung von Wasser (Wasserzersetzung) in Oxoniumionen ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ) und Hydroxid-Ionen ( $\text{OH}^-$ ) sowie Sauerstoff und Wasserstoff. Dies kann durch Absinken des pH-Wertes im Diluat festgestellt werden. Es kommt zur Abnahme der Entsalzungsleistung und Erhöhung des elektrischen Widerstands. Daher sollte die Grenzstromdichte nicht überschritten werden, da dies zur Beeinträchtigung der Membranen führt (Melin & Rautenbach, 2007). Es soll jedoch darauf geachtet werden, dass möglichst hohe Stromdichten in Abhängigkeit der Grenzstromdichte verwendet werden, da der Permeatstrom deutlich erhöht werden kann.

### 3.1.3.2 Anwendungen der Elektrodialyse

Elektrodialyseverfahren werden in vielen Bereichen eingesetzt. Die Elektrodialyse findet Anwendung in der Trinkwasseraufbereitung sowie in der Meerwasserentsalzung. Des Weiteren wird dieses Verfahren in der Lebensmittel- und Biotechnologie angewendet. Durch Elektrodialyse kann Milchsäure aus Molkereispülwässern zurückgewonnen werden. Sie wird ebenfalls in der Weinherstellung angewendet (Entfernung von Kaliumtartrat). Die Elektrodialyse ist auch in der Abwasserreinigung weit verbreitet. Es ist möglich Säuren und Laugen aus entsprechenden salzhaltigen Lösungen rückzugewinnen bzw. herstellen. Des Weiteren ist eine Entfernung von Fluorid, Sulfat, Nitrat und Ammonium aus dem Grundwasser möglich. Elektrodialysen finden auch Anwendung beim Reinigen von Abwässern der chemischen Industrie, z.B. schwermetallhaltige Abwässer, etc. Ein weiterer großer Anwendungsbereich ist die chemische Technologie, bei der mithilfe der ED elektrochemische Regenerationen von Ionenaustauscher-Säulen möglich ist (Melin & Rautenbach, 2007).

### 3.1.3.3 Betriebsweisen der Elektrodialyse

Elektrodialysen können in verschiedenen Betriebsmodi ausgeführt werden.

- Der Batch-Betrieb ist ein diskontinuierlicher Prozess, bei dem der Diluat- und der Konzentratstrom solange zirkulieren, bis ein bestimmter Entsalzungsgrad

bzw. eine bestimmte Endkonzentration erreicht ist. Ist das gewünschte Entsalzungsziel erreicht, wird die Anlage entleert, gespült und für den nächsten Batch wieder befüllt. Daher ist dieser für kleinere Feed-Mengen geeignet (Melin & Rautenbach, 2007).

- Im Feed-and-Bleed-Modus bleibt das Konzentrat im Vorlagebehälter, während das Diluat nach Erreichen der Zielkonzentration entleert und ersetzt wird. Dadurch können höhere Konzentrationen im Konzentrat erzielt werden (Melin & Rautenbach, 2007).
- Im kontinuierlichen Modus wird das Stack in der Regel nur einmal durchströmt. Es werden häufig mehrere Membranstapel in Serie geschaltet, um die gleiche Entsalzung zu erreichen. Dieser Betrieb ist für große Mengen geeignet. Die Konzentrationen sind jedoch nicht konstant, weshalb es zu unterschiedlichen Produktqualitäten kommen kann (Melin & Rautenbach, 2007).
- Um Ablagerungen (Scaling) auf der Membran zu verhindern, gibt es Elektrodialysen mit Polumkehr. Es wird entweder periodisch oder bei Erreichen einer Mindestleitfähigkeit in einer der Kammern die Richtung des Stromfluss und damit des Ionenflusses umgekehrt, wodurch sich das Ausfallen chemischer Verbindungen deutlich vermindern lässt (Melin & Rautenbach, 2007).

## 3.2 Spurenstoffe

In Haushalten, der Industrien und der Landwirtschaft werden Chemikalien, Wirkstoffe von Pflanzenschutzmitteln, Biozide, Lebensmittelzusatzstoffe, Antibiotika und Medikamente eingesetzt. Diese Substanzen gelangen auf verschiedenen Wegen ins Gewässer oder ins Grundwasser. Es gibt flächenhafte Einträge aus der Landwirtschaft (diffus), aber auch punktförmige Einträge aus einem undichten Kanalnetz oder Kläranlagenabläufen. Diese Stoffe nennt man Spurenstoffe, welche in den üblichen Kläranlagen nicht oder nur zum Teil entfernt werden können. Sie kommen in sehr geringen Konzentrationen als Mikroverunreinigungen vor (Formanek et al., 2023). Die Einträge von Nährstoffen und Spurenstoffe haben bereits in niedrigen Konzentrationen (ng/l bis µg/l) einen großen Einfluss auf die Qualität der Gewässer. Spurenstoffe können chronische bzw. subchronische Beeinträchtigungen hervorrufen, nicht nur beim Menschen, sondern auch bei aquatischen Lebewesen (Schönberger & Meyer, 2018). Spurenstoffe können toxisch wirken. Hemmung des Wachstums, Verhaltensänderungen, Stoffwechselstörungen, etc. können mögliche Reaktionen

sein (A. Schiller, 2018). Die Eigenschaft von Spurenstoffen ist neben der Wasserlöslichkeit auch die Persistenz und Mobilität. Sie verbleiben sehr lange im Wasser, können sich dort anreichern und werden im Wasserstrom weitertransportiert. (Schönberger & Meyer, 2018). Spurenstoffe gehören neben Mikroplastik, Nanopartikeln und Antibiotika zur Gruppe der „Contaminants of emerging concern“ (CEC). CEC sind Chemikalien bzw. Giftstoffe, die derzeit nur zum Teil geregelt sind, ihr Auftreten jedoch verstärkt in Gewässern nachgewiesen wird. CEC können in keinem Routinemonitoring überwacht werden.

Das Umweltbundesamt hat Indikatorsubstanzen für kommunale Verunreinigungen im Grundwasser definiert, welche für Einflüsse von Abwasser auf Gewässer und die Intensität einer Belastung im Grundwasser herangezogen werden. Sie stellen die Grundlage für die Bewertung von Eintragspfaden für Spurenstoffe dar. Indikatorsubstanzen spiegeln aufgrund ihrer Eigenschaften und ihres Verhaltens in der Umwelt entweder bestimmte Stoffgruppen oder Eintragspfade wider. Insgesamt wurden 8 anthropogene Substanzen gewählt, die stellvertretend für eine breite Anzahl von organischen Spurenstoffen als Indikatorsubstanzen definiert wurden, da sie verbreitet in den Abläufen von Kläranlagen nachgewiesen wurden (Formanek et al., 2023).

- Acesulfam-K: Dieser Lebensmittelzusatzstoff ist ein synthetischer Süßstoff, der in vielen Getränken enthalten ist. In konventionellen Kläranlagen wird der Stoff nicht abgebaut. Er gilt als sehr mobil, neigt jedoch nicht zur Sorption. Acesulfam ist ein Indikator für den Eintragspfad Abwasser (Formanek et al., 2023).
- Carbamazepin: Dieses Arzneimittel wird als Antiepileptikum bzw. Antidepressiva verwendet. Er kann in Kläranlagen kaum zurückgehalten werden (Formanek et al., 2023).
- 10,11-Dihydro-10,11-Dihydroxycarbamazepin: Dieser Stoff ist ein Hauptmetabolit von Carbamazepin. Er ist sehr mobil und gilt als sehr persistent. In den üblichen Kläranlagen wird er kaum zurückgehalten (Formanek et al., 2023).
- Diclofenac: Dieser Wirkstoff wird als Arzneimittel bei der Behandlung von Schmerzen und Entzündungen angewendet. Es ist sehr persistent. Unter aeroben Bedingungen kann Diclofenac abgebaut werden (Formanek et al., 2023).

- Metoprolol: Dieser Wirkstoff wird in Medikamenten zur Behandlung von Bluthochdruck und Herzerkrankungen verwendet. Die Entfernungsraten in Kläranlagen liegen im mittleren Bereich (Formanek et al., 2023).
- Sotalol: Dieser Arzneimittelstoff wird für Herzrhythmusstörungen eingesetzt. In Kläranlagen wird er kaum zurückgehalten. Sotalol ist sehr mobil und sehr persistent (Formanek et al., 2023).
- 1H-Benzotriazol: Diese Chemikalie wird für viele Industrie- und Haushaltsmittel eingesetzt (z.B. Farben, Lacke, Frostschutzmittel, etc.). Es ist auch in Geschirrspülmitteln enthalten, weshalb es in das kommunale Abwasser gelangt. Der Stoff kann in Kläranlagen zu einem Teil eliminiert werden (Formanek et al., 2023).
- Tolyltriazole: Wie Benzotriazol wird dieser Stoff ebenfalls für Farben, Lacke und Geschirrspülmittel verwendet. Er kann ebenfalls zu einem kleinen Teil in Kläranlagen entfernt werden (Formanek et al., 2023).

Mit einer vierten Reinigungsstufe in Kläranlagen (Membranverfahren, Oxidation mit Ozon, Aktivkohlefilter) können derartige Stoffe effizient reduziert werden (A. Schiller, 2018).

## 4 Methodik

In diesem Kapitel wird der Aufbau sowie das Verfahrensschema der Pilotanlage beschrieben und die Durchführung der Probenahmen und Versuche dargestellt. Zur Beantwortung der Forschungsfragen dieser Diplomarbeit wurden unter anderem verschiedene Studien und Fachartikel sowie Auszüge aus bereits bestehenden Forschungsarbeiten herangezogen.

### 4.1 Standort der Pilotanlage

Um die Anlage ausführlich zu testen und Versuche sowie Probenahmen für wissenschaftliche Zwecke durchzuführen, wurde die Pilotanlage für einen Zeitraum von zwei Monaten (Juli und August 2024) auf der Kläranlage Guntramsdorf (Niederösterreich) installiert und dort betrieben. Im September 2024 wurde die gesamte Anlage zum endgültigen Projektstandort am Galgenbach (Gemeinde Freistadt, Kefermarkt in Oberösterreich) an der S10 im Bereich Freistadt transportiert, um die Anlage in den folgenden Wintermonaten möglichst störungsfrei betreiben zu können und die Entsalzungstechnologien bei höheren Konzentrationen entsprechend der Projektziele auszutesten.

Diese Diplomarbeit konzentriert sich ausschließlich auf den Testbetrieb der Pilotanlage im Zeitraum, an dem sie in Guntramsdorf installiert war.



Abbildung 7: Pilotanlagenstandort Kläranlage Guntramsdorf (NÖ Atlas: [Kataster/Grundstücke, o. J.]

Die Anlagentechnik sowie die Steuerungselektronik sind in drei nebeneinander positionierten Containern untergebracht. Dadurch ist die Mobilität der Anlage gewährleistet und sie kann an unterschiedlichen Standorten betrieben werden.

## 4.2 Aufbau der Anlage

Die Pilotanlage besteht aus folgenden Komponenten: Vorfiltration (VOF), Nanofiltration (NF), Hochdruck-Umkehrosmose (HUO) und einer zweistufigen Elektrodialyse (ED). Die drei erstgenannten Anlagenteile befinden sich im ersten, die Elektrodialyse im zweiten Container. Die genaue Beschreibung der einzelnen Anlagenteile wird in Kapitel 4.3 erläutert. In Abbildung 8 sind die jeweiligen Übersichtspläne der Container und dessen Komponenten abgebildet.

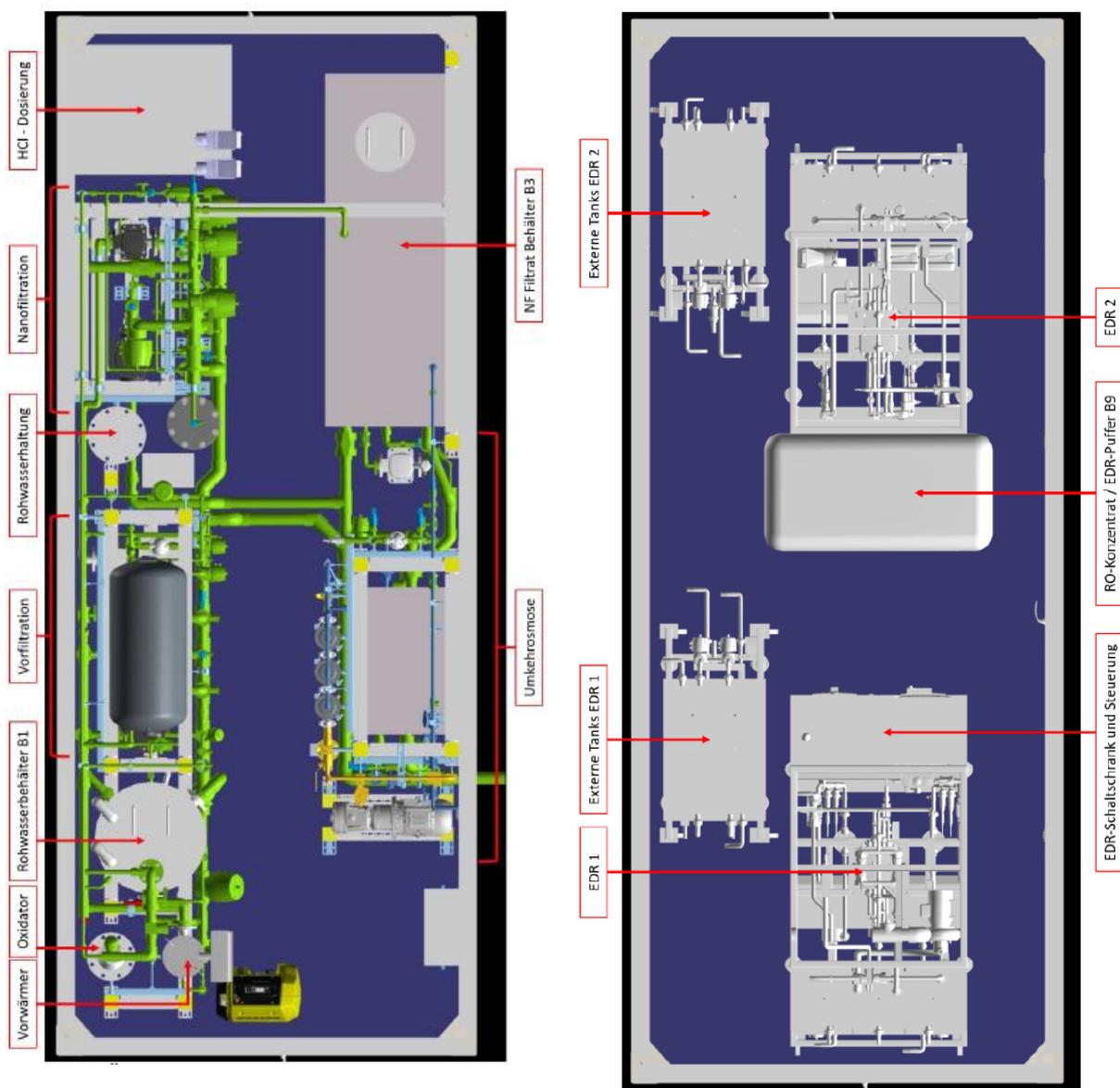


Abbildung 8: Übersichtsplan der Anlagentechnik: Container 1 mit Vorfiltration (kurz VOF), NF, HUO, Behältern (li) und Container 2 mit ED1 und ED2 (re)

Die Anlage wird mittels einer Bedienoberfläche im dritten Container (Steuerungselektronik) zentral gesteuert. Es ist möglich, per Fernzugriff für kontinuierliche Betriebe auf die Anlage zu zugreifen und diese zu steuern. Über die Bedienoberfläche können Anpassungen der Parameter der Elektrodialyse für den Entsalzungsprozess eingestellt und geändert werden. Es werden sämtliche Leitungen, Prozesswerte, Durchflussmengen, Drücke, Temperaturen und Leitfähigkeiten angezeigt und die Daten dieser Parameter aufgezeichnet.

In Abbildung 9 ist das Blockschaltbild inklusive Betriebsmodi der Anlage dargestellt.

Die Anlage bezieht das aufzubereitende Wasser vom Ablauf der Kläranlage, welches über den schwarzen Pfeil in Abbildung 9 zu erkennen ist. Das vorgereinigte Wasser gelangt im ersten Schritt in die Vorfiltration (Grob- und Feinfilter) und weiter in die Nanofiltration. Abhängig vom gewählten Betriebsmodus (Parallel- oder Serienbetrieb) wird das vorgefilterte Wasser entweder in die HUO und anschließend in die ED 2 geleitet oder das Wasser gelangt von der NF zur ED 1 und von dort in die ED 2. In beiden Betriebsmodi bildet die ED 2 den Abschluss der Anlage. Von dort kann das Konzentrat für die Salzstreuung entweder entnommen und extern gesammelt oder entsorgt werden. Das Diluat wird in den Vorfluter geleitet.

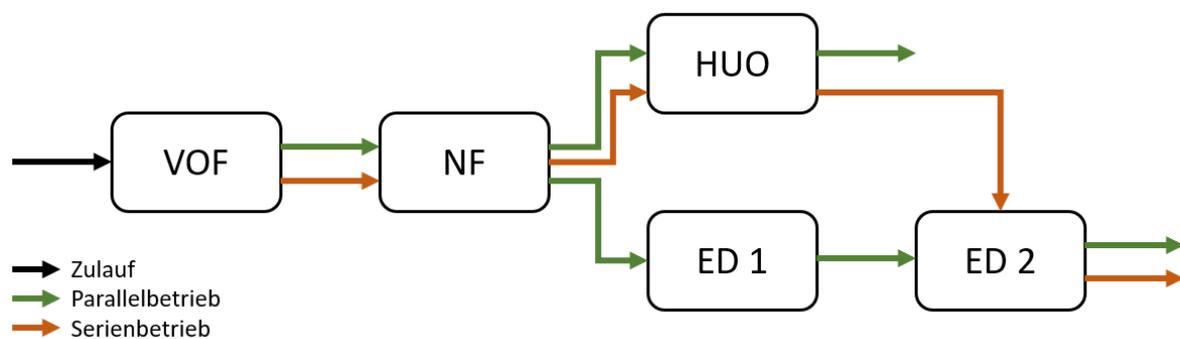


Abbildung 9: Blockschaltbild der gesamten Versuchsanlage inklusive Betriebsmodi

Um die beiden Entsalzungstechnologien und die Qualitäten der Produkte (Diluat, Konzentrat) vergleichen zu können, können zwei verschiedene Betriebsmodi gewählt werden: der Parallelbetrieb und der Serienbetrieb.

#### 4.2.1 Parallelbetrieb

Beim Parallelbetrieb gelangt das Wasser von der NF zur ED 1 und anschließend zur ED 2.

In der ED 1 wird das Wasser solange aufkonzentriert bis das Batchvolumen [kg] und die Zielleitfähigkeiten des Diluats und des Konzentrats, welche davor in der Bedienoberfläche eingestellt wurden, erreicht sind. Das Batchvolumen ist jenes Volumen, welches nach Erreichen der Zielleitfähigkeit des Konzentrats in den Pufferbehälter gelangt und dort die ED 2 speist. In der ED 2 wird das Wasser weiter aufkonzentriert, bis die Zielleitfähigkeit von Diluat und Konzentrat, die vorher in der Bedienoberfläche eingestellt worden sind, erreicht sind. Das Konzentrat kann extern gesammelt werden, das entsalzte Diluat wird entleert.

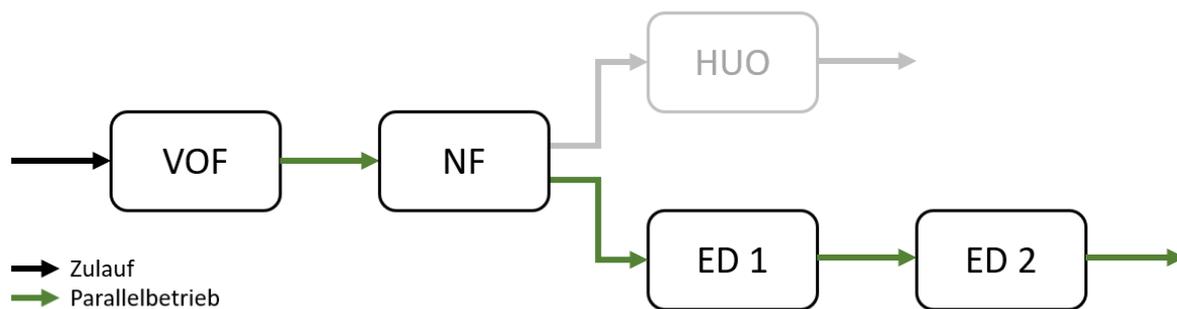


Abbildung 10: Blockschaltbild der Versuchsanlage im Parallelbetrieb

#### 4.2.2 Serienbetrieb

Anders als beim Parallelbetrieb wird beim Serienbetrieb die erste Stufe der Elektrodialyse ausgelassen. Nach der NF wird das Wasser mit der Umkehrosmose vorkonzentriert und gelangt dann in den Pufferbehälter, von dem es anschließend in die ED 2 gelangt und dort weiter aufkonzentriert wird. Die ED 2 läuft so lange bis die Zielleitfähigkeiten des Diluats und des Konzentrats erreicht ist. Das Konzentrat kann extern gesammelt werden, das entsalzte Diluat wird entleert.

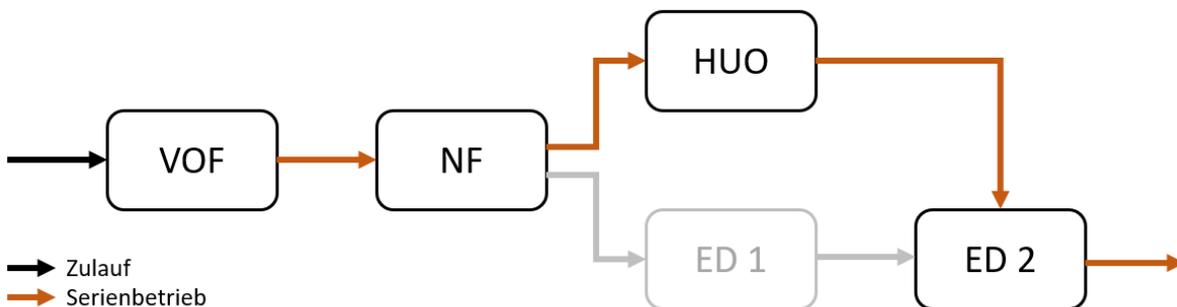


Abbildung 11: Blockschaltbild der Versuchsanlage im Serienbetrieb

## 4.3 Anlagenbeschreibung

In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Anlagenteile in der Pilotanlage beschrieben.

### 4.3.1 Zulauf der Anlage (Rohwasser)

Der Zulauf der Anlage erfolgt über eine Rohwasserpumpe (Kreiselpumpe), die mit einer konstanten Menge von etwa 1000 l/h (1 m<sup>3</sup>/h) über einen Ansaugbehälter und die Vorfilter in den Vorlagebehälter pumpt. Der Vorlagebehälter dient als Zwischenspeicher für die Umwälzung und Feinfiltration. Im Vorlagebehälter befindet sich ein Schrägboden und ein Abschlammventil, um den anfallenden Schlamm von Ausfällungen abziehen zu können.

Das Rohwasser wird vom Ablauf der Kläranlage von einem Schacht über ein perforiertes Rohr gepumpt. Das Wasser ist bereits durch den Prozess der Kläranlage vorgereinigt und würde anschließend in den Vorfluter (der Fluss Schwechat) abgeleitet werden. Der Ansaugbehälter hat ein Volumen von etwa 20 l.

### 4.3.2 Rohwasser-Vorwärmer und Oxidator

Aus dem Vorlagebehälter wird das vorgefilterte Wasser mit einer Umwälzpumpe über die Feinfilter, den Rohwasser-Vorwärmer und den Oxidator wieder zurück zum Vorlagebehälter zirkuliert.

Da die Anlage in den Sommermonaten bei der Kläranlage in Guntramsdorf installiert war, wies das Abwasser im Zulauf bereits eine Temperatur von etwa 27°C auf. Daher war der Einsatz des Vorwärmers im kommunalen Bereich nicht erforderlich. Im Winter würde der Vorwärmer das Abwasser auf eine Temperatur von mind. 15°C aufheizen, da die Trennleistung der Membranen bei zu niedrigen Temperaturen beeinträchtigt ist (Rösener, 2019).

Eisen und Mangan führt in Leitungen und an Membranen zu Ablagerungen und in weiterer Folge zu Korrosion und



Abbildung 12: Vorlagebehälter (schwarz) mit Rohwasser-Vorwärmer und Oxidator

daher Schäden im Leitungssystem. Dem Wasser wird daher über Druckluft Sauerstoff zugeführt und im Oxidator vermengt, um das gelöste Eisen und Mangan zu oxidieren.

### 4.3.3 Vorfiltration: Scheibenfilter und Beutelfilter

Die Vorfiltration dient dazu die Nanofiltration von gröberen Stoffen/Partikeln zu schützen und diese abzuscheiden. Um dies zu gewährleisten kommen einerseits Grobfilter in Form von Scheibenfilter und andererseits Feinfilter in Form von Beutelfiltern zum Einsatz.

#### 4.3.3.1 Grobfilter

Das Abwasser gelangt vom Zulauf zu den Vor-/Grobfiltern (2 Stück), die als Scheibenfilter fungieren und Grobstoffe abscheiden (sh. Abbildung 13). Die Maschenweite beträgt 200  $\mu\text{m}$ . Scheibenfilter setzen sich aus mehreren Kunststoffscheiben zusammen, die aufeinandergestapelt sind. Die Scheiben sind rau und bilden dadurch leichte Rillen, wodurch eine größere Filteroberfläche entsteht. Das Abwasser fließt durch die entstehenden Zwischenräume der Scheiben, Grobstoffe bleiben haften und werden

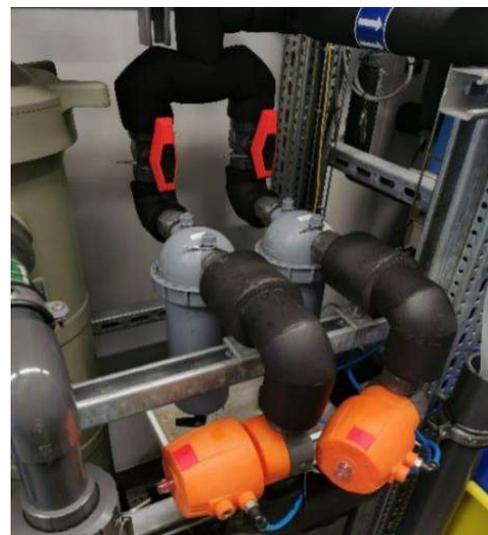


Abbildung 13: Scheibenfilter der Anlage

gefiltriert. Während dem Betrieb wird ein Filter verwendet, während der andere als Reserve verfügbar ist. Ist der Differenzdruck zwischen dem Eingangsdruck des Filters und dem Ausgangsdruck des Filters zu hoch, wird der Betriebsfilter automatisch abgeschaltet und auf den Reservefilter umgeschaltet. Der verschmutzte Scheibenfilter (sh. Abbildung 15) muss in weiterer Folge manuell mit Wasser gereinigt werden. Im Filterablauf können sowohl die Leitfähigkeit, als auch der pH-Wert und die Temperatur des Wassers gemessen werden.



Abbildung 14: sauberer Scheibenfilter [ARKAL Spine mit Scheibensatz für 1-1½" Scheibenfilter, 80 Mesh, o. J.]



Abbildung 15: verschmutzter Scheibenfilter

#### 4.3.3.2 Feinfilter

Das bereits vorgefilterte Wasser wird mittels Gewebe-Beutelfiltern mit einer Maschenbreite von 50 µm feinfltriert (sh. Abbildung 16, Abbildung 17). Das Wasser durchströmt den Beutelfilter von innen nach außen. Die Schmutzpartikel haften sich innen im Beutelfilter im Gewebe an und bleiben dort zurück (sh. Abbildung 18).

Wie bei den Scheibenfiltern, ist ein Beutelfilter in Betrieb, der andere fungiert als Reserve. Ist der Differenzdruck zu hoch, erfolgt ein Alarm und es muss manuell auf den anderen Beutelfilter umgeschaltet werden. Der verschmutzte Filter muss in Folge gegen einen neuen Beutelfilter ausgetauscht werden.



Abbildung 16: Beutelfilter der Anlage



Abbildung 17: sauberer Beutelfilter  
[Filterbeutel direkt vom Hersteller, o. J.]



Abbildung 18: verschmutzter Beutelfilter

#### 4.3.4 Nanofiltration

Aufbauend auf den bereits genannten Studien in Kapitel 3.1.1 wurde eine Nanofiltration in der Pilotanlage verbaut. Die NF dient zur Feinfiltration des bereits vorgefilterten Wassers. Es kommt ein Hohlfasermodul zur Anwendung, welches eine Gesamtfläche von 43 m<sup>2</sup> aufweist. Hohlfasermodule werden vor allem dort eingesetzt, wo große Membranflächen erforderlich sind (Melin & Rautenbach, 2007).

Das Funktionsprinzip eines Hohlfasermoduls ist in Abbildung 19 dargestellt und beschreibt den Inside-Out Betrieb des Moduls. Das Wasser wird in das Innere der Hohlfaser geleitet, fließt durch die Fasern, wird gefiltert und strömt anschließend nach außen und wird gesammelt (Melin & Rautenbach, 2007).



Schematic representation of a hollow-fiber module

1. Feed (raw solution)
2. Permeate (filtrate)
3. Retentate (concentrate)
4. Framed section
5. Hollow-fiber membrane bundle
6. Casing

Abbildung 19: Inside-Out Betrieb des Hohlfasermoduls [Breede, 2025]

Nanofiltrationsmembranen weisen in der Regel eine Porengröße von etwa 1 nm auf, was eine Molekulargewichtsgrenze (Molecular weight cut-off MWCO) von etwa 300-500 Da (Dalton) entspricht (Mohammad et al., 2015). Das Hohlfasermembranmodell in der Pilotanlage weist eine MWCO von 400 Da auf.

Die Molekulargewichtsgrenze beschreibt eine Charakterisierungsmethode, die vor allem bei Filtrationsverfahren verwendet wird, um sowohl die Porengrößenverteilung als auch das Rückhaltevermögen von Membranen zu erläutern. Die MWCO definiert das geringste Molekulargewicht eines gelösten Stoffes (in Dalton), bei dem 90 % des gelösten Stoffes von der Membran zurückgehalten werden (Song et al., 2020).

Das vorgefilterte Wasser wird durch die NF-Pumpe mit einer konstanten Menge von 950 l/h zum NF-Modul gefördert.

Im NF-Modul findet eine Cross-Flow-Filtration (Tangentialflussfiltration) statt. Für höhere Fluxraten wird das Feed-Bleed-System eingesetzt. Um die Überströmung der Membran, also die Cross-Flow-Filtration, zu erzeugen, wird eine konstante Menge von der Retentatseite auf die Zulaufseite des NF-Moduls recirkuliert. Die Umwälzung erfolgt mittels einer Umwälzpumpe (Bleedpumpe). Die Feedpumpe ist jene Pumpe, die das Wasser in das NF-Modul pumpt.

Das Permeat wird mit etwa 840 l/h in den NF-Behälter geleitet. Der Behälter dient als Puffertank für das Permeat, welches sowohl als Feed für die Umkehrosmose im Serienbetrieb als auch für die Elektrodialyse Stufe 1 im Parallelbetrieb dient.

### **Säure-/Laugendosierung:**

Die Wasserhärte im Wasser ist vom Gehalt der Calcium- und Magnesiumionen (Mineralien) abhängig. Die Wasserhärte wird in Grad deutscher Einheit (°dH) angegeben, wobei ein Grad deutscher Einheit einer Menge von etwa 7,15 mg gelöster Calcium-Ionen entspricht (BML, 2024a).

Der pH-Wert gibt die Konzentration des Wasserstoff-Ions an. Der pH-Wert kann zwischen 0 und 14 liegen, wobei Werte unter 7 eine saure Lösung angeben, Werte über 7 eine basische Lösung. Ist der pH-Wert 7 ist das Wasser neutral (BML, 2024a).



Abbildung 20:  
Nanofiltrationsmodul in  
der Anlage

Hartes Wasser, Wasser mit vielen Mineralien, hat einen höheren pH-Wert, da Erdalkalitionen basisch sind. Dieses alkalische Wasser verursacht Calciumcarbonat Ablagerungen in den Rohrleitungen, was zur Verstopfungen bzw. Scaling an den Membranen führt (Melin & Rautenbach, 2007). Die NF-Membran hält mehrwertige Anionen (z.B. Calciumionen) zum Teil zurück und hält diese im Umwälzkreislauf der NF. Dort werden sie aufkonzentriert. Um Ablagerungen im NF-Modul zu vermeiden wird in den NF-Kreislauf Salzsäure (HCl) mit einer Dosierpumpe dazu dosiert. Die Dosierung wird mit der pH-Wert Messung geregelt.

### Reinigung:

Im Betrieb der NF kommt es trotz der Dosierung von HCl zu Ablagerungen auf der Membran, die in bestimmten Abständen gespült werden müssen. Es werden drei verschiedene Methoden hierfür eingesetzt:

a) Wasserspülung (=Vorwärtsspülung) → intern in der Anlage:

Die Vorwärtsspülung findet in Zeitintervallen von etwa 0,5 h statt. Das Spülwasser ist entweder NF-Permeat oder HUO-Permeat. Um den Spülvorgang durchzuführen muss die Anlage gestoppt werden, wobei dieser Stopp automatisch erfolgt. Mit der Spülpumpe wird ein intensivierter Durchfluss auf der Zulaufseite zugeführt und auf der Retentatseite abgeleitet, um Ablagerungen auf der Membran zu entfernen. Nach der Spülung wird der Betrieb der NF wieder automatisch begonnen.

b) Chemikalien verstärkte Spülung (chemical enhanced flush CEF) → intern in der Anlage:

Sind mehrere Wasserspülungen durchgeführt worden, erfolgt danach eine chemisch verstärkte Spülung. Es werden Ablagerungen, die durch die Wasserspülungen nicht entfernt werden konnten (Fouling, Scaling), beseitigt. Im ersten Schritt wird eine alkalische Spülung mit Natriumhydroxid (NaOH) durchgeführt. Nach einer Wasserspülung erfolgt im zweiten Schritt eine saure Spülung, wo mit der Dosierpumpe HCl in das Spülwasser dazu dosiert wird.

c) Chemische Reinigung (cleaning in place CIP) → extern (Ausbau des NF-Moduls nötig):

Konnten nach der chemischen Reinigung nicht alle Ablagerungen von der Membran entfernt werden und steigt der Differenzdruck mit gleichen Betriebsparametern an muss eine chemische Reinigung mit dem externen CIP-System und speziellen Chemikalien durchgeführt werden. Das CIP-System dient zur externen Reinigung der H2O- und NF-Module. Der Reinigungsvorgang verläuft manuell.

Für die Reinigung muss das NF-Modul ausgebaut werden. Ein Reservemodul kann in die Anlage eingebaut werden, damit der Betrieb fortgesetzt werden kann.

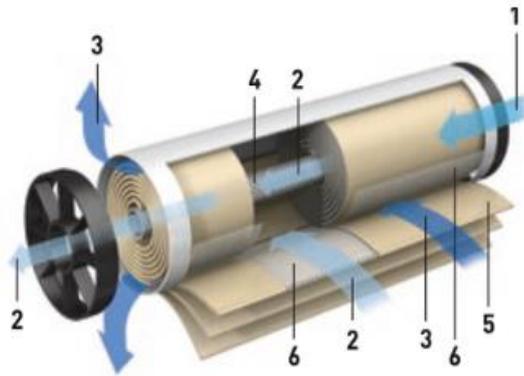
#### 4.3.5 Umkehrosmose

In der Pilotanlage wird die Umkehrosmose zur Entsalzung und Aufkonzentrierung des NF-Permeats angewendet. Die semipermeable Membran hält Salze wie Calcium, Magnesium, Natrium, Kalium, Chloride und Sulfate bis zu 99% zurück, in der Studie „Removal of emerging contaminants from wastewater using reverse osmosis for its subsequent reuse: Pilot plant“ (Egea-Corbacho Lopera et al., 2019) konnte sogar eine Entfernungsrate von 100 % erzielt werden (Egea-Corbacho Lopera et al., 2019).

Wie bereits erwähnt wird von dem zugeführten NF-Permeat ein Strom entsalztes Wasser (Permeat) und ein Konzentratstrom erzeugt.

Bei der Umkehrosmose werden spiralgewickelte Flachmembranen verwendet. Die Membranfläche beträgt etwa 8 m<sup>2</sup>. Das Funktionsprinzip der Membranen ist in Abbildung 21 dargestellt. Um das zentrale Permeatrohr sind mehrere Lagen stützschichtverstärkter Flachmembranen und Abstandhalter spiralförmig angebracht. Das Rohwasser fließt axial durch das gesamte Modul hindurch. Das gebildete Permeat fließt spiralförmig durch die Membran, um sich dann im Permeatrohr zu sammeln (Breede, 2025).

In der Pilotanlage werden insgesamt 6 Stück Spiralmodule genutzt, wobei je 2 Stück in Serie in einem Druckrohr eingebaut sind. Es sind 3 Stück Druckrohre in der Anlage verbaut, die parallel angeordnet sind. Es ergibt sich eine gesamte Membranfläche von 48 m<sup>2</sup>. Diese sind in Abbildung 23 dargestellt.



#### Schematische Darstellung eines spiralgewickelten Membranmoduls

1. Feed (Rohlösung)
2. Permeat (Filtrat)
3. Rententat (Konzentrat)
4. Permeatsammelrohr
5. Membrantasche
6. Spacer (Abstandshalter)

Abbildung 21: Spiralgewickelte Membran [Breede, 2025]

Das NF-Permeat wird aus dem NF-Behälter entnommen und mit der Zulaufpumpe über zwei Kerzenfilter auf die Saugseite der HÜO-Hochdruckpumpe zugeführt. Die Kerzenfilter dienen der Feinfiltration des Wassers bevor es in die HÜO – Module gelangt und sollen noch jene Teilchen zurückhalten, die möglicherweise von der NF nicht zurückgehalten wurden. Die Filter dienen somit als „Polizeifilter“ und sollen mögliche Partikel größer 5 µm zurückhalten. Auch hier besteht eine Redundanz, welche bei gewissen Differenzdrücken schlagend wird und somit ein Umschalten auf den Reservefilter erfolgen muss. Wie erwähnt, dienen diese Filter als Polizeistufe, im Regelfall ist das Permeat der NF bereits ausreichend gereinigt. Die Filter sind in Abbildung 22 dargestellt.



Abbildung 22: Kerzenfilter / Polizeifilter: sauber (li), verschmutzt (re)

Die HÜO-Hochdruckpumpe fördert das NF-Permeat mit einer konstanten Menge zu den Modulen. Der Druck ist abhängig vom Salzgehalt des Wassers, dem Membrantypen sowie der Wassertemperatur und dem Membran – Durchfluss.

Das erzeugte Permeat (etwa 450 l/h) wird im HUO-Behälter eingespeist und dort gespeichert. Es wird als Brauchwasser für jeweilige Spülungen (NF oder HUO) oder Filterreinigungen bzw. für diverse Zwecke, z.B. Händewaschen, verwendet. Überschüssiges Permeat läuft im Überlauf ab.

Das erzeugte Konzentrat (etwa 100 l/h) wird in den HUO-Konzentrat-Behälter (Puffertank) im zweiten Container geleitet und dort gespeichert. Es dient als Feed für die ED2. Um eine Überströmung in den Membranen zu erzeugen (Cross-Flow-Filtration) ist eine interne Umwälzung vorgesehen, wodurch sich eine verbesserte Membranleistung ergeben soll.

Wenn der Salzgehalt im Rohwasser zu gering ist, kann ein Teilstrom des Konzentrats zurück in den NF-Behälter rückgeführt werden, um durch die externe Rezirkulation den Salzgehalt im Zulauf der Umkehrosmose zu erhöhen. Dies ist jedoch nur bis zu einem gewissen Salzgehalt möglich, da sonst ein zu großer osmotischer Druck überwunden werden muss und dadurch die Effizienz des Prozesses reduziert wird. Des Weiteren besteht ein erhöhtes Scaling-Risiko (Melin & Rautenbach, 2007).

Das Konzentrat enthält die gelösten Salze des Rohwassers. Je nachdem wie die Wasserinhaltsstoffzusammensetzung vorliegt, kann es zu einer Überschreitung der Löslichkeit und damit zu Ausfällungen kommen. Um diese Ausfällungen zu verhindern, wird vor den Kerzenfiltern im Zulauf zu den HUO-Modulen ein Antiscalant in geringen Mengen zudosiert. Durch dieses Antiscalant, welches als Härtestabilisator fungiert, werden Ausfällungen (Kristallisation) von gering löslichen Stoffen verzögert und die Ablagerungen (Scaling) auf den Membranen verhindert. Als Antiscalant in der Pilotanlage kommt ein Organophosphat Type GWT RO-Tec106 (Phosphorsäureester) zur Anwendung. Es können Ausfällungen von Calciumkarbonat, Calciumsulfat, Strontiumsulfat, Bariumsulfat und Calciumfluorid verhindert werden.



Abbildung 23: Umkehrosmose-Modul in der Pilotanlage

### 4.3.6 Elektrodialyse

In der Pilotanlage kommt eine zweistufige Elektrodialyse zur Anwendung, welche von der Firma MemBrain ([www.membrain-it.com](http://www.membrain-it.com)) aus Tschechien gebaut und entwickelt wurde. Die erste Stufe der Elektrodialyse (ED1) konzentriert das NF-Permeat bis zu einer gewünschten Zielleitfähigkeit auf, wird dann weiter in die zweite Stufe der Elektrodialyse (ED2) geleitet, um dort weiter aufkonzentriert zu werden, bis die gewünschte Endkonzentration erreicht ist (Parallelbetrieb). Beim Serienbetrieb wird das HUO-Konzentrat als Feed für die ED2 verwendet.

Die Elektrodialyse in der Pilotanlage arbeitet sowohl im Batch-Betrieb, im Feed-and-Bleed als auch im kontinuierlichen Betrieb. In der ersten Stufe der ED ist eine Polumkehr möglich. Die ED2 hat keine Möglichkeit der Umpolung.

Das gesamte Elektrodialyseverfahren wird über die Bedienoberfläche gesteuert. Die Bedienoberfläche sendet alle Befehle über die Eingabe, in der alle Parameter für den Betrieb der beiden Stufen sowie Prozessparameter, Durchflussmengen, Drücke, Leitfähigkeiten und produzierte Diluat- und Konzentratmengen festgelegt werden. Des Weiteren werden die jeweiligen Zielleitfähigkeiten und Batchvolumina eingestellt. Es werden alle etwaigen Fehlermeldungen der ED an die Bedienoberfläche gesendet. Es ist möglich die ED im manuellen Modus (Hand-Modus) oder im automatischen Modus zu betreiben. Im Hand-Modus werden alle Teilschritte, also Füllen, Zirkulieren und Entleeren vom Benutzer ausgeführt. Zu Beginn der Inbetriebnahme war dies insbesondere erforderlich, um ein tieferes Verständnis der Anlage und dessen Betriebsweise zu erlangen. In weiterer Folge wird beim kontinuierlichen Betrieb der automatische Modus gewählt. Der Entsalzungsprozess ansich verläuft automatisch. Er muss jedoch manuell gestartet werden.

Die beiden Elektrodialysestufen sind auf einem sogenannten Rack verbaut und daher für etwaige Optimierungen gut geeignet (sh. Abbildung 25).

Die Anlage wird unter konstanten Betriebsbedingungen, also mit konstanter über die gesamte Prozessdauer angewandte Stromdichte, betrieben. Im Betrieb werden Spannungs- und Stromgrenzwerte in der Bedienoberfläche festgelegt (Grenzspannung, Grenzstrom). Die Gleichstrom-Leistung, d.h. der Strom fließt immer konstant in die gleiche Richtung, wird solange erhöht, bis einer der Grenzwerte erreicht ist.

Die Elektrodialyseanlage besteht aus folgenden Komponenten:

- Ionenaustauschermembranen
- Sicherheits-Kartuschenfilter
- Dosier- und Umwälzpumpen
- Interne Behälter
- Externe Behälter

In Abbildung 24 wird das Stack der ED in der Pilotanlage dargestellt.

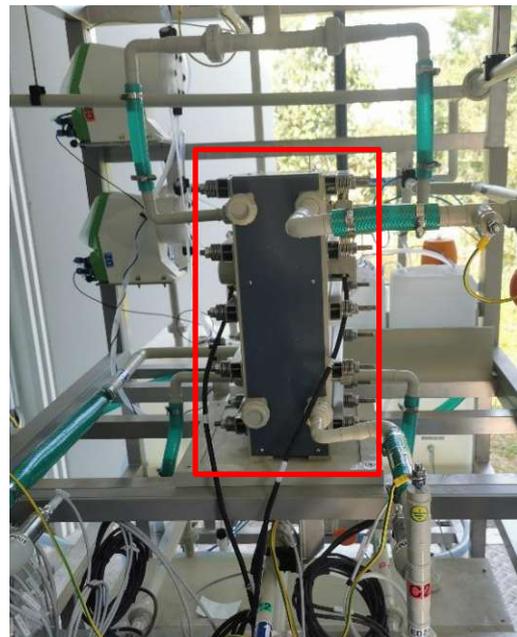


Abbildung 24: Stack der ED (rot), li...Frontansicht, re...Seitenansicht

In der ED1 sind heterogene Ionenaustauschermembranen verbaut, in der ED2 kommen homogene Membranen zum Einsatz. Der Unterschied zwischen heterogenen und homogenen Membranen besteht im Herstellungsverfahren und in der mechanischen Stabilität. Heterogene Membranen bestehen aus feinen kolloidalen Ionenaustauscherharzpartikeln, die in eine Polymermatrix eingebettet werden. Aufgrund des unterschiedlichen Quellungsgrades von Harz und Polymer weisen diese Membranen oft eine geringe mechanische Stabilität auf. Die Herstellung ist jedoch im Vergleich zu den homogenen Membranen einfacher und es sind mehr Freiheitsgrade möglich, um einen Kompromiss zwischen den elektrischen und mechanischen Eigenschaften zu schaffen. In der Praxis werden jedoch trotzdem weitgehend homogene Membranen verwendet. Die Herstellung ist aufwendiger und teurer, da verschiedene Polymerisationen durchgeführt werden müssen, sie zeigen jedoch eine gleichmäßigere Verteilung der Ladungsträger auf der Membran und daher

gleichmäßigere Eigenschaften und einen geringeren elektrischen Widerstand. Homogene Membranen besitzen eine höhere mechanische Stabilität als heterogene Membranen (Melin & Rautenbach, 2007).

Unmittelbar nach den Umwälzpumpen (ED1 und ED2), die für die Zirkulation im Stack sorgen, befinden sich Kartuschenfilter. Diese sollen Partikel, die sich noch im Wasser befinden, filtrieren (Porosität von 20  $\mu\text{m}$  oder weniger), da jegliche Verunreinigungen im Stack der ED zu Schäden und Verstopfungen führen können.

Des Weiteren befinden sich sowohl in ED1 als auch in ED2 Leitfähigkeits- und Temperaturmesssonden sowie pH-Wert-Messsonden und Durchflussmesser. Es ist möglich aus den externen Tanks der beiden Stufen, welche die fertigen Produkte (Diluat, Konzentrat) enthalten, Proben zu entnehmen.

#### **4.3.6.1 Parallelbetrieb**

Wie bereits in den vorigen Kapiteln erwähnt wird beim Parallelbetrieb die HUO nicht berücksichtigt und das NF-Permeat gelangt direkt in die Elektrodialyse Stufe 1 (ED1). Das Permeat wird in die externen Tanks der ED1 gefüllt, welche aus zwei zusätzlichen Tanks für das Diluat-Volumen und Konzentrat-Volumen bestehen. Die Füllmenge [kg] kann in der Bedienoberfläche beliebig eingestellt werden. Des Weiteren müssen Zielleitfähigkeiten in Form von Leitfähigkeitswerten [mS/cm] für Diluat als auch Konzentrat festgelegt werden.

Nachdem die externen Tanks befüllt sind, zirkuliert das Wasser in den Leitungen durch das Stack ohne Ionenaustausch, um etwaige Ablagerungen und Konzentrationsunterschiede zu beseitigen. Das Permeat fließt von den externen Tanks zur Ansaugung der Pumpen. Das aus dem Stack zurückfließende Diluat oder Konzentrat gelangt über ein 3-Wege-Ventil wieder zurück in den externen Tank. Das Permeat wird bis zur gewünschten Konzentration aufkonzentriert bzw. entsalzt, in dem es im Stack zirkuliert und Ionen ausgetauscht werden (gleichstrombetrieben). Im Feed-and-Bleed Modus wird nur das Diluat, wenn es die Wunschkonzentration erreicht hat, entleert und durch frisches Permeat ersetzt. Das Konzentrat bleibt im Kreislauf. Aus diesem Grund sind höhere Konzentrationen des Konzentrats möglich. Die ED1 ist so lange im Betrieb, bis das Diluat und das Konzentrat die gewünschte Konzentration erreicht haben. Zusätzlich zum gewünschten Konzentrat muss das festgelegte Batchvolumen [kg] erreicht werden. Das Diluat wird in den Kanal entleert, das

Konzentrat wird im Puffertank gepumpt und gesammelt. Das ED1-Konzentrat dient als Feed für die zweite Stufe der ED.

Sind das Batchvolumen und die Zielleitfähigkeiten erreicht, stoppt die ED1 automatisch und die ED2 startet. Diese entnimmt aus dem Puffertank das ED1-Konzentrat und befüllt damit die beiden externen Tanks der ED2. Wie in der ersten Stufe, werden auch hier Zielleitfähigkeiten festgelegt. Ein Batchvolumen muss in der zweiten Stufe der ED nicht bestimmt werden. Nach der Befüllung verläuft der ED-Prozess so wie in der ersten Stufe. Auch hier wird der Feed-and-Bleed-Modus angewendet. Sind die Zielleitfähigkeiten erreicht, wird das Diluat entleert und das Konzentrat kann extern gesammelt werden. In Guntramsdorf war die Sammlung des fertigen Konzentratprodukts noch nicht möglich, weshalb auch das Konzentrat verdünnt, durch eine Zwischensammelstation, in den Kanal geleitet wurde.

Diese Zyklen geben eine Charge an. Diese Chargennummer wird in der Bedienoberfläche eingegeben. Ist der Entsalzungsprozess beendet und soll ein neuer Zyklus begonnen werden, muss die Chargennummer geändert werden. Bei einer Betriebsstörung oder -unterbrechung, bei der Prozessparameter und die Chargennummer nicht geändert werden, läuft die ED nach Behebung des Problems weiter und es erfolgt keine Rücksetzung des Systems. Wird jedoch die Chargennummer geändert, wird das gesamte System zurückgesetzt und der Entsalzungsprozess beginnt von neuem.

Wie bereits erwähnt ist bei der ersten Stufe der ED eine Polumkehr möglich, um Ablagerungen auf den Membranen zu verhindern. Hierfür muss die Polarität umgestellt werden.

Damit es zu keinen Vermischungen der Konzentrate von ED1 und HUO-Konzentrat kommt, kann der Puffertank nach jeder Prozessänderungen entleert werden.

#### **4.3.6.2 Serienbetrieb**

Im seriellen Betrieb gelangt das HUO-Konzentrat in den Puffertank und wird nur in der ED2 aufkonzentriert. Vor dem Start der ED2 werden wieder Füllmengen der externen Tanks sowie Zielleitfähigkeiten festgelegt. Es muss kein Batchvolumen eingestellt werden. Nach dem Start werden die externen Behälter automatisch bis zur gewünschten Füllmenge befüllt. Nach der Zirkulation startet der Betrieb, bei dem das Diluat entsalzt und das Konzentrat aufkonzentriert wird. Es wird auch hier der Feed-

and-Bleed-Modus angewendet. Die Anlage stoppt automatisch, sobald die Zielleitfähigkeiten von Diluat und Konzentrat erreicht sind. Diluat wird entleert, das Konzentrat kann extern gesammelt werden. Aus den Werten, die in der Bedienoberfläche eingestellt wurden, ist erkennbar, dass der Serienbetrieb schneller abläuft als der Parallelbetrieb, da einerseits nur eine Stufe der ED benötigt wird und andererseits das Konzentrat der HUO bereits Konzentrationen von etwa 5,5 mS/cm aufweist. Das NF-Permeat hat eine Konzentration von nur 1,1 mS/cm. Die Ergebnisse der Entsalzungsversuche werden jedoch noch näher in Kapitel 5.2 erläutert.

In Abbildung 25 ist die Elektrodialyse der Pilotanlage dargestellt. In diesem Fall wird die ED2 gezeigt, sie unterscheidet sich optisch jedoch nicht von der ED1. Daher wurde darauf verzichtet beide Anlagenteile darzustellen.

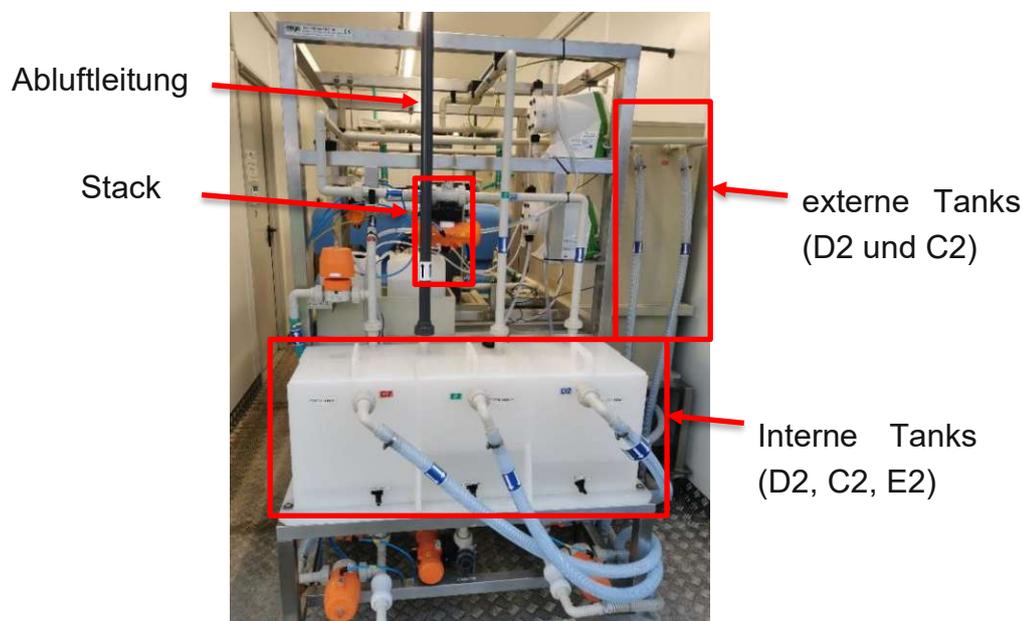


Abbildung 25: Elektrodialyse in der Pilotanlage (ED2)

#### 4.3.6.3 CIP (Cleaning in Place): Reinigung der ED-Stacks mit Chemikalien

Das gesamte ED-Modul wird einmal in der Woche mit Chemikalien gereinigt, um Ablagerungen an den Membranen zu vermindern. Dieser Prozess wird manuell durchgeführt, indem die internen Tanks mit Wasser gefüllt werden, die Säure wird darin zudosiert und die Zirkulation startet. Nach der Zirkulation werden die internen Tanks entleert, das Modul mit Wasser gespült und zirkuliert. Anschließend verläuft die alkalische Reinigung mit NaOH. Die internen Tanks werden wieder befüllt, NaOH wird darin zudosiert und das Wasser zirkuliert in der Anlage. Nach Beendigung der Zirkulation werden die internen Tanks entleert.

#### 4.3.6.4 Elektrolyt

Das Elektrolyt wird im Betrieb zwischen dem internen Behälter und dem ED-Modul zirkuliert. Für die Elektrolytlösung zur Spülung der Ionenaustauschmembranen wird  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (Natriumsulfat) verwendet (sh. Abbildung 27).

Im internen Behälter der ED2, indem sich das Elektrolyt befindet, hat sich nach einiger Zeit eine Ablagerung am Boden gebildet, welche in Abbildung 26 zu erkennen ist. Durch die NF können nicht alle zweiwertigen Ionen ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) entfernt werden, diese wurden im Parallelbetrieb über die ED1 weiter zur ED2 verschleppt. Im Kapitel 5.1.1 werden die Ergebnisse der Stoffentfernung detaillierter beschrieben. Die Studie „Effect of magnesium/calcium ratios in solutions treated by electro dialysis: Morphological characterization and identification of anion-exchange membrane fouling“ (Casademont et al., 2008) beschreibt, welche Ablagerungen sich auf der Anionenaustauschermembran während dem Betrieb der ED von Salzlösungen mit verschiedenen Magnesium- und Calciumverhältnissen bilden. Das Ergebnis der Studie hat gezeigt, dass die Ablagerung Calciumhydroxid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ist, jedoch nur, wenn sich in der Salzlösung kein Magnesium befindet. Befindet sich Magnesium in der Lösung, was in der Pilotanlage in Guntramsdorf der Fall war, ist die Ablagerung eine Mischung aus Kalk ( $\text{CaCO}_3$ ),  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  und Magnesiumhydroxid ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ). Dies ist laut der Studie unter anderem auf eine Erhöhung des pH-Wertes an der Grenzfläche der Anionenaustauschermembran zurückzuführen (Casademont et al., 2008). Dies könnte in der Pilotanlage passiert sein. Der pH-Wert betrug im ED2 Diluat bzw. im ED2 Konzentrat etwa 7,8 – 8,1, also basischer Bereich. Durch die Elektrodenspülung ist die Ablagerung danach in den internen Behälter der ED2 gelangt und hat sich dort abgesetzt.

Möglicherweise hatten die hohen Temperaturen in den Sommermonaten während der Inbetriebnahme ebenfalls einen Einfluss auf das  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Außerdem könnten Anoden- bzw. Kathodenreaktionen aufgetreten sein, die eine Fällung zur Ursache hatten. Des Weiteren könnte es auch damit zusammenhängen, wie oft eine chemische Reinigung durchgeführt wurde.

Für einen ordnungsgemäßen Betrieb ist ein in gewissen Zeitabständen erfolgter Austausch des Elektrolyts daher unvermeidbar.

Außerdem war im internen Tank ein Chlorgeruch wahrzunehmen, der auf die Bildung von Chlorgas in der ED durch die Elektrodenreaktionen hinweist. Dieses wird jedoch durch ein internes Abluftsystem (Elektrodengebläse) aus der Anlage geschleust.



Abbildung 27:  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  für Elektrolytlösung



Abbildung 26: Ablagerung des Elektrolyts im internen Tank (E2) der ED2

## 4.4 Probenahmen

Im Zuge dieser Diplomarbeit lag ein Schwerpunkt auf der Inbetriebnahme der Pilotanlagen, jedoch wurde in weiterer Folge auch ein Testbetrieb inklusive Probenahmen und Analytik durchgeführt. In der gesamten Anlage sind Probenahmestellen angeordnet, um das Wasser an unterschiedlichen Stellen der Aufbereitungstechnologien auf Spurenstoffe bzw. auf Nährstoffe untersuchen zu können und so eine Bewertung der Pilotanlage durchführen zu können. Während verschiedener Entsalzungsversuche (sowohl im Parallelbetrieb als auch im seriellen Betrieb) mit unterschiedlichen Zielleitfähigkeiten, sowohl im Parallelbetrieb als auch im Serienbetrieb, wurden gezielte Probenahmen durchgeführt.

Um eine repräsentative Probe zu erhalten, wird die Leitung und der Behälter der Probenahme mit der jeweiligen Flüssigkeit durchgespült und erst dann entnommen bzw. in den Behälter gefüllt. Es muss die genaue Uhrzeit der Entnahme auf dem Behälter notiert werden, um im Nachhinein auf die entsprechenden Daten, die in der Anlage durch Messsonden gemessen werden, Schlüsse ziehen zu können bzw. Vergleiche anstellen zu können.

Die Proben wurden in 250 ml, 500 ml oder 1000 ml Behälter befüllt, je nachdem, welche Menge für die Analyse im Labor benötigt wird. Anschließend wurden die Proben eingekühlt oder eingefroren und im Labor der TU Wien auf Spurenstoffe (Schwermetalle, etc.) sowie Nährstoffe analysiert.

Die Proben werden auf folgende **Nährstoffe** mittels Durchflussanalysen und spektrometrischen Nachweisen im Labor untersucht:

- Phosphat ( $\text{PO}_4\text{-P}$ )
- Ammonium ( $\text{NH}_4\text{-N}$ )
- Stickoxide ( $\text{NO}_x\text{-N}$ )
- Nitrit ( $\text{NO}_2\text{-N}$ )
- Hydrogencarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ )
- Chlor ( $\text{Cl}^-$ )
- Sulfat ( $\text{SO}_4$ )
- Natrium ( $\text{Na}^+$ )
- Kalium ( $\text{K}^+$ )
- Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ )
- Magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ )

Die Kationen ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) werden mittels Ionenchromatographie untersucht.

Die in Kapitel 3.2 genannten Spurenstoffe sind vom Umweltbundesamt definiert. Aufbauend auf diesen Indikatorsubstanzen wurden im Labor die Proben mittels Online-Festphasenextraktion gekoppelt mit der Hochleistungsflüssigkeitschromatographie - Analyse und Massenspektrometrie auf folgende **Spurenstoffe** untersucht:

- Coffein: Dieser Stoff kommt in vielen natürlichen Pflanzenarten und daher auch in Lebensmitteln vor (Schramm et al., 2006).
- Metoprolol
- Benzotriazol
- Sulfamethoxazol: Dieser Stoff wird als Antibiotikum zur Behandlung von Harnwegsinfekten und Lungenentzündungen angewendet (Werth, 2024).
- Amidotrizoesäure: Dieser Stoff wird in der Radiologie als Kontrastmittel verwendet (Aktories et al., 2004).
- Carbamazepin

- Diuron: Es wird als Herbizid angewendet. Es hemmt die Photosynthese von Pflanzen und wird meist als Unkrautvernichter eingesetzt (Moncada, 2004).
- Acesulfam-K
- Bezafibrat: Dieser Stoff ist ein lipidsenkendes Medikament, welches bei Fettstoffwechselstörungen eingesetzt wird (Goldenberg et al., 2008).
- Diclofenac
- Ibuprofen: Dieser Wirkstoff wird als Arzneimittel bei der Behandlung von Schmerzen und Entzündungen angewendet (Song et al., 2020).
- Trimethoprim: Dieser Wirkstoff wird in der Medizin als Antibiotikum eingesetzt. Er verändert den Stoffwechsel der Bakterien und hemmt die weitere Teilung und damit das Wachstum (Huovinen, 1987). Das Antibiotikum wird, wie Sulfamethoxazol, auch für Lungenentzündungen und Harnwegsinfekten angewendet (Werth, 2024).
- Amisulprid: Dieser Wirkstoff hat eine antipsychotische Wirkung und wird in der Medizin bei der Behandlung von Schizophrenie angewendet (McKeage & Plosker, 2004).
- Citalopram: Dieser Stoff wird als Antidepressivum zur Behandlung von Depressionen und anderen psychischen Erkrankungen angewendet (Bezchlibnyk-Butler et al., 2000).
- Venlafaxin: Dieses Medikament wird bei Depressionen angewendet (Licht & Kassow, 1998).
- Irbesartan: Dieser Stoff wird bei der Behandlung von Hypertonie (Bluthochdruck) eingesetzt (Gillis & Markham, 1997).
- Hydrochlorothiazid: Dieser Wirkstoff wird zur Entwässerung des Körpers sowie zur Behandlung von Bluthochdruck angewendet (Aktories et al., 2013).

#### 4.4.1 Diluat-, Permeat- und Konzentrat-Probenahmen

Es wurden Proben an den folgenden Probenahmestellen entnommen:

- Rohwasser: Die Probe vom Zulauf der Anlage wurde direkt aus dem Ablaufbauwerk der Kläranlage entnommen. Im Zuge der Probenahme wurde der pH-Wert, die Temperatur und die Leitfähigkeit der Zulaufprobe mit einer Handsonde gemessen.

- VOF: Die Probe wurde vor der NF entnommen. Die Vorfiltration ist somit als abgeschlossenes System beprobt worden. Einzelne Teilströme wurden hier aufgrund der bedingten Änderungen in der Wasserzusammensetzung, nach erfolgter Vorfiltration, bewusst nicht weiter beprobt.
- Feed ED1 und HUU: Mit dieser Probe wird das NF Permeat analysiert, welches den Feed für die ED1 bzw. die HUU darstellt.
- Feed HUU: Die Probe wird nach dem HUU-Feinfilter, aber vor der HUU entnommen.
- Permeat HUU: Mit dieser Probe wird das Permeat der HUU beprobt.
- Konzentrat HUU: Des Weiteren wird das Konzentrat der HUU mit einer Probe nach dem Betrieb analysiert. Das Konzentrat der HUU dient als Feed für die ED2.
- Diluat ED1: Die Probe vom Diluat der ED1 wurde nach dem Entsalzungsversuch aus dem externen Tank der ED1 entnommen.
- Konzentrat ED1: Die Probe vom Konzentrat der ED1 wurde nach dem Entsalzungsversuch aus dem externen Tank der ED1 entnommen.
- Diluat ED2: Die Probe vom Diluat der ED2 wurde nach dem Entsalzungsversuch aus dem externen Tank der ED2 entnommen.
- Konzentrat ED2: Die Probe vom Konzentrat der ED2 wurde nach dem Entsalzungsversuch aus dem externen Tank der ED2 entnommen.

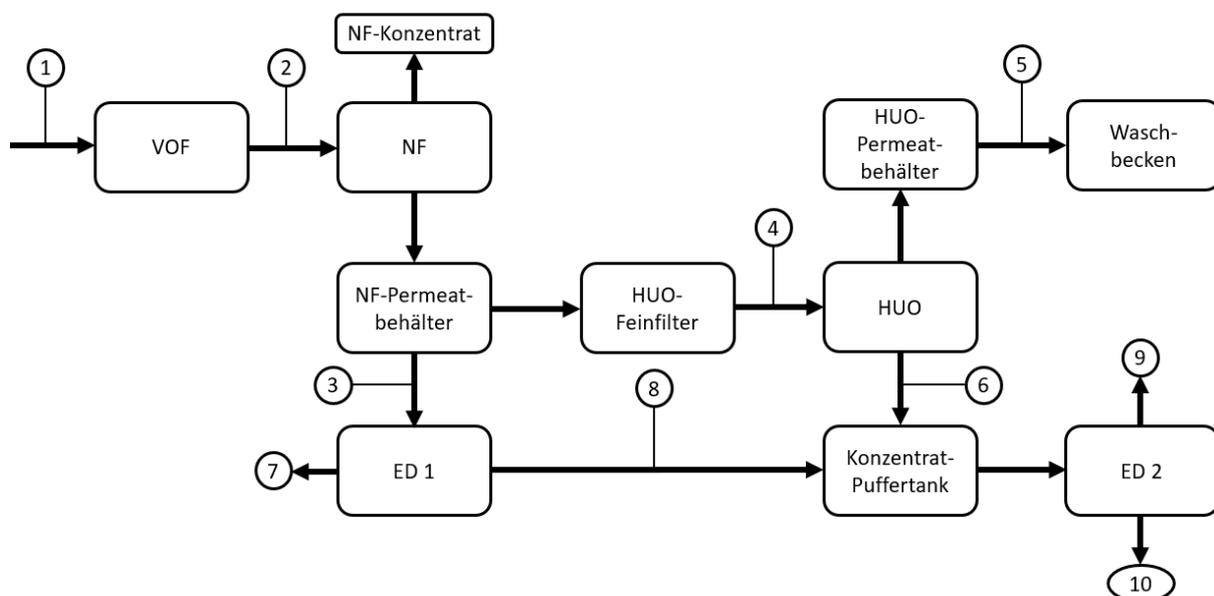


Abbildung 28: Schema der Probenahmestellen auf der Versuchsanlage

Ein Schema der Probenahmestellen kann in Abbildung 28 entnommen werden. In Tabelle 1 können die Bezeichnungen mit den Nummern der Probenahmen dargestellt. Die Nummerierung 1 – 3 stellt den Zulauf, die VOF inkl. NF dar, welche in beiden Betriebsfällen (Parallel- und Serienbetrieb) durchlaufen werden muss. Die Nummern 4 – 6 stellen den Beginn des Serienbetriebs dar, also VOF – NF – HUO, gefolgt von 9 und 10, welches das Ende des Serienbetriebs, also die Aufkonzentrierung in der ED2, darstellt. Der Parallelbetrieb startet, nach 1-3, bei Nummer 7 und 8, bei Stufe 1 der ED und endet bei 9 und 10, bei der ED2.

Tabelle 1: Bezeichnungen mit Nummer der Probenahmestellen 1 - 10

Probenahmestellen	Bezeichnung
1	Rohwasser
2	VOF
3	NF Permeat
4	HUO-Feinfilter
5	HUO-Permeat
6	HUO-Konzentrat
7	ED1-Diluat
8	ED1-Konzentrat
9	ED2-Diluat
10	ED2-Konzentrat

In weiterer Folge wurden später die Probenahmestellen angepasst, damit ein besserer Vergleich zwischen den beiden Betriebsmodi, Parallelbetrieb und Serienbetrieb, dargestellt werden kann. Es wird primär die Aufkonzentration betrachtet.

Folgende Probennahmen wurden zusätzlich durchgeführt (sh. auch Tabelle 2):

#### A) Parallelbetrieb (kurz PB):

##### M1) Mischprobe des Diluats und Konzentrats der ED1 vor dem Entsalzen/Betrieb:

Die Mischprobe stellt das NF-Permeat dar, welches nach der Befüllung in die externen Tanks als Feed für die ED1 zur Verfügung steht. Es wird nach der Zirkulation (vor dem Betrieb) der ED1 im Verhältnis 1:1 in die Probebehälter gefüllt.

##### M2) Mischprobe des Diluats und Konzentrats der ED2 vor dem Entsalzen/Betrieb:

Die Mischprobe stellt den Feed der ED2 dar, welches nach der Befüllung in die externen Tanks zur Verfügung steht und von dort nach der Zirkulation (vor dem Betrieb) der ED2 im Verhältnis 1:1 in die Probebehälter befüllt wird.

## B) Serienbetrieb (kurz SB):

### M3) Mischprobe des Diluats und Konzentrats der ED2 vor dem Entsalzen/Betrieb:

Die Mischprobe stellt das HUO-Konzentrat dar, welches nach der Befüllung in die externen Tanks als Feed für die ED2 zur Verfügung steht. Es wird nach der Zirkulation (vor dem Betrieb) der ED2 im Verhältnis 1:1 in die Probebehälter gefüllt.

Tabelle 2: Bezeichnungen mit Nummer der Probenahmestellen M1, M2, und M3

Probenahmestellen	Bezeichnung
M1	ED1 Dil. + Konz. (PB)
M2	ED2 Dil. + Konz. (PB)
M3	ED2 Dil. + Konz. (SB)

## 4.4.2 Chlorid-Küvetten-Tests

Um den Chloridgehalt des fertigen Diluats und Konzentrats der ersten und zweiten Stufe der ED zu bestimmen, wurden Chlorid-Küvetten-Tests mit einem Photometer durchgeführt.

Ein Photometer ist ein Gerät für die Lichtstärkenmessung und dient in der analytischen Chemie zur Bestimmung von Konzentrationen in Lösungen (Zöllner, 1879).

Hierfür wurde 1 ml der Probe in eine vorgefertigte Lösung in einer Eprovette zur Bestimmung des Chloridgehalts pipettiert (sh. Abbildung 29: Eprovette mit roter Kappe). Nachdem die Eprovette geschüttelt wurde, muss 3 Minuten gewartet werden, bis diese in das Photometer gesteckt werden kann. Das Gerät kann aufgrund der Farbe automatisch erkennen, wie hoch der Chloridgehalt in der Probe ist. Der Wert muss dreimal gemessen werden, um etwaige Ausreißer zu erkennen und bildet im Anschluss den Mittelwert dieser drei Werte. Bevor die Probe in das Photometer gegeben werden kann, muss davor die Nulllösung eingeführt werden, damit der Chloridgehalt gemessen werden kann (sh. Abbildung 29: Eprovette mit weißer Kappe). Der Chloridgehalt der Konzentrate war jedoch so hoch, dass ein Verdünnungsfaktor von 10



Abbildung 29: Küvetten-Tests der Firma Hach [Chlorid Küvetten-Test 1-70 mg/L / 70-1000 mg/L Cl<sup>-</sup>, 24 Bestimmungen, o. J.]

genommen werden musste. Es wurden nur 0,1 ml pipettiert.

Die Ergebnisse der Chlorid-Küvetten-Tests werden in Kapitel 5.2 erläutert.

## 4.5 Formeln für Berechnungen

In den folgenden Kapiteln werden alle Formeln angegeben, die in der Diplomarbeit benötigt wurden, um Berechnungen durchzuführen.

### 4.5.1 Stofffracht – Berechnung

Frachten werden verwendet, um den Stoffeintrag in Fließgewässern zu bilanzieren und zu vergleichen. Frachten geben einen Massenstrom an. Des Weiteren dienen Frachten zu überprüfen, ob die Ziele des Gewässerschutzes eingehalten wurden (Hilden, 2003).

Frachten werden mithilfe der Konzentration und des Abflusses (Durchflusses) wie folgt berechnet:

Formel 7: Fracht-Berechnung [mg/h] [Hilden, 2003]

$$F \left[ \frac{mg}{h} \right] = c \left[ \frac{mg}{l} \right] * Q \left[ \frac{l}{h} \right]$$

Der Durchfluss in der Pilotanlage wird in [l/min] angegeben. Die Fracht wird daher in [mg/min] berechnet und wird in weiterer Folge umgewandelt zu [kg/h].

Für den Durchflusswert werden Daten in einer 5 Minuten-Spanne während der Beprobung herangezogen und dann das arithmetische Mittel davon berechnet.

### 4.5.2 NaCl - Konzentration Berechnung

Da in der Pilotanlage keine Konzentrationen gemessen werden, sondern nur Leitfähigkeitswerte kann mithilfe der von der Firma MemBrain zur Verfügung gestellten Formel, die NaCl-Konzentration mittels der Leitfähigkeit berechnet werden.

Die Formel lautet wie folgt, wobei  $c$  die Konzentration in [g/l], und  $\kappa$  die Leitfähigkeit in [mS/cm] darstellt:

Formel 8: NaCl-Konzentration

$$c = 1,59 * 10^{-4} - 1,91 * 10^{-3} * \kappa^{\frac{1}{2}} + 0,462989 * \kappa + 2,7836 * 10^{-2} * \kappa^{\frac{3}{2}} + 5,6 * 10^{-4} * \kappa^2$$

### 4.5.3 HUO-Reinwasserausbeute

Die Reinwasserausbeute (HUO Permeat) ist wie folgt definiert und zu berechnen:

Formel 9: Reinwasserausbeute [%]

$$\frac{\text{Permeatdurchfluss}}{\text{Rohwasserzufluss}} * 100 = \text{Reinwasserausbeute} [\%]$$

Es werden die Daten auf Basis der 15 -minütigen Mittelwerte des Permeatdurchflusses und des Konzentratdurchflusses berechnet.

Die Umkehrosmose ist für eine Reinwasserausbeute von max. 85 % vorgesehen.

### 4.5.4 Salzpassage / Salzurückhalterate in der HUO

Um die Salzpassage bzw. die Salzurückhalterate in der HUO zu berechnen, wird die Leitfähigkeit des Permeats der HUO und die Leitfähigkeit des Pumpenzulaufs benötigt.

Formel 10: Salzpassage [%]

$$\frac{\text{HUO Permeat Leitfähigkeit}}{\text{Pumpenzulauf Leitfähigkeit}} * 100 = \text{Salzpassage} [\%]$$

Formel 11: Salzurückhalterate [%]

$$100 - \text{Salzpassage} = \text{Salzurückhalterate} [\%]$$

Es werden die Daten auf Basis der 15 -minütigen Mittelwerte der Leitfähigkeiten berechnet.

## 5 Auswertung / Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Auswertungen der Probenahmen sowie die Entsalzungsversuche analysiert. Des Weiteren werden die Erkenntnisse der Inbetriebnahmen und etwaige Optimierungen des Betriebs dargestellt.

### 5.1 Probenahmen-Ergebnisse

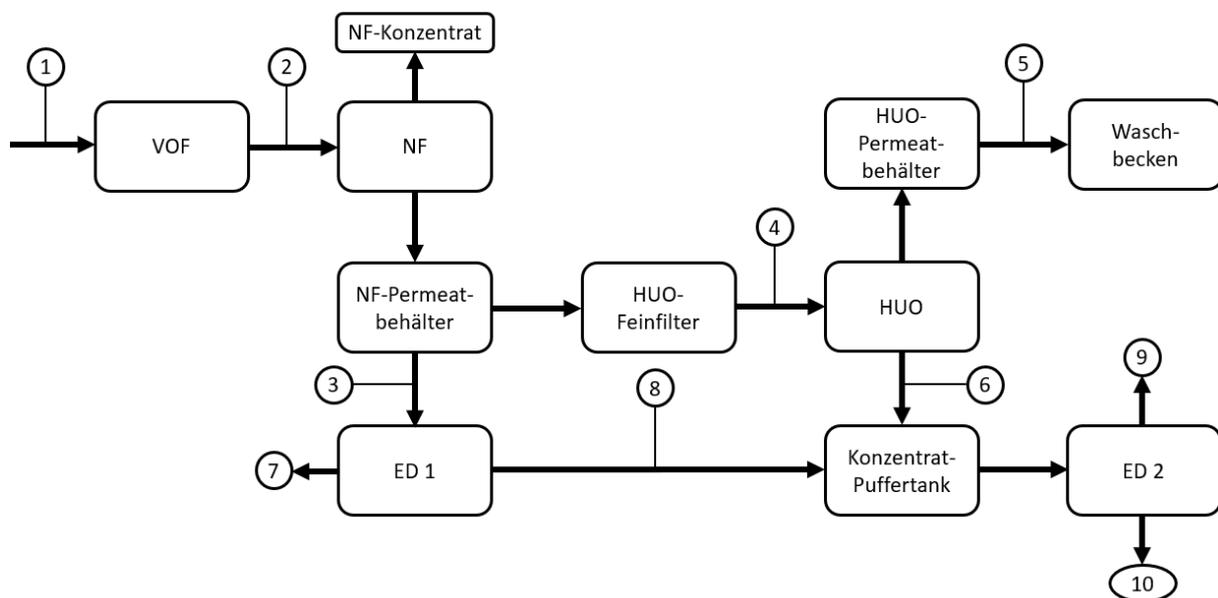


Abbildung 30: Schema der Probenahmestellen auf der Versuchsanlage

(1 = Rohwasser; 2 = VOF, 3 = NF Permeat, 4 = HUO-Feinfilter, 5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED1-Konzentrat, 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat)

Im Zuge der Inbetriebnahme in Guntramsdorf wurden zu folgenden Terminen Probenahmen durchgeführt, um die Entfernung von Nährstoffen und organischen Spurenstoffen als auch das Entsalzungspotential der Anlage zu analysieren.

- Entsalzungsversuch am 22.07.2024:  
An diesem Tag wurde ein Parallelbetrieb durchgeführt und beprobt. Die Beprobung erfolgte über die gesamte Anlage.
- Entsalzungsversuch am 22.08.2024:  
Es wurde zuerst ein Parallelbetrieb durchgeführt und beprobt, gefolgt von einem Serienbetrieb. Dieser wurde ebenfalls beprobt, um einen Vergleich darstellen zu können. Die Beprobung hat sich auf die Entsalzungstechnologien beschränkt, es wurde daher auf eine Probe beim Zulauf und der VOF verzichtet. Um dennoch den Entsalzungsvorgang bilanzieren zu können, erfolgte die Beprobung ab dem NF-Permeat.

- Entsalzungsversuch am 29.08.2024:  
Es wurde noch einmal ein Parallelbetrieb durchgeführt. Die Beprobung erfolgte wieder über die gesamte Anlage.
- Probenahme am 02.09.2024:  
Es wurde nur der ED1-Kreislauf beprobt, um Aussagen bzgl. Hydrogencarbonat ( $\text{HCO}_3$ ) – Ausfällungen treffen zu können.

### 5.1.1 Nährstoff – Entfernung

Im Zuge der Inbetriebnahme der Pilotanlage wurde untersucht, ob mittels Membrantechnik noch mehr Nährstoffe aus dem Kläranlagenablauf entfernt werden können. In den folgenden Seiten werden die Nährstoffe, die in den Probenahmen enthalten waren, analysiert.

#### A) Probenahme-Resultate vom 22.07.2024

Tabelle 3: PN-Resultate vom 22.07.2024 → Nährstoffe [mg/l]

(1 = Rohwasser; 2 = VOF, 3 = NF Permeat, 4 = HUO-Feinfilter, 5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, 7 = ED1-Diluat, 9 = ED2-Diluat)

PN	PO <sub>4</sub> -P	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>x</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N
1	0,1	0,48	0,52	0,03
2	0,07	0,45	0,51	0,03
3	0,04	0,69	0,35	0,03
4	0,06	0,59	0,43	0,03
5	0,04	0,37	0,05	0,02
6	0,34	2,26	1,72	0,12
7	0,03	0,25	0,11	0,01
9	0,04	0,1	0,13	0,04

In Abbildung 31 ist die Bilanzierung von Phosphor und Stickstoff von der Probenahme am 22.07.2024 dargestellt.

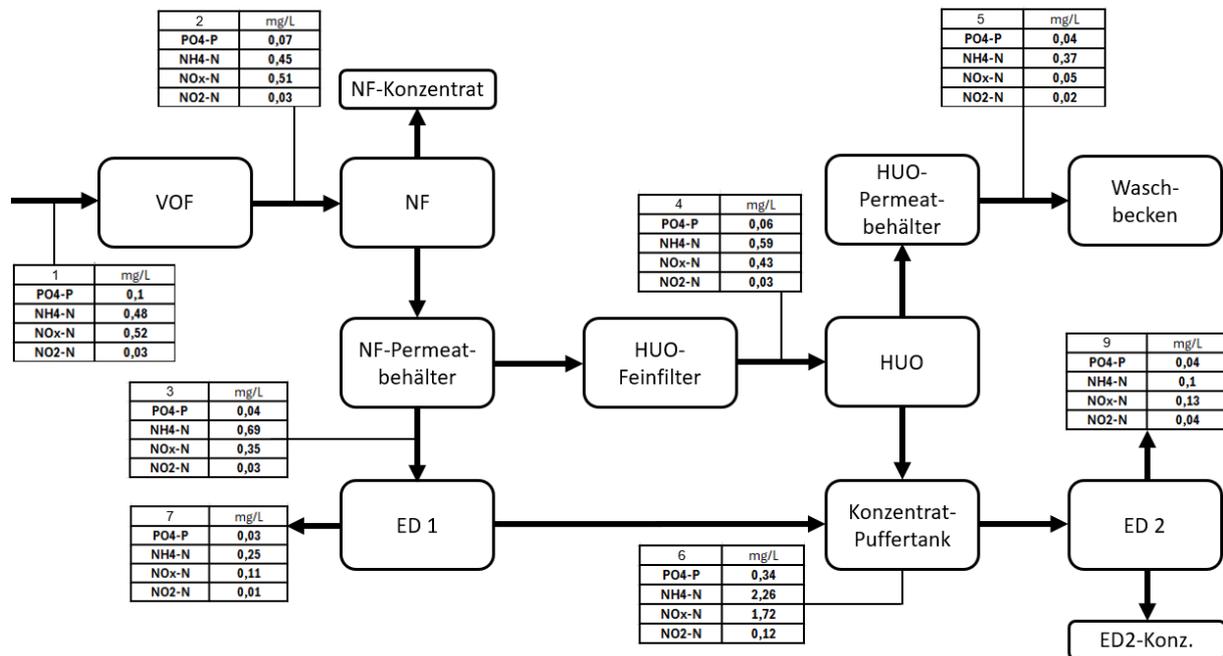


Abbildung 31: Nährstoff-Entfernung vom 22.07.2024 [mg/l]

(1 = Rohwasser; 2 = VOF, 3 = NF Permeat, 4 = HHO-Feinfilter, 5 = HHO-Permeat, 6 = HHO-Konzentrat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED2-Diluat)

Die Kläranlage Guntramsdorf (27.000 EW), bei der die Pilotanlage installiert war, besitzt bereits eine eigene biologische Phosphorentfernung mit einer Reinigungsleistung von 93% (*Marktgemeinde Guntramsdorf - Abwasser Service Betrieb*, 2024). Aus dem Bescheid der Kläranlage Guntramsdorf, der die Ablauf-Emissionen enthält, geht hervor, dass der Gesamt-Phosphor-Gehalt maximal 0,7 mg/l betragen soll. In der Bilanz ist zu erkennen, dass der Grenzwert von PO<sub>4</sub>-P im Ablauf der Kläranlage bzw. im Zulauf der Pilotanlage eingehalten wurde. Aufgrund der Phosphorentfernung in der Kläranlage ist in der Bilanz gut zu erkennen, dass im Ablauf nur noch sehr wenig PO<sub>4</sub>-P, nämlich 0,1 mg/l, enthalten ist. Durch die NF wird PO<sub>4</sub>-P noch weiter reduziert. Das Diluat in der ED1 enthält nur noch 0,03 mg/l PO<sub>4</sub>-P. Im ED2-Diluat wird der PO<sub>4</sub>-P auf 0,04 mg/l reduziert. Über die HHO-Feinfilter wird vermutlich etwas verschleppt, da es hier zu einer leichten Erhöhung kommt. In der HHO wird der PO<sub>4</sub>-P im Permeat auf 0,04 mg/l reduziert, im Konzentrat jedoch auf 0,34 mg/l aufkonzentriert.

Die Reinigungsleistung der Stickstoffverbindungen in der Kläranlage Guntramsdorf beträgt 91 % (*Marktgemeinde Guntramsdorf - Abwasser Service Betrieb*, 2024). Aus dem Bescheid der Kläranlage Guntramsdorf, der die Ablauf-Emissionen enthält, geht hervor, dass der NH<sub>4</sub>-N-Gehalt maximal 3 mg/l betragen soll. In der Bilanz ist zu

erkennen, dass der Grenzwert von  $\text{NH}_4\text{-N}$  im Ablauf der Kläranlage bzw. im Zulauf der Pilotanlage und im ED2-Diluat eingehalten wurde.

Der  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalt im Zulauf der Pilotanlage beträgt 0,48 mg/l und wird in der Pilotanlage schrittweise reduziert. Während der NF wird  $\text{NH}_4\text{-N}$  zwar aufkonzentriert, im ED1-Diluat beträgt die  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration jedoch nur noch 0,25 mg/l. Im ED2 - Diluat beträgt die Konzentration 0,1 mg/l,  $\text{NH}_4\text{-N}$  konnte um 80 % reduziert werden. Im HUO-Permeat wurde der  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalt auf 0,37 mg/l reduziert. Der  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalt beträgt im HUO-Konzentrat 2,26 mg/l.

In der Bilanz ist zu erkennen, dass  $\text{NO}_2\text{-N}$  schrittweise reduziert wird. Der  $\text{NO}_2\text{-N}$ -Gehalt beträgt anfangs 0,03 mg/l, verbleibt in der NF und der HUO gleich und reduziert sich im HUO-Permeat auf 0,02 mg/l. Das HUO-Konzentrat enthält 0,12 mg/l  $\text{NO}_2\text{-N}$ . Es ist zu erkennen, dass das ED2-Diluat 0,04 mg/l enthält, also einen etwas höheren Wert als am Anfang. Der  $\text{NO}_2\text{-N}$ -Gehalt im ED1-Diluat beträgt 0,01 mg/l. In der Allgemeinen Abwasseremissionsverordnung (AAEV) von 2025 wird folgende Anforderung für Einleitungen in ein Fließgewässer festgelegt. Der Grenzwert von Nitrit ( $\text{NO}_2$ ) ist auf 1,0 mg/l begrenzt (AAEV, 2025). Der Grenzwert vom ED2-Diluat aus der Pilotanlage ist somit eingehalten.

Wie bereits beim Ammonium und dem Nitrit werden auch die Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) in der Pilotanlage im Diluat/Permeat reduziert und im Konzentrat der HUO aufkonzentriert. Der  $\text{NO}_x$ -Gehalt im Zulauf beträgt 0,52 mg/l. Das ED1-Diluat enthält nur mehr 0,11 mg/l und das ED2-Diluat nur noch 0,13 mg/l.

In der neuen kommunalen Abwasserrahmenrichtlinie wurden neue Grenzwerte für Phosphor und Stickstoff in Abläufen von Kläranlagen festgelegt. In mittelgroßen Kläranlagen ab 10.000 EW soll eine Mindestentfernungsrate von 87,5 % oder ein Grenzwert von 0,7 mg/l Phosphor ab 2045 eingehalten werden. Bei Stickstoff beträgt die Mindestentfernungsrate bei mittelgroßen Kläranlagen 80 % und der Grenzwert 10 mg/l (Stadler, 2024). Im ED2-Diluat, welches in den Vorfluter gelangt, befinden sich nur noch 0,04 mg/l  $\text{PO}_4\text{-P}$  und 0,1 mg/l  $\text{NH}_4\text{-N}$ . Im Zuge der Pilotanlage konnten die  $\text{PO}_4\text{-P}$ -Gehalte um 60% und die  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalte um etwa 79 % reduziert werden. Die Grenzwerte bzw. die Entfernungsraten von Phosphor und Stickstoff wurden somit in der Kläranlage sowie in der Pilotanlage eingehalten.

Im Zuge des Parallelbetrieb in der Pilotanlage wurden noch mehr Nährstoffe entfernt, als sich im Ablauf der Kläranlage befunden haben. Eine Ausnahme ist Nitrit, dieses hat sich um 0,01 mg/l erhöht. Es könnte sich hier entweder um eine Messungengenauigkeit handeln oder es wurden Stoffe mitverschleppt.

Tabelle 4: PN-Resultate vom 22.07.2024 → Anionen / Kationen [mg/l]

(1 = Rohwasser; 2 = VOF, 3 = NF Permeat, 4 = H<sub>2</sub>O-Feinfilter, 5 = H<sub>2</sub>O-Permeat, 6 = H<sub>2</sub>O-Konzentrat, 7 = ED1-Diluat, 9 = ED2-Diluat)

PN	Cl	SO <sub>4</sub>	Na	K	Ca	Mg
1	109,7	112,9	62,9	16,8	67,6	31,2
2	108,6	110,8	63,2	16,8	70,7	31,1
3	187,7	0	63,7	17,1	39,5	7,9
4	558,9	0	5,5	2,9	0,2	1
5	7	1,7	5,5	2,8	0,3	1
6	193,8	0	331,7	88,5	225,2	47,5
7	49,7	0	28,1	2,7	7,3	1
9	96	0	51,4	3,8	14,2	4,3

Das gängigste Streusalz, welches im Winterdienst verwendet wird, ist Natriumchlorid (NaCl). Es können aber auch Calciumchlorid (CaCl<sub>2</sub>) oder Magnesiumchlorid (MgCl<sub>2</sub>) verwendet werden. Beide Formen kommen auch in der Natur vor (Hoffmann et al., 2011). Es ist daher nötig alle Kationen und deren Gehalte zu betrachten, da diese mit dem Anion Chlorid eine Verbindung eingehen können. Diese Erkenntnis ist in weiterer Folge wichtig, um Aussagen über die Leitfähigkeit treffen zu können.

In der oben angeführten Tabelle 4 ist zu erkennen, dass sowohl Natrium als auch Calcium mit ähnlichen Gehalten im Zulauf, also dem Ablauf der Kläranlage, vorhanden sind. Daher muss angenommen werden, dass sowohl Natriumchlorid als auch Calciumchlorid als Salze enthalten sind. Die Leitfähigkeitswerte, die in der Pilotanlage gemessen werden, geben daher nicht automatisch die Leitfähigkeit von NaCl an, sondern einen Gesamtwert aller messbaren Chlorid-Verbindungen.

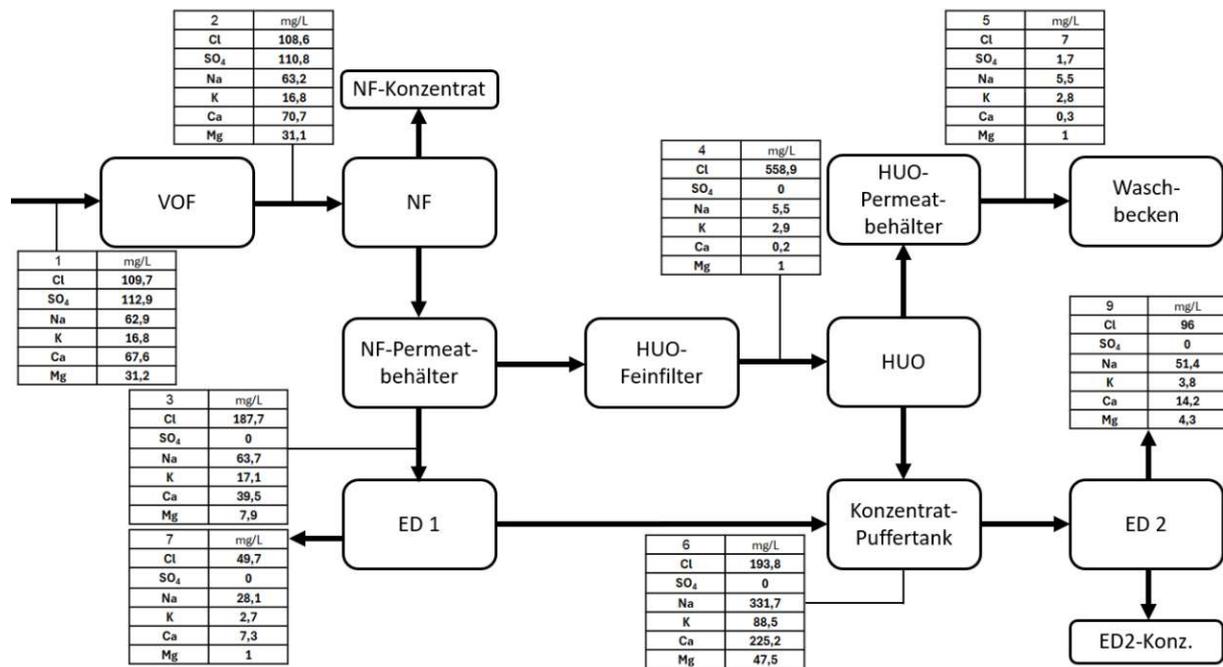


Abbildung 32: Nährstoff-Entfernung vom 22.07.2024 → Kationen und Anionen [mg/l]

(1 = Rohwasser; 2 = VOF, 3 = NF Permeat, 4 = HUO-Feinfilter, 5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, 7 = ED1-Diluat, 9 = ED2-Diluat)

In Abbildung 32 ist die Bilanzierung der Kationen und Anionen zu erkennen. Durch die VOF werden bereits alle Anionen zum Teil reduziert. Die Kationen werden teilweise leicht erhöht oder bleiben gleich. Vermutlich werden einige Stoffe verschleppt, weshalb die Werte erhöht sind. Die NF kann vor allem zweiwertige Ionen gut filtrieren. Dies kann aufgrund der Ergebnisse in der Pilotanlage bestätigt werden, da Calcium und Magnesium bereits in der NF deutlich reduziert werden. Natrium und Kalium werden erst durch die HUO reduziert. Calcium und Magnesium werden durch die HUO ebenfalls deutlich reduziert. Alle Kationen sind im HUO-Konzentrat stark aufkonzentriert. Des Weiteren fällt auf, dass durch die ED1 und der ED2 alle Kationen aufkonzentriert werden, was in den Gehalten im Diluat erkennbar ist. Die Gehalte im Diluat der ED2 haben sich bei allen Kationen fast verdoppelt.

Es ist zu erkennen, dass Sulfat im Zulauf bzw. in der VOF vorhanden war, im Zuge der NF jedoch komplett reduziert wurde. Es ist möglich, dass der Sulfat-Gehalt so gering ist, dass dieser im Labor nicht detektiert wurde. Dies würde den Wert beim HUO-Permeat erklären, da hier wieder ein Gehalt detektiert wurde (1,7 mg/l).

Der Chlorid-Gehalt im Zulauf 109,7 mg/l beträgt. In weiterer Folge steigt der Chlorid-Gehalt in der NF auf etwa 190 mg/l. Der erhöhte Chlorid-Gehalt nach dem HUO-Feinfilter lässt sich möglicherweise durch den Einsatz des Antiscalants erklären. Die Dosierung erfolgt vor dem HUO-Feinfilter, um Ausfällungen zu vermeiden (sh. Kapitel

4.3.5). Daher ist der Calcium-Gehalt nach dem HÜO-Feinfilter so gering. In der HÜO wird der Chlorid-Gehalt im Permeat deutlich reduziert (7 mg/l). Im Zuge des Entsalzungsbetriebs wurde der Chloridgehalt im Diluat der ED1 um mehr als die Hälfte reduziert. Nach der ED2 beträgt der Chlorid-Gehalt im Diluat jedoch wieder 96 mg/l. Im Diluat wurden somit nur etwa 13 % reduziert.

In der Qualitätszielverordnung Ökologie Oberflächengewässer ist der Grenzwert von Chlorid im Jahresmittel mit 150 mg/l geregelt (BMK, 2019).

Tabelle 5: Frachtberechnung → Anionen / Kationen [kg/h] (22.07.2024)

(1 = Rohwasser; 2 = VOF, 3 = NF Permeat, 4 = HÜO-Feinfilter, 5 = HÜO-Permeat, 6 = HÜO-Konzentrat, 7 = ED1-Diluat, 9 = ED2-Diluat)

PN	~Q [l/min]	Cl	SO <sub>4</sub>	Na	K	Ca	Mg
1	999,97	6,58	6,77	3,77	1,01	4,06	1,87
2	6000,21	39,10	6,65	3,79	1,01	4,24	1,87
3	823,4	9,27	0	3,15	0,84	1,95	0,39
4	449,63	15,08	0	0,15	0,08	0,01	0,03
5	449,63	0,19	0,05	0,15	0,08	0,01	0,03
6	87,27	1,01	0	1,74	0,46	1,18	0,25
7	699,67	2,09	0	1,18	0,11	0,31	0,04
9	501	2,89	0	1,55	0,11	0,43	0,13

In Tabelle 5 sind die Frachten der jeweiligen Anionen und Kationen von der Probenahme am 22.07.2024 berechnet worden.

## B) Probenahme-Resultate vom 22.08.2024 → Nährstoffe

### Parallelbetrieb:

Tabelle 6: PN-Resultate vom 22.08.2024 → Nährstoffe [mg/l] – Parallelbetrieb

(M1 = ED1 Dil. + Konz. (PB), 3 = NF Permeat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED1-Konzentrat, M2 = ED2 Dil. + Konz. (PB), 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat)

PN	PO <sub>4</sub> -P	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>x</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N
M1	0,11	0,37	0,52	0,05
3	0,24	0,77	0,1	0,02
7	0,13	0,2	0,16	0,02
8	0,32	1,26	1,13	0,09
M2	0,42	0,65	1,79	0,16
9	0,11	0,09	0,23	0,02
10	0,7	1,27	3,36	0,28

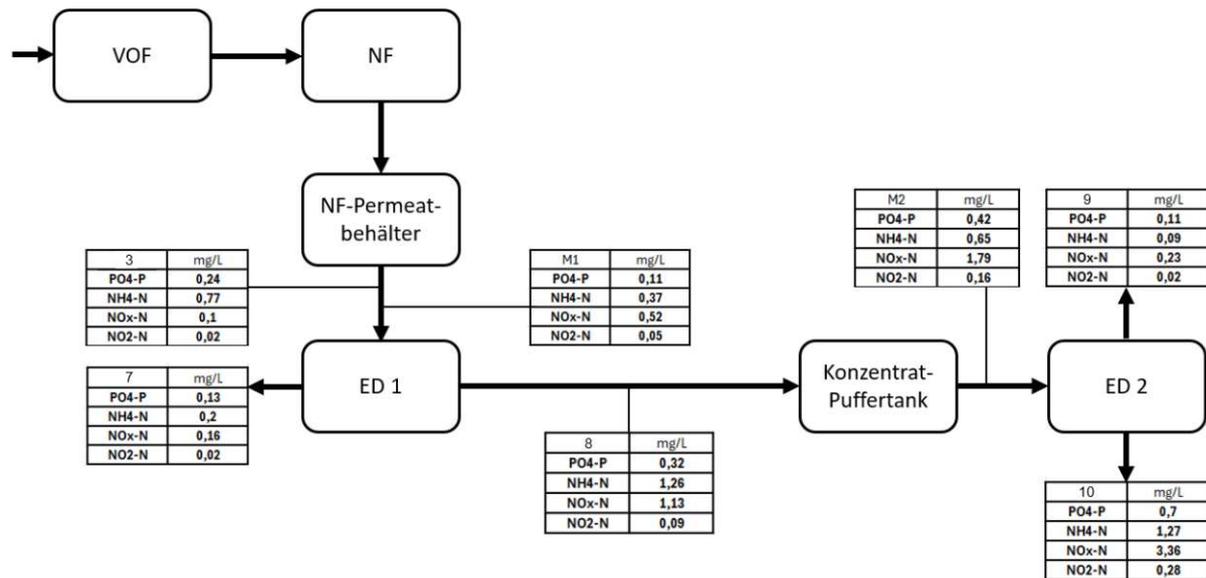


Abbildung 33: Nährstoff-Entfernung vom 22.08.2024 → Parallelbetrieb [mg/l]

(M1 = ED1 Dil. + Konz. (PB), 3 = NF Permeat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED1-Konzentrat, M2 = ED2 Dil. + Konz. (PB), 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat)

In Abbildung 33 ist die Bilanzierung von Phosphor und Stickstoff von der Probenahme am 22.08.2024 dargestellt. Es wird jedoch nur der Parallelbetrieb ab dem NF-Permeat in die Bilanz miteinbezogen.

Das NF-Permeat hat einen PO<sub>4</sub>-P-Gehalt von 0,24 mg/l. Die Mischprobe wurde aus den externen Behältern der ED1 (Diluat, Konzentrat) nach dem Befüllen mit frischem NF-Permeat nach dem Zirkulieren entnommen. Die Mischprobe M1 hat einen PO<sub>4</sub>-P-Gehalt von nur mehr 0,11 mg/l. Dieser hat sich vermutlich reduziert, da sich in den Leitungen der ED1 noch Wasser befunden hat und es daher zu einer Verdünnung gekommen ist. Nach der Aufkonzentration in der ED1 hat das Konzentrat einen PO<sub>4</sub>-P-Gehalt von 0,32 mg/l. Das ED1-Diluat enthält 0,13 mg/l. Die zweite Mischprobe M2 wurde nach dem Befüllen mit frischem ED1-Konzentrat nach dem Zirkulieren der ED2 aus den externen Tanks (Diluat, Konzentrat) entnommen. Nach der Aufkonzentration in der ED2 hat das Konzentrat einen PO<sub>4</sub>-P-Gehalt von 0,7 mg/l. Das ED2-Diluat enthält 0,11 mg/l, konnte somit zu 55 % reduziert werden im Vergleich zum NF-Permeat. Der Grenzwert für Phosphor in Gewässern wurde im ED2-Diluat eingehalten.

Der NH<sub>4</sub>-N-Gehalt beträgt im NF-Permeat 0,77 mg/l. In der ersten Phase wird bevor der eigentliche Betrieb der ED1 beginnt das Medium zunächst zirkuliert bis sich ein dementsprechendes Gleichgewicht einstellt. Somit ergeben sich Unterschiede im NF-Permeat und dem tatsächlichen Feed der ED1. In der Mischprobe M1 wurde der NH<sub>4</sub>-N-Gehalt somit auf 0,37 mg/l reduziert. Das ED1-Diluat wurde auf 0,2 mg/l NH<sub>4</sub>-N

reduziert. Das ED1- und das ED2- Konzentrat haben einen ähnlichen  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalt von 1,26 mg/l und 1,27 mg/l. Der Unterschied besteht nur im ED2-Diluat. Der  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalt dort konnte um etwa 88 % reduziert werden (0,09 mg/l).

Beachtlich ist, dass der  $\text{NO}_x$ -Gehalt von 0,1 mg/l im NF-Permeat auf 3,36 mg/l im ED2-Konzentrat aufkonzentriert wurde, dies entspricht einer Erhöhung der Konzentration von einem Faktor von etwa 34. In der gesamten Pilotanlage ist der  $\text{NO}_x$ -Gehalt gestiegen, das ED1-Diluat enthält 0,16 mg/l  $\text{NO}_x$ , ED2-Diluat am Ende der Pilotanlage enthält 0,23 mg/l.

Der  $\text{NO}_2\text{-N}$ -Gehalt in der Pilotanlage ist während dem Parallelbetrieb recht ähnlich geblieben. Im NF-Permeat, in der Mischprobe M1, im ED1-Diluat, im ED1-Konzentrat und im ED2-Diluat ist der  $\text{NO}_2\text{-N}$ -Gehalt unter 0,1 mg/l. Nur im ED2-Konzentrat und in der Mischprobe M2 ist der Wert gestiegen. Das ED2-Konzentrat enthält 0,28 mg/l.

Im Vergleich zum NF-Permeat konnten, wie zuvor zu erwarten war, sämtliche Nährstoffe im Diluat entfernt werden. Diese wurden im Konzentrat der ED2 aufkonzentriert. Im Zuge dessen wurde festgestellt, dass die ED nicht nur zum Entsalzen eine gute Technologie darstellt, sondern auch Nährstoffe effizient reduziert. In der Diplomarbeit „Alternative Stickstoffquelle für eine Industriekläranlage: Elektrodialyse kommunaler Schlammabwässer zu Aufkonzentration von Ammonium“ (Weilguni, 2024), wurde das Ammonium aus Industrieabwässern mithilfe einer Elektrodialyse im Konzentratstrom angereichert. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass das Konzentrat zwischen 25 und 89 % der Fracht angereichert werden konnte (Weilguni, 2024). Aufgrund der Ergebnisse der genannten Diplomarbeit sowie der vorliegenden Arbeit lässt sich feststellen, dass die Elektrodialyse in weiterer Folge in einer Kläranlage zur Nährstoffrückgewinnung eingesetzt werden kann.

Tabelle 7: PN-Resultate vom 22.08.2024 → Anionen / Kationen [mg/l] – Parallelbetrieb

(M1 = ED1 Dil. + Konz. (PB), 3 = NF Permeat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED1-Konzentrat, M2 = ED2 Dil. + Konz. (PB), 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat)

PN	Cl	SO <sub>4</sub>	Na	K	Ca	Mg
M1	253,4	0	51,3	16,7	50,2	14,1
3	191,9	0	18,9	4	14,2	5,2
8	634	0	71,2	17,8	58,5	17
7	50,3	0	18,9	3,9	14	5,2
M2	627,3	0	145,7	43,1	138,9	40,8
10	1345	0	181,1	44,5	116	47,9
9	57,7	26,6	22,4	3,1	13,5	5,4

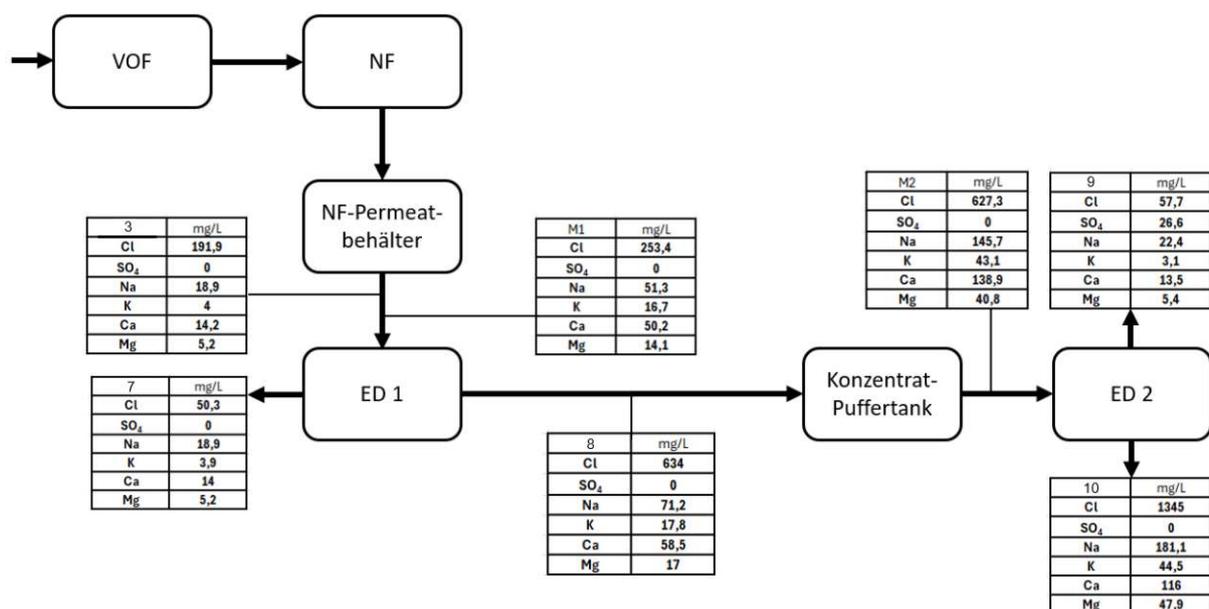


Abbildung 34: Nährstoff-Entfernung vom 22.08.2024 → Kationen und Anionen – Parallelbetrieb [mg/l]

(M1 = ED1 Dil. + Konz. (PB), 3 = NF Permeat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED1-Konzentrat, M2 = ED2 Dil. + Konz. (PB), 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat)

In Abbildung 34 ist die Bilanzierung der Kationen und Anionen zu erkennen.

Wie bereits bei der Probenahme vom 22.07.2024 ist auch bei dieser Probenahme der Sulfat-Gehalt so gering, dass er nicht zu detektieren ist. Nur beim ED2 Konzentrat ist ein Sulfat-Gehalt von 26,6 mg/l zu erkennen.

Des Weiteren ist zu erkennen, dass Natrium, Kalium, Calcium und Magnesium im Zuge der ED1 im Diluat nur minimal bis gar nicht reduziert werden. Die Stoffe werden im ED1-Konzentrat aufkonzentriert. Vor allem der Natrium-Gehalt hat sich im ED1-Konzentrat erheblich erhöht. Nach der ED2 sind die Stoffe weiter aufkonzentriert. Die Gehalte im Konzentrat der ED2 haben sich bei allen Kationen fast verdoppelt. Im Diluat der ED2 haben sich die Werte der Kationen und Anionen im Vergleich zum Diluat der

ED1 nur minimal geändert, mit Ausnahme von Sulfat. Die Natrium- und Magnesium-Gehalte im Diluat der ED2 im Vergleich zum Diluat in der ED1 haben sich leicht erhöht.

Es ist zu erkennen, dass der Chlorid-Gehalt nach der NF in der Mischprobe M1 etwa 253 mg/l beträgt. In weiterer Folge steigt der Chlorid-Gehalt in der ED1 auf 634 mg/l. Nach der ED1 beträgt der Chlorid-Gehalt im Diluat etwa 50 mg/l. Nach der ED2 beträgt der Chlorid-Gehalt im Diluat 57,7 mg/l. Das Endkonzentrat in der ED2 hat einen Chlorid-Gehalt von 1345 mg/l. Es lässt sich daraus schließen, dass die Entsalzung bzw. Aufkonzentration in der Pilotanlage erfolgreich durchgeführt werden. Im Zuge der Aufkonzentration hat sich der Chlorid-Gehalt im Konzentrat der ED2 fast verdoppelt im Vergleich zum Konzentrat der ED1.

Tabelle 8: Frachtberechnung → Anionen / Kationen [kg/h] (22.08.2024-Parallelbetrieb)  
(3 = NF Permeat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED1-Konzentrat, 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat)

PN	~Q [l/min]	Cl	SO <sub>4</sub>	Na	K	Ca	Mg
3	834,62	9,61	0,00	0,95	0,20	0,71	0,26
7	699,45	2,11	0,00	0,79	0,16	0,59	0,22
8	703,09	26,75	0,00	3,00	0,75	2,47	0,72
9	501,33	1,74	0,80	0,67	0,09	0,41	0,16
10	503,81	40,66	0,00	5,47	1,35	3,51	1,45

In Tabelle 8 sind die Frachten der jeweiligen Anionen und Kationen von der Probenahme am 22.08.2024 berechnet worden.

### Serienbetrieb:

Tabelle 9: PN-Resultate vom 22.08.2024 → Nährstoffe [mg/l] – Serienbetrieb  
(5 = HÜO-Permeat, 6 = HÜO-Konzentrat, M3 = ED2 Dil. + Konz. (SB), 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat)

PN	PO <sub>4</sub> -P	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>x</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N
5	0,03	0,33	0	0
6	1,75	2,17	0,85	0,13
M3	0,6	0,83	1,55	0,16
9	0,13	0,09	0,22	0,03
10	0,93	1,56	3,19	0,31

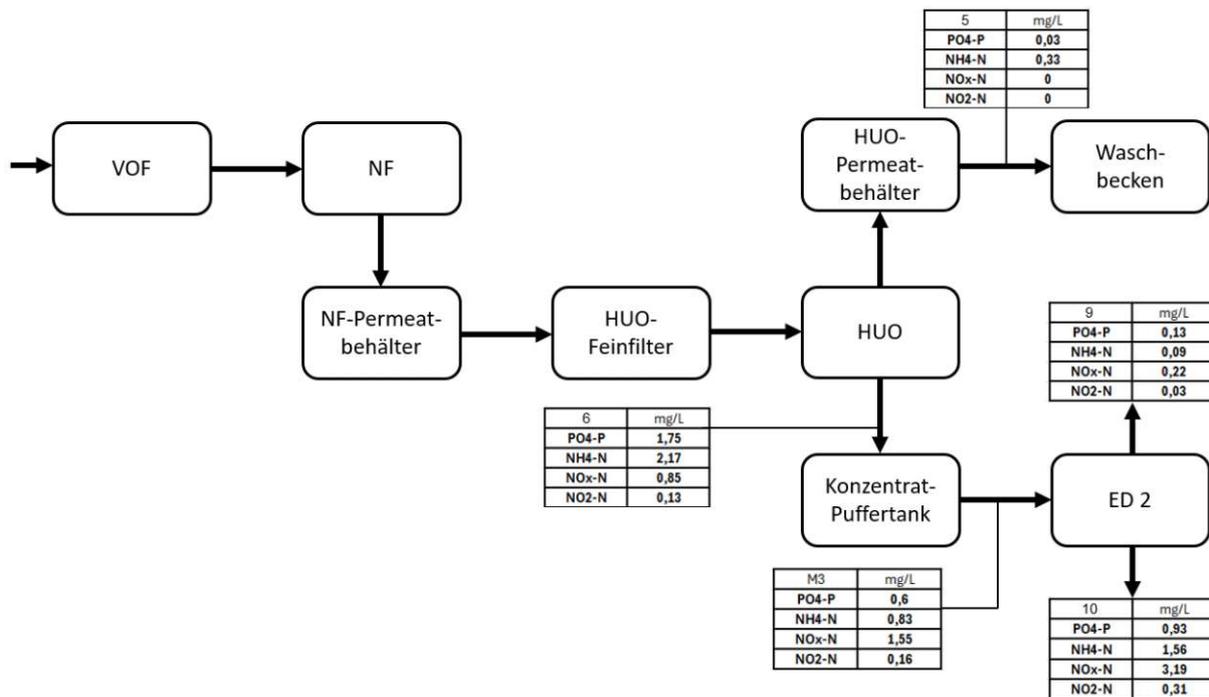


Abbildung 35: Nährstoff-Entfernung vom 22.08.2024 → Serienbetrieb [mg/l]  
 (5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, M3 = ED2 Dil. + Konz. (SB), 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat)

In Abbildung 35 ist die Bilanzierung von Phosphor und Stickstoff von der Probenahme am 22.08.2024 dargestellt. Es wird jedoch nur der Serienbetrieb ab der HUO in die Bilanz miteinbezogen.

Nach der HUO enthält das HUO-Permeat 0,03 mg/l PO<sub>4</sub>-P bzw. das HUO-Konzentrat 1,75 mg/l. Die Mischprobe M3 wird nach dem Befüllen nach der Zirkulation der ED2 entnommen und enthält einen PO<sub>4</sub>-P-Gehalt von 0,6 mg/l. Dies liegt wahrscheinlich ein dem Wasser in den Leitungen, was zur Verdünnung der Probe führt. Nach der Aufkonzentrierung enthält das ED2-Konzentrat einen PO<sub>4</sub>-P-Gehalt von 0,93 mg/l. Das ED2-Diluat hat 0,13 mg/l PO<sub>4</sub>-P enthalten. Im Vergleich mit dem Parallelbetrieb ist im Serienbetrieb der PO<sub>4</sub>-P-Gehalt sowohl im Diluat als auch im Konzentrat der ED2 höher. Dies liegt vermutlich daran, dass das HUO-Konzentrat, welches als Feed für die ED2 im Serienbetrieb zur Verfügung steht, bereits einen höheren PO<sub>4</sub>-P-Gehalt hat als das ED1-Konzentrat, welches als Feed für die ED2 im Parallelbetrieb verwendet wird. Das ED1-Konzentrat enthält nur 0,32 mg/l PO<sub>4</sub>-P, wobei das HUO-Konzentrat bereits 1,75 mg/l enthält.

Der NH<sub>4</sub>-N-Gehalt wird in der HUO deutlich aufkonzentriert (2,17 mg/l). Im HUO-Permeat wird NH<sub>4</sub>-N auf 0,33 mg/l reduziert. In weiterer Folge wird NH<sub>4</sub>-N im Konzentrat der ED2 leicht reduziert im Vergleich zum HUO-Konzentrat. Der NH<sub>4</sub>-N-Gehalt im Diluat der ED2 ist deutlich reduziert (0,09 mg/l). Wenn die NH<sub>4</sub>-N-Gehalte

im Diluat und Konzentrat der ED2 im Parallelbetrieb und Serienbetrieb vergleicht werden, ist erkennbar, dass diese recht ähnlich. Beide Diluate haben einen  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalt von 0,09 mg/l, im Konzentrat unterscheiden sich die Gehalte nur gering.

Werden die  $\text{NO}_x\text{-N}$ -Gehalte betrachtet, fällt auf, dass diese einerseits im HUO-Permeat komplett reduziert werden oder nicht detektiert wurden, und andererseits im HUO-Konzentrat aufkonzentriert wurden. Nach der ED2 ist der  $\text{NO}_x\text{-N}$ -Gehalt im Konzentrat recht hoch (3,19 mg/l), im Diluat wurde er im Vergleich zum HUO-Konzentrat weiter reduziert (0,22 mg/l). Im Vergleich zum Parallelbetrieb sind im Konzentrat der ED2 im Serienbetrieb geringe Gehalte an  $\text{NO}_x\text{-N}$  enthalten.

Der  $\text{NO}_2\text{-N}$ -Gehalt in der Pilotanlage ist während dem Serienbetrieb recht ähnlich geblieben. Im HUO-Permeat wurde  $\text{NO}_2\text{-N}$  komplett reduziert oder konnte nicht detektiert werden. Im HUO-Konzentrat beträgt der  $\text{NO}_2\text{-N}$ -Gehalt nur 0,13 mg/l. Das ED2-Konzentrat enthält 0,31 mg/l, das Diluat enthält 0,03 mg/l. Im Vergleich zum Parallelbetrieb sind im Konzentrat der ED2 im Serienbetrieb leicht erhöhte Gehalte an  $\text{NO}_2\text{-N}$  enthalten. Der Unterschied ist jedoch sehr gering (0,01-0,03 mg/l).

Im Zuge des Serienbetriebs in der Pilotanlage wurden noch mehr Nährstoffe entfernt, als sich im Konzentrat der HUO befunden haben.

Tabelle 10: PN-Resultate vom 22.08.2024 → Anionen / Kationen [mg/l] – Serienbetrieb  
(5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, M3 = ED2 Dil. + Konz. (SB), 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat)

PN	Cl	SO <sub>4</sub>	Na	K	Ca	Mg
5	78,3	5	2,2	1,3	0	0
6	1238,1	0	125,4	38,6	115,3	38,5
M3	894,4	0	91	23,5	53,3	24,6
9	61,9	3,3	9	1,7	6	2,3
10	1458	0	168,7	44,7	102,5	46,4

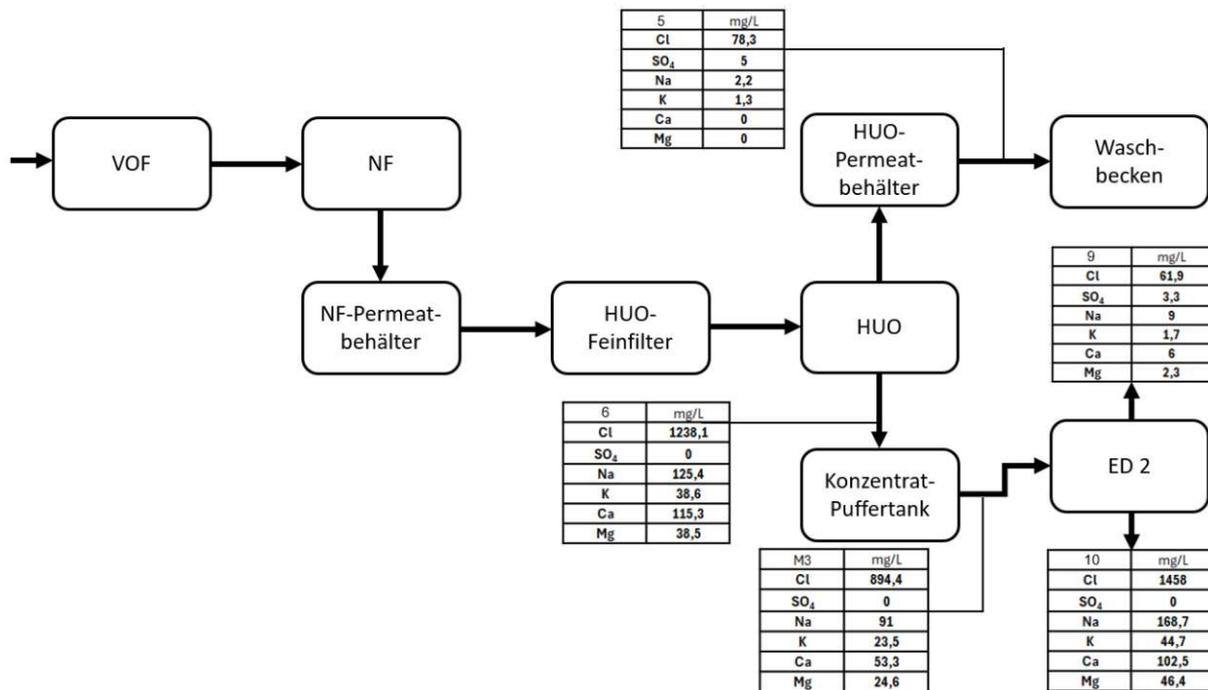


Abbildung 36: Nährstoff-Entfernung vom 22.08.2024 → Kationen und Anionen – Serienbetrieb [mg/l]  
(5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, M3 = ED2 Dil. + Konz. (SB), 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat)

In Abbildung 36 ist die Bilanzierung der Kationen und Anionen zu erkennen.

Der Sulfat-Gehalt ist im Konzentrat vermutlich so gering, dass der Gehalt nicht nachweisbar war. Im Permeat beträgt er dafür 5 mg/l. In der Mischprobe ist der Sulfat-Gehalt nicht nachweisbar. In weiterer Folge wurde das Sulfat in der ED2 im Konzentrat komplett reduziert oder nicht detektiert. Im Diluat beträgt der Sulfat-Gehalt 3,3 mg/l.

Des Weiteren ist zu erkennen, dass Natrium, Kalium, Calcium und Magnesium im HUO-Permeat stark reduziert wurden. Calcium und Magnesium wurden vollständig reduziert, Natrium und Kalium sind nur noch in geringen Mengen vorhanden. Das HUO-Konzentrat weist eine deutliche Aufkonzentrierung der Kationen auf. Aufgrund Verdünnungsprozesse sind die Gehalte in der Mischprobe geringer geworden. Nach der ED2 haben Calcium und Natrium bzw. Kalium und Magnesium ähnliche Gehalte im Diluat. Insgesamt wurden alle Kationen im Diluat reduziert im Vergleich zum Konzentrat. Im ED2-Konzentrat weisen Kalium und Magnesium ähnliche Gehalte auf. Natrium wurde im Vergleich zum HUO-Konzentrat noch weiter aufkonzentriert, Calcium hingegen weist einen geringeren Wert auf als im HUO-Konzentrat.

Im Zuge der HUO wird der Chlorid-Gehalt im Konzentrat im Vergleich zum Permeat deutlich reduziert. Im Konzentrat beträgt der Chlorid-Gehalt 1238,1 mg/l, im Diluat 78,3 mg/l. In der Mischprobe wird das Chlorid verdünnt, da sich vermutlich noch Wasser in

den Leitungen befindet. Im ED2 Diluat wird das Chlorid weiter reduziert auf 61,9 mg/l und im Konzentrat weiter aufkonzentriert auf 1458 mg/l.

Im Vergleich zum Parallelbetrieb weisen die Kationen im Serienbetrieb im ED2-Konzentrat recht ähnliche Gehalte auf. Der Chlorid-Gehalt ist im seriellen Betrieb im ED2-Konzentrat höher. Bei Betrachtung des ED2-Diluats ist ersichtlich, dass ein deutlich höherer Sulfat-Gehalt im Parallelbetrieb vorhanden war, nämlich 26,6 mg/l im Vergleich zu 3,3 mg/l im Serienbetrieb. Des Weiteren weist Natrium einen deutlich höheren Wert im ED2-Diluat im Parallelbetrieb auf (22,4 mg/l) als im Serienbetrieb (9 mg/l). Die anderen Kationen weisen ebenfalls etwas höhere Gehalte im Parallelbetrieb auf als im Serienbetrieb. Der Chlorid-Gehalt im Diluat im Parallelbetrieb ist im Vergleich zum Serienbetrieb geringfügig niedriger.

Tabelle 11: Frachtberechnung → Anionen / Kationen [kg/h] (22.08.2024-Serienbetrieb)  
(5 = H<sub>2</sub>O-Permeat, 6 = H<sub>2</sub>O-Konzentrat, 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat)

PN	~Q [l/min]	Cl	SO <sub>4</sub>	Na	K	Ca	Mg
5	450,00	2,11	0,14	0,06	0,04	0	0
6	98,83	7,34	0	0,74	0,23	0,68	0,23
9	505,5	1,88	0,10	0,27	0,05	0,18	0,07
10	501,67	43,89	0	5,08	1,35	3,09	1,40

In Tabelle 11 sind die Frachten der jeweiligen Anionen und Kationen von der Probenahme am 22.08.2024 berechnet worden.

### C) Probenahme-Resultate vom 29.08.2024 → Nährstoffe

Tabelle 12: PN-Resultate vom 29.08.2024 → Nährstoffe [mg/l]  
(1 = Rohwasser; 2 = VOF, 3 = NF Permeat, 4 = H<sub>2</sub>O-Feinfilter, 5 = H<sub>2</sub>O-Permeat, 6 = H<sub>2</sub>O-Konzentrat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED1-Konzentrat, 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat)

PN	PO <sub>4</sub> -P	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>x</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N
1	0,34	0,75	0,29	0,02
2	0,65	0,67	0,41	0,06
3	0,07	0,44	0,49	0,05
4	0,1	0,37	0,6	0,04
5	0,04	0,12	0,15	0
6	0,43	1,8	2,87	0,29
7	0,05	0,11	0,27	0,02
8	0,08	1,16	1,8	0,11
9	0,09	0,04	0,14	0,01
10	0,56	1,12	3,8	0,27

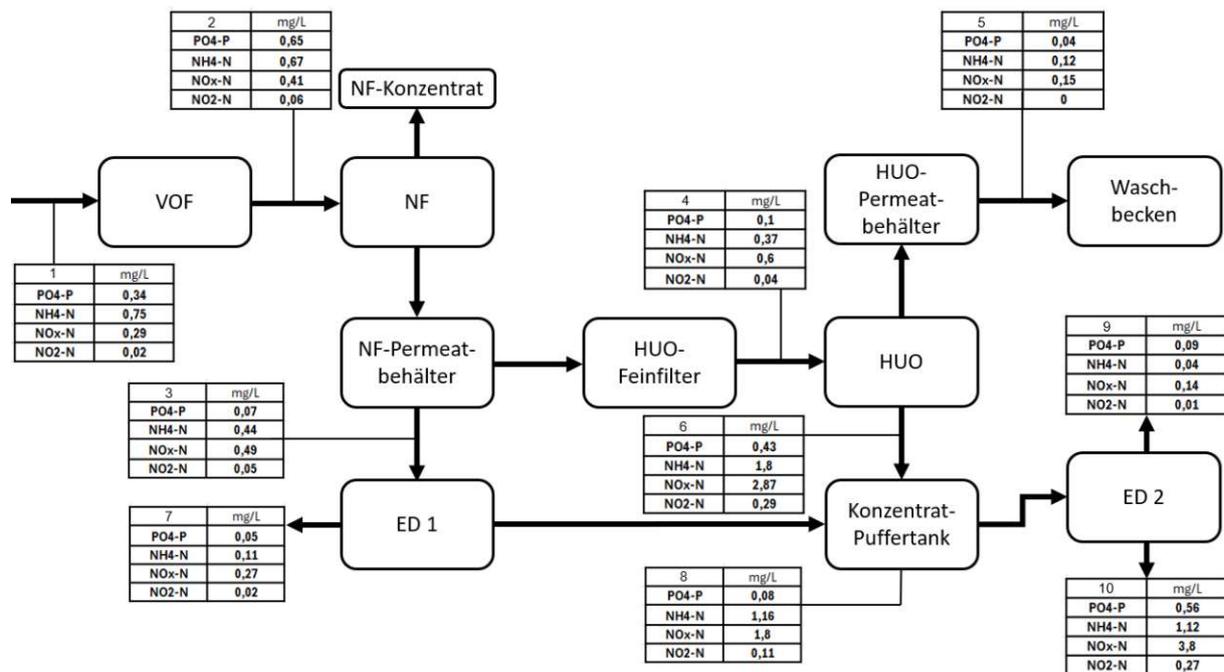


Abbildung 37: Nährstoff-Entfernung vom 29.08.2024 [mg/l]

(1 = Rohwasser; 2 = VOF, 3 = NF Permeat, 4 = HUO-Feinfilter, 5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED1-Konzentrat, 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat)

In Abbildung 37 ist die Bilanzierung von Phosphor und Stickstoff von der Probenahme am 29.08.2024 dargestellt. Die Beprobung ist über die gesamte Anlage erfolgt, damit wird die gesamte Bilanzierung betrachtet.

Im Ablauf der Kläranlage wurde eine Konzentration von 0,34 mg/l  $\text{PO}_4\text{-P}$  gemessen, was um 30 % höheren Wert darstellt im Vergleich zur Probenahme am 22.07.2024. In der VOF erhöht sich der Gehalt, vermutlich wird  $\text{PO}_4\text{-P}$  verschleppt. Durch die NF wird  $\text{PO}_4\text{-P}$  jedoch stark reduziert. Das Diluat in der ED1 enthält nur noch 0,05 mg/l  $\text{PO}_4\text{-P}$ . Im ED1-Konzentrat wird  $\text{PO}_4\text{-P}$  kaum aufkonzentriert. In weiterer Folge wird in der ED2  $\text{PO}_4\text{-P}$  im Diluat leicht aufkonzentriert. Wie bei der VOF wird hier vermutlich ebenfalls  $\text{PO}_4\text{-P}$  verschleppt. Im Konzentrat der ED2 befindet sich 0,56 mg/l  $\text{PO}_4\text{-P}$ . Über die HUO-Feinfilter wird vermutlich etwas verschleppt, da es hier zu einer leichten Erhöhung kommt. In der HUO wird der  $\text{PO}_4\text{-P}$  im Permeat auf 0,04 mg/l reduziert, im Konzentrat jedoch auf 0,43 mg/l aufkonzentriert. Im Zuge der Pilotanlage konnte im ED2-Diluat  $\text{PO}_4\text{-P}$  um 74% reduziert werden. Im HUO-Permeat konnten 89% des  $\text{PO}_4\text{-P}$  reduziert werden.

Der  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalt im Zulauf der Pilotanlage beträgt 0,75 mg/l, was im Vergleich zur Probenahme am 22.07.2024 ebenfalls einen höheren Wert darstellt. Während der VOF und der NF wird  $\text{NH}_4\text{-N}$  schrittweise reduziert. Der  $\text{NH}_4\text{-N}$  -Gehalt im ED1-Diluat beträgt 0,11 mg/l, im ED2 -Konzentrat 0,16 mg/l. In der ED2 wird  $\text{NH}_4\text{-N}$  im Diluat auf

0,04 mg/l reduziert. Im Konzentrat der ED2 befindet sich 1,12 mg/l  $\text{NH}_4\text{-N}$ . Die HUO reduziert das  $\text{NH}_4\text{-N}$  im Permeat auf 0,12 mg/l, konzentriert es jedoch im Konzentrat auf 1,8 mg/l auf, also höher als im ED2-Konzentrat. Im Zuge der Pilotanlage konnte im ED2-Diluat  $\text{NH}_4\text{-N}$  um 94% reduziert werden. Im HUO-Permeat konnten 84% des  $\text{PO}_4\text{-P}$  reduziert werden.

Die Grenzwerte bzw. die Entfernungsraten von Phosphor und Stickstoff wurden in der Kläranlage sowie in der Pilotanlage eingehalten.

$\text{NO}_2\text{-N}$  wird ebenfalls schrittweise reduziert. Der  $\text{NO}_2\text{-N}$ -Gehalt beträgt anfangs 0,02 mg/l, wird in der VOF auf 0,06 mg/l aufkonzentriert. In der NF wird er zu einem kleinen Teil reduziert. Im ED1-Diluat hat  $\text{NO}_2\text{-N}$  den Ausgangswert wieder erreicht. Im ED1-Konzentrat wird  $\text{NO}_2\text{-N}$  deutlich aufkonzentriert. In weiterer Folge wird  $\text{NO}_2\text{-N}$  im Diluat der ED2 auf 0,01 mg/l reduziert. Der  $\text{NO}_2\text{-N}$ -Gehalt im ED2-Konzentrat beträgt 0,27 mg/l. und der HUO gleich und reduziert sich im HUO-Permeat auf 0,02 mg/l. Das HUO-Konzentrat enthält 0,12 mg/l  $\text{NO}_2\text{-N}$ . Im HUO-Permeat befindet kein  $\text{NO}_2\text{-N}$  oder der Gehalt ist so gering, dass er nicht nachweisbar ist. Die HUO konzentriert  $\text{NO}_2\text{-N}$  im Konzentrat auf 0,29 mg/l auf.

In der Bilanz ist zu erkennen, dass die Grenzwerte von  $\text{NO}_2\text{-N}$  und  $\text{NH}_4\text{-N}$  im Ablauf der Kläranlage bzw. im Zulauf der Pilotanlage und im ED2-Diluat eingehalten wurden.

Wie bereits beim Ammonium und dem Nitrit werden auch die Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) in der Pilotanlage im Diluat/Permeat reduziert und im Konzentrat der HUO aufkonzentriert. Der  $\text{NO}_x$ -Gehalt im Zulauf beträgt 0,29 mg/l.  $\text{NO}_x$  wird sowohl in der VOF als auch in der NF deutlich aufkonzentriert. Erst im ED1-Diluat wird der  $\text{NO}_x$ -Gehalt auf die Anfangskonzentration reduziert. Das ED1-Konzentrat enthält 1,8 mg/l. In der ED2 wird das  $\text{NO}_x$  im Diluat auf 0,14 mg/l reduziert und im Konzentrat auf 3,8 mg/l aufkonzentriert. Das HUO-Permeat hat eine vergleichbare Konzentration wie das ED2-Diluat. Das HUO-Konzentrat enthält 2,87 mg/l  $\text{NO}_x$ , also um etwa 1 mg/l weniger als das ED2-Konzentrat.

Im Zuge des Parallelbetrieb in der Pilotanlage wurden noch mehr Nährstoffe im Diluat reduziert, als sich im Ablauf der Kläranlage befunden haben. Die Pilotanlage ist somit in der Lage sowohl Nährstoffe erfolgreich zu entfernen als auch eine Nährstoff-Rückgewinnung aus dem Konzentrat zu ermöglichen.

Tabelle 13: PN-Resultate vom 29.08.2024 → Anionen / Kationen [mg/l]

(1 = Rohwasser; 2 = VOF, 3 = NF Permeat, 4 = HUO-Feinfilter, 5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED1-Konzentrat, 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat)

PN	Cl	SO <sub>4</sub>	Na	K	Ca	Mg
1	104,7	95	27	7,2	29,4	11,4
2	99,5	90	26,5	6,9	27,9	11,4
3	105	0	25	6,7	13	7,4
4	107	0	24,6	6,6	15,4	7,3
5	3,8	1,6	1,6	0,6	0	0
6	673,3	13,9	124,1	33,3	65,2	38,7
7	29,9	5,6	9,1	1,9	5,5	2,2
8	408	0	68,4	20	22,9	20,9
9	37,4	3	10,5	1,8	4,4	2,2
10	886,5	17,8	133,5	41,1	49,5	39,1

In der oben angeführten Tabelle 13 ist zu erkennen, dass sowohl Natrium als auch Calcium mit ähnlichen Gehalten im Zulauf, also dem Ablauf der Kläranlage, vorhanden sind. Daher muss angenommen werden, dass sowohl Natriumchlorid als auch Calciumchlorid als Salze enthalten sind.

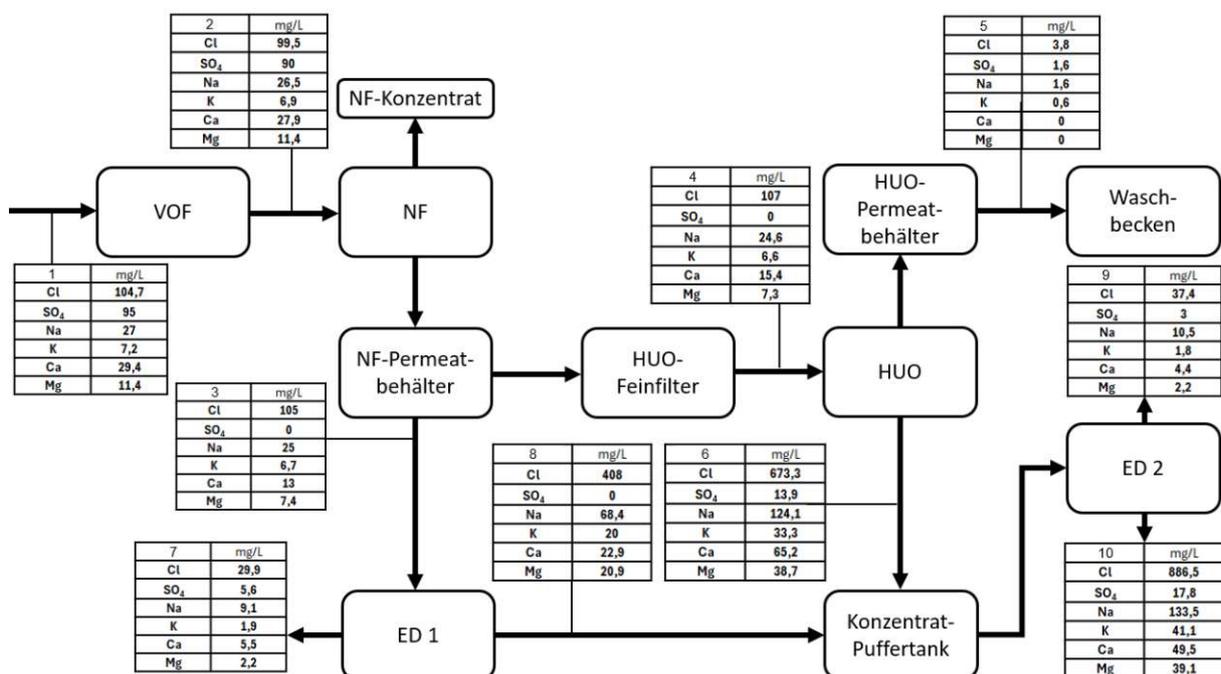


Abbildung 38: Nährstoff-Entfernung vom 29.08.2024 → Kationen und Anionen [mg/l]

(1 = Rohwasser, 2 = VOF, 3 = NF Permeat, 4 = HUO-Feinfilter, 5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED1-Konzentrat, 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat)

In Abbildung 38 ist die Bilanzierung der Kationen und Anionen zu erkennen. Durch die VOF werden bereits alle Kationen und Anionen zum Teil reduziert, bis auf Magnesium, dessen Gehalt gleichbleibt. Calcium und Magnesium werden bereits in der NF reduziert. Die NF kann vor allem zweiwertige Ionen gut filtrieren. Natrium und Kalium

werden erst durch den HUO-Feinfilter, die HUO und ED1 reduziert. Calcium und Magnesium werden durch die HUO ebenfalls deutlich reduziert. Alle Kationen sind im HUO-Konzentrat stark aufkonzentriert. Durch die ED1 und der ED2 werden alle Kationen in den Diluaten reduziert und in den Konzentraten aufkonzentriert.

Es ist zu erkennen, dass Sulfat im Zulauf bzw. in der VOF vorhanden war, im Zuge der NF jedoch komplett reduziert wurde. Es ist möglich, dass der Sulfat-Gehalt so gering ist, dass dieser im Labor nicht detektiert wurde. Dies würde den Wert beim ED1-Diluat erklären, da hier ein Gehalt von 5,6 mg/l detektiert wurde. Im ED1-Konzentrat wird Sulfat wiederum komplett reduziert. Im Zuge der ED2 wird Sulfat mit einer Konzentration von 3 mg/l im Diluat detektiert. Das Konzentrat enthält 17,8 mg/l Sulfat. Im HUO-Feinfilter wurde kein Sulfat nachgewiesen, im Permeat 1,6 mg/l. Im HUO-Konzentrat wurde Sulfat auf 13,9 mg/l aufkonzentriert.

Der Chlorid-Gehalt im Zulauf 104,7 mg/l beträgt, also einen ähnlichen Wert, wie bei der Probenahme am 22.07.2024. In weiterer Folge sinkt der Chlorid-Gehalt während der VOF und steigt dann wieder in der NF auf die anfängliche Konzentration an. Im Entsalzungsprozess der ED1 wird der Chlorid-Gehalt im Diluat auf 29,9 mg/l reduziert und im Konzentrat auf 408 mg/l aufkonzentriert. In der ED2 stieg der Chlorid-Gehalt um mehr als doppelte im Konzentrat. Das ED2-Diluat enthält 37,4 mg/l Chlorid, das entspricht einer Reduktion von 35 %. Die Entsalzung war somit erfolgreich. Im Vergleich zum Resultat von der Probenahme am 22.07.2024 gab es hier keinen Chlorid-Anstieg im HUO-Feinfilter. Der Wert entspricht etwa dem Anfangschloridgehalt. In der HUO wird der Chlorid-Gehalt im Permeat deutlich reduziert (3,8 mg/l). Das HUO-Konzentrat enthält 673,3 mg/l Chlorid, einen geringeren Wert als das ED2-Konzentrat, welcher 886,5 mg/l beträgt.

An diesem Tag der Probenahme hatte das NF-Permeat einen pH-Wert von 7,6, also leicht basisch. Dies könnte jedoch auch daran liegen, dass der NF-Behälter sehr groß ist und sich daher über die Zeit das Wasser mit allen Inhaltsstoffen sammelt und es daher zu einer Erhöhung des pH-Werts kommt. Es muss jedoch trotzdem beachtet werden, dass zu hohe pH-Werte im NF-Permeat, welches das Feed für die ED1 darstellt, zu Ausfällungen (Calciumausfällungen) führen kann. Dies ist deutlich an den Kartuschenfilter in der ED2, die sich vor dem Stack in beiden ED-Stufen befinden, zu erkennen. In Abbildung 39 sind die Filter der ED2 zu erkennen, wobei die Ablagerung (weiße Flocken) am rechten Filter deutlich zu sehen ist. Der pH-Wert des ED2-Diluats

betrug 8,2 und der pH-Wert vom ED2-Konzentrat 8,4. Beide Werte sind leicht basisch, es könnte also zu Ausfällungen kommen, welche zur Verblockung (Fouling) und Abnahme der Entsalzung führen können, da die Membrandurchlässigkeit nicht mehr gegeben ist. Die Calcium-Werte betragen 4,4 mg/l im Diluat und 49,5 mg/l im Konzentrat. Es ist darauf zu achten, die ED zu schützen. Um Ausfällungen zu vermeiden, wird HCl dazu dosiert, damit der pH-Wert gesenkt wird.



Abbildung 39: Kartuschenfilter in ED (links sauber, rechts mit Ablagerung/ schmutzig)

Tabelle 14: Frachtberechnung → Anionen / Kationen [kg/h] (29.08.2024)

(1 = Rohwasser; 2 = VOF, 3 = NF Permeat, 4 = H<sub>2</sub>O-Feinfilter, 5 = H<sub>2</sub>O-Permeat, 6 = H<sub>2</sub>O-Konzentrat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED1-Konzentrat, 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat)

PN	~Q [l/min]	Cl	SO <sub>4</sub>	Na	K	Ca	Mg
1	999,81	6,28	5,70	1,62	0,43	1,76	0,68
2	5999,87	35,82	5,40	1,59	0,41	1,67	0,68
3	839,18	5,29	0	1,26	0,34	0,65	0,37
4	449,91	2,89	0	0,66	0,18	0,42	0,20
5	449,91	0,10	0,04	0,04	0,02	0	0
6	117,76	4,76	0,10	0,88	0,24	0,46	0,27
7	698,5	1,25	0,23	0,38	0,08	0,23	0,09
8	702,83	17,21	0	2,88	0,84	0,97	0,88
9	500,17	1,12	0,09	0,32	0,05	0,13	0,07
10	503,61	26,79	0,54	4,03	1,24	1,50	1,18

In Tabelle 14 sind die Frachten der jeweiligen Anionen und Kationen von der Probenahme am 29.08.2024 berechnet worden.

## D) Probenahme-Resultate vom 02.09.2024 → $\text{HCO}_3^-$

Tabelle 15: PN-Resultate vom 02.09.2024 →  $\text{HCO}_3^-$  [°dH]  
(6 = HUO-Konzentrat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED1-Konzentrat)

PN	$\text{HCO}_3^-$
6	87,2
7	3,86
8	32

In Tabelle 15 sind die Ergebnisse der Probenahme am 02.09.2024 dargestellt. Es wurden lediglich das Diluat und das Konzentrat der ED1 sowie das HUO-Konzentrat beprobt. Betrachtet wurde das Hydrogencarbonat-Ion. Im Allgemeinen entstehen Hydrogencarbonate, welches die Salze der Kohlensäure sind, durch die Neutralisation der Kohlensäure mit einer Base. Das Hydrogencarbonat-Ion ( $\text{HCO}_3^-$ ) ist das Anion der Salze in der Kohlensäure (Holleman et al., 2007).

Dieses ist vor allem bei der Kalkausfällung von Bedeutung. Reagiert das Hydrogencarbonat-Ion mit Calciumionen entsteht  $\text{CaCO}_3$ , Calciumcarbonat, also Kalk (Holleman et al., 2007). Der pH-Wert betrug zu diesem Zeitpunkt im Diluat der ED1 7,3, im Konzentrat 7,8, also leicht basisch. Wie bereits erwähnt, ist das Calciumcarbonat für die ED schädlich und es wird daher HCl dazu dosiert wird, um Ausfällungen zu vermeiden.

Folgende Umrechnungen wurden durchgeführt (Wilhelm, 2008):

- $1 \text{ °dH} = 7,14 \text{ mg/l Ca}^{2+}$
- $1 \text{ °dH} = 10,71 \text{ mg/l CO}_3^{2-}$

Es ergeben sich daher folgende Ergebnisse:

- $1 \text{ °dH} = 17,85 \text{ mg/l CaCO}_3$

Das Diluat in der ED1 hat 3,86 °dH, das entspricht 68,90 mg/l  $\text{CaCO}_3$ . Das ED1 Konzentrat hat 32 °dH, was 571,2 mg/l  $\text{CaCO}_3$  entspricht. Das HUO-Konzentrat hat eine besonders hohe Wasserhärte, nämlich 87,2 °dH. Das entspricht 1556,52 mg/l. Es ist gut zu erkennen, dass sich recht viel Kalk sowohl im HUO-Konzentrat als auch im ED1-Konzentrat befindet und es daher leicht zu Ausfällungen kommt.

## 5.1.2 Spurenstoff-Entfernung

Im Zuge der Inbetriebnahme der Pilotanlage wurde untersucht, ob gewisse Spurenstoffe mittels Membrantechnik entfernt werden können. In den folgenden Seiten werden die Spurenstoffe, die in den Probenahmen enthalten waren, analysiert. Die einzelnen Spurenstoffe werden in Gruppen kategorisiert, um eine verständlichere Erklärung zu ermöglichen. Die meisten Stoffe, die in den Probenahmen im Labor analysiert wurden, sind in der Gruppe der pharmazeutischen Wirkstoffe (Medikamente) zu finden.

**Medikamente:** Metoprolol, Sulfamethoxazol, Carbamazepin, Trimethoprim, Amisulprid, Citalopram, Venlafaxin, Irbesartan, Bezafibrat, Diclofenac, Ibuprofen, Hydrochlorothiazid, Amidotrizoesäure

**Lebensmittelzusatzstoffe:** Coffein, Acesulfam K

**Herbizid:** Diuron

**Chemikalie:** Benzotriazol

### A) Probenahme-Resultate vom 22.07.2024 → Spurenstoffe

Tabelle 16: PN-Resultate vom 22.07.2024 → Spurenstoffe (**positiv**) [ng/l]

(1 = Rohwasser; 2 = VOF, 3 = NF Permeat, 4 = HUO-Feinfilter, 5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, 7 = ED1-Diluat, 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat)

PN	Coffein	Metoprolol	Benzotriazol	Sulfamethoxazol	Amidotrizoesäure	Carbamazepin	Diuron	Trimethoprim	Amisulprid	Citalopram	Venlafaxin	Irbesartan
1	117	3081	295	73	0	221	141	2580	1653	631	2226	46
2	127	8423	311	65	0	220	150	149	3076	722	4229	96
3	86	70	379	2	0	24	0	79	5	5	17	2
4	221	38	377	2	0	25	0	66	3	4	13	0
5	70	0	167	0	0	0	0	0	1	7	0	0
6	51	302	1675	19	0	147	0	128	21	8	78	2
7	73	65	304	1	0	24	0	106	2	4	5	2
9	44	176	689	3	0	99	0	196	6	2	29	0

Tabelle 17: PN-Resultate vom 22.07.2024 → Spurenstoffe (**negativ**) [ng/l]

(1 = Rohwasser; 2 = VOF, 3 = NF Permeat, 4 = HUO-Feinfilter, 5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, 7 = ED1-Diluat, 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat)

PN	Acesulfam K	Bezafibrat	Diclofenac	Ibuprofen	Hydrochloro- thiazid
1	29	11	869	10	1899
2	27	10	926	7	4158
3	30	0	16	25	4324
4	29	0	16	18	3613
5	0	0	2	0	22
6	154	1	95	1	7508
7	9	0	10	3	16966
9	33	0	41	15	12576

In den Tabelle 16 und Tabelle 17 sind die Ergebnisse der Spurenstoff-Analyse aufgelistet.

Bei Betrachtung von Tabelle 16 fällt auf, dass sich keine Amidotrizoesäure in den Proben befindet. Das Herbizid Diuron wurde bereits im Zuge der NF komplett reduziert. Diuron ist in der „Qualitätszielverordnung Chemie Oberflächengewässer“ mit einer zulässigen-Höchstkonzentration-Umweltqualitätsnorm von 1,8 µg/l festgelegt (BML, 2024b) Dies ist bereits im Zulauf der Anlage eingehalten worden.

Benzotriazol (Chemikalie) hat eine molaren Masse von 119,13 g/mol (*Listen Übersicht - Das Periodensystem online*, o. J.) und hat damit die kleinste molare Masse der untersuchten Spurenstoffe. Die Entfernung bzw. Aufkonzentration von Benzotriazol ist in Abbildung 40 prozentuell dargestellt. Der schlechtere Rückhalt von Benzotriazol kann daraus resultieren, da die Chemikalie in dem Fall als „kleines Molekül“ bezeichnet und daher von den Membranen mäßig zurückgehalten werden kann. Bereits nach der Nanofiltration ist die Konzentration um etwa 29 % höher als beim Zulauf der Kläranlage. Im HUO-Konzentrat ist eine Erhöhung der Konzentration um etwa 470 % zu vermerken (1675 ng/l). Das ED1-Diluat weist keine signifikante Änderung in der Konzentration auf. Im ED2-Diluat ist eine um den Faktor 2,34 höhere Konzentration von Benzotriazol nachgewiesen worden als im Zulauf der Anlage.

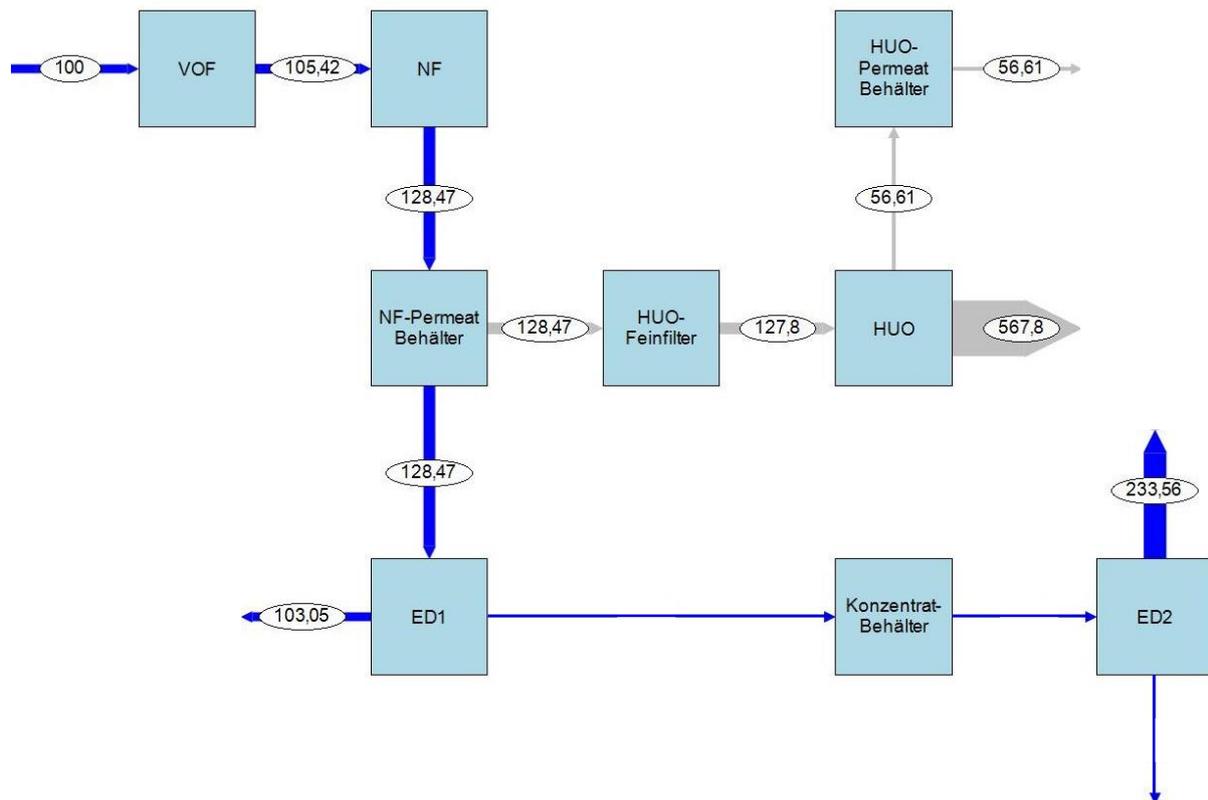


Abbildung 40: Benzotriazol-Konzentrationsverlauf bezogen auf Zulaufkonzentration [%] vom 22.07.2024

Auffallend in der Gruppe der Medikamente ist vor allem das Hydrochlorothiazid. Im Vergleich zu den anderen Spurenstoffen weist Hydrochlorothiazid deutlich höhere Konzentrationen im Zulauf auf (1899 ng/l). So hohe Konzentrationen wurden ebenfalls bei der Probenahme am 22.08.2024 beobachtet, sowohl im Parallel- als auch im Serienbetrieb. Hydrochlorothiazid hat etwa die gleiche molare Masse wie Diclofenac (Hydrochlorothiazid = 297,74 g/mol, Diclofenac = 296,148 g/mol (*Listen Übersicht - Das Periodensystem online*, o. J.)), verhält sich aber anders. Beide Spurenstoffe sind negativ geladen. In Abbildung 41 ist der Konzentrationsverlauf von Hydrochlorothiazid dargestellt. Der Stoff wird vor allem in der ED1 um den Faktor 8,9 aufkonzentriert. Im ED2-Diluat wird der Spurenstoff um 560 % aufkonzentriert. In der NF wird Hydrochlorothiazid stark aufkonzentriert (um 100 %), im HUF-Permeat konnte der Stoff jedoch wieder reduziert werden.

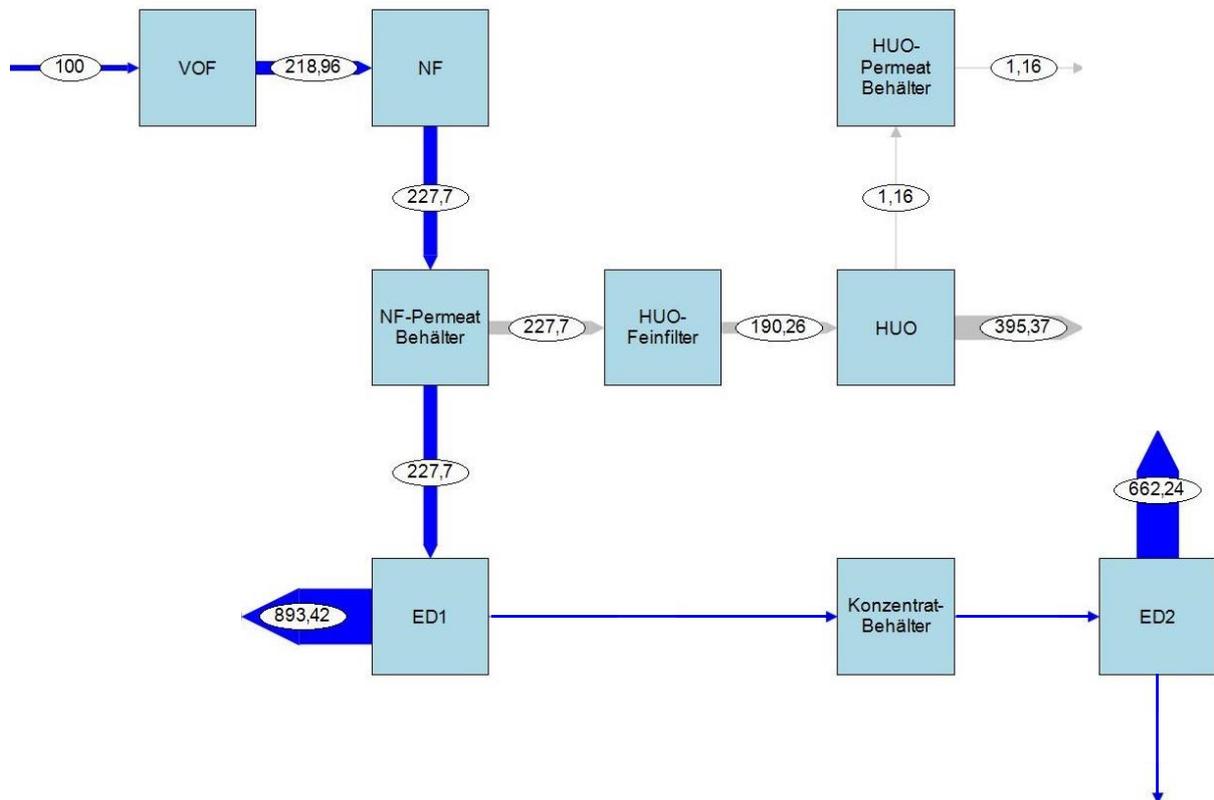


Abbildung 41: Hydrochlorothiazid- Konzentrationsverlauf bezogen auf Zulaufkonzentration [%] vom 22.07.2024

Sowohl Benzotriazol und Hydrochlorothiazid wurden in der Pilotanlage nicht reduziert, sondern bis zum ED2-Diluat (Endprodukt) aufkonzentriert.

Coffein kann in Kläranlagen gut abgebaut werden, es können jedoch Restkonzentrationen in den Vorfluter gelangen oder wie in diesem Fall in den Zulauf der Pilotanlage (Schramm et al., 2006). Die NF kann bereits einen großen Teil zurückhalten, die Coffein-Konzentration beträgt 86 ng/l. Im Zuge der HUF wird Coffein im Permeat noch weiter auf 70 ng/l reduziert. Im HUF-Konzentrat befindet sich sogar noch weniger Coffein (51 ng/l). Im ED2-Diluat beträgt die Coffein-Konzentration 44 ng/l. In Abbildung 42 ist die Entfernung von Coffein in der Pilotanlage prozentuell dargestellt. Coffein wird wie gesagt schrittweise reduziert.

Der Lebensmittelzusatzstoff Acesulfam K wird in Kläranlagen gar nicht oder nur in sehr geringen Mengen abgebaut (Formanek et al., 2023). Im Ablauf der Kläranlage, also im Zulauf der Pilotanlage befinden sich 29 ng/l Acesulfam K. Dieses wird im Zuge der HUF im Permeat komplett reduziert. Im HUF-Konzentrat wird es auf 154 ng/l aufkonzentriert. In den ED-Diluaten liegen die Konzentrationen bei 9 ng/l in der ersten Stufe und bei 33 ng/l in der zweiten Stufe. Im ED2-Diluat wurde Acesulfam K um 13% aufkonzentriert im Vergleich zur Ausgangskonzentration (sh. Abbildung 43).

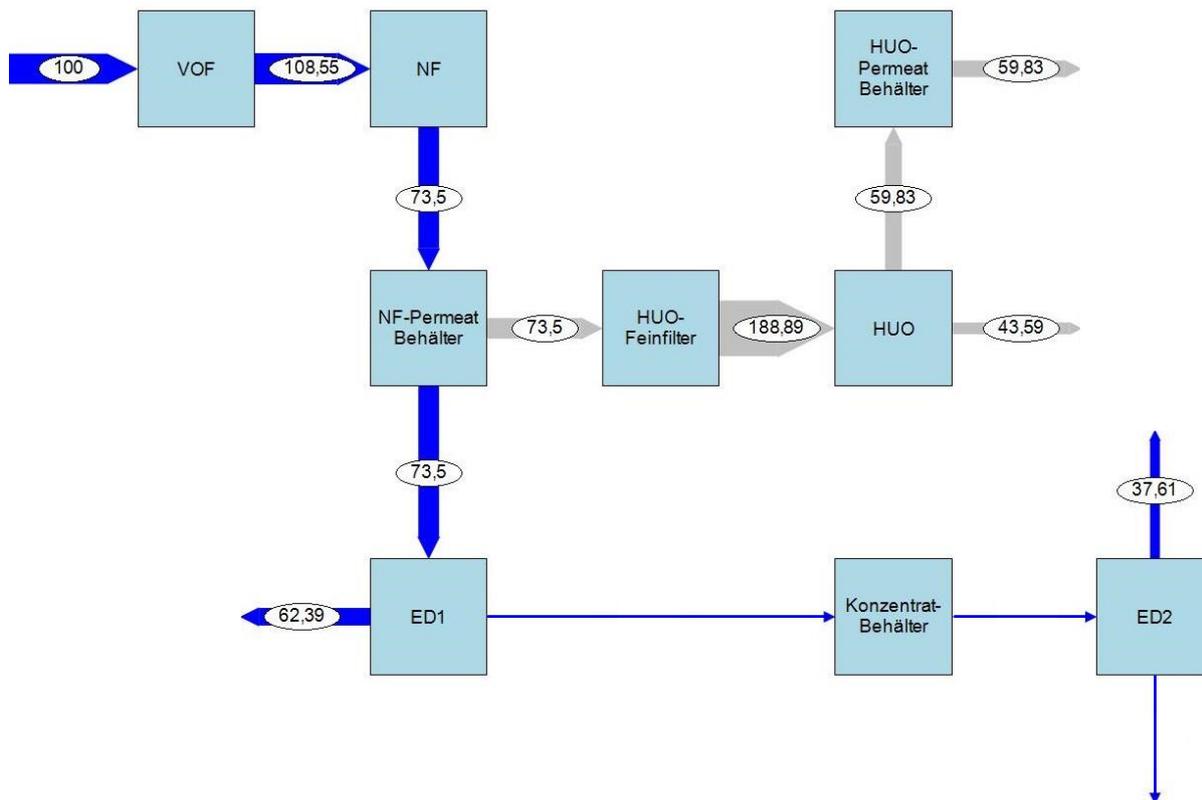


Abbildung 42: Coffein- Konzentrationsverlauf bezogen auf Zulaufkonzentration [%] vom 22.07.2024

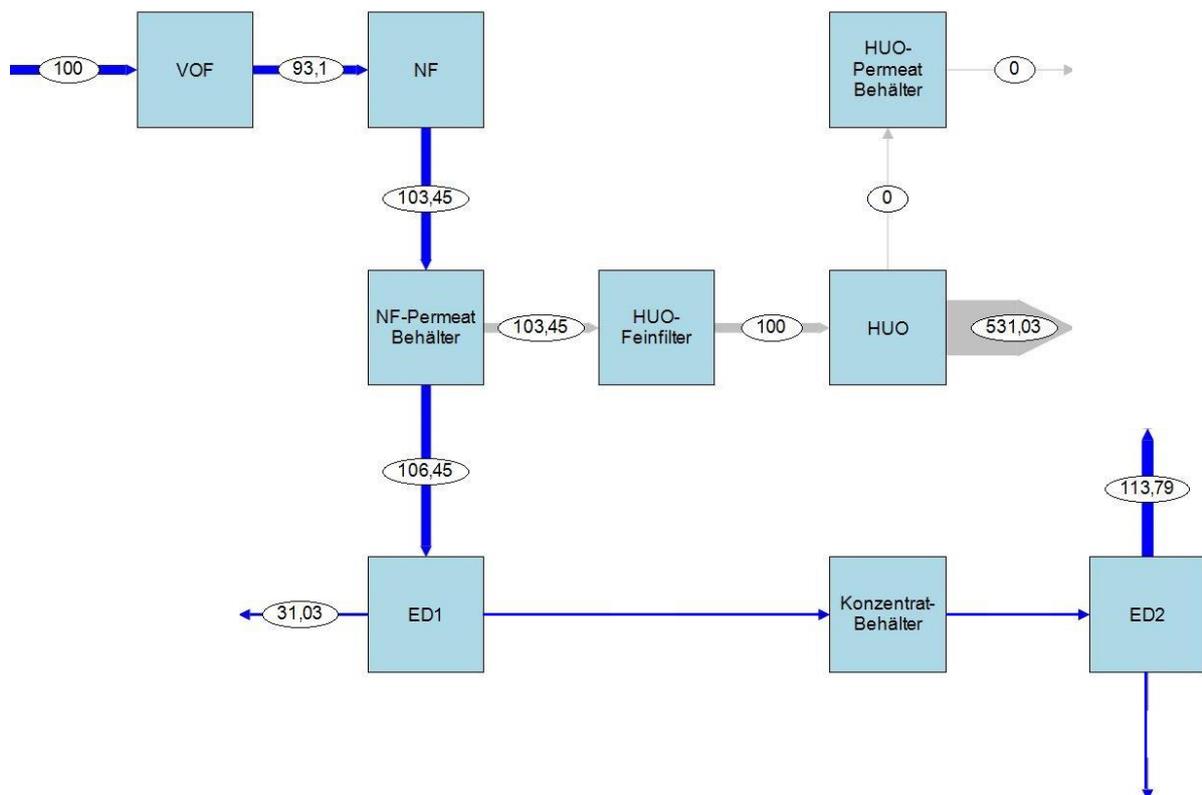


Abbildung 43: Acesulfam K- Konzentrationsverlauf bezogen auf Zulaufkonzentration [%] vom 22.07.2024

Ibuprofen, ein Medikament, welches täglich eingenommen werden kann, war nur in geringen Mengen vorhanden. Ibuprofen (molare Masse = 206,28 g/mol) ist negativ geladen. Die prozentuelle Darstellung ist in Abbildung 44 dargestellt. In der NF verhält es sich ähnlich wie Hydrochlorothiazid. Es ist eine deutliche Aufkonzentration um den Faktor 2,5 aufgetreten. In weiterer Folge wird es jedoch sowohl in der HUO als auch in der ED reduziert. Im ED2-Diluat wurde der Spurenstoff um 50 % im Vergleich zur Anfangskonzentration aufkonzentriert.

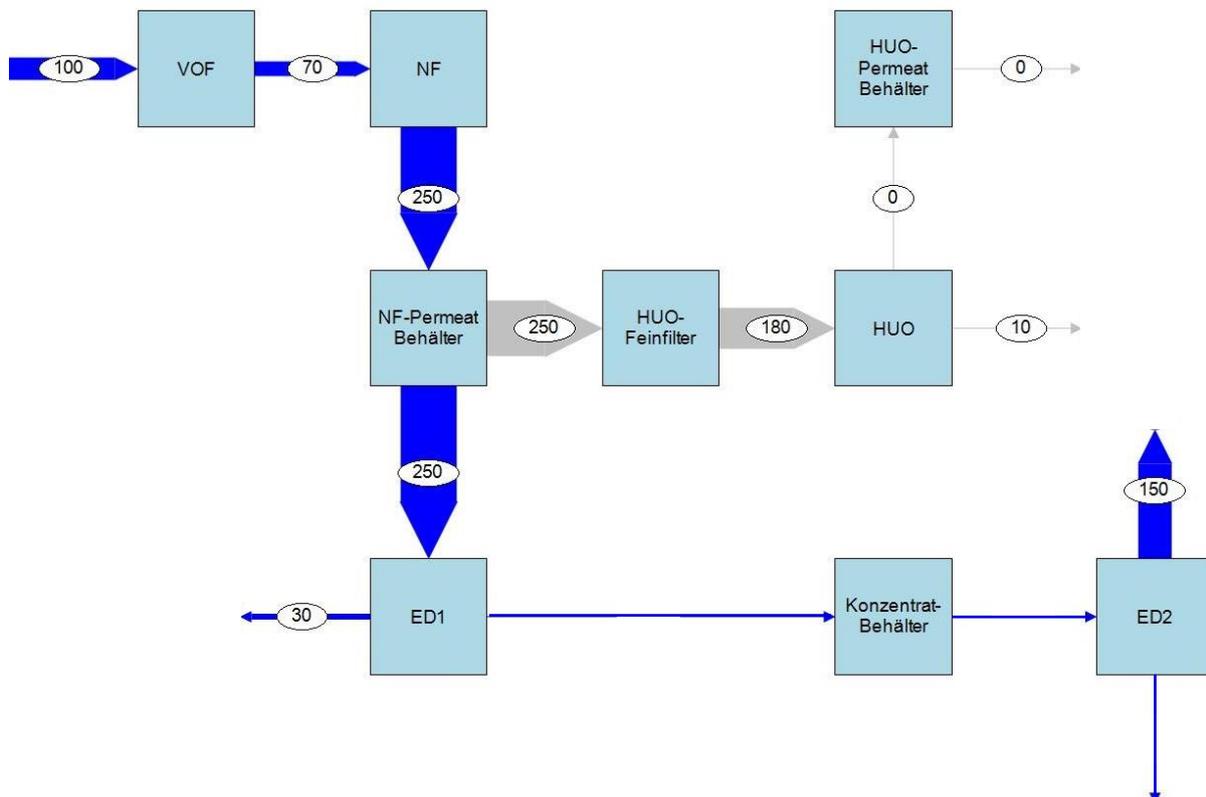


Abbildung 44: Ibuprofen- Konzentrationsverlauf bezogen auf Zulaufkonzentration [%] vom 22.07.2024

Der Konzentrationsverlauf von Irbesartan ist in Abbildung 45 dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass die Konzentration von Irbesartan nach der VOF um 108,7% höher ist als die Ausgangskonzentration beim Zulauf der Anlage. Wie bereits erwähnt, konnte durch die NF bereits eine deutliche Reduktion, nämlich um 94 %, erfolgen. Irbesartan hat eine molare Masse von 428,54 g/mol (*Listen Übersicht - Das Periodensystem online*, o. J.) und hat somit die höchste molare Masse der untersuchten Spurenstoffe dieser Diplomarbeit. Der Rückhalt der NF von Irbesartan kann daraus resultieren, da Irbesartan in dem Fall als „großes Molekül“ bezeichnet werden kann und es daher besser von der Membran der NF zurückgehalten wird. In weiterer Folge ist es im HUO-Permeat vollständig reduziert. Mit einem Anteil von nur 4 % des Ausgangswertes ist

es im Konzentrat der HUO bzw. im ED1-Diluat noch vorhanden. Im ED2-Diluat ist Irbesartan mit 0 % vorhanden.

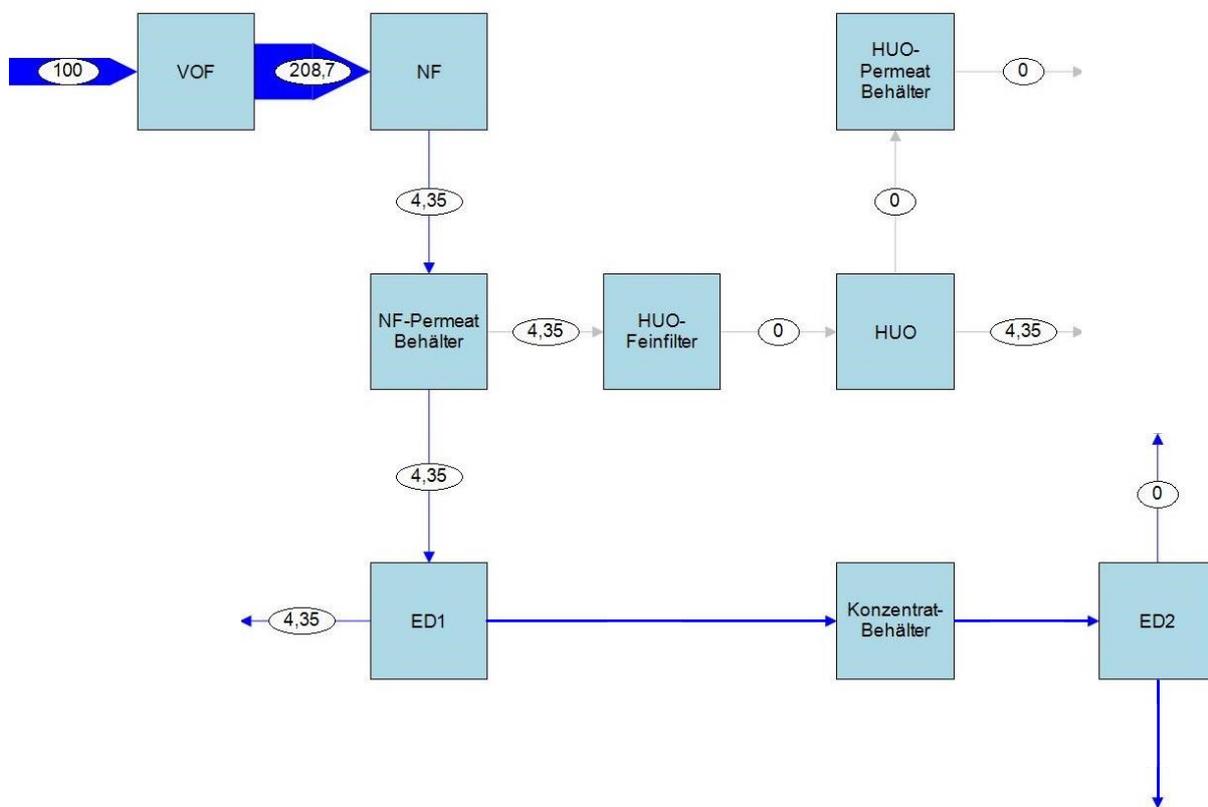


Abbildung 45: Irbesartan-Konzentrationsverlauf bezogen auf Zulaufkonzentration [%] vom 22.07.2024

Die Spurenstoffe Amisulprid, Bezafibrat und Citalopram, haben ähnliche molare Massen (etwa 324 g/mol bis 369 g/mol (*Listen Übersicht - Das Periodensystem online*, o. J.)) und zählen daher auch zu den großen Molekülen. Sie verhalten sich ähnlich wie Irbesartan, da sie ebenfalls nach der NF deutlich reduziert werden (fast um 100 %) und in weiterer Folge in den Diluaten bzw. HUO-Permeat und Konzentrat im Bereich zwischen 0,1 und 2 % vom Ausgangswert liegen.

Diclofenac, Metoprolol, Trimethoprim, Carbamazepin, Venlafaxin Sulfamethoxazol und Diuron weisen ähnliche molare Massen (im Bereich zwischen 233 g/mol und 296 g/mol (*Listen Übersicht - Das Periodensystem online*, o. J.)) auf. Obwohl die genannten Moleküle kleiner sind als Amisulprid, Bezafibrat und Citalopram verhalten sich die Moleküle ebenfalls wie Irbesartan. Die Spurenstoffe werden ebenfalls bereits in der NF um 96 – 99 % reduziert, mit Ausnahme von Carbamazepin, welches um nur 90 % reduziert wird. Im weiteren Verlauf der Pilotanlage sind keine signifikanten Änderungen in den Konzentrationen zu verzeichnen. Ausnahmen sind bei Sulfamethoxazol und Carbamazepin im HUO-Konzentrat und Metoprolol im ED1-

Diluat zu erkennen. Der Spurenstoff Sulfamethoxazol wurde im H<sub>2</sub>O-Konzentrat um etwa 74% und Carbamazepin um 34 % reduziert und bei Metoprolol war eine Reduktion von etwa 40 % zu erkennen.

Die Studie „Rejection rate and mechanisms of drugs in drinking water by nanofiltration technology“ (Ge et al., 2017) hat Trinkwasser mithilfe der NF auf Medikamentenspuren untersucht. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die NF die Spurenstoffe gut zurückhält und sie dadurch die Qualität des Trinkwassers verbessert (Ge et al., 2017). Diese Ergebnisse konnten im Zuge der Probenahmen in der Pilotanlage bestätigt werden. Die NF zeigt sehr gute Ergebnisse in Bezug auf den Rückhalt von Spurenstoffen. Metoprolol, Sulfamethoxazol, Carbamazepin, Diuron, Trimethoprim, Amisulprid, Citalopram, Venlafaxin, Irbesartan, Bezafibrat und Diclofenac werden besonders gut zurückgehalten.

Die Ergebnisse des H<sub>2</sub>O-Permeats zeigen, dass fast alle Spurenstoffe darin komplett reduziert wurden und sich im H<sub>2</sub>O-Konzentrat befinden. Ausnahmen bilden Coffein und Benzotriazol, bei denen die Konzentrationen über 10 ng/l liegen. Bei den anderen Probenahmen sind die Ergebnisse ähnlich. Die Studie „Removal of emerging contaminants from wastewater using reverse osmosis for its subsequent reuse: Pilot plant“ (Egea-Corbacho Lopera et al., 2019) bestätigt, dass verschiedene Spurenstoffe durch den Prozess der Umkehrosmose eliminiert werden können. Die Studie behandelt die Wiederverwendung von H<sub>2</sub>O-Permeat für den Gebrauch. Spurenstoffe, wie Coffein oder Penicillin G wurden in das Abwasser der Kläranlage dazu gemischt. In der Studie wurden alle Spurenstoffe zu 100 % entfernt, was in einem ungefährlichen Gebrauch des H<sub>2</sub>O-Permeat resultiert (Egea-Corbacho Lopera et al., 2019). Im Fall der Pilotanlage in Guntramsdorf konnte keine 100 %ige-Reinigungsleistung erreicht werden. Es wurden aber vergleichbare Ergebnisse erzielt.

## B) Probenahme-Resultate vom 22.08.2024 → Spurenstoffe

### Parallelbetrieb:

Tabelle 18: PN-Resultate vom 22.08.2024 → Spurenstoffe (**positiv**) – Parallelbetrieb [ng/l]

(M1 = ED1 Dil. + Konz. (PB), 3 = NF Permeat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED1-Konzentrat, M2 = ED2 Dil. + Konz. (PB), 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat)

PN	Coffein	Metoprolol	Benzotriazol	Sulfamethoxazol	Amidotrizoensäure	Carbamazepin	Diuron	Trimethoprim	Amisulprid	Citalopram	Venlafaxin	Irbesartan
<b>M1</b>	185	434	690	12	0	94	0	59	73	8	118	2
<b>3</b>	84	691	532	19	0	83	0	416	67	12	121	2
<b>7</b>	70	437	590	13	0	93	0	114	38	6	68	1
<b>8</b>	72	567	938	25	0	88	0	32	55	10	117	0
<b>M2</b>	91	3379	1429	33	0	231	13	59	177	14	251	1
<b>9</b>	57	622	1169	16	0	247	6	54	73	12	145	2
<b>10</b>	88	687	3698	53	0	238	0	63	179	15	255	1

Tabelle 19: PN-Resultate vom 22.08.2024 → Spurenstoffe (**negativ**) – Parallelbetrieb [ng/l]

(M1 = ED1 Dil. + Konz. (PB), 3 = NF Permeat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED1-Konzentrat, M2 = ED2 Dil. + Konz. (PB), 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat)

PN	Acesulfam K	Bezafibrat	Diclofenac	Ibuprofen	Hydrochloro- thiazid
<b>M1</b>	28	1	160	90	8583
<b>3</b>	28	1	173	121	6043
<b>7</b>	13	1	114	2	7515
<b>8</b>	36	0	111	2	6752
<b>M2</b>	75	2	536	388	29259
<b>9</b>	14	1	180	66	16598
<b>10</b>	159	2	1092	653	12027

An 22.08.2024 wurde ein Parallelbetrieb durchgeführt. Es wurde jedoch ab dem NF-Permeat beprobt. In den Tabelle 18 und Tabelle 19 sind die Ergebnisse der Spurenstoff-Analyse aufgelistet.

Wie bereits in der Probenahme am 22.07.2024 befindet sich auch hier keine Amidotrizoesäure in den Proben. Das Herbizid Diuron ist nur in der zweiten Mischprobe (M2) und in einer sehr geringen Menge im ED2-Diluat enthalten.

Bezafibrat und Irbesartan sind beide nur in sehr geringen Mengen vorhanden. Diclofenac hat im NF-Permeat eine Konzentration von 173 ng/l. In der ersten ED-Stufe wird der Stoff im Diluat auf 114 ng/l reduziert. Im Konzentrat ist der Gehalt von Diclofenac vergleichbar. In der zweiten Stufe der ED war Diclofenac mit einer Konzentration von 180 ng/l vorhanden, im Konzentrat sogar mit einer Konzentration von 1092 ng/l. Ibuprofen wurde im Zuge der ersten Stufe der Elektrodialyse fast vollständig reduziert. In der ED2 wurde es jedoch wieder aufkonzentriert, sowohl im Diluat als auch im Konzentrat. Hydrochlorothiazid war wieder in sehr hohen Konzentrationen vorhanden und wurde stark aufkonzentriert.

Benzotriazol, Carbamazepin, Amisulprid, Venlafaxin und Hydrochlorothiazid wurden im Zuge der Membrantechnologien nicht reduziert, sondern vom NF-Permeat zum ED2-Diluat aufkonzentriert. Carbamazepin und Hydrochlorothiazid weisen im ED2-Diluat höhere Konzentrationen aus als im ED2-Konzentrat.

Die restlichen Spurenstoffe wurden im Zuge der ED reduziert.

### Serienbetrieb:

Tabelle 20: PN-Resultate vom 22.08.2024 → Spurenstoffe (**positiv**) – Serienbetrieb [ng/l]  
(5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, M3 = ED2 Dil. + Konz. (SB), 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat)

PN	Coffein	Metoprolol	Benzotriazol	Sulfamethoxazol	Amidotrizoesäure	Carbamazepin	Diuron	Trimethoprim	Amisulprid	Citalopram	Venlafaxin	Irbesartan
<b>5</b>	90	0	313	1	0	1	0	0	1	0	7	0
<b>6</b>	101	1949	7642	376	0	556	11	300	540	51	879	4
<b>M3</b>	71	6595	1840	40	0	273	10	66	208	21	380	2
<b>9</b>	62	2296	1589	16	0	301	0	290	91	12	170	0
<b>10</b>	59	962	2190	133	0	314	0	154	235	21	345	2

Tabelle 21: PN-Resultate vom 22.08.2024 → Spurenstoffe (**negativ**) – Serienbetrieb [ng/l]  
 (5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, M3 = ED2 Dil. + Konz. (SB), 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat)

PN	Acesulfam K	Bezafibrat	Diclofenac	Ibuprofen	Hydrochloro- thiazid
<b>5</b>	0	0	6	4	55
<b>6</b>	199	7	1230	2	7492
<b>M3</b>	90	2	611	429	4219
<b>9</b>	14	1	140	87	11044
<b>10</b>	164	3	898	639	16419

An 22.08.2024 wurde ebenfalls ein Serienbetrieb durchgeführt. Es wurde wieder nur der Entsalzungsprozess ab dem HUO-Permeat beprobt. In den Tabelle 20 und Tabelle 21 sind die Ergebnisse der Spurenstoff-Analyse aufgelistet.

Wie in der ersten Probenahme ist auch hier gut zu erkennen, dass im HUO-Permeat keine Spurenstoffe bzw. nur Spurenstoffe in geringen Konzentrationen befinden. Eine Ausnahme bildet Benzotriazol, welches mit einer Konzentration von 313 ng/l im HUO-Permeat vorhanden ist.

In der HUO werden die Spurenstoffe im Permeat reduziert, im Konzentrat jedoch hoch aufkonzentriert. Diese Tatsache bestätigt auch die Studie „Occurrence of emerging and priority pollutants in municipal reverse osmosis concentrates“ (Wei et al., 2015). In dieser Studie wurde zunächst eine Mikro- oder Ultrafiltration durchgeführt und anschließend die Umkehrosmose. Es wurden einige Pharmazeutika, Herbizide und andere organische Spurenstoffe detektiert. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die meisten Spurenstoffe unter 1 ng/l betragen, Ausnahmen waren z.B. Coffein und Benzylbutylphthalat, welche beide eine Konzentration über 3 µg/l aufwiesen. Im Fall der Pilotanlage in Guntramsdorf waren die Ergebnisse höher. Benzotriazol und Hydrochlorothiazid haben Konzentrationen über 7 µg/l. Diclofenac und Metoprolol haben Konzentrationen über 1 µg/l. Obwohl im Fall der Pilotanlage eine Nanofiltration zum Einsatz kommt, also eine feinere Filtration als die Mikro- oder Ultrafiltration in der genannten Studie, hat die Studie bessere Ergebnisse erzielt, als die Pilotanlage.

Es gibt bereits verschiedene Möglichkeiten, wie das HUO-Konzentrat weiter behandelt werden kann, um die Spurenstoffe zu entfernen. Die Studie “Simultaneous removal of

natural organic matter and micro-organic pollutants from reverse osmosis concentrate using granular activated carbon” (Jamil et al., 2019) verwendet als Adsorbens granuliert Aktivkohle (GAC), die zum Konzentrat hinzugegeben wird. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass durch GAC nicht nur organische Spurenstoffe entfernt werden können, sondern auch gelöster organischer Kohlenstoff (DOC). Es wurde darauf hingewiesen, dass die Versuche über einen längeren Zeitraum wiederholt werden sollen bzw. auch andere GACs verwendet werden sollen (Jamil et al., 2019). Eine weitere Studie, die sich mit dem Entfernen organischer Spurenstoffe aus HUO-Konzentrat beschäftigt hat, ist die Studie „Innovative Treatment of Organic Contaminants in Reverse Osmosis Concentrate from Water Reuse: a Mini Review” (Xiang et al., 2019). In dieser Studie werden einige Möglichkeiten geboten, das Konzentrat weiter zu behandeln. Es wurde die Vorwärtsosmose angewendet, um eine Volumensreduktion des Konzentrats zu erreichen. Des Weiteren wurden Oxidationsverfahren (Ozonung) angewendet, um organische Verunreinigungen abzubauen. Eine Vorbehandlung beim Oxidationsverfahren kann Koagulation erfolgen, da es die biologische Abbaufähigkeit verbessert. Eine weitere Möglichkeit ist die post-biologische Behandlung, z.B. Mikroalgen Anbau. Diese entfernt biologisch abbaubare Stoffe, die beim Oxidationsverfahren entstanden sind. Als Endlösung wurde eine Kombination aus den genannten Techniken präsentiert (Xiang et al., 2019).

Ein weiterer Ansatz HUO-Konzentrat weiter zu behandeln, wäre die Elektrodialyse, die in der Pilotanlage zur Anwendung kommt. Dies wird ebenfalls in der Studie „Reverse Osmosis Concentrate: Physicochemical Characteristics, Environmental Impact, and Technologies“ (Valdés et al., 2021) vorgeschlagen. Das ED2-Diluat enthält geringere Konzentrationen an Spurenstoffe im Vergleich zum HUO-Konzentrat mit Ausnahme von Metoprolol, Ibuprofen und Hydrochlorothiazid, welche höhere Konzentrationen aufweisen. Es lässt sich daraus schließen, dass die ED dementsprechend als nachgeschaltete Stufe der HUO für die Behandlung von HUO-Konzentrat eine gute Option darstellt. Ein Vergleich zwischen dem ED2-Konzentrat und dem HUO-Konzentrat zeigt, dass die meisten Spurenstoffe geringere Konzentrationen im ED2-Konzentrat aufweisen, mit Ausnahme von Ibuprofen und Hydrochlorothiazid, als im HUO-Konzentrat. Diese Ausnahme ist jedoch nur am 22.08.2024 im Serienbetrieb aufgetreten. Ein kurzer Vergleich von ED2-Diluat mit dem ED2-Konzentrat zeigt, dass Coffein, Metoprolol und Trimethoprim im Diluat höhere Konzentrationen aufweisen, als im Konzentrat.

## C) Probenahme-Resultate vom 29.08.2024 → Spurenstoffe

Tabelle 22: PN-Resultate vom 29.08.2024 → Spurenstoffe (**positiv**) [ng/l]

(1 = Rohwasser; 2 = VOF, 3 = NF Permeat, 4 = HÜO-Feinfilter, 5 = HÜO-Permeat, 6 = HÜO-Konzentrat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED1-Konzentrat, 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat)

PN	Coffein	Metoprolol	Benzotriazol	Sulfamethoxazol	Amidotrizoensäure	Carbamazepin	Diuron	Trimethoprim	Amisulprid	Citalopram	Venlafaxin	Irbesartan
1	215	1818	1701	83	0	245	150	11490	1420	591	1806	199
2	118	9413	2114	95	0	239	128	330	1705	464	1955	59
3	206	8048	5011	37	0	170	0	57	416	43	273	2
4	145	7374	4402	37	0	157	0	29	373	43	254	0
5	222	4534	1616	1	0	1	0	0	4	0	1	0
6	70	9310	7827	347	0	1091	20	5905	6299	441	2109	4
7	66	1468	2515	19	0	161	0	306	209	23	155	1
8	39	1915	3231	38	0	154	0	33	348	32	282	2
9	49	1725	1044	23	0	242	0	283	312	19	244	2
10	47	7632	3097	182	0	237	0	132	568	38	408	2

Tabelle 23: PN-Resultate vom 29.08.2024 → Spurenstoffe (**negativ**) [ng/l]

(1 = Rohwasser; 2 = VOF, 3 = NF Permeat, 4 = HÜO-Feinfilter, 5 = HÜO-Permeat, 6 = HÜO-Konzentrat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED1-Konzentrat, 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat)

PN	Acesulfam K	Bezafibrat	Diclofenac	Ibuprofen	Hydrochloro- thiazid
1	24	14	1887	34	2701
2	22	8	2784	26	1958
3	22	1	450	194	439
4	21	1	299	1	373
5	0	0	5	2	15
6	99	4	4727	1179	4471
7	9	1	233	1	304
8	44	1	160	7	180
9	11	1	148	2	190
10	101	1	711	1	719

In Tabelle 22 und Tabelle 23 sind die Ergebnisse der Spurenstoff-Analyse aufgelistet.

Aus Tabelle 22 geht hervor, dass sich, wie in den anderen Probenahmen, keine Amidotrizesäure in den Proben befand. Das Herbizid Diuron ist im Zulauf und der VOF vorhanden, wurde dann aber im Zuge der NF komplett reduziert. Im HUO-Konzentrat wurde es mit 20 ng/l wieder nachgewiesen.

Wie in den anderen Probenahmen auch, ist auch hier das HUO-Permeat annähernd Spurenstoff frei. Ausnahmen bilden Coffein, Metoprolol und Benzotriazol, welche sich in höheren Konzentrationen im Permeat befinden.

Acesulfam K ist im Zulauf mit einer Konzentration von 24 ng/l vorhanden. Im Zuge des Parallelbetriebs wird es im ED2-Diluat auf 11 ng/l reduziert, im Konzentrat ist es mit einer Konzentration von 101 ng/l vorhanden. Der prozentuelle Verlauf während der Entfernung des Spurenstoffs ist nicht signifikant anders als bei der Probenahme am 22.07.2024.

Es ist zu erkennen, dass die NF, wie auch am 22.07., einen guten Rückhalt bei den Spurenstoffen Sulfamethoxazol, Diuron, Trimethoprim, Amisulprid, Citalopram, Venlafaxin, Irbesartan, Diclofenac, Bezafibrat und Hydrochlorothiazid bietet. Ausnahmen sind Metoprolol, welches am 22.07.2024 eine gute Reduktion in der NF erzielt hat, am 29.08. jedoch um einen Faktor von 3,43 höhere Konzentrationen aufgewiesen hat als im Zulauf und Carbamazepin, welches in der NF um nur 30 % reduziert wurde. Der Konzentrationsverlauf von Metoprolol ist in Abbildung 46 dargestellt.

Metoprolol und Benzotriazol haben während dem kompletten Betrieb Konzentrationen über 1 µg/l. Im HUO-Konzentrat ergeben sich sogar Konzentrationen von 9,3 µg/l (Metoprolol) und 7,8 µg/l (Benzotriazol). Wie bereits erwähnt, hat Benzotriazol die geringste molare Masse und kann in der NF nicht gut zurückgehalten werden. Der Konzentrationsverlauf von Benzotriazol ist in Abbildung 47 in Prozent dargestellt.

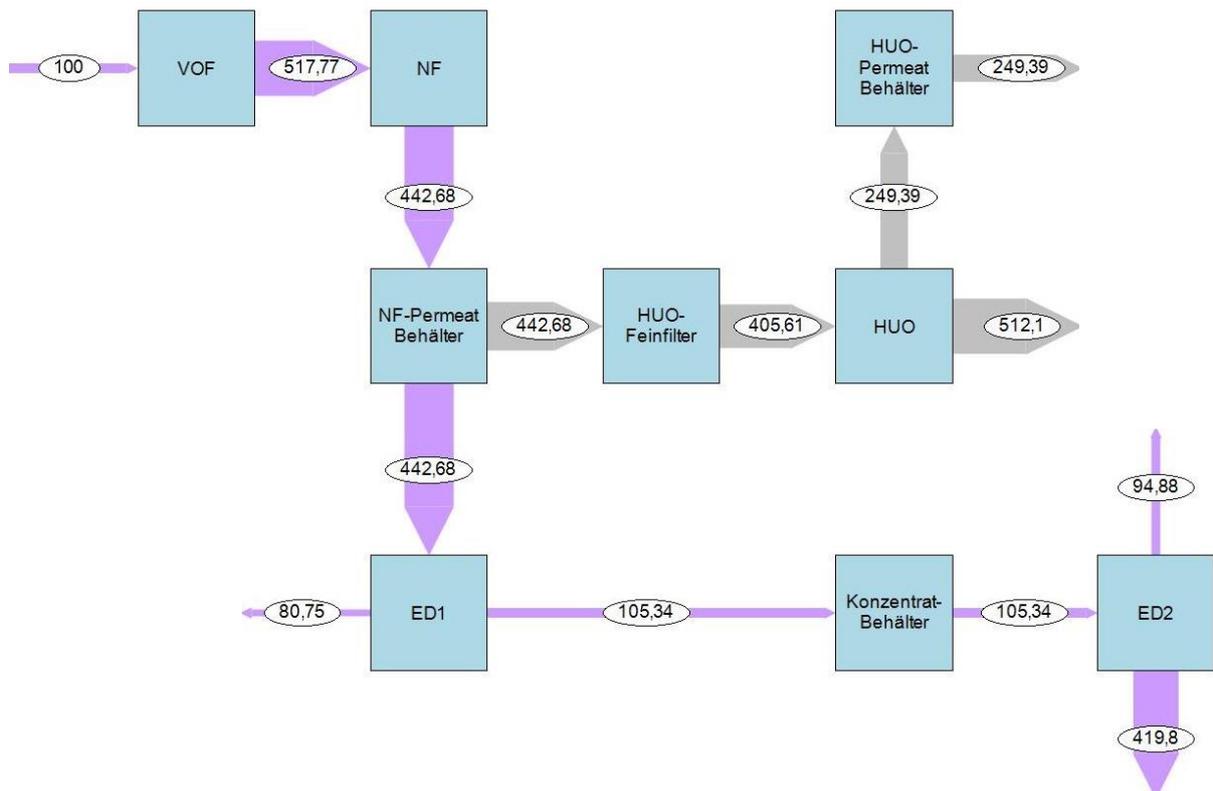


Abbildung 46: Metoprolol - Konzentrationsverlauf bezogen auf Zulaufkonzentration [%] vom 29.08.2024

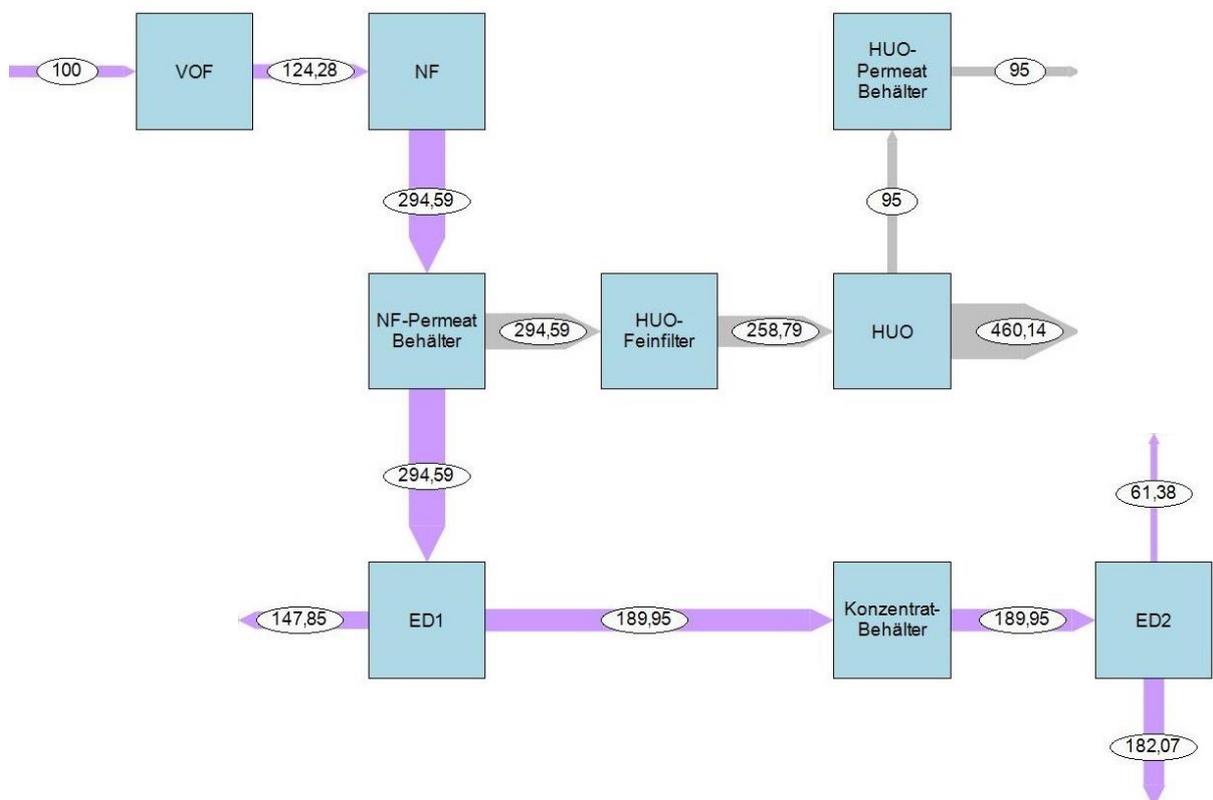


Abbildung 47: Benzotriazol - Konzentrationsverlauf bezogen auf Zulaufkonzentration [%] vom 29.08.2024

Des Weiteren wurde Carbamazepin in weiterer Folge im Gegensatz zu den Ergebnissen von der Probenahme am 22.07.2024 nur mäßig reduziert. Im ED1-Diluat konnte Carbamazepin wie auch in der NF nur um etwa 35 % reduziert werden. Das HUO-Konzentrat wurde um einen Faktor von 4,5 aufkonzentriert. Das ED2-Diluat und -Konzentrat weisen ähnliche Konzentrationen von Carbamazepin auf, der Spurenstoff wurde dementsprechend weder reduziert noch aufkonzentriert. Der prozentuelle Verlauf des Spurenstoffs ist in Abbildung 48 dargestellt.

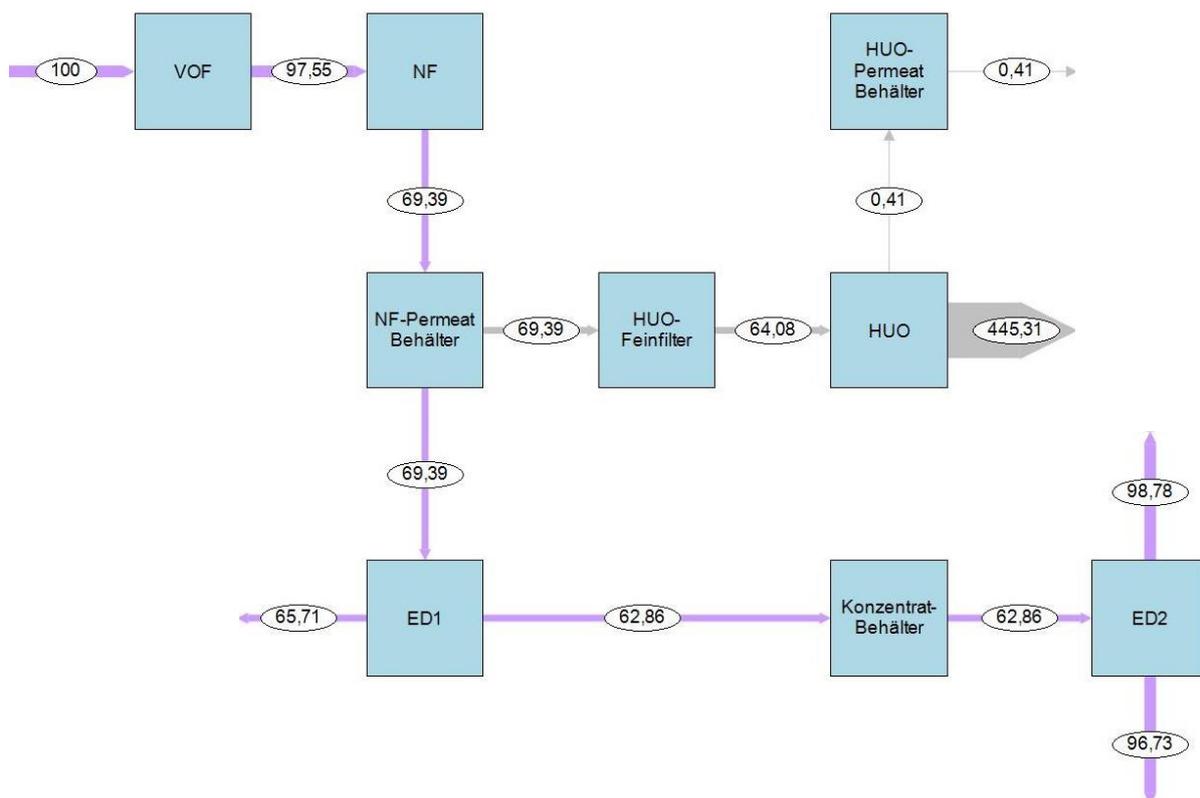


Abbildung 48: Carbamazepin - Konzentrationsverlauf bezogen auf Zulaufkonzentration [%] vom 29.08.2024

Die Medikamente Irbesartan und Bezafibrat sowie Ibuprofen sind in nur geringen Mengen in der ED2 vorhanden. Die Spurenstoffe Irbesartan und Bezafibrat verhalten sich ähnlich wie am 22.07.2024, es sind keine signifikanten Unterschiede zu erkennen.

Der prozentuelle Verlauf von Ibuprofen ist in Abbildung 49 dargestellt. Ibuprofen hat eine sehr hohe Konzentration im HUO-Konzentrat. Der Spurenstoff ist im HUO-Konzentrat um einen Faktor von etwa 35 höher als im Zulauf. In den ED-Diluate und im ED2-Konzentrat wurde Ibuprofen jedoch stark reduziert.



auch im ED2-Diluat stark reduziert werden. Dies ist in Abbildung 51 als prozentueller Verlauf dargestellt.

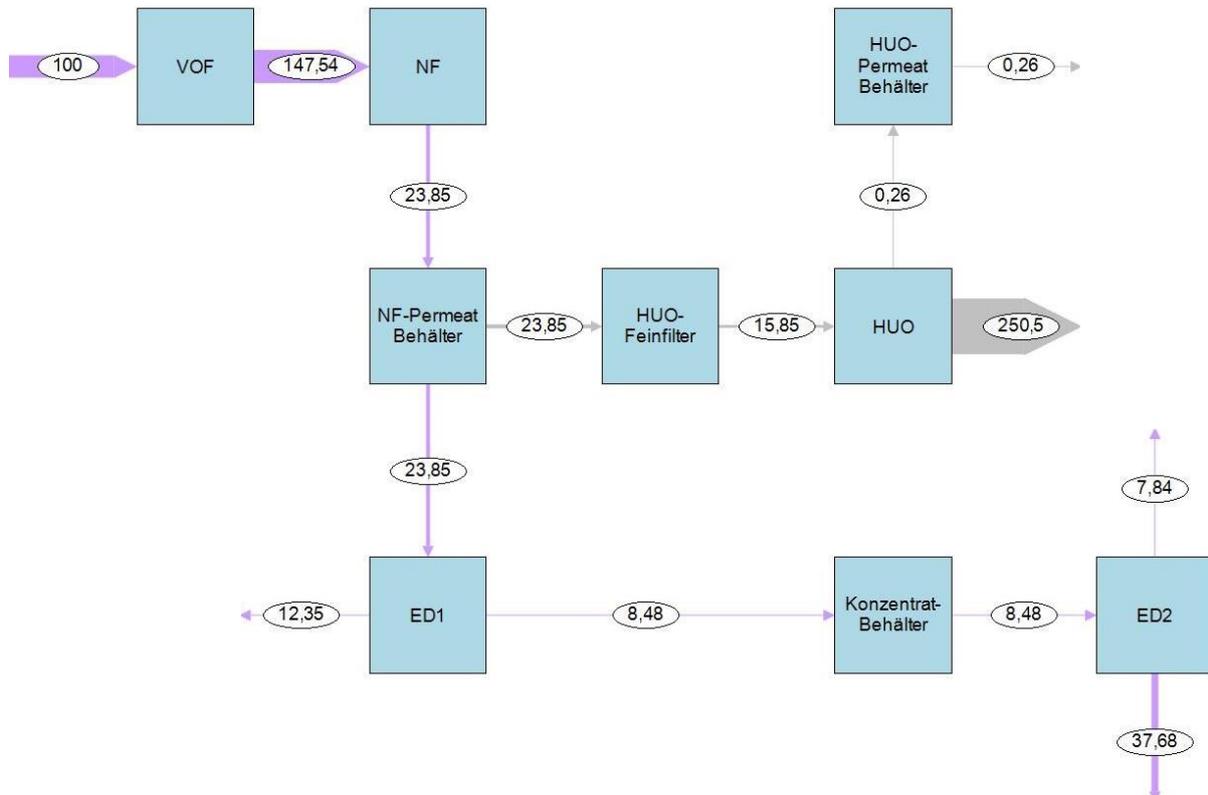


Abbildung 50: Diclofenac - Konzentrationsverlauf bezogen auf Zulaufkonzentration [%] vom 29.08.2024

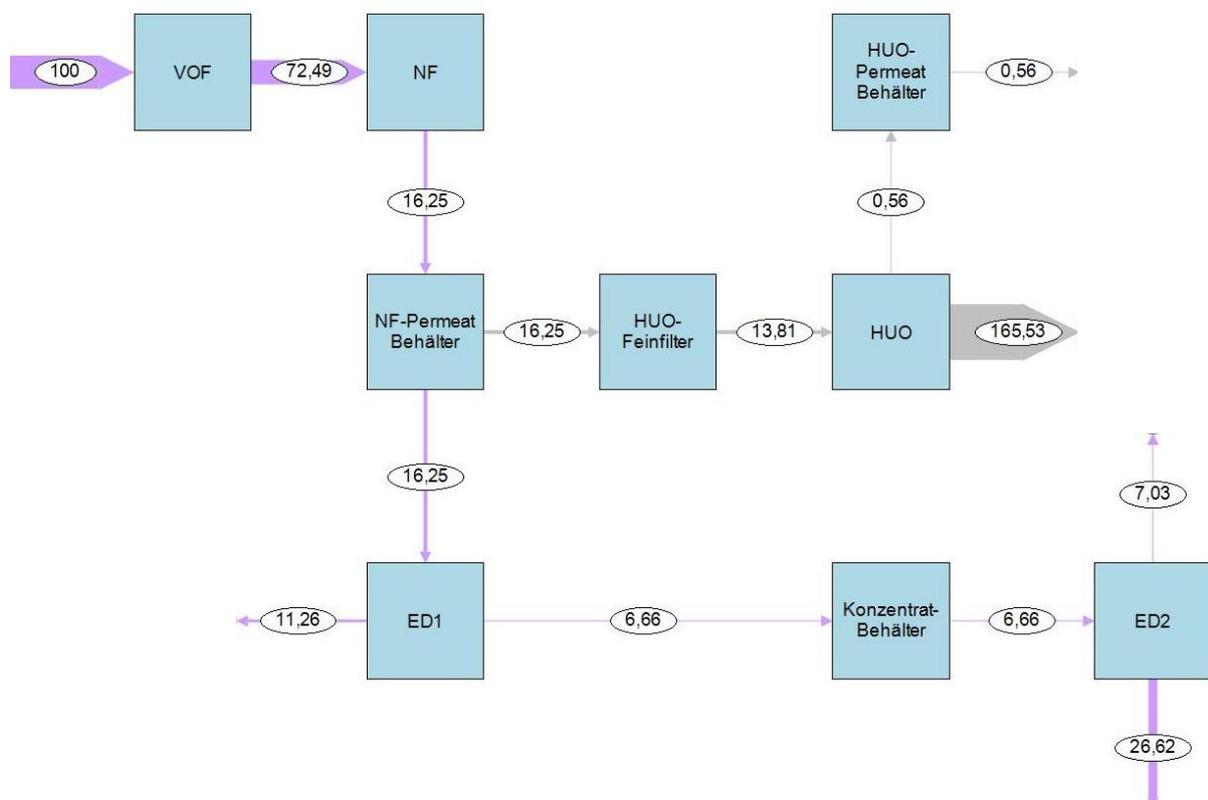


Abbildung 51: Hydrochlorothiazid- Konzentrationsverlauf bezogen auf Zulaufkonzentration [%] vom 29.08.2024

## 5.2 Entsalzung

Im Zuge des Testbetriebs der Pilotanlage wurden alle Werte der eingebauten Sonden zur Messdatenaufzeichnung jede Minute aufgezeichnet und gespeichert. Es werden Daten zu Drücken, Differenzdrücken, pH-Werten, Leitfähigkeiten, Temperaturen, Sauerstoff-Werten, Durchflüssen und Füllständen gesichert. Je nachdem welche Werte für den Parallel- oder Serienbetrieb eingestellt werden, dauert der Betrieb unterschiedlich lang.

Damit die Entsalzung visuell dargestellt werden kann, wurden die Leitfähigkeitswerte der einzelnen Entsalzungsversuche herangezogen. Die Leitfähigkeit ist ein Gesamtmaß für den Salzgehalt. Gemessen wird die Leitfähigkeit in  $[\mu\text{S}/\text{cm}]$  oder  $[\text{mS}/\text{cm}]$ . Sie hängt von der Dichte der frei beweglichen Ionen (Kationen und Anionen) ab (Frohne, 1982). Die Leitfähigkeit gibt keine Information über einzelner Stoffe an, sie zeigt primär Änderungen im Mischungsverhältnis an (Nds, o. J.).

Um ein besseres Verständnis für Werte zur Leitfähigkeit zu bekommen, ist der Grenzwert von Trinkwasser angegeben. In der Trinkwasserverordnung ist der Grenzwert für die Leitfähigkeit im Trinkwasser auf  $2500 \mu\text{S}/\text{cm}$  ( $2,5 \text{ mS}/\text{cm}$ ) bei  $20^\circ\text{C}$  festgelegt (BKA, o. J.). In der Regel liegt die Leitfähigkeit von Trinkwasser bei etwa  $200 - 400 \mu\text{S}/\text{cm}$  (laut dem Inspektionsbericht der 1. Hochquellwasserleitung 2024) (Tietz, 2024).

Um einen Vergleich der Entsalzung und der Entfernung der Spurenstoffe zu ermöglichen, wurden für die Leitfähigkeitswerte jene Uhrzeit gewählt, bei der die Probenahmen erfolgt sind. Die Leitfähigkeiten, die in der Anlage gemessen wurden, resultieren aus allen Salzen, die sich gelöst im Wasser befinden. Chlorid kann sowohl mit Natrium, Calcium, Kalium und Magnesium eine Verbindung eingehen. Des Weiteren werden, Natriumchlorid als auch Calciumchlorid und Magnesiumchlorid als Streusalz verwendet. All diese Salze sind im Leitfähigkeitswert mit eingebzogen. Es ist jedoch anzunehmen, dass Calciumchlorid und Magnesiumchlorid leitfähiger ist als Natriumchlorid, da pro mol Calcium oder Magnesium 2 mol Chloridionen gelöst sind. Möglicherweise wird daher im Ablauf der Kläranlage Guntramsdorf eher ein größerer Teil Calciumchlorid oder Magnesiumchlorid detektiert als das einwertige Natriumchlorid. Die Versuche wurden im Sommer im Ablauf der Kläranlage durchgeführt, weshalb kein vermehrter NaCl Eintrag (Streusalz) vorhanden war,

sondern nur vergleichsweise geringe Mengen an den bereits genannten Kationen und Anionen. Damit diese Erklärung anschaulicher wird, wurde die Leitfähigkeit bzw. die Konzentration von Natriumchlorid am Beispiel vom ED2-Diluat mit den Stoffkonzentrationen der Probenahme vom 22.07.2024 berechnet und mit den Leitfähigkeitswerten vom Entsalzungsversuch, der an diesem Tag durchgeführt wurde, verglichen.

Bei Betrachtung der Werte der Kationen bei der Entfernung ist ersichtlich, dass Magnesium und Kalium sehr geringe Gehalte aufweisen. Es ist daher anzunehmen, dass Chlorid primär mit Natrium und Calcium eine Verbindung eingegangen ist. Der Natrium-Gehalt im ED2-Diluat beträgt 51,4 mg/l, der Calcium-Gehalt 14,2 mg/l und der Chlorid-Gehalt beträgt 96 mg/l. Um die Stoffmengenkonzentration [mol/l] zu berechnen, sind die molaren Massen nötig.

- Natrium: 22,99 g/mol
- Chlorid: 35,45 g/mol
- NaCl: 58,35 g/mol

$$\frac{0,0514 \text{ g/l}}{22,99 \text{ g/mol}} = 0,002236 \text{ mol/l}$$

$$\frac{0,096 \text{ g/l}}{35,45 \text{ g/mol}} = 0,002708 \text{ mol/l}$$

Da ein mol Natrium und ein mol Chlorid ein mol Natriumchlorid (NaCl) ergeben und Natrium in diesem Fall der limitierende Faktor ist, kann folgendes angenommen werden: ein mol NaCl = 0,002236 mol/l

$$0,002236 \frac{\text{mol}}{\text{l}} * 58,35 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 0,13046 \frac{\text{g}}{\text{l}} = 130,46 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \rightarrow \text{Konzentration NaCl}$$

Mithilfe der empirischen Gleichung (sh. Kapitel 4.5.2) kann die Konzentration aus der Leitfähigkeit abgeschätzt werden. Diese empirische Formel wurde vom Hersteller der ED-Anlage (MemBrain) zur Verfügung gestellt und dient nur als Richtwert. Die Konzentrationen müssen mit jenen aus dem Labor verglichen werden, um eine Aussage treffen zu können.

$$0,13046 = 1,59 * 10^{-4} - 1,91 * 10^{-3} * \kappa^{\frac{1}{2}} + 0,462989 * \kappa + 2,7836 * 10^{-2} * \kappa^{\frac{3}{2}} + 5,6 * 10^{-4} * \kappa^2$$

Die Leitfähigkeit von NaCl bei einer NaCl Konzentration von 130, 46 mg/l beträgt:

$$\kappa_{\text{NaCl}}=0,2748 \text{ mS/cm}$$

Die Leitfähigkeit im ED2-Diluat, welche durch Sonden gemessen wurde, beträgt 2,69 mS/cm. Es ist daher anzunehmen, dass Natriumchlorid nicht das Hauptsalz ist. Wie bereits erwähnt, weist  $\text{CaCl}_2$  pro Mol eine höhere Leitfähigkeit auf, weshalb dieses Salz eher detektiert wird.

Analog dazu wurden die NaCl-Konzentrationen und NaCl-Leitfähigkeiten bei den restlichen Diluaten bzw. Konzentraten von allen Probenahmetermeninen ausgerechnet. Die Ergebnisse dazu, sind in Tabelle 24, Tabelle 25, Tabelle 26 und Tabelle 27 aufgelistet.

Tabelle 24: Berechnung der NaCl-Konzentrationen und NaCl-Leitfähigkeiten vom 22.07.2024 - Parallelbetrieb

22.07.2024 - Parallelbetrieb			
	NaCl Konzentration	NaCl Leitfähigkeit	Leitfähigkeit
	$c_{\text{NaCl}}$ [g/l]	$\kappa_{\text{NaCl}}$ [mS/cm]	gemessen [mS/cm]
ED1-Diluat	0,0713	0,1517	0,3
ED1-Konzentrat	-	-	2,02
ED2-Diluat	0,1305	0,2748	2,69
ED2-Konzentrat	-	-	5,04
HUO-Permeat	0,0115	0,0250	0,05
HUO-Konzentrat	0,3190	0,6593	4,82

Tabelle 25: Berechnung der NaCl-Konzentrationen und NaCl-Leitfähigkeiten vom 22.08.2024 - Parallelbetrieb

22.08.2024 - Parallelbetrieb			
	NaCl Konzentration	NaCl Leitfähigkeit	Leitfähigkeit
	$c_{\text{NaCl}}$ [g/l]	$\kappa_{\text{NaCl}}$ [mS/cm]	gemessen [mS/cm]
ED1-Diluat	0,0480	0,1026	0,3
ED1-Konzentrat	0,1807	0,3783	3,04
ED2-Diluat	0,0569	0,1213	0,29
ED2-Konzentrat	0,4596	0,9405	6,26

Tabelle 26: Berechnung der NaCl-Konzentrationen und NaCl-Leitfähigkeiten vom 22.08.2024 - Serienbetrieb

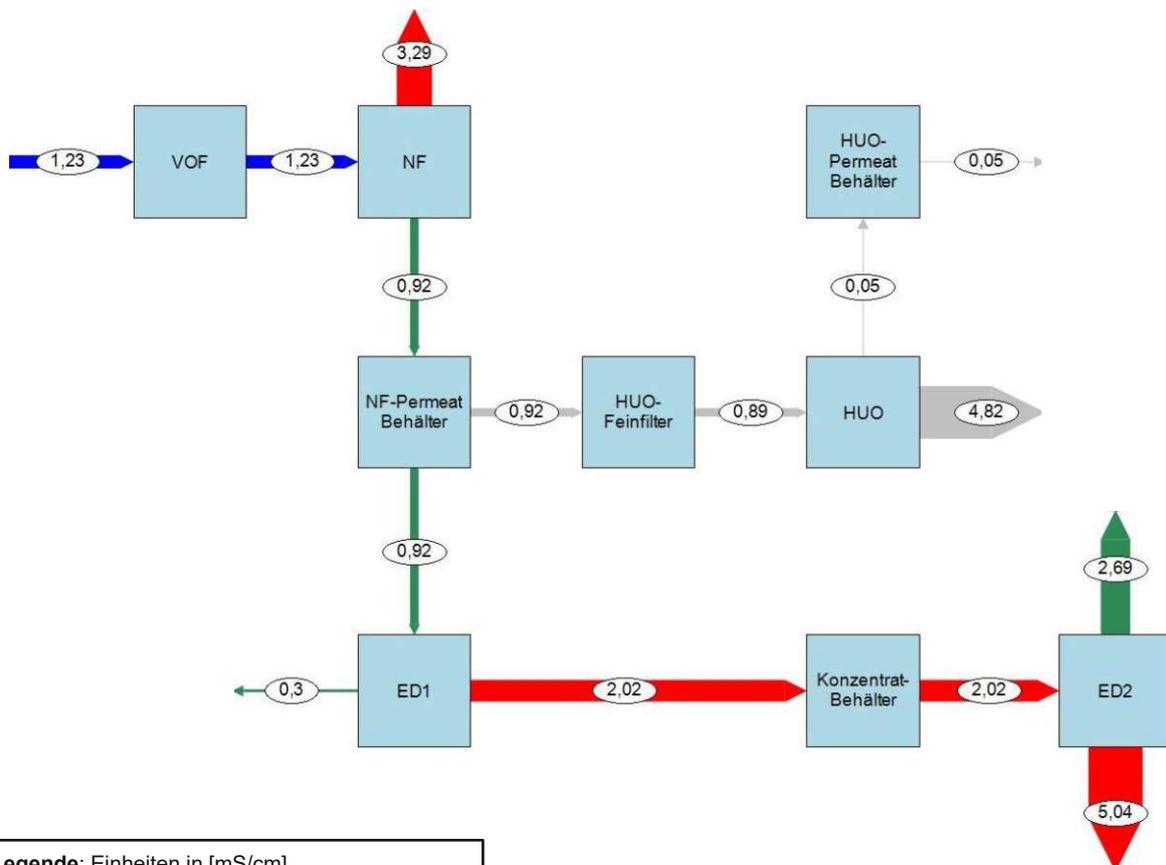
22.08.2024 - Serienbetrieb			
	NaCl Konzentration	NaCl Leitfähigkeit	Leitfähigkeit
	$c_{\text{NaCl}}$ [g/l]	$k_{\text{NaCl}}$ [mS/cm]	gemessen [mS/cm]
ED2-Diluat	0,0228	0,4925	0,3
ED2-Konzentrat	0,4282	0,8779	6,5
HUO-Permeat	0,0056	0,0121	0,05
HUO-Konzentrat	0,3183	0,6578	5,62

Tabelle 27: Berechnung der NaCl-Konzentrationen und NaCl-Leitfähigkeiten vom 29.08.2024 - Parallelbetrieb

29.08.2024 - Parallelbetrieb			
	NaCl Konzentration	NaCl Leitfähigkeit	Leitfähigkeit
	$c_{\text{NaCl}}$ [g/l]	$k_{\text{NaCl}}$ [mS/cm]	gemessen [mS/cm]
ED1-Diluat	0,0231	0,0498	0,29
ED1-Konzentrat	0,1736	0,3638	2,55
ED2-Diluat	0,0266	0,0574	0,29
ED2-Konzentrat	0,3388	0,6992	4,9
HUO-Permeat	0,0041	0,0088	0,03
HUO-Konzentrat	0,3150	0,6512	4,69

Aus den Ergebnissen der Tabellen geht hervor, dass die berechneten Leitfähigkeiten geringer sind als die gemessenen Leitfähigkeiten. Es lässt sich daraus schließen, dass entweder die empirische Formel nicht korrekt ist, oder andere Verbindungen ( $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ) einen höheren Beitrag zur Leitfähigkeit aufweisen. Es ist anzumerken, dass am 22.08.2024 im Serienbetrieb im HUO-Permeat die Calciumkonzentration und Magnesiumkonzentration 0 ergeben haben, die berechnete NaCl-Leitfähigkeit jedoch immer noch einen geringeren Wert aufweist als die gemessene Leitfähigkeit. Die Annahme, dass  $\text{CaCl}_2$  und  $\text{MgCl}_2$  einen höheren Beitrag zur Leitfähigkeit leisten, erweist sich in diesem Fall als unzutreffend.

## A) Entsalzungsversuch vom 22.07.2024 → Parallelbetrieb



**Legende:** Einheiten in [mS/cm]  
 blau...Zulauf  
 grün...Permeat/Diluat  
 rot...Konzentrat  
 grau...Strang, der nicht in die Bilanz miteinbezogen wird (Parallel- oder Serienbetrieb)

Abbildung 52: Entsalzungsergebnisse vom 22.07.2024

In Abbildung 52 ist der Parallelbetrieb dargestellt, bei dem die HUO zwar in Betrieb ist, das Konzentrat der HUO jedoch nicht verwendet wird, sondern verworfen wird. Daher ist der entsprechende Strang der HUO grau hinterlegt, da er nicht in die Bilanz miteinbezogen wird.

Die Leitfähigkeit im Zulauf der Anlage bzw. in der VOF beträgt etwa 1,23 mS/cm. Nach der NF wurde das Wasser auf 0,92 mS/cm entsalzt, das Konzentrat mit den für die HUO und ED störenden Stoffen wird verworfen. In der ED1 wird das Wasser auf 1,54 mS/cm aufkonzentriert, weiter in den Puffertank und anschließend in die ED2 geleitet. In der ED2 hat das Endprodukt eine Leitfähigkeit von etwa 5 mS/cm. Die Leitfähigkeit des Diluats der ED2 beträgt 2,69 mS/cm.

Des Weiteren ist zu erkennen, dass die HÜO ein Konzentrat von etwa 4,8 mS/cm und ein Diluat von etwa 0,05 mS/cm produziert.

Es ist anzumerken, dass für die ED in beiden Stufen zu erreichende Konzentrat- und Diluat-Werte eingestellt werden können. Es ist daher grundsätzlich möglich, mit der ED höhere Konzentrationen zu erreichen, wie dies auch später durchgeführte Versuche gezeigt haben.

In Abbildung 53 ist die Entsalzung der ED1 vom 22.07.2024 in einem Diagramm abgebildet. Das Diluat wird rot, das Konzentrat blau dargestellt. In der ED1 erfolgt der Betrieb im Batch-Modus.

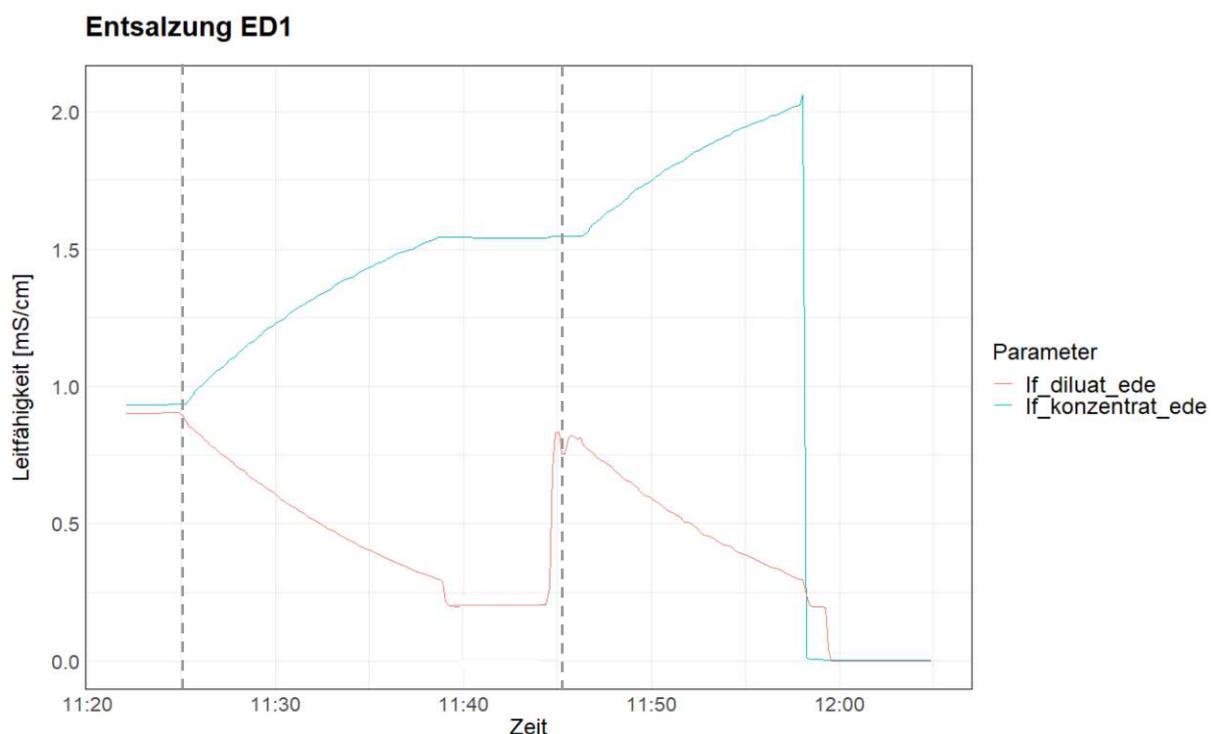


Abbildung 53: Entsalzung ED1 am 22.07.2024 - Parallelbetrieb

Der Feed für die ED1 ist das NF-Permeat, welches eine Leitfähigkeit von 0,92 mS/cm aufweist. Dieser Wert ist ebenfalls aus Abbildung 52 zu entnehmen. Dieser Wert ist anfänglich sowohl im Konzentrat-Behälter, also auch im Diluat-Behälter gegeben. Nach einer Zirkulation startet die Entsalzung. Die ED1 läuft solange, bis das Diluat und das Konzentrat die Zielleitfähigkeit erreicht haben und das eingestellte Batchvolumen erreicht ist. In der Abbildung ist die Entsalzung bzw. Aufkonzentration gut ersichtlich. In diesem Fall erreicht das Diluat die Zielleitfähigkeit von 0,3 mS/cm, zuerst. Das Diluat wird entleert (gerader Teil der Messdatenlinie), das Konzentrat wird nicht mehr aufkonzentriert, aber im Konzentratbehälter belassen. Der Messbereich für den ersten

Durchgang liegt zwischen den beiden strichlierten Linien. Nachdem der Diluat-Behälter der ED1 wieder mit frischen NF-Permeat befüllt wurde, startet ein neuer Entsalzungsdurchgang. Das Konzentrat wird aufkonzentriert und das Diluat wird entsalzt, bis wieder die Zielleitfähigkeiten und das gewünschte Batchvolumen erreicht sind. In der Abbildung können die im Konzentrat und Diluat erreichten Konzentrationen von etwa 2 mS/cm und 0,3 mS/cm abgelesen werden. Das Diluat wird in den Kanal entleert, das Konzentrat wird in den Puffertank geleert.

Der Betrieb wird in der ED2 fortgesetzt. Dieser Vorgang ist im Diagramm in Abbildung 54 dargestellt.

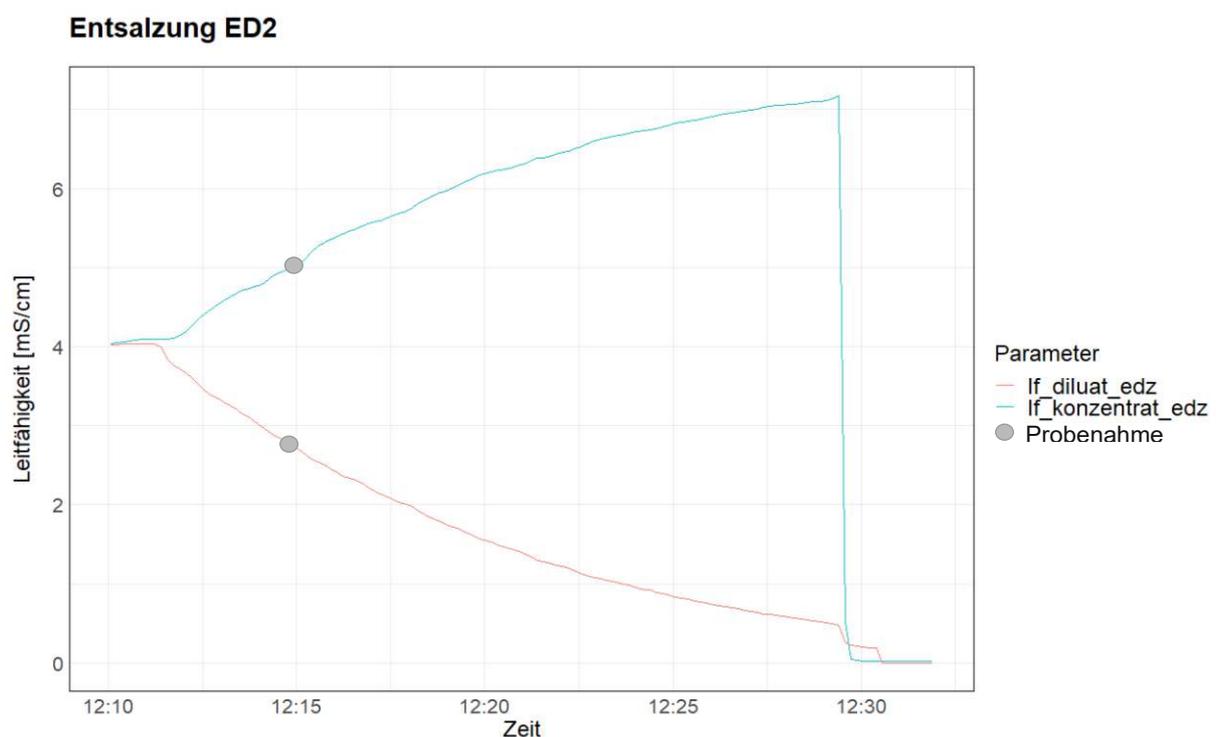


Abbildung 54: Entsalzung ED2 am 22.07.2024 - Parallelbetrieb

Der Feed der ED2, also das zuvor erzeugte ED1-Konzentrat aus dem Puffertank, hat eine Leitfähigkeit von etwa 4 mS/cm. Der Wert ist höher, als das Konzentrat in der ED1. Dies liegt vermutlich daran, dass sich noch Rückstände aus einem vorhergegangenen Prozesszyklus im System befunden haben.

In der ED2 müssen nur die Zielleitfähigkeiten als Surrogat-Parameter für die Salzkonzentration für die Wiederverwendung im Winterdienst erreicht werden, es ist kein vorgegebenes Batchvolumen nötig. Die Entsalzung bzw. Aufkonzentration in der ED2 erfolgt schneller als in der ED1.

Die Proben wurden entnommen, deutlich bevor der Entsalzungsversuch zu Ende war.  
Diese werden durch den grauen Punkt angegeben

## B) Entsalzungsversuch vom 22.08.2024 → Parallelbetrieb

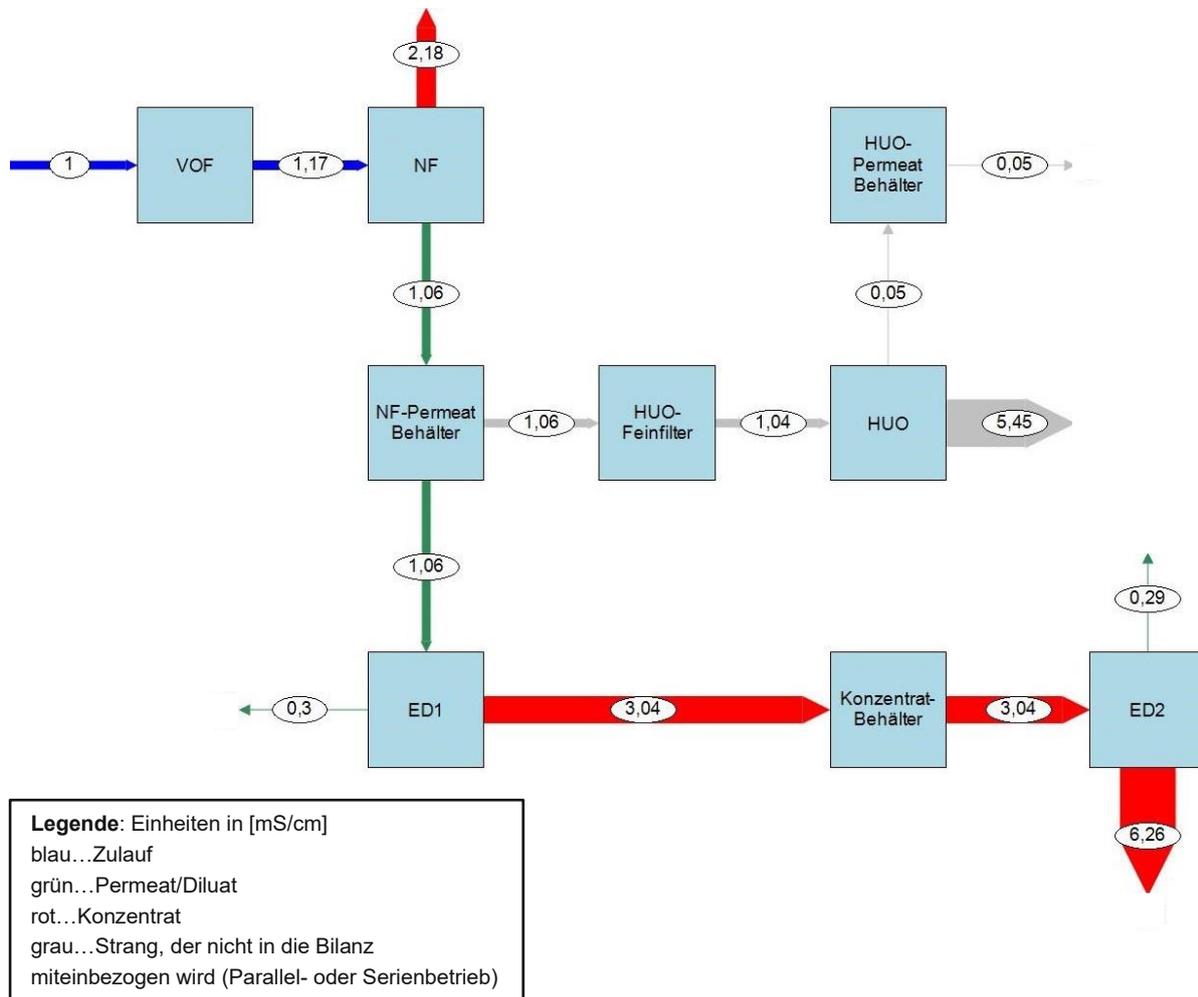


Abbildung 55: Entsalzungsergebnisse vom 22.08.2024 → Parallelbetrieb

In Abbildung 55 ist ebenfalls ein Parallelbetrieb dargestellt. Daher ist der Strang der HUF grau hinterlegt.

In der Bedienoberfläche wurden folgende Werte für die ED1 und ED2 festgelegt:

- ED1:
  - Diluat: 0,3 mS/cm
  - Konzentrat: 2,5 mS/cm
- ED2:
  - Diluat: 0,3 mS/cm
  - Konzentrat: 6,0 mS/cm

Weil keine Messwerte vorliegen, wurde die Leitfähigkeit im Zulauf der Anlage mit 1,0 mS/cm angenommen, wie dies beim Versuch am 22.07.2024 der Fall war, da sich die Leitfähigkeit im Zulauf nicht gravierend ändern sollte und die Werte nach der VOF bzw. nach der NF, die beide die Leitfähigkeit nicht verändern, in diesem Bereich liegen. Das Konzentrat der NF wird wieder verworfen und das Diluat in die ED weitergeleitet. In der ED1 wird das Wasser auf etwa 3,0 mS/cm aufkonzentriert, weiter in den Puffertank und anschließend in die ED2 geleitet. In der ED2 hat das Endprodukt eine Leitfähigkeit von etwa 6,3 mS/cm. Im gesamten Prozess wird das Wasser von etwa 1 mS/cm auf etwa 6,3 mS/cm aufkonzentriert. Die Leitfähigkeit des Diluats der ED2 beträgt 0,29 mS/cm.

Der Chlorid-Küvettest hat folgendes Ergebnis geliefert:

- ED1:
  - Diluat: 61,5 mg/l Cl
  - Konzentrat: 1060,0 mg/l Cl
- ED2:
  - Diluat: 53,1 mg/l Cl
  - Konzentrat: 1970,0 mg/l Cl

Des Weiteren ist zu erkennen, dass die HUO ein Konzentrat von etwa 5,45 mS/cm und ein Diluat von etwa 0,05 mS/cm produzieren würde.

In Abbildung 56 ist die Entsalzung der ED1 vom 22.08.2024 im Parallelbetrieb in einem Diagramm abgebildet. Das Konzentrat ist blau, das Diluat rot dargestellt.

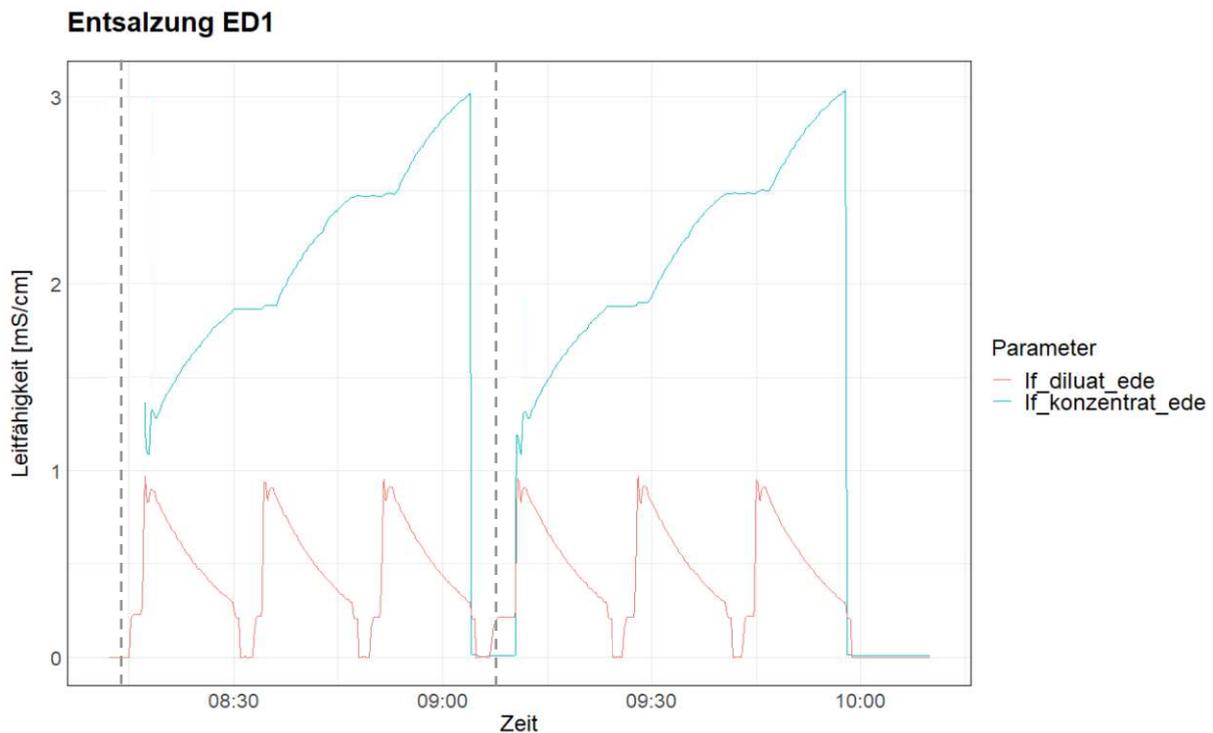


Abbildung 56: Entsalzung ED1 am 22.08.2024 - Parallelbetrieb

Das NF-Permeat, welches den Feed der ED1 darstellt, hat eine Leitfähigkeit von 1,06 mS/cm. Dieser Wert ist ebenfalls aus Abbildung 55 zu entnehmen. Dieser Wert ist anfänglich sowohl im Konzentrat-Behälter, also auch im Diluat-Behälter gegeben. Nach einer initialen Zirkulation startet die Entsalzung. Die ED1 läuft solange, bis das Diluat und das Konzentrat die Zielleitfähigkeit erreicht haben und das Batchvolumen erreicht ist. In diesem Fall musste das Diluat dreimal entleert und wieder befüllt werden, bis die Zielleitfähigkeit des Konzentrats (2,5 mS/cm) erreicht wurde. Das Konzentrat wurde solange aufkonzentriert (bis etwa 3 mS/cm) bis das Diluat ebenfalls seine niedrige Zielleitfähigkeit erreicht hat. Das Konzentrat wird in den Puffertank geleert. Da das vorgegebene Batchvolumen noch nicht erreicht wurde, musste ein neuer Entsalzungsvorgang gestartet werden. Die strichlierten Linien geben einen Zyklus des gesamten Entsalzungsversuchs an, bei dem die Zielleitfähigkeit erreicht wurden, das Batchvolumen aber noch nicht. Das Diluat wurde wieder dreimal entleert und mit frischen NF-Permeat befüllt, bis die Zielleitfähigkeit des Konzentrats erreicht wurde. Parallel dazu wurde auch das Batchvolumen erreicht. Das Diluat wurde wieder in den Kanal entleert, das Konzentrat wurde in den Puffertank geleert.

Der Betrieb wird in der ED2 fortgesetzt. Dieser Vorgang ist im Diagramm in Abbildung 57 dargestellt.

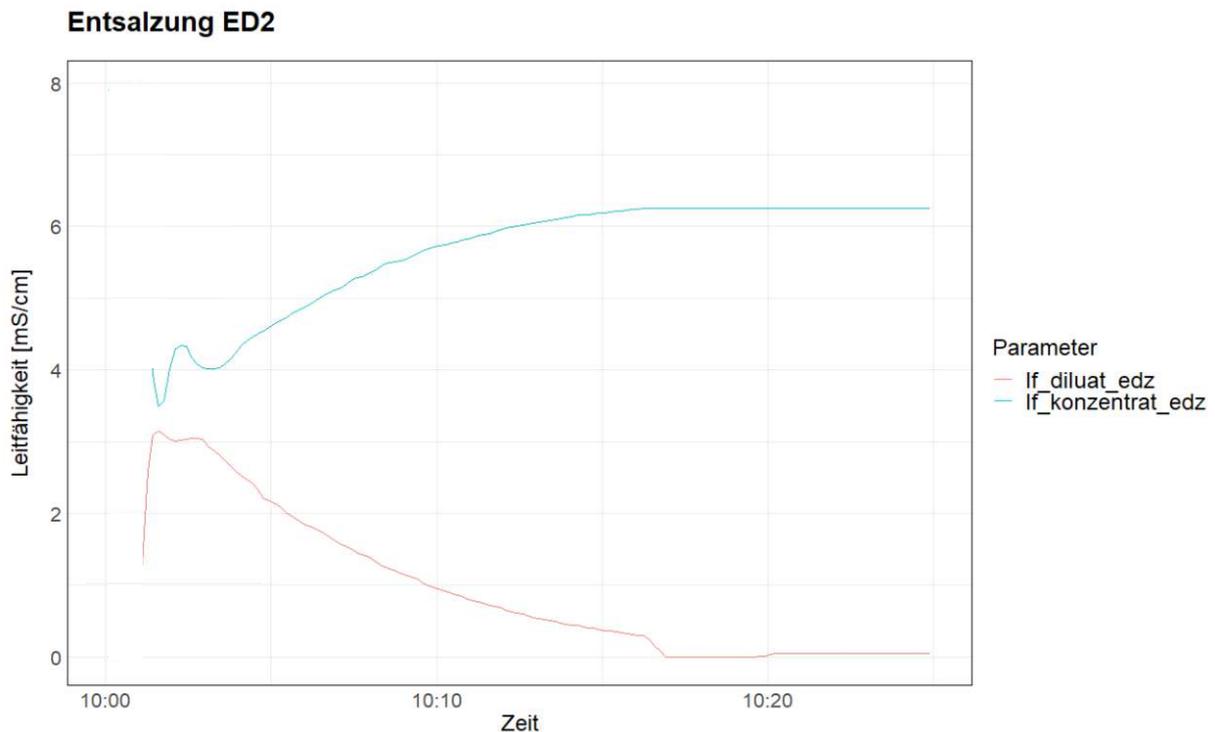


Abbildung 57: Entsalzung ED2 am 22.08.2024 - Parallelbetrieb

Der Feed der ED2, also das zuvor erzeugte ED1-Konzentrat aus dem Puffertank, hat eine Leitfähigkeit von etwa 3 mS/cm. In der ED2 müssen nur die Zielleitfähigkeiten erreicht werden, es ist kein Batchvolumen nötig. Die Entsalzung bzw. Aufkonzentration in der ED2 erfolgt wie bereits weiter oben ausgeführt schneller als in der ED1. Das Konzentrat hat eine Leitfähigkeit von 6,3 mS/cm und das Diluat hat eine Leitfähigkeit 0,3 mS/cm.

Der Parallelbetrieb hat ca. 2 Stunden benötigt, um die gewünschten Werte zu erreichen. Bei höheren Zielleitfähigkeiten ist eine längere Betriebsdauer erforderlich.

### C) Entsalzungsversuch vom 22.08.2024 → Serienbetrieb

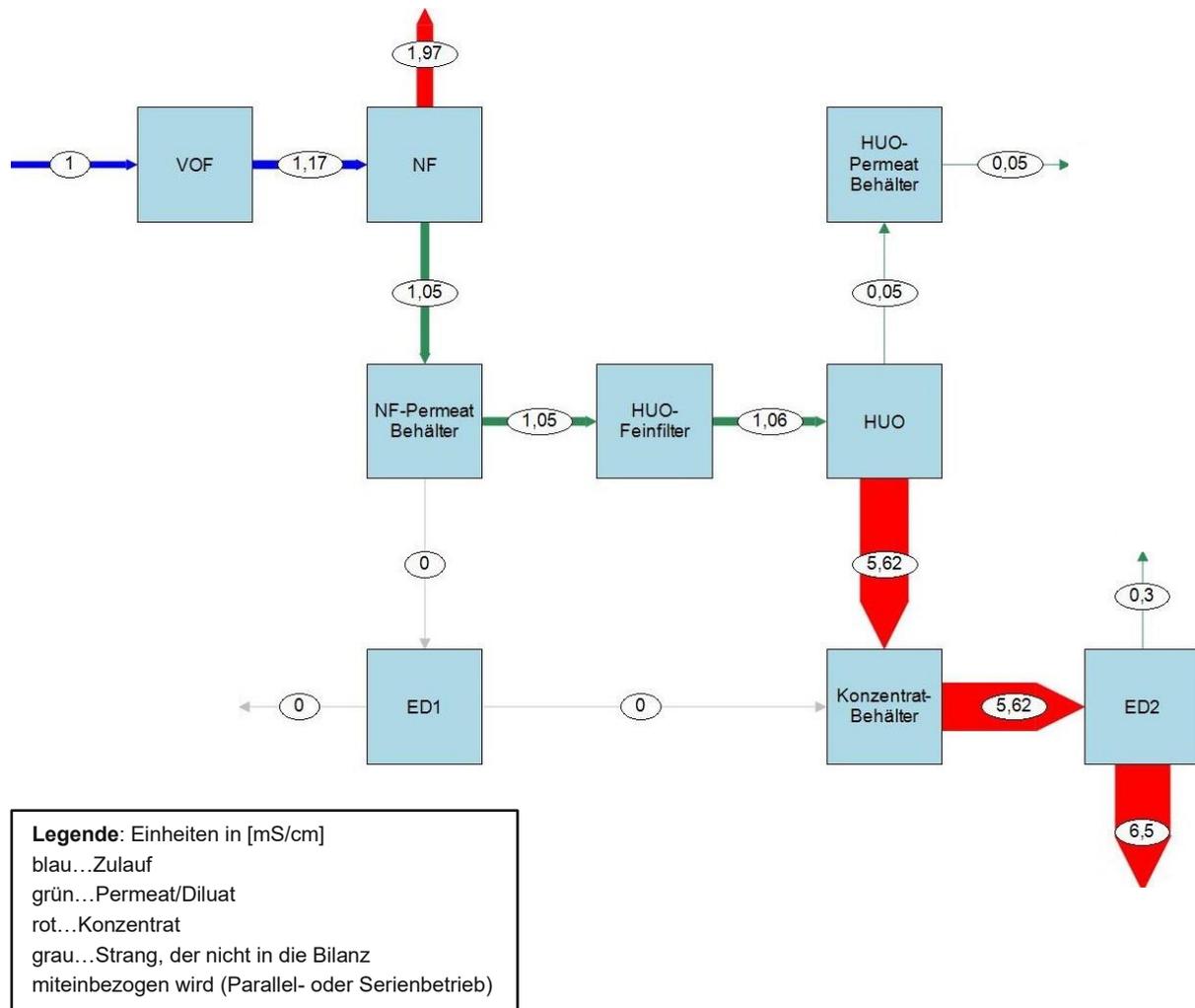


Abbildung 58: Entsalzungsergebnisse vom 22.08.2024 → Serienbetrieb

In Abbildung 58 ist ein Serienbetrieb dargestellt, bei dem die ED1 nicht in Betrieb ist und das Konzentrat der H<sub>2</sub>O als Feed für die ED2 verwendet wird. Daher ist der Strang der ED1 grau hinterlegt, da er nicht in die Betrachtungen miteinbezogen wird.

In der Bedienoberfläche wurden folgende Werte für die ED2 festgelegt:

- ED2:
  - Diluat: 0,3 mS/cm
  - Konzentrat: 6,0 mS/cm

Die Leitfähigkeit im Zulauf der Anlage bzw. in der VOF beträgt etwa 1,17 mS/cm. Nach der NF wurde das Wasser auf 1,05 mS/cm entsalzt, das Konzentrat wird wie in den anderen Versuchen auch verworfen. In der H<sub>2</sub>O wird das Wasser auf etwa 5,6 mS/cm aufkonzentriert und in den Puffertank und anschließend in die ED2 geleitet. In der ED2

hat das Endprodukt eine Leitfähigkeit von 6,5 mS/cm. Im gesamten Prozess wird das Wasser somit von etwa 1,17 mS/cm auf 6,5 mS/cm aufkonzentriert. Die Leitfähigkeit des Diluats der ED2 beträgt 0,3 mS/cm.

Der Chlorid-Küvettentest hat folgendes Ergebnis geliefert:

- ED2:
  - Diluat: 62,1 mg/l Cl
  - Konzentrat: 2046,7 mg/l Cl

In Abbildung 59 ist die Entsalzung der ED2 vom 22.08.2024 im Serienbetrieb noch einmal in einem Diagramm abgebildet. Das Konzentrat ist blau, das Diluat rot dargestellt.

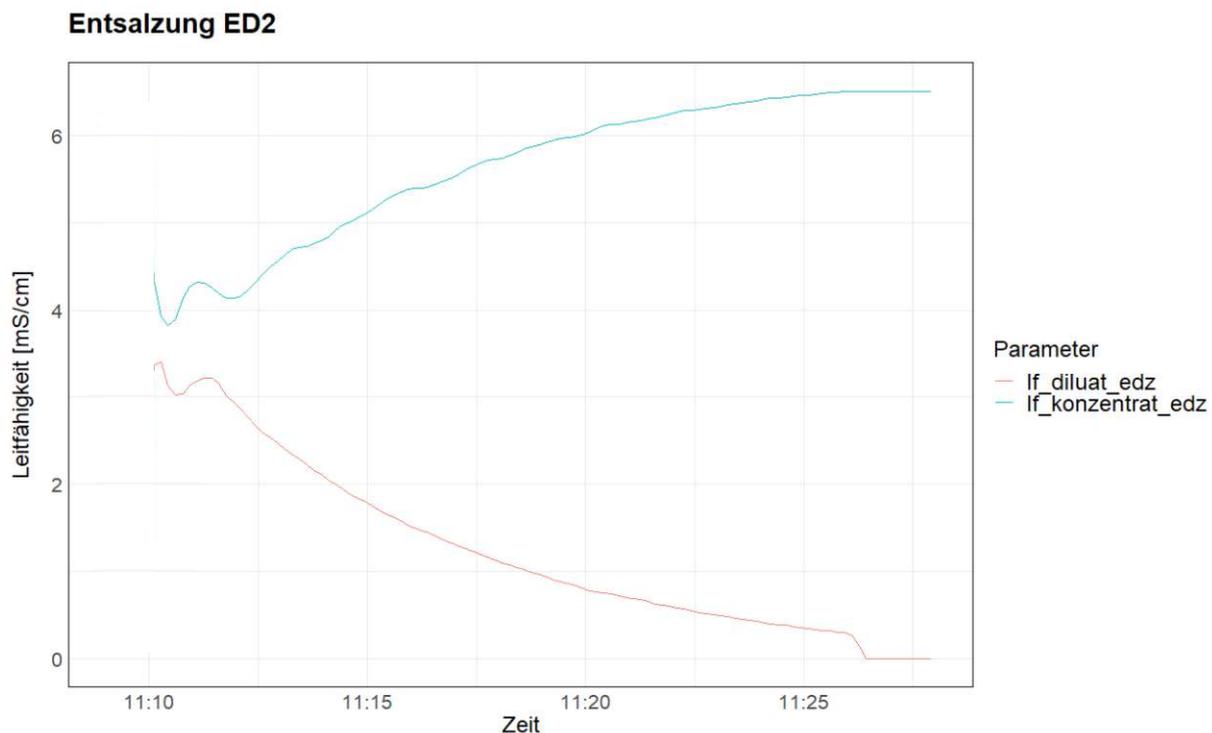


Abbildung 59: Entsalzung ED2 am 22.08.2024 - Serienbetrieb

Der Feed der ED2 im Serienbetrieb ist das H<sub>2</sub>O-Konzentrat. Dieses hat eine Leitfähigkeit von etwa 4 mS/cm. Die Leitfähigkeit des H<sub>2</sub>O-Konzentrats in Abbildung 58 hat eine Leitfähigkeit von 5,6 mS/cm. Vermutlich wird durch die Zirkulation in der ED2 das Wasser verdünnt, welches sich noch in den Leitungen befunden hat. Die Zielleitfähigkeiten betragen 6 mS/cm im Konzentrat und 0,3 mS/cm im Diluat. Das Konzentrat wurde solange aufkonzentriert, bis das Diluat die Zielleitfähigkeit erreicht hat. Aus diesem Grund hat das Konzentrat am Ende des Versuchs eine Leitfähigkeit von 6,5 mS/cm.

Der Serienbetrieb hat ca. 30 Minuten benötigt, um die gewünschten Leitfähigkeiten vom Konzentrat und Diluat zu erreichen. Die Entsalzung war sehr schnell, da das HUO-Konzentrat bereits eine hohe Leitfähigkeit aufgewiesen hat.

In Abbildung 60 ist die Entsalzung in der HUO dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass die HUO sehr gleichmäßig entsalzt bzw. aufkonzentriert. Der Feed der HUO, also das NF-Permeat, hat eine Leitfähigkeit von etwa 1 mS/cm. Die Aufkonzentration erfolgt sehr schnell und bleibt dann konstant, da die HUO-Pumpe das NF-Permeat mit einer konstanten Menge zu den Modulen fördert. Der Druck in der HUO ist von der Salzkonzentration im Zulauf abhängig und stellt sich so ein, dass der osmotische Druck überwunden werden kann. Die Leitfähigkeit im Zulauf der Anlage ist ebenfalls konstant und beträgt im Mittel etwa 1000  $\mu$ S/cm. Somit ist die Reinwasserausbeute bzw. die Konzentrat-Produktion ebenfalls konstant und der Betrieb verläuft stabil. Die Leitfähigkeit vom Diluat ist etwa 0,05 mS/cm, die Leitfähigkeit vom Konzentrat beträgt 5,6 mS/cm.

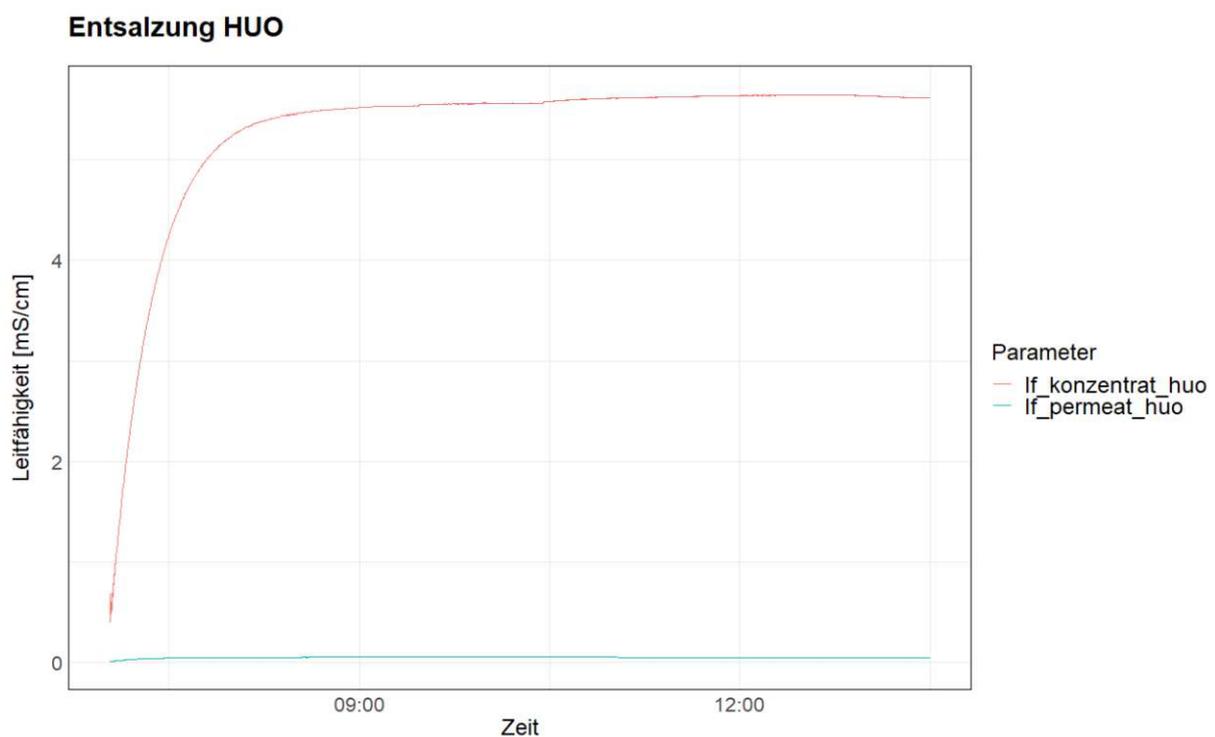


Abbildung 60: Entsalzung HUO am 22.08.2024

## D) Entsalzungsversuch vom 29.08.2024 → Parallelbetrieb

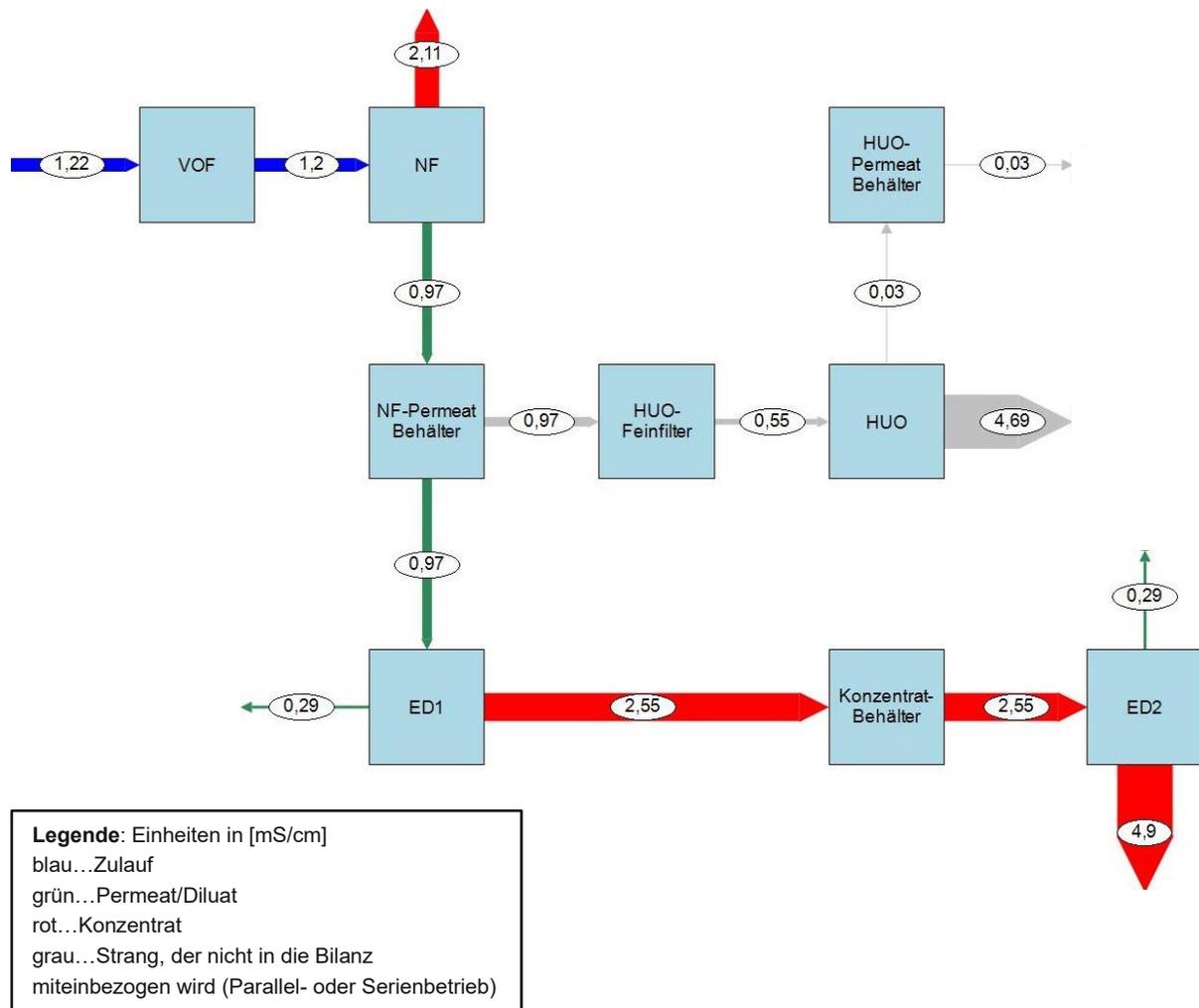


Abbildung 61: Entsalzungsergebnisse vom 29.08.2024 → Parallelbetrieb

In Abbildung 61 ist ebenfalls ein Parallelbetrieb dargestellt.

In der Bedienoberfläche wurden folgende Werte für die ED1 und ED2 festgelegt:

- ED1:
  - Diluat: 0,3 mS/cm
  - Konzentrat: 2,5 mS/cm
- ED2:
  - Diluat: 0,3 mS/cm
  - Konzentrat: 6,0 mS/cm

Die Leitfähigkeit im Zulauf der Anlage bzw. in der VOF beträgt etwa 1,2 mS/cm. Nach der NF wurde das Wasser auf 0,97 mS/cm entsalzt, das Konzentrat wird verworfen. In der ED1 wird das Wasser auf etwa 2,55 mS/cm aufkonzentriert, weiter in den Puffertank und anschließend in die ED2 geleitet. Aufgrund einer Betriebsstörung

konnte das Endprodukt (ED2-Konzentrat) nur eine Leitfähigkeit von 4,9 mS/cm erreichen. Die Leitfähigkeit des Diluats der ED2 beträgt 0,29 mS/cm.

Der Chlorid-Küvettentest hat folgendes Ergebnis geliefert:

- ED1:
  - Diluat: 29,5 mg/l Cl
  - Konzentrat: 621,7 mg/l Cl
- ED2:
  - Diluat: 36,7 mg/l Cl
  - Konzentrat: 1270,0 mg/l Cl

Des Weiteren ist zu erkennen, dass die HÜO ein Konzentrat von etwa 4,69 mS/cm und ein Diluat von etwa 0,06 mS/cm produzieren würde.

In Abbildung 62 ist die Entsalzung der ED1 vom 29.08.2024 im Parallelbetrieb noch einmal in einem Diagramm abgebildet. Das Konzentrat ist blau, das Diluat rot dargestellt.

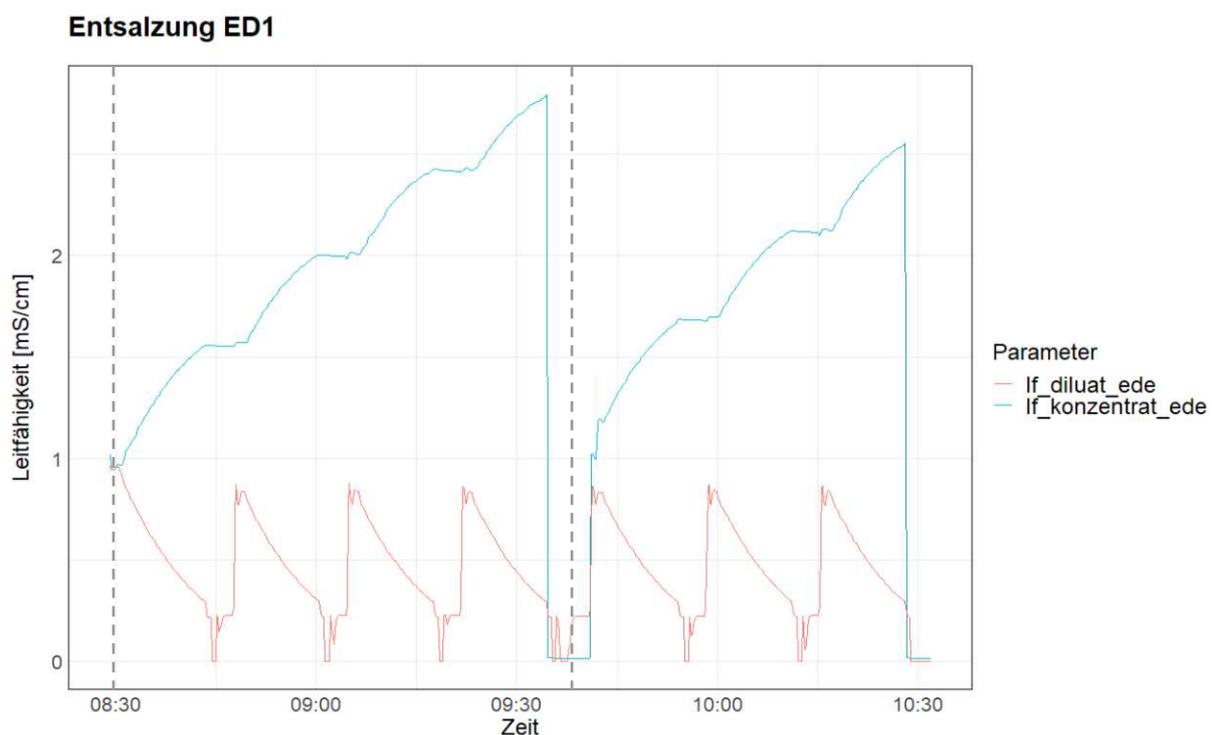


Abbildung 62: Entsalzung ED1 am 29.08.2024 - Parallelbetrieb

Das NF-Permeat, welches der Feed der ED1 darstellt, hat eine Leitfähigkeit von etwa 1 mS/cm. Dieser Wert ist ebenfalls aus Abbildung 61 zu entnehmen. Dieser Wert ist sowohl im Konzentrat-Behälter, also auch im Diluat-Behälter gegeben. Nach der Zirkulation startet die Entsalzung. Die ED1 läuft solange, bis das Diluat und das

Konzentrat die Zielleitfähigkeit erreicht haben und das Batchvolumen erreicht ist. In diesem Fall musste das Diluat viermal entleert und mit frischem NF-Permeat befüllt werden, bis die Zielleitfähigkeit des Konzentrats (2,5 mS/cm) ebenfalls erreicht wurde. Das Konzentrat wird in den Puffertank entleert. Das Batchvolumen ist jedoch noch nicht erreicht, weshalb ein neuer Entsalzungszyklus gestartet werden muss. Die strichlierten Linien geben einen gesamten Entsalzungsversuch an, bei dem die Zielleitfähigkeiten erreicht wurden, das Batchvolumen aber noch nicht. Das Diluat wurde dreimal entleert und mit frischem NF-Permeat befüllt, bis die Zielleitfähigkeit des Konzentrats erreicht wurde. Wie bereits erwähnt gab es bei diesem Versuch eine Betriebsstörung, weshalb die Zielleitfähigkeit von 6,0 mS/cm nicht erreicht werden konnte. Die Leitfähigkeit des ED2-Konzentrats ergab nur 4,9 mS/cm. Das Batchvolumen wurde ebenfalls erreicht. Das Diluat wurde in den Kanal entleert, das Konzentrat wurde in den Puffertank geleert.

Die Spitzen beim Diluat bei der Entleerung sind Messungenauigkeiten. Das Diluat sollte bei der Entleerung knapp über 0 mS/cm aufweisen. Die Sonde hat vermutlich bei der Entleerung noch einen Wert festgestellt.

Der Betrieb wird in der ED2 fortgesetzt. Dieser Vorgang ist im Diagramm in Abbildung 63 dargestellt.

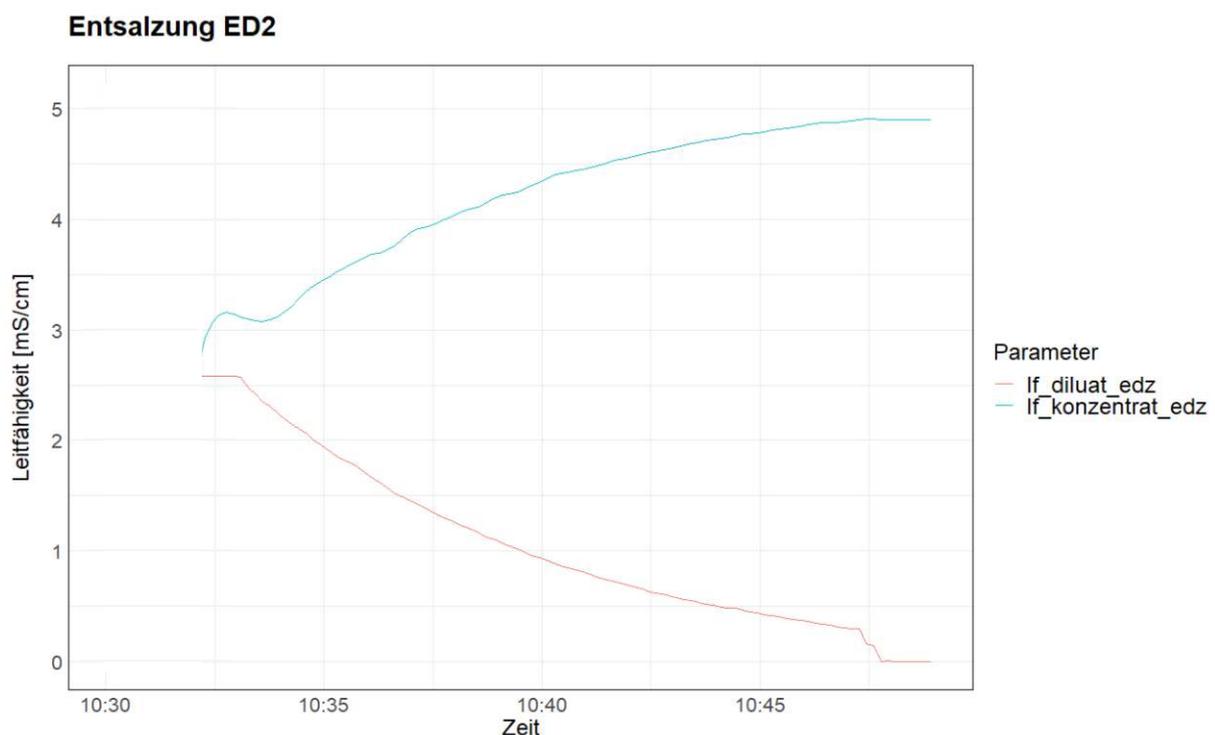


Abbildung 63: Entsalzung ED2 am 29.08.2024 - Parallelbetrieb

Der Feed der ED2, also das Konzentrat der ED1, hat eine Leitfähigkeit von etwa 2,5 mS/cm.

In der ED2 müssen nur die Zielleitfähigkeiten erreicht werden, es ist kein vorgegebenes Batchvolumen nötig. Die Entsalzung bzw. Aufkonzentration in der ED2 erfolgt schneller als in der ED1. Das Konzentrat hat eine Leitfähigkeit von 4,9 mS/cm und das Diluat hat eine Leitfähigkeit von 0,3 mS/cm.

Der Parallelbetrieb hat ca. 2 Stunden benötigt, um die gewünschten Werte zu erreichen.

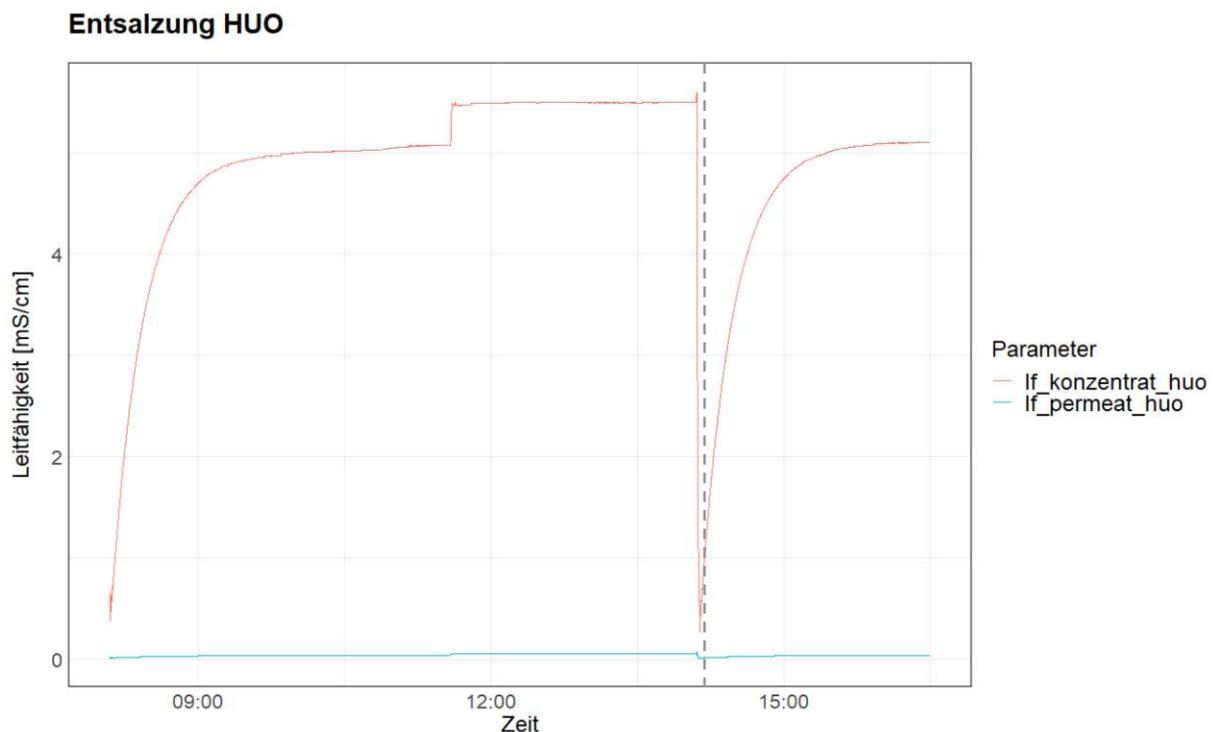


Abbildung 64: Entsalzung HUU am 29.08.2024

In Abbildung 64 ist die Entsalzung in der HUU dargestellt. Die HUU ist während dem Parallelmodus ebenfalls in Betrieb, das Konzentrat wird jedoch entleert. Die Entsalzung bzw. Aufkonzentration verläuft wie am 22.08. beim Serienbetrieb ebenfalls sehr gleichmäßig. Der Feed der HUU, also das NF-Permeat, hat eine Leitfähigkeit von etwa 1 mS/cm. Die Aufkonzentration erfolgt sehr schnell und bleibt dann recht konstant. Die Leitfähigkeit vom Diluat ist etwa 0,03 mS/cm, die Leitfähigkeit vom Konzentrat erreicht ca. 4,6 mS/cm.

Beim Zeitpunkt bei der gestrichelten Linie gab es eine Betriebsstörung, weshalb die HUU kurzzeitig außer Betrieb war, um dann die Entsalzung bzw. Aufkonzentration wieder zu starten.

## 5.2.1 Verhältnis Konzentrat zu Permeat Fluss (HUO)

Die HUO ist für eine Reinwasserausbeute von max. 85 % ausgelegt. Die berechneten Daten haben ergeben, dass sich die Reinwasserausbeute an allen Entsalzungsversuchstagen zwischen 78 % und 85 % befindet. Im Mittel ergibt sich eine Reinwasserausbeute von etwa 81 %. Der Permeat – Durchfluss beträgt im Mittel 450 l/h, der Konzentrat – Durchfluss beträgt im Mittel etwa 100 l/h.

In Abbildung 65 und Abbildung 66 sind die Daten vom 22.08.2024 und vom 29.08.2024 als Beispiel dargestellt, um die Reinwasserausbeute zu vergleichen. Die Diagramme sollen das Verhältnis zwischen dem Konzentrat Fluss und dem Permeat Fluss darstellen. Wie bereits in Kapitel 4.5.3 gesagt, werden die Daten auf Basis der 15 -minütigen Mittelwerte des Permeat Durchflusses und des Konzentrat Durchflusses berechnet und in den Diagrammen dargestellt.

Die x-Achse gibt die Zeit an, an der die HUO in Betrieb war und regelmäßig betrieben werden konnte. Bei Betrachtung der Reinwasserausbeute der HUO, welche in der Formel 9 definiert wurde, für die Tage, an denen die Entsalzungsversuche stattgefunden haben, fällt rasch auf, dass diese nicht stark variiert.

Die Reinwasserausbeute ist an beiden Tagen sehr konstant und variiert nur minimal. Des Weiteren kann daher angenommen werden, dass die HUO konstant entsalzt.

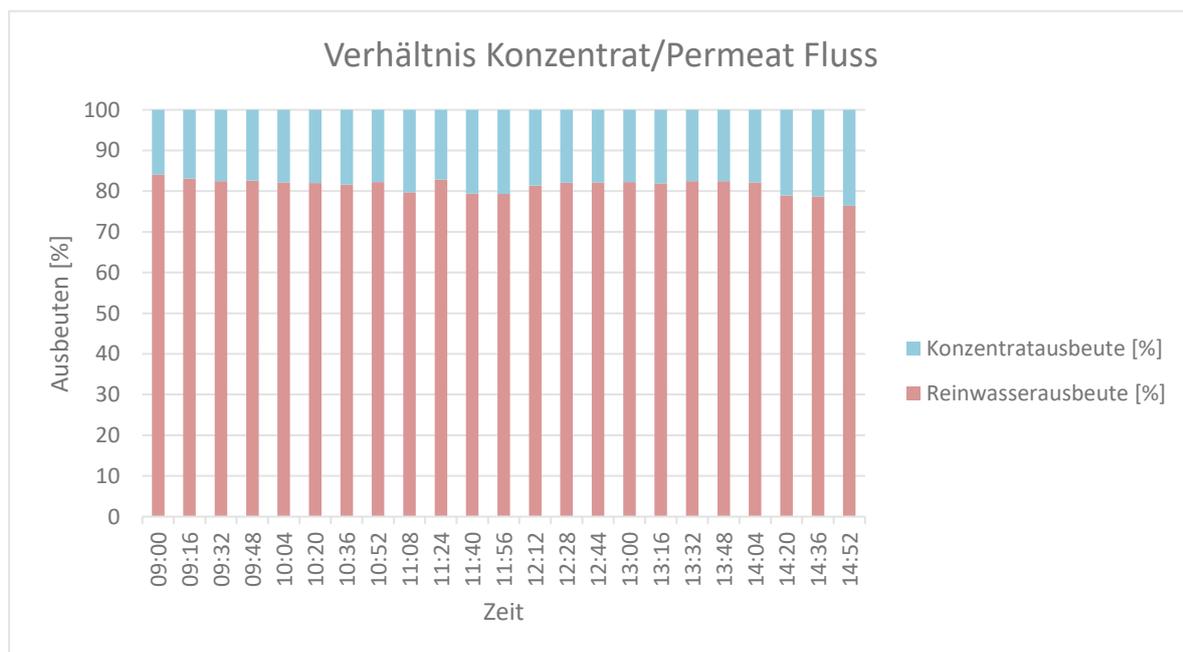


Abbildung 65: Verhältnis Konzentrat / Permeat Fluss am 22.08.2024

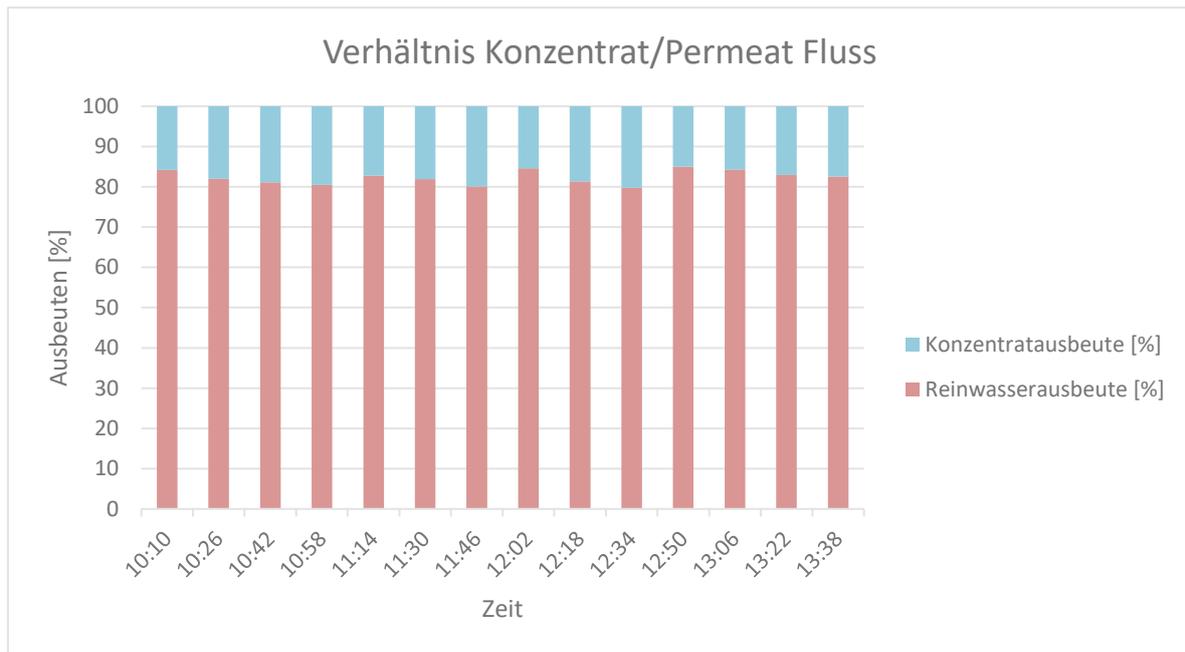


Abbildung 66: Verhältnis Konzentrat / Permeat Fluss am 29.08.2024

## 5.2.2 Verhältnis Salzpassage und Salzurückhalterate in der HUO

Die Salzpassage gibt an, wie viele gelösten Salze durch die HUO-Membran in das Permeat gelangen. Die Salzurückhalterate gibt an, wie viele gelösten Salze von der HUO-Membran zurückgehalten wird.

Als Beispiel werden wieder die Daten vom 22.08.2024 und vom 29.08.2024 genommen.

In Abbildung 67 und Abbildung 68 sind jeweils die Verhältnisse von Salzpassage und Salzurückhalterate dargestellt. Auf der x-Achse ist wieder die Zeit angegeben, an der die HUO in Betrieb war und regelmäßig betrieben werden konnte.

Wie auch bei der Reinwasserausbeute, variieren diese Daten ebenfalls nicht stark. Im Mittel wird am 22.08.2024 eine Salzpassage von 5 % berechnet, dadurch ergibt sich eine Salzurückhalterate von etwa 95 %. Am 29.08.2024 ergibt sich eine Salzpassage von etwa 3 % und eine Salzurückhalterate von etwa 97 %. Die Ergebnisse zeigen, dass die HUO, Salze sehr gut zurückhalten kann und nur wenige Durch die Membran hindurchgelangen.

Der Betriebsdruck betrug an beiden Tagen etwa 6,5 bar bis 6,7 bar.

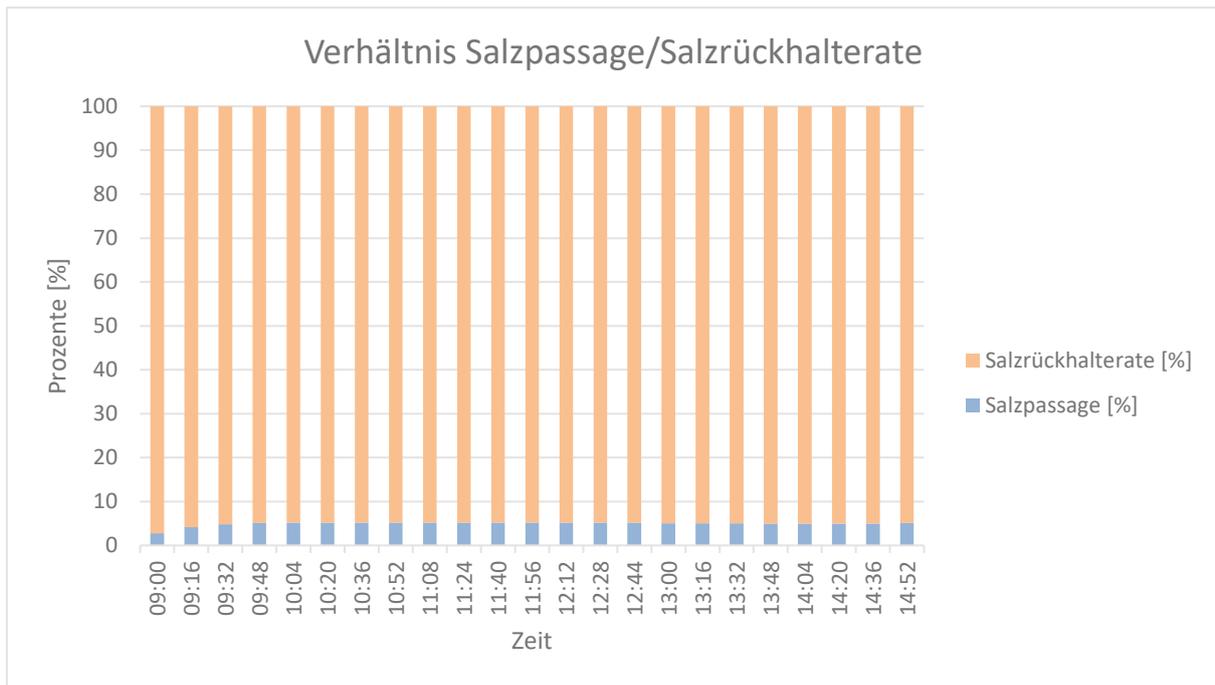


Abbildung 67: Verhältnis Salzpassage und Salzurückhalterate am 22.08.2024

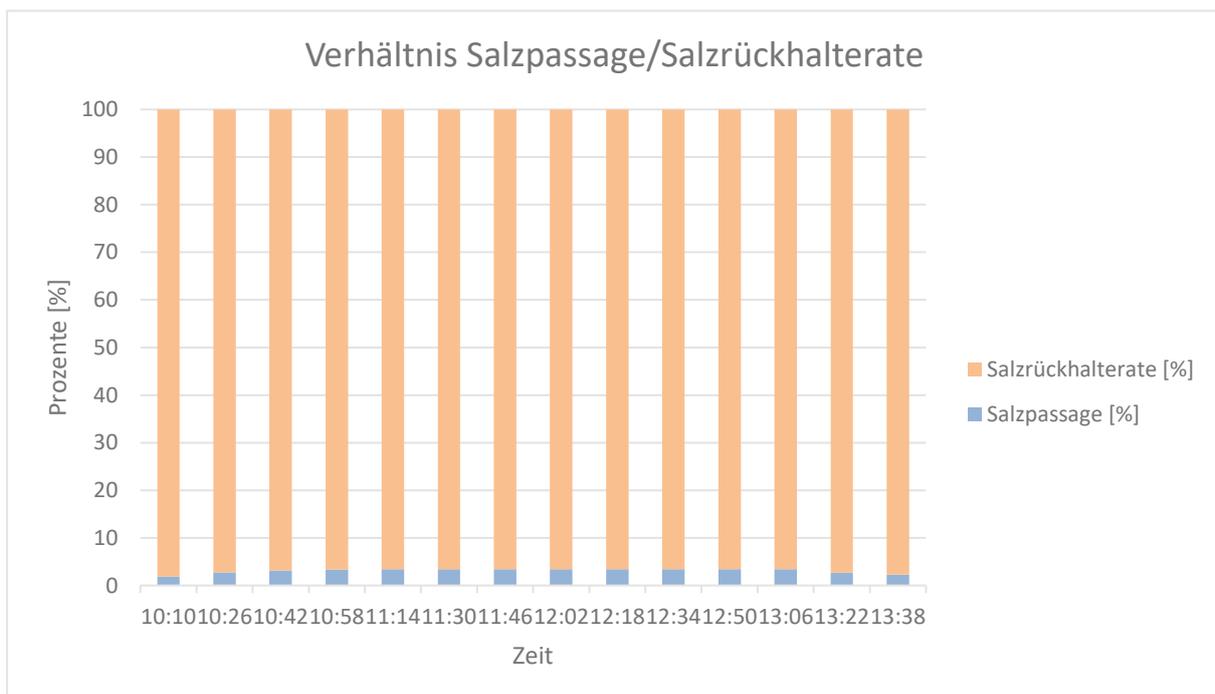


Abbildung 68: Verhältnis Salzpassage und Salzurückhalterate am 29.08.2024

## 5.3 Erkenntnisse und Optimierungen des Anlagenbetriebs

Im Zuge der Testphase bzw. der Inbetriebnahme der Pilotanlage traten mehrere technische Probleme auf. Einige konnten jedoch in weiterer Folge durch gezielte Maßnahmen verbessert und behoben werden. Für andere Mängel konnten nur Lösungsvorschläge gebracht werden.

### 5.3.1 Beschickung ED1 und HUO

Eine wichtige Erkenntnis aus der Inbetriebnahme ist die generelle Konzipierung der Anlage. Im Verfahrensschema ist ein Betrieb der ED1 unabhängig von der HUO vorgesehen. Das NF-Permeat wird dabei als Feed für die ED1 herangezogen, womit die HUO nicht in den Betrieb der ED1 eingreift. In der Umsetzung der Pilotanlage ist die Beschickung der ED1 (NF-Permeat) jedoch abhängig von der HUO-Pumpe. Diese fördert nicht nur einen Teilstrom zur weiteren Aufkonzentrierung beim Serienbetrieb zur HUO, sondern pumpt auch das NF-Permeat zur ED1 (Parallelbetrieb). Fällt die HUO aufgrund einer Betriebsstörung oder einem anderen Problem aus, funktioniert die HUO-Pumpe als Zulaufpumpe für die ED1 nicht mehr. Das NF-Permeat wird somit nicht mehr zur ED1 gepumpt, der Entsalzungsprozess in der ED1 kann daher nicht fortgeführt werden und es kommt zum Betriebsstopp der ED1.

Ein Optimierungsvorschlag ist eine hydraulische Entkopplung der beiden Entsalzungstechnologien, sodass die ED nicht abhängig von der HUO ist und ein kontinuierlicher Betrieb der ED möglich ist. Die HUO-Pumpe wird nur dann in Betrieb genommen, wenn der Parallelbetrieb vom Anwender gewünscht ist.

### 5.3.2 Automatisierung

Für einen vollautomatischen Betrieb ist die Umrüstung mancher handgeschalteten Ventile auf automatische Ventile notwendig.

Beim Parallelbetrieb ist es nötig, zwei Ventile bei der HUO manuell umzuschalten, dass es zu keiner Vermischung der HUO- und ED1-Konzentrate im Puffertank kommt. Um einen Serienbetrieb zu starten, müssen die Ventile manuell wieder umgestellt werden.

Ein ähnliches Problem in Bezug auf die Automatik besteht bei der VOF mit den Beutelfiltern. Ein Beutelfilter ist in Betrieb, der andere fungiert als Reserve. Ist der Differenzdruck zu hoch und kann daher keine optimale Filtration mehr stattfinden, muss das Ventil manuell auf den Reservebeutelfilter umgestellt werden, damit die Pilotanlage in Betrieb bleibt.

Die Versuche zeigten, dass im kontinuierlichen Betrieb während der Übergangsmonate vor dem Winter (September, Oktober), aufgrund höherer Temperaturen, mehr Organik im Rohwasser auftritt, wodurch die Scheibenfilter schneller verschmutzen und damit verlegen. Diese müssen dann in regelmäßigen Abständen händisch gereinigt werden. Um einen reibungslosen Betrieb zu gewährleisten, ist eine automatische Reinigung (Rückspülung) der Scheibenfilter anzudenken.

Durch die Automatisierung in der Pilotanlage ist jedoch generell betrachtet ein flexibler und kontinuierlicher Betrieb möglich.

### 5.3.3 Ansaugung

Ein großes Problem während dem Betrieb bestand in der Ansaugung des Rohwassers beim Zulauf zur Anlage. Im normalen Betrieb würde beim Starten der Anlage der Ansaugbehälter automatisch durch die Pumpe befüllt werden und in die restlichen Leitungen transportiert werden. In der Zulaufleitung befand sich jedoch regelmäßig Luft, welche ein Ansaugen des Rohwassers durch die Pumpe unmöglich gemacht hat. Für die Ansaugung wurde eine Kreiselpumpe verwendet. Bei Luftansaugungen haben Kreiselpumpen jedoch generell das Problem, dass sie keinen Durchfluss mehr erreichen, die Strömung dadurch abreißt, kein Rohwasser für die Aufbereitung zur Verfügung steht und die Anlage deshalb auf Störung geht und nicht funktioniert.

Um dieses Problem zu vermeiden, wurde im Projektverlauf eine Vakuumpumpe eingebaut. Die Luft in der Ansaugleitung wurde durch die Vakuumpumpe erfolgreich entfernt, der Strömungsabriss dadurch verhindert und die Ansaugung gewährleistet. Die Kreiselpumpe konnte problemlos in den Ansaugbehälter pumpen.

Woher im Betrieb (nicht nach Auslaufen der Leitung infolge Stillstand) die Luft in der Leitung bzw. in der Pumpe stammt, konnte nicht restlos geklärt werden. Einerseits könnte die Luft durch undichte Stellen bei Verbindungstücken (z.B. Schellen) in das

System gelangen, wobei dies kontrolliert wurde. Andererseits könnte die Luft durch Ausgasungen infolge Kavitation an der Pumpe erzeugt werden. Dieses Phänomen tritt in Kreiselpumpen vermehrt auf. Wenn der Ansaugdruck der Pumpe unter den Dampfdruck der Flüssigkeit sinkt, entstehen Dampfblasen. Diese werden weiter transportiert und platzen in der Pumpe bzw. häufen sich als Gasansammlungen an. In der Studie „Cavitation Effects in Centrifugal Pumps- A Review“ von Binama, Muhirwa und Bisengimana (Binama et al., 2016) wurde die Theorie von Kavitation in Kreiselpumpen näher erläutert und beschreiben die Probleme, die durch Kavitation in Pumpen entstehen. Die Niederdruckbereiche (z.B. der Schaufeleinlass) in Kreiselpumpen sind besonders betroffen. Durch die Dampfblasen können zudem die Schaufelräder und die Wände der Pumpen Schaden nehmen. Kavitation wird oft übersehen oder zu spät erkannt, nachdem die Schäden aufgetreten sind (Binama et al., 2016).

Eine weitere Überlegung, wie Luft in das System gelangen könnte ist, dass der Durchfluss der Pumpe beim Zulauf im Vergleich mit dem Volumen des Ansaugbehälters zu hoch ist. Folgende Überlegung wurde angenommen:

- Volumen Ansaugbehälter:  $V = 0,02 \text{ m}^3$  (sh. Kapitel 4.3.1)
- Durchfluss Pumpe:  $Q = 1,0 \text{ m}^3/\text{h}$  (sh. Kapitel 4.3.1)

$$\frac{0,02 \text{ m}^3}{1,0 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} = 0,02 \text{ h} = 1,2 \text{ Minuten}$$

Der Behälter wäre daher in ~1 Minute leer. Das Rohwasser wird vom Ablauf der Kläranlage von einem Schacht über ein Rohr gepumpt. Jener Teil des Rohrs, welcher sich im Wasser befindet, ist perforiert, um das Wasser fördern zu können. Ist nun das perforierte Rohr zu weit an der Oberfläche verlegt, könnte es passieren, dass Luft angesaugt wird, sobald der Behälter leer ist, da die Pumpe zu stark ist und es so zum Strömungsabriss kommt.

#### 5.3.4 Sedimentation im Vorlagebehälter

Im Vorlagebehälter sollen Eisen- und Manganausfällungen bzw. Schlammflocken sedimentieren, damit in weiterer Folge die Membranen geschützt werden. Es wurde jedoch festgestellt, dass die Sedimentation im Behälter nicht einwandfrei funktioniert.

Vermutlich ist das Volumen bzw. die Aufenthaltszeit zu gering und die Strömung zu hoch, sodass keine einwandfreie Sedimentation stattfinden kann.

Es muss hier eine andere Möglichkeit gefunden werden, wie die Sedimentation besser stattfinden kann, z.B. durch die Reduktion der Strömungsgeschwindigkeit oder Verbesserung bzw. Unterstützung der Absetzeigenschaften.

## 6 Diskussion / Schlussfolgerung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Versuche und der Auswertungen der Probenahmen bzw. des Betriebs, welche in Kapitel 5 aufgeführt sind, im Kontext der in Kapitel 2 definierten Forschungsfragen mit den Unterfragen diskutiert und bewertet. Dieses Kapitel dient somit der gezielten Beantwortung der Forschungsfragen.

### 6.1 Vergleich der beiden Entsalzungstechnologien (Forschungsfrage 1)

Sowohl die Umkehrosmose als auch die Elektrodialyse sind Membranverfahren, die zur Entsalzung verwendet werden. Sie unterscheiden sich im verfahrenstechnischen Ansatz und in ihrer Funktionsweise.

#### 6.1.1 Verfahrenstechnischer Vergleich

- **Umkehrosmose:**

Die Umkehrosmose ist ein physikalisches, druckbetriebenes Membranverfahren, bei dem Wasser mittels Druck durch eine semipermeable Membran gepresst wird, welche nur Wassermoleküle hindurch lässt und Ionen bzw. Verunreinigungen zurückhält. Die Umkehrosmose kehrt den natürlichen Osmose-Prozess um. Das Wasser wird dabei entsalzt. Es entsteht ein entsalzter Permeatstrom (Reinwasser) und ein aufkonzentrierter Konzentratstrom, der die zurückgehaltenen Stoffe enthält. Der zur Kompensation des osmotischen Drucks erforderliche Gegendruck ist die treibende Kraft bei diesem Trennmechanismus.

Im Fall der Aufkonzentration von organischen Spurenstoffen in Konzentrat können verschiedene Methoden zur weiteren Behandlung eingesetzt werden. Das Permeat kann direkt als Brauchwasser verwendet werden.

Die Umkehrosmose findet Anwendung in der Trinkwasseraufbereitung, der Abwasserbehandlung, der Meerwasserentsalzung und der Deponiesickerwasserreinigung

- **Elektrodialyse:**

Die Elektrodialyse ist ein auf Ionentransport in einem elektrischen Feld basierendes Membranverfahren. Der Unterschied zur Umkehrosmose besteht darin, dass bei der Elektrodialyse Ionen durch Ionenaustauschermembranen in einem elektrischen Feld (Stromdichte) transportiert werden, um (geladene) Verunreinigungen abzutrennen. Die ionenselektiven Membranen (Anionen- und dann Kationenaustauschermembranen) sind abwechselnd in einem Stack angeordnet. Durch das elektrische Feld bewegen sich die positiv bzw. negativ geladenen Ionen in entgegengesetzte Richtungen. Die Ionenaustauschermembranen lassen nur jene Ionen passieren, welche dieselbe Ladung aufweisen wie die Membran. Ungeladene Partikel werden nicht im Feld bewegt und somit aufkonzentriert. Das elektrische Feld bzw. die Stromdichte ist die treibende Kraft in diesem Trennverfahren.

Wie bei der Umkehrosmose entsteht auch hier ein entsalzter, sauberer Diluatstrom und ein aufkonzentrierter Konzentratstrom.

Die Elektrodialyse wird ebenfalls in der Trinkwasseraufbereitung, der Meerwasserentsalzung und der Abwasserbehandlung angewendet, aber auch in der Lebensmittel- und Biotechnologie, der Weinindustrie und der chemischen Industrie.

- **Vergleich:**

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die beiden Entsalzungstechnologien in ähnlichen Anwendungsbereichen eingesetzt werden, sich jedoch im Trennmechanismus und der treibenden Kraft maßgeblich unterscheiden. Die Umkehrosmose arbeitet mit Druck und „size exclusion“, die Elektrodialyse nutzt ein elektrisches Feld für die Trennung.

### **6.1.2 Steuerungstechnische Unterschiede**

Die steuerungstechnischen Unterschiede zwischen den beiden Entsalzungstechnologien bestehen in den jeweiligen Prozessparametern. Aufgrund der unterschiedlichen Funktionsweisen, die bereits erklärt wurden, erfordern die Umkehrosmose und die Elektrodialyse eine unterschiedliche Steuerungstechnik, um einen effizienten Betrieb zu erreichen.

- **Umkehrosmose:**

Wie bereits erwähnt, ist hier der Druck ein zentrales Steuerungselement. Dieser beeinflusst die Effizienz des Trennmechanismus und muss konstant gehalten werden, damit der osmotische Druck überwunden werden kann und eine erfolgreiche Entsalzung/Reinigung stattfinden kann. Der Druck wird über Sensoren und Pumpen gesteuert. Der erforderliche Druck ergibt sich aus der Salzkonzentration im Zulauf.

Des Weiteren müssen die Durchflüsse (Permeatstrom, Konzentratstrom) überwacht werden. Es muss die richtige Menge an Wasser durch die Membran fließen, um eine effiziente Trennung zu gewährleisten. Der Durchfluss wird ebenfalls mit Sensoren überwacht und aufgezeichnet.

Um die Membranen vor Ablagerungen (Fouling) zu schützen, muss eine regelmäßige Reinigung, also Spülung der Membranen erfolgen. Am Ende des Betriebs wird im Fall der Pilotanlage mit NF-Permeat gespült.

- **Elektrodialyse:**

In der Elektrodialyse ist die Stromdichte, also die Stromstärke pro Fläche das zentrale steuerungstechnische Element. Sie ist für die Auslegung und den effizienten Betrieb der Elektrodialyse ausschlaggebend. Die eingestellte Stromdichte wird in Abhängigkeit der maximalen Grenzstromdichte festgelegt. Die Stromdichte soll möglichst hoch sein, die maximale Grenzstromdichte darf jedoch nicht überschritten werden, da es sonst zu Schäden auf der Membran und ungewollten Prozessen, wie einer Elektrolyse des Wassers kommt.

Alle Zielleitfähigkeiten und das Batchvolumen können manuell eingestellt werden. Diese sollen automatisch erreicht werden.

Das Elektrolyt, welches für die Membranspülung verwendet wird, muss regelmäßig überprüft und gegebenenfalls getauscht werden, da es sonst zu Ausfällungen an den Membranen bzw. Elektroden kommen kann (sh. Kapitel 4.3.6.4).

Um derartige Ablagerungen zu verhindern, kann wie im Fall der ersten Stufe der Elektrodialyse auf der Pilotanlage die Polarität getauscht werden. Der Strom kehrt sich dadurch um und bereits an die Membranen angelagerte Ionen werden wieder mobilisiert, sodass Ausfällungen / Scaling vermindert wird

- **Vergleich:**

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die beiden Entsalzungstechnologien signifikante steuerungstechnische Unterschiede aufweisen. Die Umkehrosmose ist von physikalischen Parametern, wie dem Druck und Durchfluss, abhängig, während die Elektrodialyse von der Stromdichte, also dem elektrischen Feld gesteuert wird.

### 6.1.3 Unterschiede der Betriebseinstellungen

Der grundlegende Unterschied zwischen den beiden Betriebseinstellungen: Parallelbetrieb bzw. Serienbetrieb ist jener, dass im Parallelbetrieb die Umkehrosmose zwar im Betrieb ist, jedoch nicht als Vorkonzentration des Rohwassers für die ED verwendet wird. Es wird das NF-Permeat als Feed für die ED1 verwendet und anschließend gelangt das bereits vorkonzentrierte Wasser in die ED2. Im Serienbetrieb ist die erste Stufe der ED nicht im Betrieb. Das Wasser wird in der Umkehrosmose aufkonzentriert und gelangt dann direkt in die ED2.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass der Serienbetrieb schneller verläuft als der Parallelbetrieb, da die Umkehrosmose im Konzentrat bereits höhere Leitfähigkeitswerte aufweist und die Endkonzentration in der ED2 daher schneller erreicht wird. Die ED2 im Serienbetrieb benötigt etwa 30 Minuten bis die Zielleitfähigkeiten erreicht sind, die ED1 und ED2 benötigen im Parallelbetrieb zusammen etwa 2 Stunden, bis die Zielleitfähigkeiten erreicht sind.

Die Frage, inwieweit die Effizienz und Effektivität der Entsalzung der Pilotanlage von der Betriebseinstellung beeinflusst ist, kann aufgrund der Daten, die aus dem Testbetrieb zur Verfügung stehen, nicht geklärt werden. Mit beiden Betriebsmodi konnte das Rohwasser jedoch entsalzt werden. Mit Ausnahme vom 29.08.2024, wurden die eingestellte Zielleitfähigkeiten immer erreicht. Die Betriebseinstellungen haben jedoch einen zentralen Einfluss auf die Qualität der Diluate und Konzentrate, die in den weiteren Forschungsfragen beantwortet werden.

## 6.2 Entsalzung und Salzurückgewinnung (Forschungsfrage 2)

Das Potential der Pilotanlage in Bezug auf die Entsalzung und Salzurückgewinnung bzw. Aufkonzentration ist definitiv gegeben. Die Daten der Ergebnisse haben gezeigt,

dass die Entsalzung bzw. die Aufkonzentration in der Anlage funktioniert, jedoch muss darauf hingewiesen werden, dass die Versuche im Rahmen der Testphase der neu fertiggestellten Anlage im Sommer im Ablauf der Kläranlage Guntramsdorf durchgeführt wurden, weshalb wenig Salz (NaCl) im Ablauf der Kläranlage vorhanden war. Es konnten nur vergleichsweise geringe Konzentrationen an Kationen in Form von Natrium, Kalium, Calcium und Magnesium und Anionen in Form von Chlorid und Sulfat nachgewiesen werden. Diese Konzentrationen reichten jedoch aus, um im Testbetrieb die Funktionsfähigkeit der Anlage nachzuweisen.

### 6.2.1 Aufkonzentration des Konzentrats

Der erforderliche Druck in der HUO ist von der Salzkonzentration im Zulauf des Verfahrens abhängig und ist so hoch, dass der dem Ionengehalt korrespondierende osmotische Druck überwunden werden kann. Da die Salzkonzentration im Zulauf der Anlage eine Leitfähigkeit von etwa 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (1  $\text{mS}/\text{cm}$ ) hatte, kann die HUO das Konzentrat nicht höher als 5 – 6  $\text{mS}/\text{cm}$  aufkonzentrieren. Um höhere Leitfähigkeiten zu erreichen, musste Konzentrat von der Umwälzung rückgeführt werden. Bei der ED können die Zielleitfähigkeiten selbst gewählt werden. Spätere Versuche per Fernzugriff haben gezeigt, dass Leitfähigkeiten von 18  $\text{mS}/\text{cm}$  in der ED ebenfalls möglich sind, wenn diese vorausgewählt und eingestellt werden. Des Weiteren ist durch die Ergebnisse erkennbar, dass die Umkehrosmose sehr gleichmäßig entsalzt bzw. aufkonzentriert, da kein Batchvolumen erreicht werden muss bzw. keine Entleerungen stattfinden. Zudem ist die Reinwasserausbeute ebenfalls konstant bei etwa 85 %.

Im Labor wurden nicht nur organische Spurenstoffe analysiert, sondern auch konventionelle Nährstoffe, wie Phosphor, Ammonium, Stickoxide und Nitrit, aber auch Chlorid und Sulfat als Anionen und Natrium, Kalium, Calcium und Magnesium als Kationen. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die HUO nicht nur Salz, sondern auch die Nährstoffe aufkonzentriert und sich somit im Konzentrat höhere Konzentrationen von Nährstoffen befinden, als im Zulauf der Pilotanlage. Damit besteht im Konzentrat ein Potential, die Nährstoffe zurückzugewinnen bzw. zu recyceln. Im Serienbetrieb am 22.08.2024 ist zu erkennen, dass das HUO-Konzentrat höhere Konzentrationen bei  $\text{PO}_4\text{-P}$  und  $\text{NH}_4\text{-N}$  aufweist, jedoch niedrigere Konzentrationen bei  $\text{NO}_x\text{-N}$  und  $\text{NO}_2\text{-N}$  als das im parallel betriebenen ED2-Konzentrat der Fall ist. Nur Calcium hat eine höhere Konzentration im HUO-Konzentrat als in der ED2-Konzentrat, die restlichen Kationen weisen eine höhere Konzentration in der ED auf. Im Serienbetrieb am 22.08.

und im Parallelbetrieb am 29.08., bei dem das HUO-Konzentrat ebenfalls erprobt wurde, ist ersichtlich, dass der Chlorid-Gehalt in beiden Fällen in der ED2 höher ist, als im HUO-Konzentrat.

Im Parallelbetrieb am 22.08.2024 wurden die Nährstoffe in der ersten Stufe der ED im Konzentrat aufkonzentriert und in weiterer Folge im ED2-Konzentrat noch weiter angereichert. Der Parallelversuch am 29.08.2024 zeigt dies ebenfalls im Konzentrat. Die Chlorid-Konzentrationen im Konzentrat der ED2 sind um etwa 50% höher als im ED1-Konzentrat.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass beide Technologien ähnliche Ergebnisse liefern in Bezug auf die Qualität des Konzentrats für eine potentielle Weiterverwendung. Die ED2 erreicht jedoch höhere Chlorid-Konzentration als die HUO.

### **6.2.2 Entsalzung und Entfernung von Nährstoffen im Diluats**

Die Technologien, die in der Pilotanlage Anwendung finden, sind in der Lage die Nährstoffe, die sich noch im Ablauf der Kläranlage befinden, zu einem großen Teil zu reduzieren. Im HUO-Permeat sind die annähernd keine Nährstoffe vorhanden. Die Entsalzung in der HUO (Reduktion von Chlorid) zeigt ebenfalls gute Ergebnisse. Dies wird vor allem durch die Salzurückhalterate gezeigt, die bis zu 97 % liegt. Im Vergleich zur ED weist das Permeat in der HUO eine bessere Qualität in Bezug auf die Nährstoffentfernung auf. Die in der HUO erreichten Chlorid-Konzentrationen sind jedoch geringer als in der ED2, mit Ausnahme vom 22.08. im Serienbetrieb. Im Parallelbetrieb (sowohl am 22.07., als auch am 22.08.) werden in der zweiten ED-Stufe, im Vergleich mit dem HUO-Permeat, die Nährstoffe im Diluat nicht reduziert, sondern aufkonzentriert. Die Konzentrationen der Nährstoffe sowie Kationen und Anionen sind in den meisten Fällen in der ED2 höher als in der ED1. Das ist vor allem bei der Chlorid-Konzentration ersichtlich, die in der ED2 höher sind als in der ED1. Nur im Parallelbetrieb am 29.08. sind die Konzentrationen der Nährstoffe sowie Kationen und Anionen in der ED2 geringer als in der ED1, mit Ausnahme von Natrium und Chlorid.

Die Nährstoffe sowie Kationen und Anionen werden in beiden Entsalzungstechnologien sehr gut entfernt, wobei die Qualität des HUO-Permeats aufgrund der Datenaussage, bessere Ergebnisse liefert als die ED.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass beide Technologien ähnliche Ergebnisse liefern in Bezug auf die Qualität des Diluats, das ins Gewässer abgeleitet wird. In der Qualitätszielverordnung Ökologie Oberflächengewässer ist der Grenzwert von Chlorid bei einem Jahresmittel von 150 mg/l festgelegt. Der Grenzwert wurde in den Diluaten eingehalten.

Beide Entsalzungstechnologie erzielen gute Ergebnisse in Bezug auf die Nährstoffentfernung bzw. -Rückgewinnung und die Entsalzung.

### **6.3 Organische Spurenstoffe (Forschungsfrage 3)**

Die Ergebnisse der Probenahmen haben gezeigt, dass durch die Umkehrosmose und die Elektrodialyse effektiv organische Spurenstoffe entfernt werden können. Des Weiteren hat bereits die vorgeschaltete Nanofiltration in Bezug auf die Entfernung der Spurenstoffe sehr gute Ergebnisse geliefert. Insgesamt 11 der untersuchten Spurenstoffe (Metoprolol, Sulfamethoxazol, Carbamazepin, Diuron, Trimethoprim, Amisulprid, Citalopram, Venlafaxin, Irbesartan, Bezafibrat und Diclofenac) konnten etwa am 22.07.2024 zu einem großen Teil bereits im Zuge der NF reduziert werden. Im NF-Permeat sind Bezafibrat und Diuron zu 100 % entfernt worden. Die anderen Spurenstoffe konnten eine Reduktion in der NF im Bereich von 96 – 99 % erreichen, mit Ausnahme von Carbamazepin, welches um 90 % reduziert werden konnte. Ähnliche Ergebnisse sind auch am 29.08.2024 erzielt worden, wobei Metoprolol und Carbamazepin von der NF nicht gut reduziert werden konnten, dafür erzielte Hydrochlorothiazid sehr gute Ergebnisse. Metoprolol wurde am 29.08. um einen Faktor von 3,43 durch die NF im NF-Permeat aufkonzentriert. Nur Diuron konnte zu 100 % entfernt werden. Die anderen Spurenstoffe konnten eine Reduktion in der NF im Bereich von 70 – 99 % erreichen.

#### **6.3.1 Entfernung organischer Spurenstoffe im Konzentrat**

Beim Vergleich des HUO-Konzentrats und ED2-Konzentrats im Serienbetrieb am 22.08.2024, ist zu erkennen, dass die Konzentrationen im HUO-Konzentrat, bis auf zwei Ausnahmen (Ibuprofen, Hydrochlorothiazid), höher sind als im ED2-Konzentrat. Bei den meisten Spurenstoffen sind die Konzentrationen im HUO-Konzentrat doppelt so hoch als im ED2-Konzentrat. In der HUO werden alle Stoffe, die sich im Wasser befinden, also nicht nur Ionen, sondern auch organische Stoffe, aufkonzentriert. In der

ED werden nur geladene Stoffe aufkonzentriert. Da auch die organischen Spurenstoffe eine Ladung aufweisen können, die jedoch in Bezug zur Molekülgröße zu einer geringeren Ladungsstärke führen, weist die ED eine geringere Entfernung für organische Verbindungen auf. Der Chloridgehalt im HUO-Konzentrat war dennoch niedriger als im ED2-Konzentrat. Es lässt sich daraus schließen, dass das Konzentrat aus der ED chloridhaltiger ist und geringere Spurenstoffkonzentrationen aufweist, als das HUO-Konzentrat im Serienbetrieb.

Am 29.08.2024 wurde zwar ein Parallelbetrieb durchgeführt, die HUO wurde jedoch trotzdem beprobt. In diesem Fall zeigen die Daten ähnliche Ergebnisse wie am 22.08.2024. Die Konzentrationen der Spurenstoffe waren im HUO-Konzentrat höher als im ED2-Konzentrat. Die einzige Ausnahme bildet Acesulfam K, welches höhere Konzentrationen in der ED aufweist, als im HUO-Konzentrat. Des Weiteren ist anzumerken, dass am 29.08.2024 die Konzentration von Ibuprofen im ED2-Konzentrat nur 1 ng/l aufgewiesen hat, im HUO-Konzentrat wurde bei Behandlung des selben Rohwassers eine Konzentration von über 1000 ng/l (1 µg/l) gefunden.

Bezieht sich die Analyse auf den Parallelbetrieb am 22.08.2024 und vergleicht die ED2-Konzentrate miteinander, zeigt sich, dass die Konzentrationen der Spurenstoffe im Serienbetrieb in den meisten Fällen höher sind als die Konzentrationen der Spurenstoffe im Parallelbetrieb. Ausnahmen bilden Coffein, Benzotriazol, Diclofenac und Ibuprofen. Diese Spurenstoffe weisen etwas höhere Konzentrationen im Parallelbetrieb im ED2-Konzentrat auf als im Serienbetrieb. Die Konzentrationen der Spurenstoffe im HUO-Konzentrat sind jedoch weiterhin am höchsten.

Der Vergleich der ED2-Konzentrate des Serienbetriebs vom 22.08. mit denen des Parallelbetriebs vom 29.08. zeigt, dass Metoprolol, Benzotriazol, Sulfamethoxazol, Amisulprid, Citalopram und Venlafaxin niedrigere Konzentrationen im Serienbetrieb aufweisen als im Parallelbetrieb. Die restlichen 11 Spurenstoffe weisen höhere oder gleich hohe Konzentrationen im Serienbetrieb auf.

Des Weiteren geht aus den Ergebnissen der Probenahmen vom 22.08. (Serienbetrieb) und vom 29.08. hervor, dass die Konzentrationen der ED bereits nach Stufe 1 geringere Spurenstoff-Konzentrationen im Konzentrat aufweisen als das HUO-Konzentrat.

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass die ED bessere Ergebnisse in Bezug auf die Qualität im Konzentrat liefert als die HUO, da sich niedrigere Spurenstoffkonzentrationen darin befinden. Des Weiteren liefert der Parallelbetrieb bessere Ergebnisse im ED-Konzentrat als im Serienbetrieb, aufgrund geringerer Spurenstoffgehalte.

### 6.3.2 Entfernung organischer Spurenstoffe im Diluat

Im Gegensatz dazu, liefert die HUO sehr gute Ergebnisse bei der Entfernung von Spurenstoffen im Permeat. Die Konzentrationen im Serienbetrieb sind in den meisten Spurenstoffe annähernd null, es gibt hierbei jedoch Ausnahmen. Im HUO-Permeat von der Probenahme am 22.08.2024 im Vergleich zum ED2-Diluat waren, bis auf Coffein, alle Konzentrationen der Spurenstoffe im HUO-Permeat niedriger als im ED2-Diluat. Am 29.08.2024 waren die Konzentrationen von Coffein, Metoprolol und Benzotriazol im HUO-Permeat höher als im ED2-Diluat. Wie bereits im Kapitel der Ergebnisse erläutert bestätigt die Studie „Removal of emerging contaminants from wastewater using reverse osmosis for its subsequent reuse: Pilot plant“ (Egea-Corbacho Lopera et al., 2019), dass durch den Umkehrosmose-Prozess die Spurenstoffe fast komplett entfernt werden können. Im Allgemeinen ist festzustellen, dass die Umkehrosmose sehr gute Ergebnisse beim Entfernen von Spurenstoffen im Permeat liefert und hier besser performt als die ED.

Der Vergleich der Diluate der beiden ED-Stufen im Parallelbetrieb zeigt, dass die Konzentrationen der Spurenstoffe am 22.08.2024, mit Ausnahme von Coffein und Trimethoprim, im ED1-Diluat niedriger sind als im ED2-Diluat. Was nicht zu erwarten war ist, dass durch die zweite Stufe der ED die Spurenstoffe im Diluat aufkonzentriert wurden. Möglicherweise wurden hier Spurenstoffe von einem früheren Entsalzungsvorgangs verschleppt. Dieses Ergebnis trifft bei der Probenahme am 22.07.2024 ebenfalls zu, mit Ausnahme von Coffein, Citalopram, Irbesartan und Hydrochlorothiazid. Bei diesen Spurenstoffen waren die Konzentrationen im ED2-Diluat niedriger. Am 29.08.2024 sind die Konzentrationen von Coffein, Benzotriazol, Trimethoprim, Citalopram, Diclofenac und Hydrochlorothiazid im ED1-Diluat höher als im ED2-Diluat. Es ist anzunehmen, dass im Parallelbetrieb durch die zweite Stufe der ED die Spurenstoffe zu einem Teil höher aufkonzentriert werden. Um genaue Aussagen über diesen Vorgang im Diluat der ED2 treffen zu können, müssen gezielte Untersuchungen und Analysen durchgeführt werden.

Bei den ED2-Diluaten beim Parallel- und Serienbetrieb sind keine großen Unterschiede oder Trends erkennbar.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Pilotanlage gute Ergebnisse in Bezug auf die Nährstoffentfernung bzw. -rückgewinnung und Spurenstoffentfernung liefert. In der kommunalen Abwasserreinigung könnten die Technologien als 4. Reinigungsstufe in Erwägung gezogen werden.

## 6.4 Limitierungen der Arbeit

Die dritte Unterfrage der zweiten Forschungsfrage und die dritte Unterfrage der dritten Forschungsfrage können nicht beantwortet werden, da die Energiedaten während der untersuchten Betriebsphase nicht im System eingespielt waren und sie nicht mehr rückwirkend erhoben werden können. Die Pilotanlage ist nunmehr bereits in Freistadt am finalen Bestimmungsort installiert und wurde diesbezüglich optimiert. Die Aufzeichnung der Energiedaten wurde ins System der Pilotanlage implementiert und können abgerufen werden. Die Studie „Potential of electro-dialytic techniques in brackish desalination and recovery of industrial process water for reuse“ (Lopez et al., 2017) gibt jedoch an, dass die Elektrodialyse im Vergleich zur Umkehrosmose Vorteile in Bezug auf die Energie hat und daher vermehrt bei wässrigen Medien mit einer <1% Salinität angewendet wird (Lopez et al., 2017). Des Weiteren gibt (Valdés et al., 2021) in der Studie „Reverse Osmosis Concentrate: Physicochemical Characteristics, Environmental Impact, and Technologies“ an, dass die Elektrodialyse einen geringen Energieverbrauch hat. Es wird darauf hingewiesen, dass die Reduktion des Energieverbrauchs der HUO schwierig zu bewältigen ist, in Kombination mit erneuerbaren Energien jedoch eine Lösung darstellt (Valdés et al., 2021).

## 7 Synopse

In dieser Diplomarbeit wurde die Inbetriebnahme der Pilotanlage in Guntramsdorf betrachtet. In der vorliegenden Arbeit konnten die Forschungsfragen mit den vorhandenen Daten beantwortet werden. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Umkehrosmose bessere Ergebnisse in Bezug auf die Qualität des Permeats liefert als die Elektrodialyse, jedoch eine schlechtere Qualität des Konzentrats aufweist. In Zukunft können weitere Untersuchungen in diesem Bereich sinnvoll sein, um weitere Erkenntnisse zu erhalten.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass sowohl die Umkehrosmose als auch die Elektrodialyse sehr gute Ergebnisse in Bezug auf die Reduktion von Nähr- und Spurenstoffen liefert. Des Weiteren ist die Aufkonzentration von Chlorid und damit von NaCl mit beiden Technologien möglich. Das Potential für die Salzurückgewinnung und die damit verbundene Ressourcenschonung durch den Einsatz der Pilotanlage ist gegeben. Im HUO-Konzentrat befinden sich jedoch hohe Konzentrationen von organischen Spurenstoffen, die somit gemeinsam mit dem Salz freigesetzt werden würden, was unerwünscht ist. Das Konzentrat der HUO muss daher vor Verwendung als Auftaumittel weiter behandelt werden, um diese Stoffe zu reduzieren. Die Elektrodialyse liefert hier bessere Ergebnisse.

Des Weiteren besteht ein Potential, die Nährstoffe (z.B.  $\text{NH}_4\text{-N}$ , und  $\text{PO}_4\text{-P}$ ), die sich in den Konzentraten befinden, zurückzugewinnen. Im Zuge der ED wurden die meisten Stoffe, die sich im Zulauf der Pilotanlage befunden haben, im Diluat reduziert.

Abschließend ist darauf hinzuweisen, dass die Diplomarbeit sich primär mit der Leistung der beiden Verfahren während des Testbetriebs und der Inbetriebnahme der Pilotanlage in Guntramsdorf befasst hat. Ein kontinuierlicher Betrieb war nur begrenzt möglich, da es wiederholt zu Betriebsproblemen und Ausfällen der Anlage gekommen ist. Im Zuge der Testphase ist es in der Diplomarbeit gelungen, erste Erkenntnisse zu gewinnen.

## 8 Literaturverzeichnis

Aktories, K., Förstermann, U., Hofmann, F. B., & Starke, K. (2004). *Allgemeine und spezielle Pharmakologie und Toxikologie—Begründet von W. Forth, D. Henschler, W. Rummel* (9. Auflage). Urban & Fischer Verlag/Elsevier GmbH.

[https://www.medimops.de/klaus-aktories-allgemeine-und-spezelle-pharmakologie-und-toxikologie-begrundet-von-w-forth-d-henschler-w-rummel-gebundene-ausgabe-M03437425218.html?variant=UsedAcceptable&creative=&sitelink=&gclid=EAIaIQobChMItcWCnurljAMV1KaDBx0LpRFGEAQYByABEglQgfD\\_BwE&utm\\_source=PSM&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=AT\\_BM\\_OUT\\_WEB\\_ALL\\_SHO\\_GOO-PMX\\_MR-10\\_&gad\\_source=1](https://www.medimops.de/klaus-aktories-allgemeine-und-spezelle-pharmakologie-und-toxikologie-begrundet-von-w-forth-d-henschler-w-rummel-gebundene-ausgabe-M03437425218.html?variant=UsedAcceptable&creative=&sitelink=&gclid=EAIaIQobChMItcWCnurljAMV1KaDBx0LpRFGEAQYByABEglQgfD_BwE&utm_source=PSM&utm_medium=cpc&utm_campaign=AT_BM_OUT_WEB_ALL_SHO_GOO-PMX_MR-10_&gad_source=1)

Aktories, K., Förstermann, U., Hofmann, F. B., & Starke, K. (2013). *Allgemeine und spezielle Pharmakologie und Toxikologie—Begründet von W. Forth, D. Henschler, W. Rummel* (11. Auflage). Urban & Fischer Verlag/Elsevier GmbH.

<https://www.sciencedirect.com/book/9783437425233/allgemeine-und-spezelle-pharmakologie-und-toxikologie#book-info>

*Allgemeine Abwasseremissionsverordnung (AAEV).* (2025).

<https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung/Bundesnormen/10010977/AAEV%2c%20Fassung%20vom%2025.02.2025.pdf>

Almawatech GmbH. (2025, Januar 11). *Die neue EU-Kommunalabwasserrichtlinie: Auswirkungen auf Industrie und Abwasserbehandlung - ALMAWATECH.*

<https://www.almawatech.com/news/die-neue-eu-kommunalabwasserrichtlinie-auswirkungen-auf-industrie-und-abwasserbehandlung/>

ASFINAG. (2024). *Gewässerschutzanlagen entlang der Autobahn: Das können sie und so funktionieren sie.* <https://blog.asfinag.at/ganz-schon-grun/gewaesserschutzanlagen-entlang-der-autobahn/>

- Bezchlibnyk-Butler, K., Aleksic, I., & Kennedy, S. H. (2000). Citalopram—A review of pharmacological and clinical effects. *Journal of Psychiatry and Neuroscience*, 25(3), 241–254.
- Bhave, R. R. (1996). Cross-Flow Filtration. In H. C. Vogel & C. L. Todaro (Hrsg.), *Fermentation and Biochemical Engineering Handbook (Second Edition)* (S. 271–347). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-081551407-7.50010-6>
- Binama, M., Muhirwa, A., & Bisengimana, E. (2016). *Cavitation Effects in Centrifugal Pumps- A Review*. 6(5).
- BKA. (o. J.). *RIS - Trinkwasserverordnung—Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 12.03.2025*. Abgerufen 12. März 2025, von <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20001483>
- BMK. (2019). *Erläuterungen zur Qualitätszielverordnung Ökologie Oberflächengewässer (konsolidiert)*.
- BMK. (2021). *Gewässerschutz an Straßen*. <https://www.bmk.gv.at/themen/verkehr/strasse/umwelt/gewaesserschutz.html>
- BML. (2014). *Chlorid:Auswirkungen auf die aquatische Flora und Fauna* (S. 162) [Studie]. [https://info.bml.gv.at/dam/jcr:7b8b410a-345b-4321-8cea-68c68cee3eb2/Chlorid\\_Auswirkungen%20auf%20die%20Aquatische%20Flora%20und%20Fauna\\_Studie.pdf](https://info.bml.gv.at/dam/jcr:7b8b410a-345b-4321-8cea-68c68cee3eb2/Chlorid_Auswirkungen%20auf%20die%20Aquatische%20Flora%20und%20Fauna_Studie.pdf)
- BML. (2024a). *Chemisch-physikalische Begriffe rund um das Wasser*. Chemisch-physikalische Begriffe rund um das Wasser. <https://info.bml.gv.at/themen/wasser/wasserqualitaet/chemphybegriffe.html>
- BML. (2024b). *Qualitätszielverordnung Ökologie Oberflächengewässer—QZV Ökologie OG*. Qualitätszielverordnung Ökologie Oberflächengewässer - QZV

- Ökologie OG. [https://info.bml.gv.at/themen/wasser/wasser-oesterreich/wasserrecht\\_national/planung/QZVOekologieOG.html](https://info.bml.gv.at/themen/wasser/wasser-oesterreich/wasserrecht_national/planung/QZVOekologieOG.html)
- BMSGPK. (2025). *Wasser*.  
<https://www.sozialministerium.at/Themen/Gesundheit/Wasser.html>
- BMUV. (2024, Juli 25). *Hintergrund zur Nationalen Wasserstrategie*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. <https://www.bmuv.de/WS5871>
- Breede, K. (2025). *Cross-Flow-Membranmodule | LEHVOSS Filtration*.  
<https://www.lehvoss.de/Filtration/produkte/cross-flow-membranmodule>
- Campione, A., Gurreri, L., Ciofalo, M., Micale, G., Tamburini, A., & Cipollina, A. (2018). Electrodialysis for water desalination: A critical assessment of recent developments on process fundamentals, models and applications. *Desalination*, 434, 121–160. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.12.044>
- Casademont, C., Pourcelly, G., & Laurent, B. (2008). Effect of magnesium/calcium ratios in solutions treated by electrodialysis: Morphological characterization and identification of anion-exchange membrane fouling. *Journal of Colloid and Interface Science*, 322, 215–223. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2008.02.068>
- Cath, T., Childress, A., & Elimelech, M. (2006). Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments. *Journal of Membrane Science*, 281(1–2), 70–87. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.05.048>
- Dipl.-Ing. Reif, D., Grossgasteiger, L., Mag. Wimmer, R., & Mag. Dr. Kreuzinger, N. (2021). *RecyCl -Phase I: Rückgewinnung von Auftausalzen aus Straßenabwasser* (S. 104).
- Egea-Corbacho Lopera, A., Gutiérrez Ruiz, S., & Quiroga Alonso, J. M. (2019). Removal of emerging contaminants from wastewater using reverse osmosis for

its subsequent reuse: Pilot plant. *Journal of Water Process Engineering*, 29, 100800. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100800>

Formanek, C., Briemann, H., Humer, F., & Zieritz, I. (2023). *Indikatorsubstanzen für kommunale Verunreinigungen im Grundwasser*. Indikatorsubstanzen für kommunale Verunreinigungen im Grundwasser. <https://info.bml.gv.at/themen/wasser/wasserqualitaet/grundwasser/indikatorsubstanzen-gw.html>

Frohne, H. (1982). *Einführung in die Elektrotechnik. Grundlagen und Netzwerke*. Springer.

Ge, S., Feng, L., Zhang, L., Xu, Q., Yang, Y., Wang, Z., & Kim, K.-H. (2017). Rejection rate and mechanisms of drugs in drinking water by nanofiltration technology. *Environmental Engineering Research*, 22(3), 329–338. <https://doi.org/10.4491/eer.2016.157>

Gillis, J. C., & Markham, A. (1997). Irbesartan. *Drugs*, 54(6), 885–902. <https://doi.org/10.2165/00003495-199754060-00007>

Goldenberg, I., Benderly, M., & Goldbourt, U. (2008). Update on the use of fibrates: Focus on bezafibrate. *Vascular Health and Risk Management*, 4(1), 131–141.

Hilden, M. (2003). *Ermittlung von Stoff-Frachten in Fließgewässern*. Kulturbuch-Verlag.

Hoffmann, M., Blab, R., & Nutz, P. (2011). *Forschungsbericht „Optimierung der Feuchtsalzstreuung“*. <https://www.bmk.gv.at/themen/verkehr/strasse/publikationen/feuchtsalzstreuung.html>

Holleman, A. F., Wiberg, E., & Wiberg, N. (2007). *Lehrbuch der anorganischen Chemie* (102. Aufl.). Walter de Gruyter & Co.

- Huovinen, P. (1987). *Trimethoprim Resistance*. *ANTIMICROBIAL AGENTS AND CHEMOTHERAPY*, 1451–1456.
- Jamil, S., Loganathan, P., Listowski, A., Kandasamy, J., Khourshed, C., & Vigneswaran, S. (2019). Simultaneous removal of natural organic matter and micro-organic pollutants from reverse osmosis concentrate using granular activated carbon. *Water Research*, 155, 106–114. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.02.016>
- Licht, R. W., & Kassow, P. (1998). Venlafaxin for the treatment of psychotic depression. *European Psychiatry*, 13(5), 276–277. [https://doi.org/10.1016/S0924-9338\(98\)80037-0](https://doi.org/10.1016/S0924-9338(98)80037-0)
- Lindner, H., Brauer, H., & Lehmann, C. (2004). *Taschenbuch der Elektrotechnik und Elektronik* (8. Aufl.). Carl Hanser.
- Listen Übersicht—Das Periodensystem online*. (o. J.). Abgerufen 7. April 2025, von <https://www.periodensystem-online.de/index.php?id=lists>
- Lopez, A. M., Williams, M., Paiva, M., Demydov, D., Do, T. D., Fairey, J. L., Lin, Y. J., & Hestekin, J. A. (2017). Potential of electrodialytic techniques in brackish desalination and recovery of industrial process water for reuse. *Desalination*, 409, 108–114. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.01.010>
- Lozán, J., Graßl, H., Hupfer, P., Karbe, L., & Schönwiese, C.-D. (2005). *Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle*.
- Marktgemeinde Guntramsdorf—Abwasser Service Betrieb*. (2024). <https://www.guntramsdorf.at/cgi-bin/ONLWYSIWYG2008/ONL.cgi?WHAT=INFOSHOW&INFONUMMER=24027307&ONLFA=GUN>
- McKeage, K., & Plosker, G. L. (2004). *Amisulpride—A Review of its Use in the Management of Schizophrenia*. *ADIS DRUG EVALUATION*, 933–956.

- Melin, T., & Rautenbach, R. (2007). *Membranverfahren*. Springer.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-34328-8>
- Mohammad, A. W., Teow, Y. H., Ang, W. L., Chung, Y. T., Oatley-Radcliffe, D. L., & Hilal, N. (2015). Nanofiltration membranes review: Recent advances and future prospects. *Desalination*, 356, 226–254.  
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.10.043>
- Moncada, A. (2004). *Environmental Fate of Diuron*.
- Nds. (o. J.). *Leitfähigkeit* | Nds. Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz. Abgerufen 12. März 2025, von [https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/wasser/grundwasser/grundwasserbericht\\_niedersachsen/grundwasserbeschaffenheit/guteparameter/grundprogramm\\_des\\_nlwkn/leitfaehigkeit/leitfaehigkeit-137601.html](https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/wasser/grundwasser/grundwasserbericht_niedersachsen/grundwasserbeschaffenheit/guteparameter/grundprogramm_des_nlwkn/leitfaehigkeit/leitfaehigkeit-137601.html)
- Nds.MUEK. (o. J.). *Chlorid* | Nds. Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz. Abgerufen 8. November 2024, von [https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/wasser/grundwasser/grundwasserbericht\\_niedersachsen/grundwasserbeschaffenheit/guteparameter/grundprogramm\\_des\\_nlwkn/chlorid/Chlorid-137596.html](https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/wasser/grundwasser/grundwasserbericht_niedersachsen/grundwasserbeschaffenheit/guteparameter/grundprogramm_des_nlwkn/chlorid/Chlorid-137596.html)
- Rösener, T. B. M. (2019). *Temperature modulated membrane transport phenomena* [Doktorarbeit]. Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.
- Schiller, A. (2018, Juli 24). *Spurenstoffe in Gewässern* [Text]. Umweltbundesamt; Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/spurenstoffe-in-gewaessern>
- Schiller, K. (2022, Juli 22). *Wasserrecycling: Grundlagen der Abwasseraufbereitung*. <https://umweltmission.de/wissen/wasserrecycling/>
- Schlauchpumpe. (2023). In *Wikipedia*.  
<https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Schlauchpumpe&oldid=237068571>

- Schönberger, H., & Meyer, C. (Hrsg.). (2018). *Spurenstoffe und antibiotikaresistente Bakterien - Schnittstelle Abwasserent- und Wasserversorgung: Abwasserkolloquium 2018, 08.11.2018*. Vulkan-Verlag GmbH. <https://doi.org/10.18419/opus-10845>
- Schramm, C., Gans, O., Uhl, M., Grath, J., Scharf, S., Zieritz, I., Kralik, M., Scheidleder, A., & Humer, F. (2006). *CARBAMAZEPIN UND KOFFEIN – POTENZIELLE SCREENINGPARAMETER FÜR VERUNREINIGUNGEN DES GRUNDWASSERS DURCH KOMMUNALES ABWASSER?*
- Singh, R. (2015). Introduction to Membrane Technology. In *Membrane Technology and Engineering for Water Purification* (S. 1–80). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63362-0.00001-X>
- Song, W., Lee, L. Y., & Ng, H. Y. (2020). Chapter 21—Nanofiltration and reverse osmosis processes for the removal of micro-pollutants. In S. Varjani, A. Pandey, R. D. Tyagi, H. H. Ngo, & C. Larroche (Hrsg.), *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering* (S. 527–552). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819594-9.00021-8>
- Stadler, E. (2024). *Kommunales Abwasser*.
- Tegethof, U. (with Bundesanstalt für Straßenwesen). (1998). *Straßenseitige Belastungen des Grundwassers*. Wirtschaftsverl. NW, Verl. für Neue Wiss.
- Tietz, A. (2024). *1. Wiener Hochquellenleitung nach Desinfektion, Auslauf CD-Kammer; umfassende Kontrolle (= Volluntersuchung), 4. Quartal 2024 [Inspektionsbericht]*. <https://www.wien.gv.at/wienwasser/pdf/hq1-volluntersuchung.pdf>
- Töpfer, K. (2016, Oktober 20). *4. Nachhaltigkeitsfrühstück der Hagelversicherung mit Prof. Dr. Klaus Töpfer [Interview]*.

<https://www.hagel.at/presseaussendungen/klimawandel-als-chance-und-bedrohung-zugleich/>

Valdés, H., Saavedra, A., Flores, M., Vera-Puerto, I., Aviña, H., & Belmonte, M. (2021). Reverse Osmosis Concentrate: Physicochemical Characteristics, Environmental Impact, and Technologies. *Membranes*, 11(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/membranes11100753>

Visable GmbH. (2023, Dezember 21). *Der Weg des Streusalzes auf unsere Straßen*. Home. <https://www.wlw.de/de/inside-business/branchen-insights/werkstoffe/vom-abbau-zum-streuwagen-der-weg-des-streusalzes-auf-unsere-strassen>

Wei, X., Gu, P., Zhang, G., & Huang, J. (2015). Occurrence of emerging and priority pollutants in municipal reverse osmosis concentrates. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 17(2), 488–494. <https://doi.org/10.1039/C4EM00205A>

Weilguni, S. (2024). *Alternative Stickstoffquelle für eine Industriekläranlage: Elektrodialyse kommunaler Schlammabwässer zu Aufkonzentration von Ammonium* [Diplomarbeit, Technische Universität Wien]. <https://repositum.tuwien.at/handle/20.500.12708/201160>

Werth, B. J. (2024). *Trimethoprim mit Sulfamethoxazol—Infektionen*. MSD Manual Ausgabe für Patienten. <https://www.msdmanuals.com/de/heim/infektionen/antibiotika/trimethoprim-mit-sulfamethoxazol>

Wilhelm, S. (2008). *Wasseraufbereitung*.

Xiang, Q., Nomura, Y., Fukahori, S., Mizuno, T., Tanaka, H., & Fujiwara, T. (2019). Innovative Treatment of Organic Contaminants in Reverse Osmosis Concentrate from Water Reuse: A Mini Review. *Current Pollution Reports*, 5(4), 294–307. <https://doi.org/10.1007/s40726-019-00119-2>

Zöllner, (Johann Karl) Friedrich. (1879). *Das Skalen-Photometer.*

## 9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Funktionsprinzip der Nanofiltration [Nanofiltration - OSMO Membrane Systems, o. J.].....	9
Abbildung 2: Dead-End-Filtration VS Cross-Flow-Filtration [Dynamische Cross-Flow-Anlage System BECA, o. J.].....	10
Abbildung 3: Unterschied Osmose (Mitte: forward osmosis, kurz FO) und Umkehrosmose (rechts: reverse osmosis, kurz RO) [In Anlehnung an Cath et al., 2006] .....	11
Abbildung 4: a) geladene Teilchen zwischen den Elektroden b) Ionenaustauschermembran: hier Kationenaustauschermembran (KAM) [Membranverfahren, 2007] .....	12
Abbildung 5: Funktionsprinzip der ED [Membranverfahren, 2007] .....	13
Abbildung 6: Stack-Aufbau / Strömungsführung im Stack [Rapp, 2006].....	15
Abbildung 7: Pilotanlagenstandort Kläranlage Guntramsdorf (NÖ Atlas: [Kataster/Grundstücke, o. J.].....	20
Abbildung 8: Übersichtsplan der Anlagentechnik: Container 1 mit Vorfiltration (kurz VOF), NF, HUO, Behältern (li) und Container 2 mit ED1 und ED2 (re) .....	21
Abbildung 9: Blockschaltbild der gesamten Versuchsanlage inklusive Betriebsmodi	22
Abbildung 10: Blockschaltbild der Versuchsanlage im Parallelbetrieb.....	23
Abbildung 11: Blockschaltbild der Versuchsanlage im Serienbetrieb .....	23
Abbildung 12: Vorlagebehälter (schwarz) mit Rohwasser- Vorwärmer und Oxydator .....	24
Abbildung 13: Scheibenfilter der Anlage.....	25
Abbildung 14: sauberer Scheibenfilter [ARKAL Spine mit Scheibensatz für 1-1½" Scheibenfilter, 80 Mesh, o. J.] .....	26
Abbildung 15: verschmutzter Scheibenfilter.....	26
Abbildung 16: Beutelfilter der Anlage .....	26
Abbildung 17: sauberer Beutelfilter [Filterbeutel direkt vom Hersteller, o. J.] .....	27
Abbildung 18: verschmutzter Beutelfilter .....	27
Abbildung 19: Inside-Out Betrieb des Hohlfasermoduls [Breede, 2025].....	27
Abbildung 20: Nanofiltrationsmodul in der Anlage .....	28
Abbildung 21: Spiralgewickelte Membran [Breede, 2025] .....	31
Abbildung 22: Kerzenfilter / Polzeifilter: sauber (li), verschmutzt (re).....	31
Abbildung 23: Umkehrosmose-Modul in der Pilotanlage .....	32
Abbildung 24: Stack der ED (rot), li...Frontansicht, re...Seitenansicht .....	34
Abbildung 25: Elektrodialyse in der Pilotanlage (ED2) .....	37
Abbildung 26: Ablagerung des Elektrolyts im internen Tank (E2) der ED2.....	39
Abbildung 27: Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> für Elektrolytlösung.....	39
Abbildung 28: Schema der Probenahmestellen auf der Versuchsanlage .....	42

Abbildung 29: Küvetten-Tests der Firma Hach [Chlorid Küvetten-Test 1-70 mg/L / 70-1000 mg/L Cl <sup>-</sup> , 24 Bestimmungen, o. J.].....	44
Abbildung 30: Schema der Probenahmestellen auf der Versuchsanlage (1 = Rohwasser; 2 = VOF, 3 = NF Permeat, 4 = HUO-Feinfilter, 5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED1-Konzentrat, 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat).....	47
Abbildung 31: Nährstoff-Entfernung vom 22.07.2024 [mg/l] (1 = Rohwasser; 2 = VOF, 3 = NF Permeat, 4 = HUO-Feinfilter, 5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, 7 = ED1-Diluat, 9 = ED2-Diluat).....	49
Abbildung 32: Nährstoff-Entfernung vom 22.07.2024 → Kationen und Anionen [mg/l] (1 = Rohwasser; 2 = VOF, 3 = NF Permeat, 4 = HUO-Feinfilter, 5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, 7 = ED1-Diluat, 9 = ED2-Diluat).....	52
Abbildung 33: Nährstoff-Entfernung vom 22.08.2024 → Parallelbetrieb [mg/l] (M1 = ED1 Dil. + Konz. (PB), 3 = NF Permeat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED1-Konzentrat, M2 = ED2 Dil. + Konz. (PB), 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat).....	54
Abbildung 34: Nährstoff-Entfernung vom 22.08.2024 → Kationen und Anionen – Parallelbetrieb [mg/l] (M1 = ED1 Dil. + Konz. (PB), 3 = NF Permeat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED1-Konzentrat, M2 = ED2 Dil. + Konz. (PB), 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat).....	56
Abbildung 35: Nährstoff-Entfernung vom 22.08.2024 → Serienbetrieb [mg/l] (5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, M3 = ED2 Dil. + Konz. (SB), 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat).....	58
Abbildung 36: Nährstoff-Entfernung vom 22.08.2024 → Kationen und Anionen – Serienbetrieb [mg/l] (5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, M3 = ED2 Dil. + Konz. (SB), 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat).....	60
Abbildung 37: Nährstoff-Entfernung vom 29.08.2024 [mg/l] (1 = Rohwasser; 2 = VOF, 3 = NF Permeat, 4 = HUO-Feinfilter, 5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED1-Konzentrat, 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat).....	62
Abbildung 38: Nährstoff-Entfernung vom 29.08.2024 → Kationen und Anionen [mg/l] (1 = Rohwasser, 2 = VOF, 3 = NF Permeat, 4 = HUO-Feinfilter, 5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED1-Konzentrat, 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat).....	64
Abbildung 39: Kartuschenfilter in ED (li...sauber, re...mit Ablagerung/ schmutzig) ....	66
Abbildung 40: Benzotriazol-Konzentrationsverlauf bezogen auf Zulaufkonzentration [%] vom 22.07.2024.....	70
Abbildung 41: Hydrochlorothiazid- Konzentrationsverlauf bezogen auf Zulaufkonzentration [%] vom 22.07.2024.....	71
Abbildung 42: Coffein- Konzentrationsverlauf bezogen auf Zulaufkonzentration [%] vom 22.07.2024.....	72
Abbildung 43: Acesulfam K- Konzentrationsverlauf bezogen auf Zulaufkonzentration [%] vom 22.07.2024.....	72

Abbildung 44: Ibuprofen- Konzentrationsverlauf bezogen auf Zulaufkonzentration [%] vom 22.07.2024 .....	73
Abbildung 45: Irbesartan-Konzentrationsverlauf bezogen auf Zulaufkonzentration [%] vom 22.07.2024 .....	74
Abbildung 46: Metoprolol - Konzentrationsverlauf bezogen auf Zulaufkonzentration [%] vom 29.08.2024 .....	82
Abbildung 47: Benzotriazol - Konzentrationsverlauf bezogen auf Zulaufkonzentration [%] vom 29.08.2024 .....	82
Abbildung 48: Carbamazepin - Konzentrationsverlauf bezogen auf Zulaufkonzentration [%] vom 29.08.2024 .....	83
Abbildung 49: Ibuprofen- Konzentrationsverlauf bezogen auf Zulaufkonzentration [%] vom 29.08.2024 .....	84
Abbildung 50: Diclofenac - Konzentrationsverlauf bezogen auf Zulaufkonzentration [%] vom 29.08.2024 .....	85
Abbildung 51: Hydrochlorothiazid- Konzentrationsverlauf bezogen auf Zulaufkonzentration [%] vom 29.08.2024 .....	85
Abbildung 52: Entsalzungsergebnisse vom 22.07.2024 .....	90
Abbildung 53: Entsalzung ED1 am 22.07.2024 - Parallelbetrieb .....	91
Abbildung 54: Entsalzung ED2 am 22.07.2024 - Parallelbetrieb .....	92
Abbildung 55: Entsalzungsergebnisse vom 22.08.2024 → Parallelbetrieb .....	93
Abbildung 56: Entsalzung ED1 am 22.08.2024 - Parallelbetrieb .....	95
Abbildung 57: Entsalzung ED2 am 22.08.2024 - Parallelbetrieb .....	96
Abbildung 58: Entsalzungsergebnisse vom 22.08.2024 → Serienbetrieb .....	97
Abbildung 59: Entsalzung ED2 am 22.08.2024 - Serienbetrieb .....	98
Abbildung 60: Entsalzung HUO am 22.08.2024 .....	99
Abbildung 61: Entsalzungsergebnisse vom 29.08.2024 → Parallelbetrieb .....	100
Abbildung 62: Entsalzung ED1 am 29.08.2024 - Parallelbetrieb .....	101
Abbildung 63: Entsalzung ED2 am 29.08.2024 - Parallelbetrieb .....	102
Abbildung 64: Entsalzung HUO am 29.08.2024 .....	103
Abbildung 65: Verhältnis Konzentrat / Permeat Fluss am 22.08.2024 .....	104
Abbildung 66: Verhältnis Konzentrat / Permeat Fluss am 29.08.2024 .....	105
Abbildung 67: Verhältnis Salzpassage und Salzurückhalterate am 22.08.2024 .....	106
Abbildung 68: Verhältnis Salzpassage und Salzurückhalterate am 29.08.2024 .....	106

## 10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bezeichnungen mit Nummer der Probenahmestellen 1 - 10.....	43
Tabelle 2: Bezeichnungen mit Nummer der Probenahmestellen M1, M2, und M3 ....	44
Tabelle 3: PN-Resultate vom 22.07.2024 → Nährstoffe [mg/l] (1 = Rohwasser; 2 = VOF, 3 = NF Permeat, 4 = HUO-Feinfilter, 5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, 7 = ED1-Diluat, 9 = ED2-Diluat).....	48
Tabelle 4: PN-Resultate vom 22.07.2024 → Anionen / Kationen [mg/l] (1 = Rohwasser; 2 = VOF, 3 = NF Permeat, 4 = HUO-Feinfilter, 5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, 7 = ED1-Diluat, 9 = ED2-Diluat).....	51
Tabelle 5: Frachtberechnung → Anionen / Kationen [kg/h] (22.07.2024) (1 = Rohwasser; 2 = VOF, 3 = NF Permeat, 4 = HUO-Feinfilter, 5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, 7 = ED1-Diluat, 9 = ED2-Diluat) .....	53
Tabelle 6: PN-Resultate vom 22.08.2024 → Nährstoffe [mg/l] – Parallelbetrieb (M1 = ED1 Dil. + Konz. (PB), 3 = NF Permeat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED1-Konzentrat, M2 = ED2 Dil. + Konz. (PB), 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat).....	53
Tabelle 7: PN-Resultate vom 22.08.2024 → Anionen / Kationen [mg/l] – Parallelbetrieb (M1 = ED1 Dil. + Konz. (PB), 3 = NF Permeat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED1-Konzentrat, M2 = ED2 Dil. + Konz. (PB), 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat).....	56
Tabelle 8: Frachtberechnung → Anionen / Kationen [kg/h] (22.08.2024-Parallelbetrieb) (3 = NF Permeat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED1-Konzentrat, 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat).....	57
Tabelle 9: PN-Resultate vom 22.08.2024 → Nährstoffe [mg/l] – Serienbetrieb (5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, M3 = ED2 Dil. + Konz. (SB), 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat).....	57
Tabelle 10: PN-Resultate vom 22.08.2024 → Anionen / Kationen [mg/l] – Serienbetrieb (5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, M3 = ED2 Dil. + Konz. (SB), 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat).....	59
Tabelle 11: Frachtberechnung → Anionen / Kationen [kg/h] (22.08.2024-Serienbetrieb) (5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat) ....	61
Tabelle 12: PN-Resultate vom 29.08.2024 → Nährstoffe [mg/l] (1 = Rohwasser; 2 = VOF, 3 = NF Permeat, 4 = HUO-Feinfilter, 5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED1-Konzentrat, 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat).....	61
Tabelle 13: PN-Resultate vom 29.08.2024 → Anionen / Kationen [mg/l] (1 = Rohwasser; 2 = VOF, 3 = NF Permeat, 4 = HUO-Feinfilter, 5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED1-Konzentrat, 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat).....	64
Tabelle 14: Frachtberechnung → Anionen / Kationen [kg/h] (29.08.2024) (1 = Rohwasser; 2 = VOF, 3 = NF Permeat, 4 = HUO-Feinfilter, 5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED1-Konzentrat, 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat).....	66

Tabelle 15: PN-Resultate vom 02.09.2024 → HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [°dH] (6 = HUO-Konzentrat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED1-Konzentrat).....	67
Tabelle 16: PN-Resultate vom 22.07.2024 → Spurenstoffe ( <b>positiv</b> ) [ng/l] (1 = Rohwasser; 2 = VOF, 3 = NF Permeat, 4 = HUO-Feinfilter, 5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, 7 = ED1-Diluat, 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat).....	68
Tabelle 17: PN-Resultate vom 22.07.2024 → Spurenstoffe ( <b>negativ</b> ) [ng/l] (1 = Rohwasser; 2 = VOF, 3 = NF Permeat, 4 = HUO-Feinfilter, 5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, 7 = ED1-Diluat, 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat).....	69
Tabelle 18: PN-Resultate vom 22.08.2024 → Spurenstoffe ( <b>positiv</b> ) – Parallelbetrieb [ng/l] (M1 = ED1 Dil. + Konz. (PB), 3 = NF Permeat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED1-Konzentrat, M2 = ED2 Dil. + Konz. (PB), 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat).....	76
Tabelle 19: PN-Resultate vom 22.08.2024 → Spurenstoffe ( <b>negativ</b> ) – Parallelbetrieb [ng/l] (M1 = ED1 Dil. + Konz. (PB), 3 = NF Permeat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED1-Konzentrat, M2 = ED2 Dil. + Konz. (PB), 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat).....	76
Tabelle 20: PN-Resultate vom 22.08.2024 → Spurenstoffe ( <b>positiv</b> ) – Serienbetrieb [ng/l] (5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, M3 = ED2 Dil. + Konz. (SB), 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat).....	77
Tabelle 21: PN-Resultate vom 22.08.2024 → Spurenstoffe ( <b>negativ</b> ) – Serienbetrieb [ng/l] (5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, M3 = ED2 Dil. + Konz. (SB), 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat).....	78
Tabelle 22: PN-Resultate vom 29.08.2024 → Spurenstoffe ( <b>positiv</b> ) [ng/l] (1 = Rohwasser; 2 = VOF, 3 = NF Permeat, 4 = HUO-Feinfilter, 5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED1-Konzentrat, 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat).....	80
Tabelle 23: PN-Resultate vom 29.08.2024 → Spurenstoffe ( <b>negativ</b> ) [ng/l] (1 = Rohwasser; 2 = VOF, 3 = NF Permeat, 4 = HUO-Feinfilter, 5 = HUO-Permeat, 6 = HUO-Konzentrat, 7 = ED1-Diluat, 8 = ED1-Konzentrat, 9 = ED2-Diluat, 10 = ED2-Konzentrat).....	80
Tabelle 24: Berechnung der NaCl-Konzentrationen und NaCl-Leitfähigkeiten vom 22.07.2024 - Parallelbetrieb.....	88
Tabelle 25: Berechnung der NaCl-Konzentrationen und NaCl-Leitfähigkeiten vom 22.08.2024 - Parallelbetrieb.....	88
Tabelle 26: Berechnung der NaCl-Konzentrationen und NaCl-Leitfähigkeiten vom 22.08.2024 - Serienbetrieb.....	89
Tabelle 27: Berechnung der NaCl-Konzentrationen und NaCl-Leitfähigkeiten vom 29.08.2024 - Parallelbetrieb.....	89

# 11 Formelverzeichnis

Formel 1: Hypochoridbildung [Membranverfahren, 2007].....	14
Formel 2: Chlorgasbildung [Membranverfahren, 2007] .....	14
Formel 3: Sauerstoffbildung [Membranverfahren, 2007] .....	14
Formel 4: Wasserstoffbildung [Membranverfahren, 2007].....	14
Formel 5: Elektrolyse von Wasser [Wendt & Plzak, 1991].....	14
Formel 6: Stromdichte .....	15
Formel 7: Fracht-Berechnung [mg/h] [Hilden, 2003].....	45
Formel 8: NaCl-Konzentration .....	45
Formel 9: Reinwasserausbeute [%].....	46
Formel 10: Salzpassage [%].....	46
Formel 11: Salzurückhalterate [%].....	46

## 12 Abkürzungsverzeichnis

Alle Abkürzungen, die in dieser Diplomarbeit verwendet wurden, werden hier angeführt.

VOF	Vorfiltration
NF	Nanofiltration
HUO	Hochdruck-Umkehrosmose
ED	Elektrodialyse
NaOH	Natriumhydroxid
HCl	Salzsäure
GAC	granulierte Aktivkohle
DOC	gelöster organischer Kohlenstoff
NaCl	Natriumchlorid
CaCl <sub>2</sub>	Calciumchlorid
MgCl <sub>2</sub>	Magnesiumchlorid
CIP	Cleaning in Place
CEF	Chemical enhanced flush