



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

## DIPLOMARBEIT

Vergleich unterschiedlicher Aufbauten einer kompakten  
Membranentsalzungsanlage zur Trinkwassergewinnung und deren Effekt  
auf die Trennleistung

Ausgeführt am Institut für  
E166 Verfahrens-, Umwelttechnik und technische Biowissenschaften  
der Technische Universität Wien

unter der Anleitung von Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Harasek Michael**

durch **Anna Frena**, BSc.

*Anna Frena*

September 2022

## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst habe, dass ich die verwendeten Quellen und Hilfsmittel vollständig angegeben habe und dass ich die Stellen der Arbeit – einschließlich Tabellen und Abbildungen –, die anderen Werken oder dem Internet im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht habe.

Wien, 01.09.2022

*Anna Frena*  
Anna Frena, BSc.

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich beim Fertigstellen dieser Arbeit unterstützt haben, sei es durch fachliche Kompetenz oder durch offene Ohren für meine Anliegen.

Hierbei möchte ich mich besonders bei meinen Eltern, Angelika und Gerhard, für ihre Geduld mit mir und dafür, dass sie mich beide bedingungslos unterstützen, bedanken. Gleichzeitig möchte ich mich auch bei meinen Brüdern, Bernhard und Fabian, bedanken, die mir ebenfalls eine große Stütze sind und immer wissen, wie man mich wieder fokussieren kann.

Ebenfalls möchte ich mich bei meinem Betreuer Herrn Professor Dr. Michael Harasek bedanken, der mit seinem Input das Beste aus meiner Arbeit geholt hat und mir geholfen hat, diese durch seine Expertise noch zu verfeinern. Danke auch an Christian Jordan, der mit mir sein Wissen über Wasserentsalzung geteilt hat und mit dem ich die Verläufe der Messungen besprechen konnte.

Natürlich gilt auch mein Dank Frau Professor Dr. Margit Gföhler und ihrer Arbeitsgruppe, insbesondere Markus, Georgios und Christoph, die ich oft mit Fragen löchern konnte und die mir geholfen haben, wenn ich mit meinem Aufbau nicht mehr weitergekommen bin.

Thilo Wuest von der Firma Suez möchte ich hier auch nochmal speziell danken, da durch seine Hilfe und die Bereitstellung der Wickelmembranen und des dazugehörigen Gehäuses die Messungen überhaupt stattfinden konnten.

"Last, but not least", wie es so schön auf Englisch heißt, möchte ich mich bei allen bedanken, die mich außerhalb meiner Diplomarbeit und den vielen Messreihen unterstützt haben und mich durch strategische Ablenkungen aus meinen Gedanken losgerissen haben. Damit konnte ich mich ausruhen und mit neuer Kraft und die Messungen setzen und mich anschließend besser auf das Schreiben konzentrieren. Danke Stefan, Uli, Martin, Yuuri, Georg und den Turnern für die lustigen Stunden fern von der Universität.

## Kurzfassung

Diese Arbeit befasst sich mit dem Thema einstufiger Entsalzung von Salzwasser zu Trinkwasser durch Umkehrosmose, mit einem möglichst kompakten Aufbau. Dazu wurden zwei verschiedene Systeme miteinander verglichen.

Zunächst ist ein simpler Aufbau zusammengestellt worden, bestehend aus einem Motor, einer Pumpe und einem Membranmodul. Mittels dieses Aufbaus wurden drei verschiedene Salzwasserkonzentrationen - 2.000ppm, 10.000ppm und 20.000ppm - mit unterschiedlichen Eingangsdrücken entsalzen und deren elektrische Leitfähigkeit, mit dazugehöriger Temperatur, sowie die Ausbeute, sowohl des Permeats als auch des Retentats, gemessen. Ziel dieser Messungen war unter anderem zu ermitteln, ob eine simple einstufige Entsalzung auch gewünschte Ergebnisse im Trinkwasserbereich produzieren kann, oder ob eine weitere Auftrennung hierfür nötig wäre.

Der zweite Aufbau fügte dem System zusätzlich einen Druckaustauscher und eine weitere Pumpe als Energierückgewinnung auf der Permeatseite hinzu, womit das aufkonzentrierte Salzwasser noch einmal durch die Membran geschickt wurde. Bei gleichen Rohwasserkonzentrationen wie zuvor und ebenfalls variierenden Eingangsdrücken wurden die gleichen Messungen wie im anderen System vorgenommen.

Die erlangten Messergebnisse der beiden Anlagen wurden miteinander verglichen, um zu eruieren ob sich durch die Energierückgewinnung in dem System mehr entsalztes Wasser gewinnen lässt bei geringeren Druck und ob sich etwas an der Salzkonzentration des aufgetrennten Trinkwassers verändert.

Aus den Resultaten ist zu erkennen, dass bei Verwendung einer Energierückgewinnung in der Anlage im Bereich von Brackwasser deutlich eine Verbesserung in allen wichtigen Punkten erreicht wird. Bei Meerwasserkonzentrationen ist der untersuchte Aufbau nicht effizient genug und liefert keine gewünschten Ergebnisse.

## Abstract

This Thesis concerns the desalination of saltwater using a reverse osmosis membrane. Just one membrane was used, for the purpose of creating the smallest possible system. Therefore two different designs were measured and compared.

The first design contained just a motor, a pump and the spiral-wound membrane module. Desalination at three different saltwater solutions - with concentrations of 2.000ppm, 10.000ppm and 20.000ppm - were conducted, alternating inlet pressures throughout. The resulting electrical conductivity, temperature and flow were measured in both the permeate and the retentate outlet. Amongst other things these measurements were used to conclude if single filtration with just one membrane can provide drinkable water or if another desalination cycle would be needed to achieve this goal.

The second design contained an additional pressure exchanger and a second pump at the outlet, as a form of energy recovery using the waste water, which re-cycles the ejected brine once more through the module. For the measurements on this system the same saltwater solutions were used, again alternating inlet pressure and taking the same measurements as before.

The results of both Systems were compared as to whether the pressure exchanger and the second pump resulted in a better flowrate of the clean drinking water under lower inlet pressure and whether there would be a significant change in the salt concentration in the permeate.

The result shows that the usage of energy recovery in the system yields an improvement in all significant data points in the range of brackish water, but for seawater the results were unable to achieve the desired goals.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Wasserverteilung und -verbrauch . . . . .	1
1.2	Problemstellung . . . . .	2
1.3	Vorgehen . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Theorien und Grundlagen</b>	<b>4</b>
2.1	Verschiedene Salzgehalte und ihre Auswirkungen auf den menschlichen Körper . . . . .	4
2.1.1	Definition Süß-, Brack- und Meerwasser . . . . .	4
2.1.2	Wasser- und Salzhaushalt im menschlichen Organismus . . . . .	5
2.2	Entsalzungsprozesse . . . . .	7
2.2.1	Mehrstufige Entspannungsanlagen . . . . .	7
2.2.2	Elektrodialyse . . . . .	8
2.2.3	Umkehrosmose . . . . .	9
2.3	Mathematische Beschreibungen . . . . .	16
2.3.1	Permeatfluss und Salzgleichgewicht . . . . .	16
2.3.2	Wassertransport . . . . .	16
2.3.3	Salztransport . . . . .	17
2.3.4	Konzentrationspolarisation . . . . .	18
2.3.5	Osmotischer Druck . . . . .	19
2.3.6	Elektrische Leitfähigkeit . . . . .	21
2.3.7	Temperaturkorrektur der elektrischen Leitfähigkeit . . . . .	21
2.3.8	Referenzmessungen der Salzkonzentrationen . . . . .	23
2.3.9	Druckaustauscher . . . . .	25
2.4	Voraussetzungen an die Membran und das System . . . . .	26
2.4.1	Vergleich verschiedener Wickelmembranmodule . . . . .	27
2.5	Auswahl der Messbereiche . . . . .	28
2.6	Beschreibung der Messaufbauten . . . . .	29
2.6.1	Messaufbau ohne Druckaustauscher . . . . .	29
2.6.2	Messaufbau mit Druckaustauscher . . . . .	31
2.7	Vorfiltration und Reinigung des Membranmoduls . . . . .	33
2.7.1	Vorfilter . . . . .	33
2.7.2	Reinigung des Membranmoduls . . . . .	34
2.8	Nachbehandlung des gefiltertem Permeats . . . . .	35
2.9	Vergleich verschiedener Entsalzungsanlagen aus der Literatur . . . . .	36
<b>3</b>	<b>Versuchsergebnisse und Diskussion</b>	<b>40</b>
3.1	Ergebnisse der Testmessungen . . . . .	40
3.1.1	Ergebnisse der 1.Testmessung . . . . .	41
3.1.2	Ergebnisse der 2.Testmessung . . . . .	46
3.2	Ergebnisse der 1.Messreihe . . . . .	51
3.2.1	Messungen ohne Energierückgewinnung . . . . .	52
3.2.2	Messungen mit Energierückgewinnung . . . . .	56
3.3	Ergebnisse der 2.Messreihe . . . . .	62
3.3.1	Messungen ohne Energierückgewinnung . . . . .	62
3.3.2	Messungen mit Energierückgewinnung . . . . .	66

<b>4</b>	<b>Diskussion der zusammengefassten Messergebnisse</b>	<b>74</b>
4.1	Vergleich der Testmessungen . . . . .	74
4.2	Vergleich der Resultate der 1. Messreihen . . . . .	77
4.3	Vergleich der Resultate der 2. Messreihen . . . . .	78
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>82</b>

# Abbildungsverzeichnis

1	Tagesverbrauch von Wasser pro Kopf in Österreich [4] . . . . .	1
2	Fotografie der kompakten Entsalzungsanlage auf dem Gepäckträger eines Fahrrades	3
3	Schema mehrstufige Entspannungsanlage . . . . .	8
4	Schema Elektrodialyse . . . . .	9
5	Prinzip Osmose . . . . .	10
6	Prinzip Umkehrosmose . . . . .	11
7	Hohlfasermembran . . . . .	12
8	Aufbau einer spiralförmig gewickelten Membranbahn [15] . . . . .	13
9	Veränderter Fluss durch Membranbahn eines Wickelmembranmoduls [17] . . . . .	14
10	Modulschaltungen bei mehreren Modulen [18] . . . . .	15
11	Darstellung des osmotischen Drucks von verschiedenen Salzgehalten im Wasser . .	20
12	Der Einfluss unterschiedlicher Salzkonzentrationen auf die elektrische Leitfähigkeit und deren Trendlinie . . . . .	23
13	Foto des Versuchsaufbaus ohne Energierückgewinnung . . . . .	30
14	Schaltplan der Anlage ohne Energierückgewinnung . . . . .	30
15	Foto des Versuchsaufbaus mit Energierückgewinnung . . . . .	31
16	Schaltplan der Anlage mit Energierückgewinnung . . . . .	32
17	Funktionsschema eines Rotationsdruckaustauschers . . . . .	33
18	Salzgehalte im Permeat der 1. Testmessung bei unterschiedlichen angelegten Drücken auf das System . . . . .	44
19	Salzrückhalt der Membran der 1. Testmessung bei unterschiedlichen Transmembranflusses . . . . .	45
20	Salzkonzentrationen im Permeat bei angewendeten Drücken von 16 und 24 bar bei der 2. Testmessung . . . . .	49
21	Salzrückhalt der Membran bei unterschiedlichen Transmembranflüssen bei der 2. Testmessung . . . . .	50
22	Das Verhältnis der Trinkwasserausbeute der Membran zu unterschiedlichen Transmembranflüssen und Salzkonzentrationen des Rohwassers bei der 2. Testmessung .	51
23	Salzgehalt des Permeats bei den angelegten Drücken von 16, 24, 25 und 35 bar bei unterschiedlichen Ausgangskonzentrationen des Feedwassers ohne Energierückgewinnung bei der 1. Messreihe . . . . .	55
24	Salzrückhalt SR der Membran bei unterschiedlichen spezifischen Transmembranflüssen $Q_{Op}$ der 1. Messreihe ohne Verwendung einer Energierückgewinnung . . . . .	56
25	Salzkonzentrationen des Permeats der 1. Messreihe unter variierenden Drücken und Einsatz einer Energierückgewinnung . . . . .	60
26	Salzrückhalts SR der 1. Messreihe bei unterschiedlichen spezifischen Transmembranflüssen $Q_{Op}$ unter Verwendung einer Energierückgewinnung . . . . .	61
27	Salzkonzentrationen des Permeats der 2. Messreihe unter bestimmten Drücken ohne Einsatz einer Energierückgewinnung . . . . .	65
28	Salzrückhalt SR in der 2. Messreihe bei unterschiedlichen spezifischen Transmembranflüssen $Q_{Op}$ ohne Verwendung einer Energierückgewinnung . . . . .	66
29	Salzkonzentration im Permeat der 2. Messreihe bei unterschiedlichen Drücken unter Einsatz einer Energierückgewinnung und gehemmten Retentatfluss . . . . .	70

30	Salzrückhalt SR der Membran der 2. Messreihe unter unterschiedlichen spezifischen Transmembranflüssen $Q_{Op}$ unter Verwendung einer Energierückgewinnung und gehemmten Retentatfluss . . . . .	71
31	Salzkonzentration der Permeats der 2. Messreihe bei unterschiedlichen Drücken unter Einsatz einer Energierückgewinnung und ungehemmten Retentatfluss . . . . .	72
32	Salzrückhalt SR der Membran der 2. Messreihe bei unterschiedlichen spezifischen Transmembranflüssen $Q_{Op}$ unter Verwendung einer Energierückgewinnung und ungehemmtem Retentatfluss . . . . .	73
33	Vergleich des Unterschiedes in der Salzkonzentration des Permeats der beiden Testmessungen . . . . .	75
34	Vergleich des Salzrückhaltes der Membran der beiden Testmessungen . . . . .	76
35	Vergleich der Salzkonzentrationen des Permeats von einem Aufbau mit Energierückgewinnung und einem ohne für die 1. Messreihe . . . . .	77
36	Vergleich des Salzrückhalts der Membran bei Anlagen mit und ohne Energierückgewinnung für die 1. Messreihe . . . . .	78
37	Vergleich der Salzkonzentrationen bei Anlagen mit und ohne Energierückgewinnung und gehemmten Retentatfluss für die 2. Messreihe . . . . .	79
38	Vergleich der Salzkonzentrationen bei Anlagen mit und ohne Energierückgewinnung und ungehemmten Retentatfluss für die 2. Messreihe . . . . .	79
39	Vergleich des Salzrückhalts der Membran bei Anlagen mit und ohne Energierückgewinnung und gehemmten Retentatfluss für die 2. Messreihe . . . . .	80
40	Vergleich des Salzrückhalts der Membran bei Anlagen mit und ohne Energierückgewinnung und ungehemmten Retentatfluss für die 2. Messreihe . . . . .	81
41	Fotografie, die die Ausbeulungen und die metallischen Ablagerungen an der Membran zeigt . . . . .	84
42	Funktionsweise einer Clarkpumpe [36] . . . . .	85
43	Fotografie des Aufbaus der Entsalzungsanlage auf einem Fahrrad . . . . .	86

## Tabellenverzeichnis

1	Osmotischer Druck verschiedener Konzentrationen . . . . .	19
2	Leitfähigkeit von verschiedenen Referenzmessungen . . . . .	24
3	Liste Membranmodule . . . . .	28
4	Wichtiger Elektrolytbedarf des Körpers und Werte im Trinkwasser . . . . .	35
5	Messergebnisse der 1. Testmessung einer Salzkonzentration von 1.000ppm . . . . .	41
6	Berechnete Ergebnisse der 1. Testmessung einer Salzkonzentration von 1.000ppm . . . . .	41
7	Messergebnisse der 1. Testmessung einer Salzkonzentration von 3.000ppm . . . . .	42
8	Berechnete Ergebnisse der 1. Testmessung einer Salzkonzentration von 3.000ppm . . . . .	42
9	Messergebnisse der 1. Testmessung einer Salzkonzentration von 6.000ppm . . . . .	42
10	Berechnete Ergebnisse der 1. Testmessung einer Salzkonzentration von 6.000ppm . . . . .	43
11	Messergebnisse der 1. Testmessung einer Salzkonzentration von 8.000ppm . . . . .	43
12	Berechnete Ergebnisse der 1. Testmessung einer Salzkonzentration von 8.000ppm . . . . .	43
13	Messergebnisse der 2. Testmessung einer Salzkonzentration von 1.000ppm . . . . .	46
14	Berechnete Ergebnisse der 2. Testmessung einer Salzkonzentration von 1.000ppm . . . . .	47
15	Messergebnisse der 2. Testmessung einer Salzkonzentration von 8.000ppm . . . . .	47
16	Berechnete Ergebnisse der 2. Testmessung einer Salzkonzentration von 8.000ppm . . . . .	47
17	Messergebnisse der 2. Testmessung einer Salzkonzentration von 10.000ppm . . . . .	48
18	Berechnete Ergebnisse der 2. Testmessung einer Salzkonzentration von 10.000ppm . . . . .	48
19	Messergebnisse der 1. Messreihe ohne Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 2.000ppm . . . . .	52
20	Berechnete Ergebnisse der 1. Messreihe ohne Energierückgewinnung einer Salzkonzentration von 2.000ppm . . . . .	52
21	Messergebnisse der 1. Messreihe ohne Energierückgewinnung einer Salzkonzentration von 10.000ppm . . . . .	53
22	Berechnete Ergebnisse der 1. Messreihe ohne Energierückgewinnung einer Salzkonzentration von 10.000ppm . . . . .	53
23	Messergebnisse der 1. Messreihe ohne Energierückgewinnung einer Salzkonzentration von 20.000ppm . . . . .	54
24	Berechnete Ergebnisse der 1. Messreihe ohne Energierückgewinnung einer Salzkonzentration von 20.000ppm . . . . .	54
25	Messergebnisse der 1. Messreihe mit Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 2.000ppm . . . . .	57
26	Berechnete Ergebnisse der 1. Messreihe mit Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 2.000ppm . . . . .	57
27	Messergebnisse der 1. Messreihe mit Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 10.000ppm . . . . .	57
28	Berechnete Ergebnisse der 1. Messreihe mit Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 10.000ppm . . . . .	58
29	Messergebnisse der 1. Messreihe mit Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 20.000ppm . . . . .	58
30	Berechnete Ergebnisse der 1. Messreihe mit Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 20.000ppm . . . . .	59
31	Messergebnisse der 2. Messreihe ohne Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 2.000ppm . . . . .	62

32	Berechnete Ergebnisse der 2. Messreihe ohne Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 2.000ppm . . . . .	63
33	Messergebnisse der 2. Messreihe ohne Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 10.000ppm . . . . .	63
34	Berechnete Ergebnisse der 2. Messreihe ohne Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 10.000ppm . . . . .	63
35	Messergebnisse der 2. Messreihe ohne Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 20.000ppm . . . . .	64
36	Berechnete Ergebnisse der 2. Messreihe ohne Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 20.000ppm . . . . .	64
37	Messergebnisse der 2. Messreihe mit Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 2.000ppm . . . . .	67
38	Berechnete Ergebnisse der 2. Messreihe mit Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 2.000ppm . . . . .	67
39	Messergebnisse der 2. Messreihe mit Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 10.000ppm . . . . .	68
40	Berechnete Ergebnisse der 2. Messreihe mit Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 10.000ppm . . . . .	68
41	Messergebnisse der 2. Messreihe mit Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 20.000ppm . . . . .	69
42	Berechnete Ergebnisse der 2. Messreihe mit Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 20.000ppm . . . . .	69

# 1 Einleitung

## 1.1 Wasserverteilung und -verbrauch

Die Wasserverteilung auf unserem Planeten ist ungleich verteilt, besonders in Bezug auf den Zugang zu sicheren Trinkwasser. Laut Angaben der WHO hatten 2015 etwa 2,3 Milliarden Menschen nur unsicheren Zugang zu Trinkwasser [1]. Das bedeutet weite Wege bis zur nächsten sicheren Wasserquelle, beziehungsweise keine Möglichkeit zur Reinigung von nahen, ungesicherten Wasserquellen, wie Brunnen, oder Wasser aus Seen, Flüssen oder Teichen.

Dies ist besorgniserregend, da Trinkwasser für das menschliche Überleben zwingend notwendig ist. Eine erwachsene Person in gemäßigten Breitengraden sollte optimalerweise 2-3 Liter pro Tag zu sich nehmen [2], doch dieser Bedarf kann von Person zu Person und durch äußere Einflüsse, wie das Klima, variieren. Aufgrund dieser Unverzichtbarkeit von Wasser haben die UN deshalb 2010 den Zugang zu sicherem Wasser zu einem fundamentalen Menschenrecht erklärt [3].

In Österreich stellt die Versorgung von genügend Trinkwasser keine große Herausforderung dar, denn hierzulande sind wir in der glücklichen Situation über größere Grundwasservorkommen und Quellen, bei einem gemäßigteren Klima, zu verfügen. Somit ist es nicht verwunderlich, dass sich laut dem Bundesministerium für Landwirtschaft, Region und Tourismus der durchschnittliche Wasserbedarf einer Person pro Tag auf ungefähr 130 Liter beläuft.

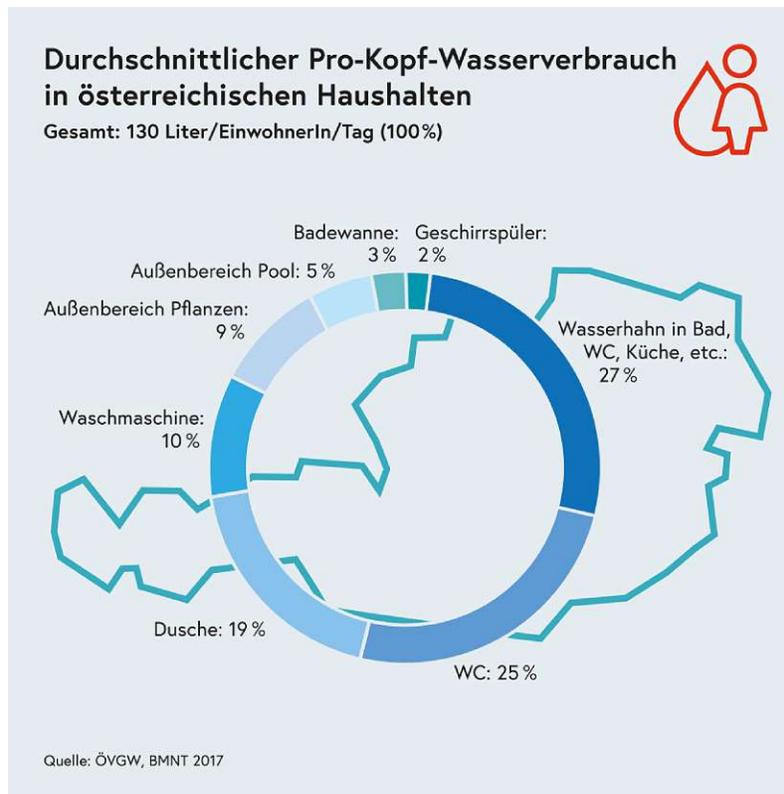


Abbildung 1: Tagesverbrauch von Wasser pro Kopf in Österreich [4]

Dabei sind die Spitzenreiter das Baden und Waschen mit 22%, die Toilettenspülung mit 25% und der Wasserhahn mit 27% [4].

Sieht man aber über die Landesgrenzen hinweg, bemerkt man, dass bereits einige europäische Länder, wie zum Beispiel Spanien, mit Wassermangel zu kämpfen haben. Sie verfügen nicht über große Grundwasservorkommen oder Hochquellen und müssen ihre Wasserversorgung über kompliziertere Wege abdecken. Länder in Südamerika, Asien, Afrika und insbesondere Zentralafrika sind jedoch häufig von weit gravierenderen Problemen in der Wasserversorgung betroffen. Dies wirkt sich auf die lokale Politik aus und macht Wasser zu einem Handelsgut, was speziell ärmere Regionen wiederum stärker trifft.

Dürreperioden und der zunehmende Klimawandel sorgen für einen stetigen Anstieg dieser Probleme, sogar in Österreich. Wir sehen, dass auch hier immer öfter lange Trockenzeiten herrschen mit wenig Niederschlag. In Ländern, welche ohnehin schon mit einem Wassermangel zu kämpfen haben, sind diese Dürreperioden akut lebensbedrohend. Dadurch verschärft sich der Zustand für die 2,3 Milliarden Menschen, die sich bereits im Normalfall um eine Wasserversorgung anstrengen müssen, zusehends.

Dabei könnte man sich nüchtern betrachtet durchaus wundern, wie Wassermangel überhaupt möglich ist, wenn die Erdoberfläche zu 71% aus Wasser besteht. Doch nur 3% dieses Wassers ist Süßwasser und kommt vor allem in Form von Eis in den Polarkappen und Gletschern vor [5]. Der erheblich höhere Anteil des Wassers ist Salzwasser, welches ohne Verarbeitung keine Option für die Deckung des täglichen Wasserbedarfs von Menschen darstellt.

## 1.2 Problemstellung

Doch aufgrund dieser hohen Unterschiede zwischen Süß- und Salzwasser nutzen viele Länder bei Salzwassermangel große Wasserentsalzungsanlagen um ihren Bedarf zu decken, sofern sie über einen Meereszugang verfügen und sich die Kosten leisten können. Spitzenreiter hier sind Länder wie Saudi-Arabien, die Vereinigten Arabischen Emirate und Israel. Dieses Wasser ist aber nur sehr lokal genutzt. Ein Transport in abgelegene Regionen, wie Inselgruppen oder kleine Ansiedlungen in den ländlichen Regionen, ist durch diese Anlagen nicht vorgesehen, da sie große umliegende Städte mit Wasser versorgen. Um Trinkwassergewinnung durch Entsalzung auch für diese Regionen für den täglichen Bedarf der Einwohner zu ermöglichen bräuchte es kleinere Anlagen, die autark vom Stromnetz betrieben werden können. Im besten Fall sind diese möglichst klein und transportfähig, damit auch etwas weiter entfernte Brack- oder Salzwasser Zugänge nutzbar gemacht werden können. Bestehende Ansätze sind oft kleine Entsalzungsanlagen, die durch erneuerbare Energien, wie Photovoltaik oder Windenergie, betrieben werden können. Sie sind jedoch meistens nicht für den Transport konzipiert und bei Mangel an Windenergie oder Sonneneinstrahlung können sie auch nicht betrieben werden.

Um auch den entlegensten Gegenden eine effiziente Trinkwassergewinnung über Entsalzung zu ermöglichen wird ein System benötigt, das unabhängig von Stromnetzen oder externen Elektrizitätsquellen auskommt, betrieben nur mit Muskelkraft. Das System muss portabel sein, mit einem möglichst einfachen Aufbau um Wartung und Fehlerquellen gering zu halten. Es muss robust sein, einfach in der Handhabung und kleine Haushalte durch einen Aufwand von wenigen Stunden mit genügend Trinkwasser versorgen können.

### 1.3 Vorgehen

Damit die Ziele solch eines Systems erreicht werden konnten, wurde eine Anlage konzipiert, welche aus 100 Liter Salzwasser pro Stunde durch Umkehrosmose 10 Liter/Stunde trinkbares Wasser produzieren kann. Das gesamte System hat die Form eines umgebauten Fahrrads. Die Komponenten der Entsalzungsanlage finden auf dem Gepäckträger Platz, der Antrieb des Fahrrads dient neben der Mobilität des Systems auch zum Betrieb der Pumpe. Das aufgetrennte Wasser wird direkt in einen mitgeführten Wassertank geleitet. Das gesamte System lässt sich so mit dem Fahrrad zur Salzwasserquelle befördern und anschließend das entsalzte Trinkwasser wieder zum Haushalt.



Abbildung 2: Fotografie der kompakten Entsalzungsanlage auf dem Gepäckträger eines Fahrrades

Aufgabe dieser Arbeit war ausschließlich der Teilbereich der Wasserentsalzung mittels Umkehrosmose. Weitere Teilbereiche des Projektes beschäftigten sich mit dem Pumpenantrieb und dem Gesamtaufbau. Für diese Arbeit wurden unterschiedliche Aufbauten, deren Effekte auf die Trennleistung und Nutzbarkeit für das angedachte Gesamtsystem untersucht. Dazu wurden zwei unterschiedliche Anlagen aufgebaut, die eine ohne und die andere mit Energierückgewinnung. Die Ergebnisse wurden bei unterschiedlichen Einlass-Drücken und Salzgehalten im Rohwasser verglichen. Dadurch konnten Empfehlungen für das effektivste System für den weiteren Verlauf des Projektes gegeben werden um die geforderten Ziele in Effizienz, Mobilität und Aufbau erreichbar zu machen.

## 2 Theorien und Grundlagen

### 2.1 Verschiedene Salzgehalte und ihre Auswirkungen auf den menschlichen Körper

Um die Effizienz der Anlage bewerten zu können ist es notwendig zu verstehen, wie unterschiedliche Salzgehalte auf den menschlichen Körper wirken und insbesondere, ab welchen Werten Wasser für den Organismus in der Regel nicht mehr schädlich ist.

Zu diesem Zweck bietet dieses Kapitel einen knappen Überblick über generelle Bereiche von Salzgehalten in Wasser und den Einfluss von Salz auf den menschlichen Stoffwechsel.

#### 2.1.1 Definition Süß-, Brack- und Meerwasser

Wasser wird nach dem Salzgehalt grundsätzlich in die Bereiche Süß-, Brack- und Meerwasser unterteilt. Diese Einteilung erfolgt aufgrund des prozentualen Salzgehaltes, beziehungsweise des Salzgehaltes in "Parts Per Million"(ppm) und ist folgendermaßen:

- **Süßwasser:** Man spricht von Süßwasser bei einem Salzgehalt von unter 0,05%. Dies entspricht einer Salzkonzentration von 500 ppm im Wasser, oder Wasser mit gelösten Feststoffen  $< 1.000$  ppm [6].
- **Salzwasser:** Generell wird Salzwasser mit einem Salzgehalt von über 0,05% [7] definiert und in Brack- und Meerwasser unterteilt:
  - **Brackwasser:** Da der ganze Bereich, der zwischen Süß- und Meerwasser liegt, Brackwasser genannt wird liegt die Salzkonzentration hier zwischen 0,05% und etwa 3,0% [8]. Dies entspricht einer Salzkonzentration zwischen 500 und 30.000 ppm.
  - **Meerwasser:** Von Meerwasser spricht man, wenn ein Salzgehalt von 3,0% überschritten wird. Allgemein liegt der Salzgehalt der Weltmeere zwischen 3,3–3,7% [9], oder 33.000 - 37.000 ppm.

In der Regel sollte Trinkwasser den Bereich von 1.000 ppm und im besten Fall 500 ppm<sup>1</sup> nicht überschreiten. Jedoch ist dies nicht zwanghaft eine Grenze, die generell gut oder schlecht für den Salzhaushalt des menschlichen Organismus ist, denn je nach Lebensraum nehmen Menschen auch höhere Salzgehalte im Trinkwasser zu sich, ohne selbst Defizite dadurch zu merken [10].

In Wien ist eine Grenze von 200 ppm [11] sowohl für Chlorid, als auch für Natrium vorgesehen und eine maximale Leitfähigkeit von 2.500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  bei 20°C<sup>2</sup>. Das entspricht etwa einer Konzentration von 1.444 ppm. Dabei werden beide Werte bei Weitem unterschritten mit einem Bereich von 1 - 2,3 ppm Natrium und Chlorid im Wasser und einer elektrischen Leitfähigkeit von 208 - 274  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , entspricht umgerechnet einem Salzgehalt von 120 bis 158ppm.

Folgend aus der Definition aus dem Wörterbuch der Ökologie [6] [8] [9], den Grenzen der Stadt Wien für Trinkwasser, dem Umrechnungsfaktor aus dem Kapitel 2.3.8 „Referenzmessungen der Salzkonzentrationen“ und den verschiedenen Unterteilungen für die Betriebsbereiche von Herstellern für Umkehrosmodulare von Brackwasser und Salzwasser, wurde die Aufteilung der Wasserbereiche für diese Arbeit folgendermaßen definiert:

- Süßwasser: Bis 1.000ppm , bis 1,73 mS/cm

<sup>1</sup>Ausgehend von der Empfehlung der WHO pro Tag nur bis zu 5g Salz zu sich zu nehmen [12], sollte Trinkwasser 5 mg/l nicht überschreiten.

<sup>2</sup>Dieser Wert entspricht dem EU-Grenzwert für Trinkwasser [13]

- Brackwasser: 1.000 - 10.000ppm, 1,73 - 17,32 mS/cm
- Meerwasser: 10.000ppm, wobei Meerwasser gewöhnlich zwischen 30.000ppm und 35.000ppm liegt, was einer Leitfähigkeit von 51,97 - 60,63 mS/cm entspricht.
- Trinkwasser: Ein Wert unterhalb von 500 ppm (0,87 mS/cm) ist wünschenswert, aber der Wert von 1.444 ppm sollte nicht überschritten werden.

### 2.1.2 Wasser- und Salzhaushalt im menschlichen Organismus

Ein erwachsener Mensch besteht ungefähr aus 60%-65% Wasser, wobei sich dieses in die zwei Flüssigkeitsräume Intra- (IZR 40%) und Extrazellularraum (EZR 25%) aufteilt [2]. Schon kleine Konzentrationsänderungen des Volumens und der Elektrolytkonzentration in diesen Räumen haben große Auswirkungen auf die Zellfunktionen, weshalb diese so gut wie möglich konstant gehalten werden und nur kleinste Schwankungen auftreten sollten.

Täglich sollten circa 2,5l Wasser [2] zu sich genommen werden, wobei der größte Teil durch Flüssigkeitsaufnahme direkt zu sich genommen wird. Reguliert wird der Wasser- und Salzhaushalt akut von der Niere, die durch Ausscheidung von Wasser und Salzen diesen im Gleichgewicht haltet. Wenn jedoch die Homöostase, auf Grund von vermehrten trinken oder Salzzunahme, aus dem Gleichgewicht kommt führt dies zu Dehydration und Hyperhydratation.

Zunächst muss beachtet werden, dass der Extrazellularraum und der Intrazellularraum durch eine semipermeable Membran, die Zellmembran, getrennt sind, welche Wasser besser durchlässt als Ionen. Daraus entstehen zwei Flüssigkeitsräume mit oft verschiedenen Konzentrationen, durch die mittels osmotischem Druck Wasser in die Zelle oder aus der Zelle befördert wird. Es gibt drei Störungen, welche in der Zelle auftreten können und unterschiedliche Effekte haben:

- **hypertone Störung im EZR:** durch die höhere Ionenkonzentration im EZR als im IZR bewirkt der osmotische Druck, dass das Wasser aus dem Intrazellularraum in den Extrazellularraum gedrückt wird, was zur Folge hat, dass die Zelle schrumpft
- **hypotone Störung im EZR:** im Gegensatz zur hypertonen Störung ist die Ionenkonzentration im IZR höher als im EZR und dadurch wird das Wasser in die Zelle hineingedrückt und diese schwillt an.
- **isotone Störung:** der osmotische Druck ist auf beiden Seiten gleich und kein Wasser wird verschoben.

Verschiedene Einflüsse auf den Körper können zu Dehydratationen oder Hyperhydratationen führen, welche mit diesen Störungen auf unterschiedliche Weise interagieren

#### Dehydration:

- **isotone Dehydration:** Es besteht der gleiche Mangel an Salz und Wasser, ausgelöst durch massiven Blutverlust (isotone Flüssigkeit). Dies betrifft ausschließlich den EZR.
- **hypertone Dehydration:** Es wird mehr Wasser als Salz verloren, etwa durch starkes Schwitzen, Durst oder Durchfälle. Dieser Wassermangel wird mittels Wasser aus dem IZR aufgefüllt, was zur Konsequenz hat, dass das Gesamtvolumen niedriger wird, die Osmolarität auf beiden Seiten aber steigt.

- **hypotone Dehydration:** Verlust von hypertonen Flüssigkeiten zum Beispiel durch Erbrechen. Das Gesamtvolumen wird auch hier vermindert, aber durch die verschiedenen Konzentrationen wird zusätzlich Wasser in den Intrazellularraum geschoben.

#### Hyperhydration:

- **isotone Hyperhydration:** Hier besteht ein Überschuss an Wasser und Salz, was den Extrazellularraum ausdehnt und den Intrazellularraum unverändert lässt.
- **hypertone Hyperhydration:** Wenn stark gesalzenes Wasser getrunken wird erhöht sich die Osmolarität im EZR und gleichzeitig wird zusätzliches Wasser vom IZR dahin verschoben. Schlussendlich wird das Gesamtvolumen gesteigert, da die Volumenzunahme im EZR die Abnahme im IZR übersteigt. Konkret bedeutet das, dass die Zelle von Innen ausgetrocknet wird, weil ihr das Wasser entzogen wird.
- **hypotone Hyperhydration:** Ist jedoch die Wassermenge viel größer als die Salzmenge, durch Trinken großer Mengen von Wasser mit geringer Osmolarität, wie zum Beispiel destilliertem Wasser, steigt zwar das Volumen im EZR, doch die Osmolarität sinkt und Wasser wird vom EZR in den IZR geschoben. Dies hat zur Folge, dass die Zelle von Innen stark überfüllt wird und somit platzen könnte.

Für diese Arbeit ist somit der Begriff der hypertonen Hyperhydration, welche auftritt, wenn zum Beispiel Salzwasser getrunken wird. Durch den Entzug des Wassers aus der Zelle wird der betroffenen Person vom Körper weiter ein Durstgefühl signalisiert. Die Salze können nicht mehr vom Körper mittels Urin ausgeschieden werden. Man könnte sagen der Körper trocknet sich selbst von Innen aus, obwohl Flüssigkeit zugeführt wird. Unter Anderem sind auch die roten Blutkörperchen betroffen, die durch den Wasserentzug die Eigenschaft verlieren können Sauerstoff aufzunehmen und somit zu transportieren, was eine Erstickung zur Folge hat.

Allgemein liegt der Natriumgehalt im Körper bei ungefähr 70-100g. Täglich werden zwischen 5-15g (circa 1 Teelöffel) Salz durch die Nahrung aufgenommen [2], dies ist auch gleich der vorgeschlagene maximal Wert der WHO [12].

All dies führt zu dem Schluss, dass Trinken von zu salzhaltigem Wasser schädliche, bis hin zu lebensbedrohende Auswirkungen hat, insbesondere über längere Zeiträume, in großen Mengen oder ohne sofortige Hilfeleistung.

## 2.2 Entsalzungsprozesse

Um Trinkwasser oder Süßwasser zu gewinnen gibt es mehrere Arten Salzwasser aufzutrennen. Viele dieser Methoden werden erfolgreich in großen Anlagen an Küstenregionen eingesetzt und gehören dort zur wichtigen Infrastruktur. Grob kann man die wichtigsten Entsalzungsverfahren unterteilen in drei große Gebiete und deren erfolgreichste Methoden:

- Destillation: mehrstufige Entspannungsverdampfung
- Ionenaustausch: Elektrodialyse
- Membranfiltration: Umkehrosmose

Doch nicht alle sind geeignet in Hinblick auf unser weiteres Projekt, deswegen soll in den folgenden Unterkapiteln auf die Vor- und Nachteile jeder dieser Methoden eingegangen und Beispiele ihrer Verwendung gezeigt werden.

### 2.2.1 Mehrstufige Entspannungsanlagen

Mehrstufige Entspannungsanlagen beruhen auf dem Prinzip der Destillation zur Gewinnung von Süßwasser aus Salzwasser. Diese Methode benötigt einen großen Energieaufwand. Damit genügend Wasser gefiltert werden kann, ist ebenfalls eine große Menge an Dampferzeugnis notwendig. So wird pro kg Heißdampf ungefähr 10 kg Süßwasser erzeugt. In industriellen Anlagen entspricht ein Dampferzeuger damit zum Beispiel der Größe eines Dampfkessels für Kraftwerke.

Ein Entspannungsverdampfer besteht aus zwei Hauptteilen, wobei der letzte Bauteil in drei weitere Kammern unterteilt werden kann:

- Enderhitzer (Heizzone)
- Wärmerückgewinnungszone (Entspannungszone):
  - Entspannungsteil
  - Dampf-Flüssigkeits-Trennteil
  - Kondensationsteil

Durch den Wärmerückgewinner wird Salzwasser in den Erhitzer oder Heißdampfkondensator gebracht und dort auf ca. 120°C erhitzt. Das dadurch auch entstehende Kondensat wird aufgefangen und wiederum in den Dampferhitzer zurückgeführt. Damit das Wasser in den zuführenden Rohren nicht verdampft, sondern nur erwärmt wird, wird der Druck stetig höher als der Sättigungsdruck gehalten.

Das erhitzte Salzwasser wird nun in die erste Entspannungsstufe gespeist, in der dieses mittels Entspannung auf einen niedrigeren Druck gebracht wird und so Verdampfungswärme entsteht. Der somit generierte Dampf wird nun durch den Dampf-Flüssigkeits-Trennteil in den Kondensationsteil geleitet, in dem die Wärme an die Sole, die in die Richtung des Enderhitzers läuft, abgegeben wird und dadurch kondensiert. Das Kondensat wird als Süßwasser abgefangen und gesammelt.

Die nicht kondensierbaren Gase werden abgesaugt und die verbleibende Sole im Wärmerückgewinner wird in die nächste Entspannungsstufe geleitet und der ganze Vorgang wiederholt. Gewöhnlich werden 12 bis 38 Kammern in der Wärmerückgewinnungszone durchlaufen bis die nicht mehr kondensierbare Konzentrat aus dem System ausgeschieden wird.

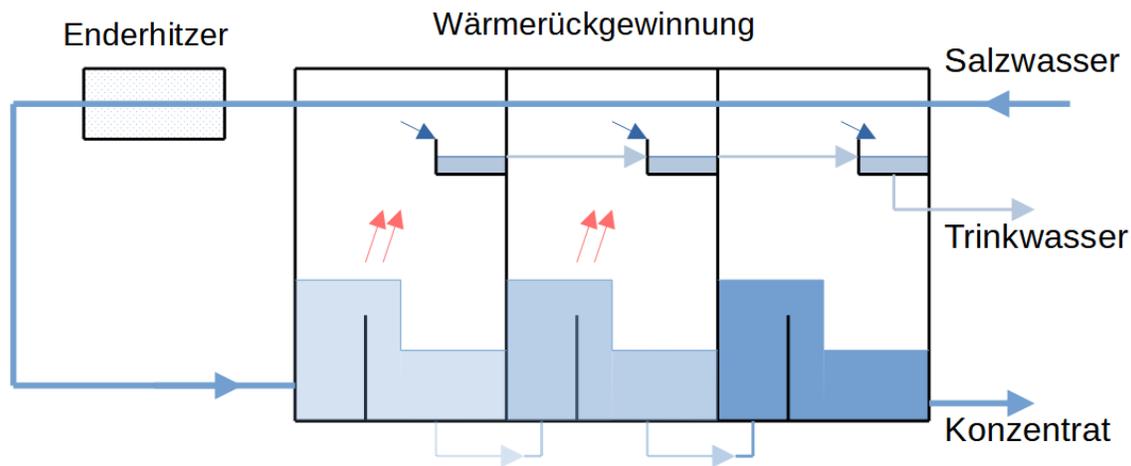


Abbildung 3: Schema mehrstufige Entspannungsanlage

Auch wenn diese Methode der Entsalzung seine Vorteile hat und zum Beispiel in der weltweit größten Meerwasserentsalzungsanlage Dschabal Ali südwestlich von Dubai verwendet wird, hat sie auch viele Nachteile. Besonders für unsere Verwendungszwecke ist sie nicht geeignet, da sie im Betrieb als einstufiges System nur eine relativ geringe Menge Trinkwasser im Vergleich zur verbrauchten Energie erzeugt und somit unwirtschaftlich ist. Ein zusätzliches Problem ist, dass sie aus aufwendigen Bauteilen besteht, die auch nicht von Laien gewartet werden kann.

### 2.2.2 Elektrodialyse

Elektrodialyse ist eine spezielle Form des Ionenaustauschverfahrens und wurde schon im Jahr 1928 entdeckt, doch erst mittels der Möglichkeit der künstlichen Herstellung von Ionenaustauscherharzen war es für den Gebrauch realisierbar.

Die Membran, die für die Filtration verantwortlich ist, besteht aus einem mit feinkörnigen Ionenaustauscherharzen befüllten Kunststoff. Eine Zelle der Elektrodialyse besteht aus mehreren Kammern, die abwechselnd durch kationen- und anionendurchlässige Membranen aufgebaut sind. Zusätzlich sind an den jeweiligen Endkammern Elektroden angebracht, die die elektrolytischen Vorgänge bewirken.

Wird nun eine Gleichspannung an die Elektrodialysezelle angelegt, werden das Chlorid, beziehungsweise das Natrium, dazu angeregt durch die jeweiligen Membranen in die Richtung der Anode oder Kathode zu wandern. Im anodischen Raum der Endkammern sammelt sich, zusätzlich zum Salz, auch noch Salzsäure und Sauerstoffgase und im kathodischen Raum Natronlauge und Wasserstoffgase.

In den Kammern zwischen den unterschiedlichen Membranen, also jeder Zweiten, sammelt sich reines Wasser, das am Ende als Süßwasserprodukt gesammelt werden kann. Die übrigen Kammern liefern aufkonzentrierte Sole, die wieder zurück in die Quelle, zum Beispiel das Meer, geleitet werden kann.

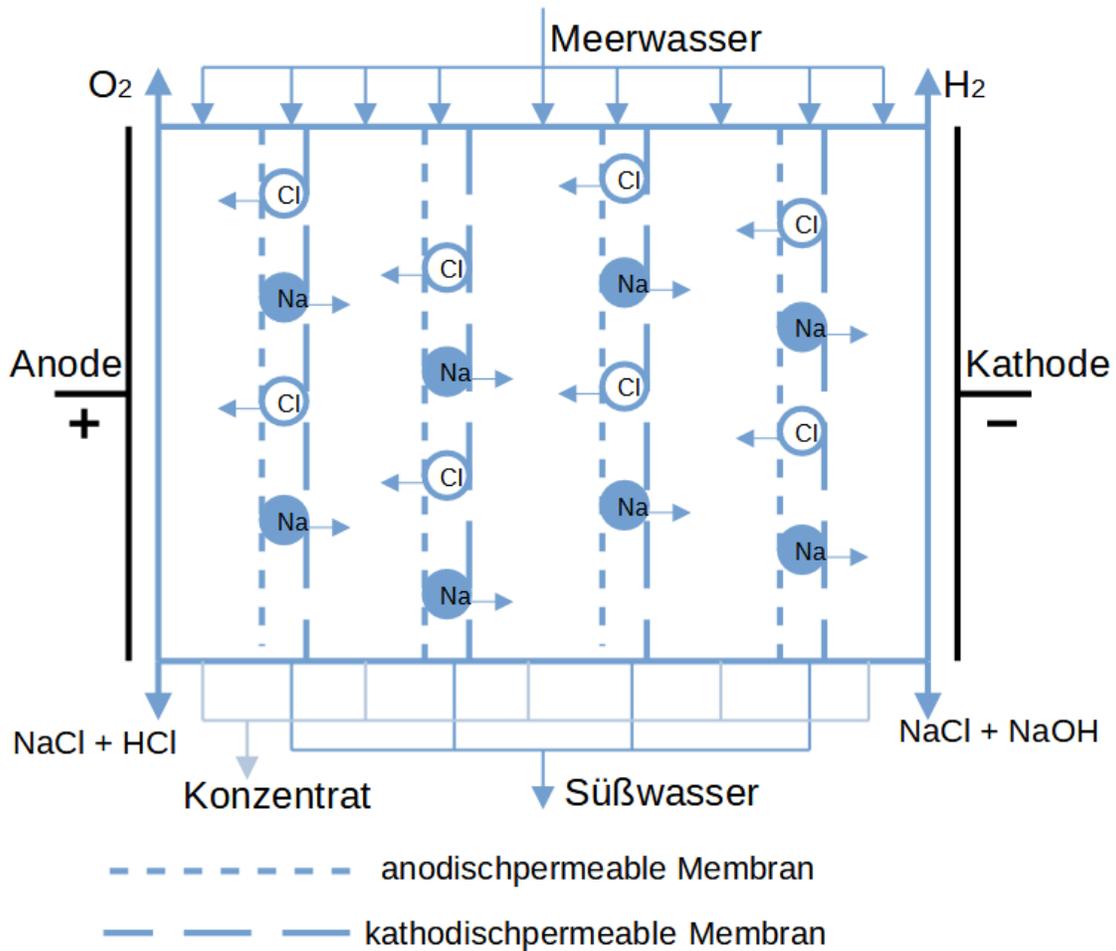


Abbildung 4: Schema Elektrodialyse

Obwohl der Energieaufwand beträchtlich geringer ist als zum Beispiel bei Umkehrosmoseanlagen, hat die Elektrodialyse für unsere Anwendung ein großes Problem, denn durch verschiedene Bestandteile des Rohwassers, wie organische oder ungelöste Anteile, kann die Membran schnell verstopfen und zusätzlich wird mit einer Verringerung der Salzkonzentration im Wasser die Filtration der Anlage gehemmt.

### 2.2.3 Umkehrosmose

Umkehrosmose, auch Reverse Osmosis genannt, hat sich vor allem wegen ihrer guten Trennleistung, besonders im Bereich der Entsalzung, der langen Verwendbarkeit bei guter Pflege, und der einfachen industriellen Herstellung durchgesetzt.

Die Technik der Umkehrosmose ist, wie schon der Name vermuten lässt, auf das Prinzip der Osmose zurückzuführen. Bei Osmose wird ein Fluss eines Lösungsmittels durch eine semipermeable Mem-

bran erzeugt. Dieser entsteht dadurch, dass ein hoher Konzentrationsunterschied auf den beiden Seiten einer Membran besteht und das System versucht diesen auszugleichen, indem aus der weniger konzentrierten Seite das Lösungsmittel genommen und auf der anderen Seite zugeführt wird, sodass die beiden unterschiedlichen Konzentrate nach einer gewissen Zeit ausgeglichener sind. Bei der Reverse Osmosis (RO) will man allerdings genau das Gegenteil erzielen, also keine Konzentrationsausgleichung, sondern eine Aufkonzentration, beziehungsweise eine Filtration, soll erreicht werden. Um dies zu bewerkstelligen ist eine bestimmte Druckdifferenz zwischen dem osmotischen Druck des zu filternden Wassers und den von außen angewendeten Druck nötig um den natürlichen Prozess der Osmose umzukehren.

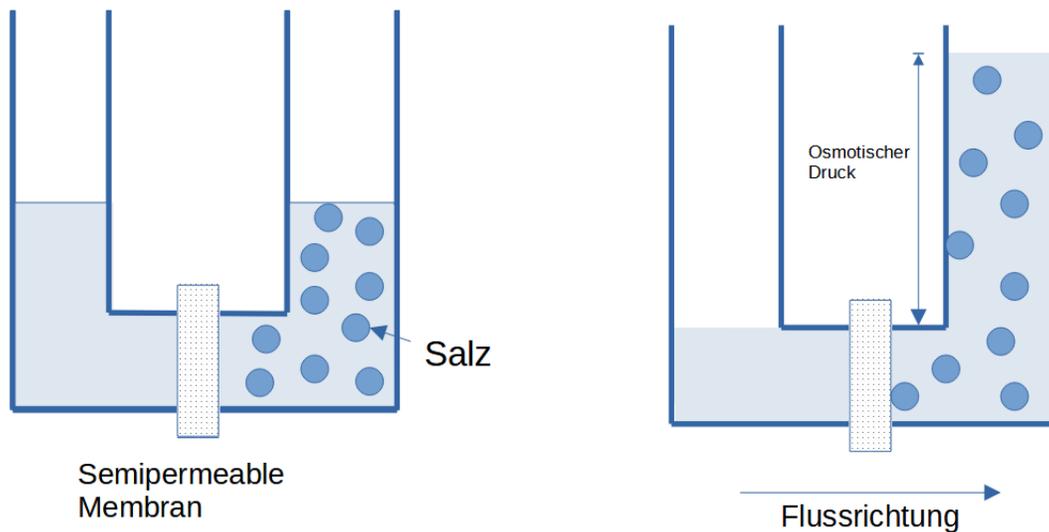


Abbildung 5: Prinzip Osmose

Abbildungen 5 und 6 kann man sehr gut sehen was der Unterschied zwischen Osmose und Umkehrosmose ist. Bei der Osmose wandert das reine Wasser sozusagen aus der linken Seite von alleine durch die semipermeable Membran auf die Salzwasserseite. Dabei werden die Volumen der beiden Seiten verändert, doch die Konzentration auf der rechten Seite wird deutlich geringer und nähert sich der anderen Seite an.

Wenn nun die Umkehrosmose betrachtet wird, sieht man, dass man eine externe Kraft braucht um den ausgeglichenen Zustand der Osmose umzukehren und eine Erhöhung des ungesalzenen Wassers zu erreichen. Die aufgewandte Kraft muss jedoch bei diesem Beispiel aufrecht erhalten werden, sofern keine Rückkehr zum Ausgangspunkt erwünscht ist.

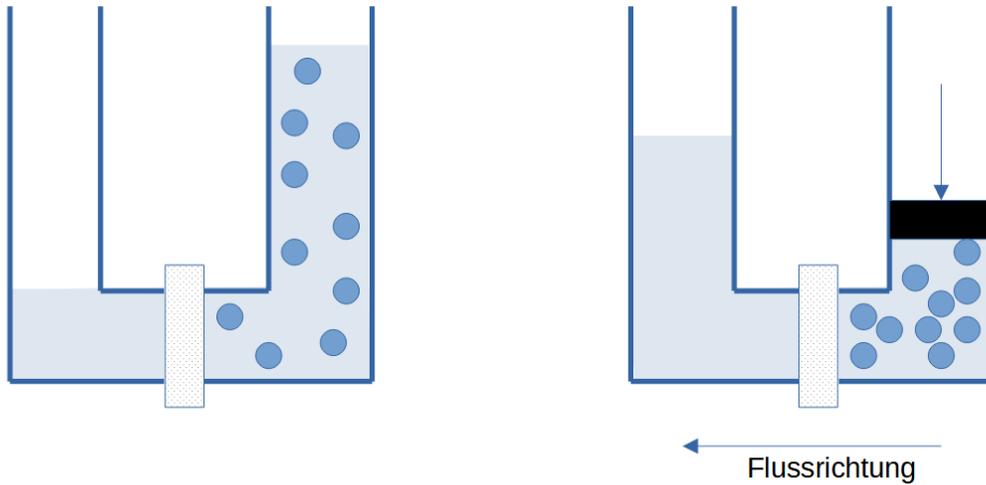


Abbildung 6: Prinzip Umkehrosmose

Um diesen Effekt auszunutzen gibt es zwei verschiedene Membrane, die dafür genutzt werden können:

- Wickelmembranmodule
- Hohlfasermembran

Wobei Erstere aus unterschiedlichen Gründen, die nachfolgend besprochen werden, hauptsächlich verwendet werden. Grundsätzlich unterscheiden sich beide durch ihren Aufbau.

#### **Hohlfasermembran:**

Grundsätzlich bestehen Hohlfasermembrane aus einem zylindrischen Druckgehäuse in dem sich zentral ein perforiertes Rohr befindet, das von langen, in der Hälfte gefalteten Bündeln von Hohlfasern umringt ist. Die offenen Faserenden sind in Harz fixiert und leiten das Wasser zum Auslass des Gehäuses, siehe Abbildung 7.

Diese Membrane können in zwei verschiedenen Arten betrieben werden, eine Filterung von Innen nach außen (In-Out) oder von Außen nach Innen (Out-In). Der Aufbau verändert sich dadurch nicht wesentlich, aber die gängigste ist die In-Out-Methode. Bei dieser Betriebsart wird das zu filternde Salzwasser unter Druck in der Mitte durch das perforierte Rohr eingelassen und breitet sich radial durch die Hohlfasern nach außen aus bis es an dem Retentatauslass gelangt. Durch den Druck wird das Wasser durch die Faserwände gedrückt und im hohlen Inneren zum Permeatauslass geleitet.

Aufgrund der resultierenden großen Membranfläche pro Volumeneinheit sind Hohlfasermembrane sehr kompakt, aber gleichzeitig anfällig für Scaling und Fouling, das zudem erheblich schwerer zu reinigen ist als bei Wickelmembranmodulen.

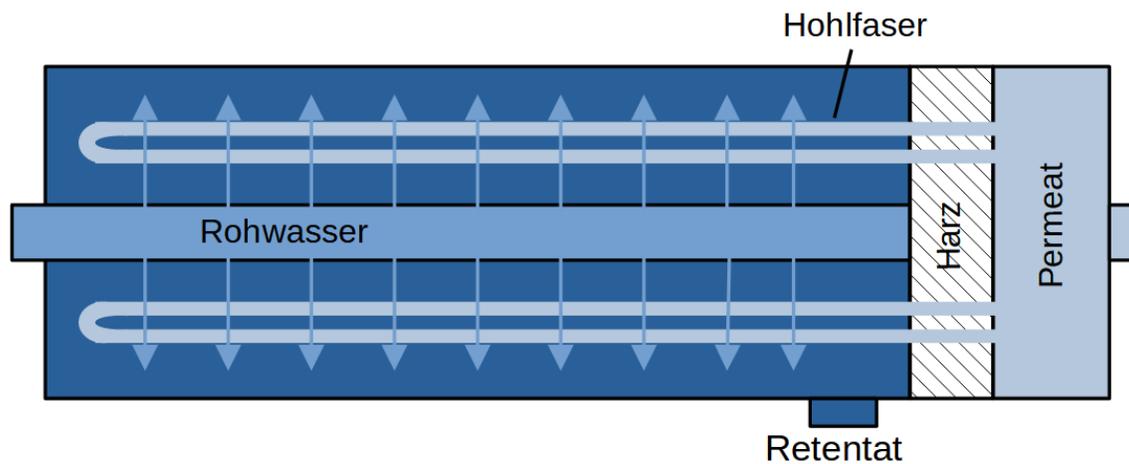


Abbildung 7: Hohlfasermembran

### Wickelmembranmodule:

Ein Wickelmembranmodul besteht aus einer langen Membranbahn, die mehrmals um ein Sammelrohr gewickelt wird und dadurch von Außen zugeführtes Salzwasser mehrfach filtern kann, bis es am Ende aus dem in der Mitte liegenden Permeatsammelrohr und einem folgenden Auslass gewonnen wird.

Die Membranbahn besteht aus mehreren verschiedenen Schichten, die den Zweck haben den Fluss über die Membran sicherzustellen und gleichzeitig eine gute Filterung zu ermöglichen. Wie in Abbildung 8 zu sehen ist handelt es sich um drei abwechselnde Schichten: der Membranschicht, dem Spacer und der Drainageschicht.

- Membran:  
Ein engmaschiges Material, das Wassermoleküle durch Kleinstporen durchlässt und alle größeren Moleküle zurückhält. Zum Beispiel besteht bei der Membran AG1812 von Suez [14] das Material dieser Schicht aus Polysulfon, einem Thermoplast. Durch ihre einfache Verarbeitung und gut bestimmbare Porengrößen ist dieses Material gerne bei Wickelmembranmodulen im Einsatz.
- Abstandshalter oder Spacer:  
Trennt die Membranen voneinander und ermöglicht den Zustrom des Wassers in die unterschiedlichen Schichten. Ebenfalls wird durch sie die nicht mehr filterbare Sole zum entsprechenden Abfluss geleitet. Die Stärken dieser Abstandshalter variieren leicht, sie liegen aber um etwa 0,86mm, wie bei der Membran von Suez.
- Drainageschicht:  
Diese Schicht ist zwischen zwei Membranen gelegen und leitet das Permeat in konzentrischen Kreisen zum Sammelrohr in der Mitte, in dem sich das fertig gefilterte Wasser sammelt und abgenommen wird.

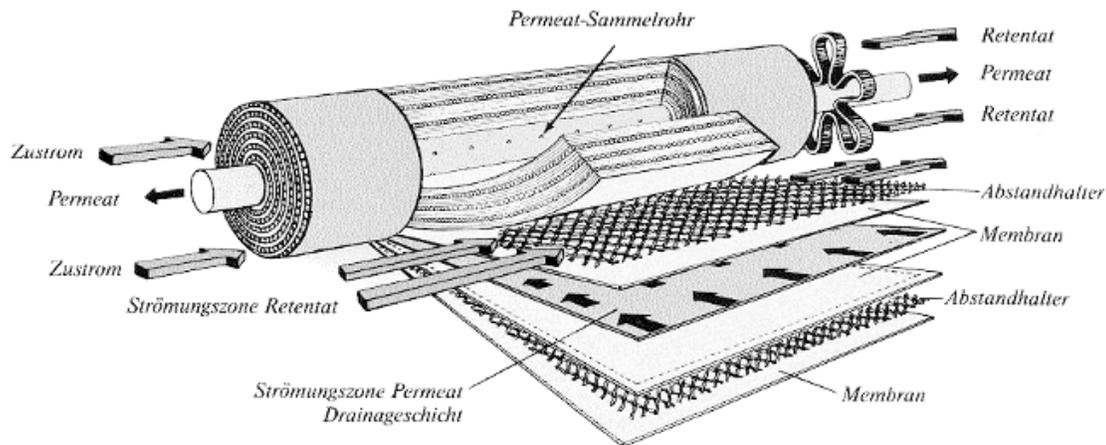


Abbildung 8: Aufbau einer spiralförmig gewickelten Membranbahn [15]

Eine Membranbahn besteht also aus Membranen, die abwechselnd von Abstandhaltern und Drainageschichten getrennt sind, durch die jeweils das Retentat abgeführt, beziehungsweise das Permeat ins Innere geleitet wird. Durch diese Bauweise wird eine hohe Filtrierleistung in einem sehr komprimierten Bereich ermöglicht. Zusätzlich führt dies aber dazu, dass sich die nicht gefilterten Stoffe an den Oberflächen sammeln, was zum sogenannten Scalingeffekt und/oder zu Fouling führen kann. Dies beeinträchtigt die Leistung der Membran erheblich und kann durch spezielle Reinigungen bis zu einem bestimmten Grad behoben werden.

In dem Artikel von W. Lin et al. [16] aus 2022 wurde untersucht wie sich der Fluss und Performance eines spiralgewickelten Membranmoduls verändert, wenn der Fluss über die Membran, nicht wie bisher, waagrecht durch die Membranbahn erfolgt, sondern diagonal. Veranschaulicht ist dieses Prinzip in Abbildung 9.

Das Ergebnis war, dass der Fluss über die Membran beträchtlich erhöht wird, wodurch die Laufzeit der Membran vermutlich verlängert wird, da der Aufbau von Scaling an der Oberfläche verhindert wird und zusätzlich auch die Salzurückhaltung des Moduls verbessert.

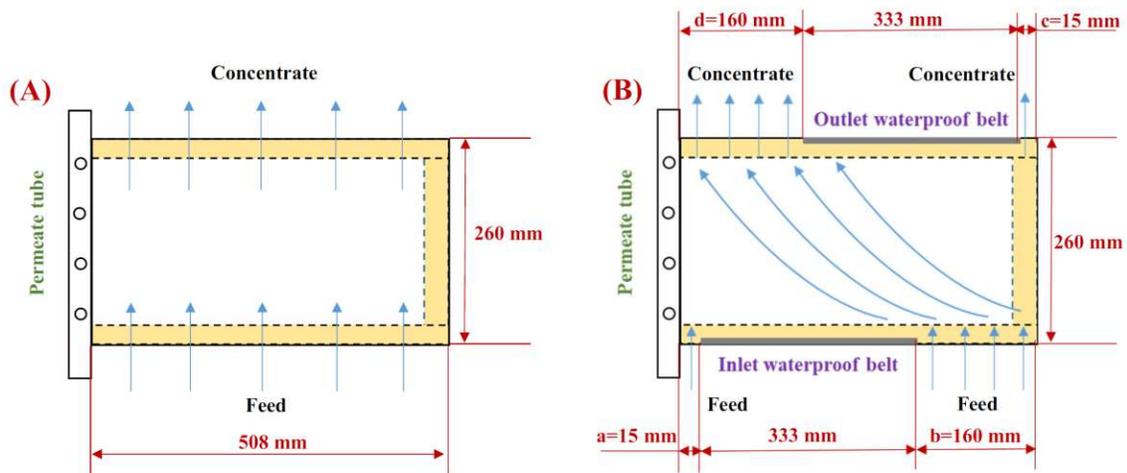


Abbildung 9: Veränderter Fluss durch Membranbahn eines Wickelmembranmoduls [17]

Für gewöhnlich werden die aufgewickelten Membranbahnen nicht als Einzelstücke in einem passenden Druckgefäß verwendet. In großen Anlagen werden in einem Druckgefäß zwei bis drei dieser Membranen gemeinsam verwendet um die Filtrierate zu erhöhen. Zusätzlich, wie in Abbildung 10 zu sehen, werden unterschiedliche Modulschaltungen, wie Reihen- und Parallelschaltung, benutzt, durch die ausgeschiedene Sole nochmals gefiltert werden kann.

Die Methode der Umkehrosmose ist ein sehr effektives und gängiges System zur Auftrennung von Salzwasser und wird schon in großen Entsalzungsanlagen in verschiedenen Ländern erfolgreich verwendet. Gleichmaßen besitzt sie den Vorteil einer kompakten Bauweise, die bei mehrstufiger Entspannungsverdampfung oder Elektrodialyse nicht realisierbar ist. Deswegen wurde von Anfang an diese Methode als die beste Möglichkeit für unser Projekt gesehen.

Zwischen Wickelmembranmodulen und Hohlfasermembranen, ist die Wahl auf Erstere gefallen, da sie gute Filtereigenschaften hat, kompakt und einfacher im Betrieb sowie Reinigung ist. Außerdem ist durch ihre bevorzugte Nutzung in großen Anlagen der Markt, besonders in Europa, größer und so eine bessere Auswahl an Produkten erhältlich. Allerdings bedingt die kompakte Größe der angestrebten Anlage eine einstufige Entsalzung, was weniger gute Erfolge des Produkts verspricht, aber für diesen Zweck notwendig ist.

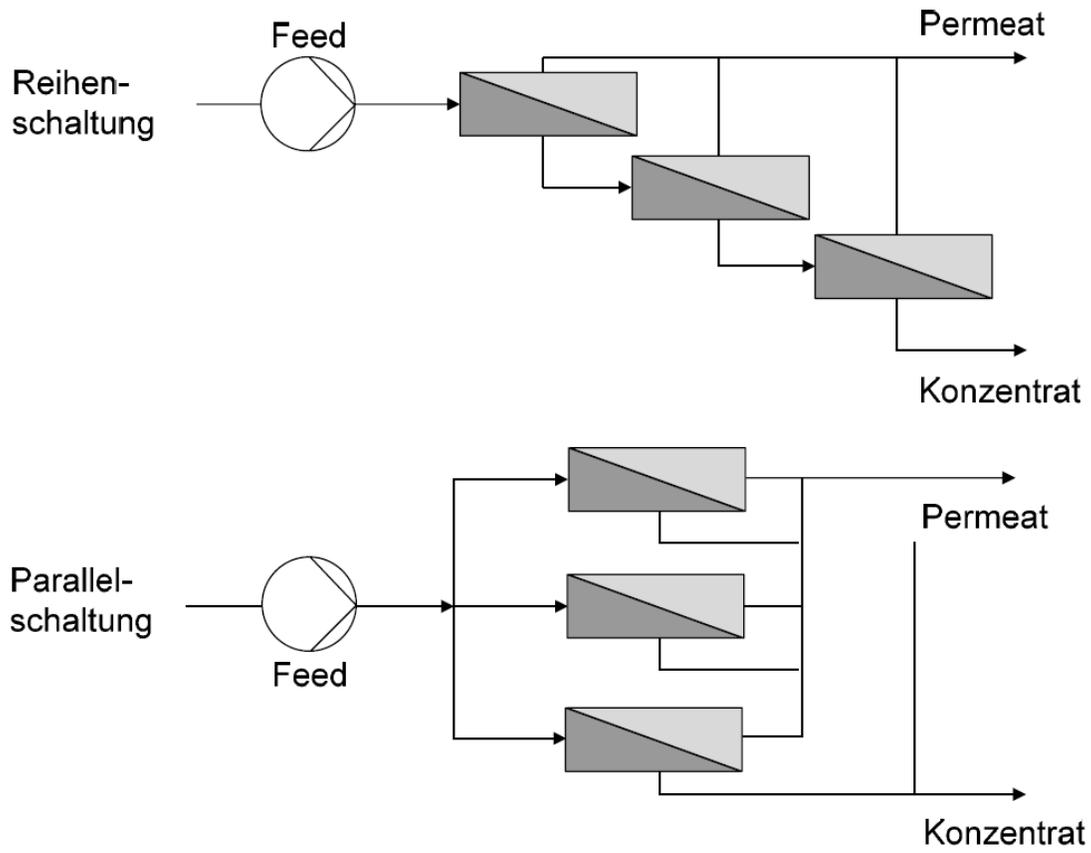


Abbildung 10: Modulschaltungen bei mehreren Modulen [18]

## 2.3 Mathematische Beschreibungen

Zur Bestimmung der Entsalzungsfiltration und der Effektivität einer Membran und dem später verwendeten System müssen viele Punkte beachtet werden, damit Verbesserungen entwickelt und ein optimales Ergebnis erzielt werden kann.

### 2.3.1 Permeatfluss und Salzgleichgewicht

Im Allgemeinen kann man annehmen, dass der geförderte Feedfluss in das System gleich den beiden Ausflüssen aus dem System, also dem Permeat und dem Retentatfluss, ist.

$$Q_F = Q_P + Q_R \quad \text{Flusserhaltung} \quad (1)$$

Das gleiche kann auch vom Salzgehalt in der Anlage behauptet werden, woraus erfolgt

$$C_F Q_F = C_P Q_P + C_R Q_R \quad \text{Salzgleichgewicht} \quad (2)$$

Aus den Salzkonzentrationen im zugeführten Rohwasser und dem gefilterten Produkt kann sich nun auch der Salzurückhalt der Membran bestimmen lassen

$$SR = 100\% \left( 1 - \frac{C_P}{C_F} \right) \quad (3)$$

Zum Beispiel bei einem zu filternden Wasser von 2.000ppm und einem daraus resultierenden gefilterten Wasser von 100ppm entspricht das einem Salzurückhalt von  $SR = 95\%$ .

Aus dem Permeatfluss und dem Feedfluss lässt sich ermitteln, wie die Permeat- oder Süßwassergewinnung des Systems ist.

$$R = 100\% \frac{Q_P}{Q_F} \quad (4)$$

Das Rückhaltevermögen beeinflusst den Salzdurchlass und den Fluss des gefilterten Produktes. Denn wenn R sich erhöht, erhöht sich damit die Salzkonzentration am Feed und am Retentat, was eine Erhöhung der Salzflussrate über die Membran bewirkt. Diese Erhöhung lässt gleichzeitig den osmotischen Druck im System steigen, was den Druckunterschied verringert und somit den Fluss des Permeats verringert.

### 2.3.2 Wassertransport

Das Fick'sche Gesetz kann herangezogen werden um die Permeation durch eine Membran zu beschreiben

$$J = -D \frac{dC_i}{dx} = D \frac{(C_F - C_P)}{d} \quad (5)$$

J...Diffusions Flux

D...Diffusions Koeffizient

d...Dicke der Membran

Wenn nun angenommen wird, dass der Tausch von Wasser und Partikel an einer Membran so schnell geschieht, dass ein Verteilungsgleichgewicht in der Wasser-Membran-Grenzschicht erreicht wird, kann man eine Beziehung zwischen ihnen über den Verteilungskoeffizienten  $\gamma$  aufstellen

$$\gamma = \frac{C_{m,F}}{C_{w,F}} = \frac{C_{m,P}}{C_{w,P}} \quad (6)$$

Wobei  $C_{m,F/P}$  und  $C_{w,F/P}$  die Konzentration an der Wasserseite und Membranseite von Feedwasser und Permeatwasser beschreibt.

Wieder eingesetzt in das Fick'sche Gesetz erhält man, unter der Annahme, dass der Flux proportional zum Konzentrationsunterschied an den Grenzschichten und dem Permeabilitätskoeffizienten der Lösung ist, daraus

$$J = \gamma D \frac{\Delta C}{d} = K \cdot \Delta C \quad (7)$$

$$\text{mit } K = \frac{\gamma D}{d} \quad (8)$$

Somit kann der Fluss von Wasser durch eine Membranfläche beschrieben werden durch

$$Q_P = (\Delta P - \Delta \pi) K_w \cdot A \quad (9)$$

$Q_P$ ... Permeatfluss

$K_w$ ... Permeabilitätskoeffizient von Wasser  $\frac{m^3}{m^2 s Pa}$

$A$ ... Membranfläche

$P, \pi$ ... Äußerer Druck und osmotischer Druck

wobei  $\Delta P$  und  $\Delta \pi$  die Veränderlichen des zugeführten Druckes und des osmotischen Druckes sind

$$\Delta P = \bar{P} - P_p \quad \rightarrow \quad \bar{P} = \frac{1}{2}(P_f + P_r) \quad (10)$$

$$\Delta \pi = \bar{\pi} - \pi_p \quad \rightarrow \quad \bar{\pi} = \frac{1}{2}(\pi_f + \pi_r) \quad (11)$$

### 2.3.3 Salztransport

Der Transport von Salz durch eine Membran kann beschrieben werden durch

$$Q_S = (\bar{C} - C_P) K_s \cdot A \quad (12)$$

$Q_S$ ... Fluss von Salz durch die Membran  $\left[\frac{kg}{s}\right]$

$K_s$ ... Permeabilitätskoeffizient von Salz der Membran  $\left[\frac{m^3}{m^2 s}\right]$

$C_P$ ... Konzentrat im Permeat  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

$A$ ... Membranfläche

Wobei  $\bar{C}$  geschrieben werden kann als

$$\bar{C} = \frac{(Q_F C_F + Q_R C_R)}{(Q_F + Q_R)} \quad (13)$$

Aus den Berechnungen von Wassertransport und Salztransport durch die Membran lässt sich nun schlussfolgern, dass die Flussrate von Wasser durch eine Membran proportional zur Druckdifferenz über die Membran zwischen dem angelegten Druck und dem osmotischen Druck ist. Ebenfalls lässt sich feststellen, dass die Flussrate von Salz durch die Membran hingegen proportional zur Konzentrationsdifferenz über die Membran ist und somit unabhängig vom auf das System angewandten Druck. Dies bedeutet, wenn der Druck auf das System erhöht wird, dass der Fluss ins Permeats erhöht wird, aber der Salztransport nicht betroffen ist.

Die Salzkonzentration vom Permeat hängt vom relativen Fluss von Wasser und dem Transport von Salz durch die Membran ab

$$C_p = \frac{Q_S}{Q_P} \quad (14)$$

Durch diesen Zusammenhang lässt sich auch zeigen, dass durch Erhöhung des Flusses die Salzkonzentration des Permeats abnimmt.

### 2.3.4 Konzentrationspolarisation

Wenn Salzwasser in einem Umkehrosioseprozess durch eine Membran gefiltert wird, geht im Idealfall nur Wasser durch die Membran und das Salz wird zurückgehalten. Dieses Salz bildet nun eine Schicht an der Oberfläche der Membran, welche die Salzkonzentration dort deutlich erhöht. Das hat den Effekt, dass der tatsächliche Fluss des gefilterten Wassers und der Salzurückhalt geringer ist, als die theoretisch bestimmten Werte.

Durch die erhöhte Salzkonzentration ist der osmotische Druck auf der Oberfläche ebenfalls erhöht und somit wird die Druckdifferenz ( $\Delta P - \Delta \pi$ ) verringert, was wie bei den Berechnungen des Wassertransportes eine Verringerung des Permeatflusses bewirkt. Zusätzlich verringert sich der Wasserfluss über die Membran und erhöht sich der Salztransport durch die Membran. Dies führt zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit von Scaling (eine Anhäufung von Partikeln an der Membranoberfläche, die die Filtration hemmen).

Der Konzentrationspolarisationsfaktor (KPF) lässt sich definieren durch die Salzkonzentration an der Membranoberfläche und der Konzentration der zu filternden Salzlösung im Feed

$$KPF = \frac{C_S}{C_F} \quad (15)$$

Damit hängt der Konzentrationspolarisationsfaktor direkt proportional mit dem Permeatfluss zusammen, da durch eine Erhöhung gleichzeitig auch die Salzkonzentration an der Membranoberfläche steigt. Zusätzlich hängt der Faktor aber auch indirekt proportional mit dem Feedfluss zusammen, da durch die Erhöhung vom Feedstrom die turbulente Strömung um die Membranoberfläche erhöht wird und dadurch die Dicke der Konzentrationsschicht an der Oberfläche verringert wird.

Mit dieser Erkenntnis kann KPF nun in Verhältnis mit den Strömen gebracht werden, da die Dicke der Salzkonzentration an der Membranoberfläche schwer zu bestimmen ist.

$$KPF = K_0 e^{\frac{Q_P}{Q_F}} = K_0 e^{\frac{2R}{2-R}} \quad (16)$$

Wobei  $K_0$  eine Proportionalitätskonstante ist, die von der Geometrie des Systems abhängt. Ein KPF von 1,20 ist laut der Firma Hydranautics ein gewünschter Wert und hat in einer 40 Zoll (101,6 cm) langen Membran einen Rückhalt R von 18%.

### 2.3.5 Osmotischer Druck

Der osmotische Druck ist im Großen und Ganzen das begrenzende Medium für die Umkehrosmose. Denn falls der Druck auf die Membran größer ist als der osmotische Druck der zu filternden Flüssigkeit wird Trinkwasser gefiltert, wenn er jedoch gleich oder darunter liegt, dann kommt das ganze System zum Erliegen. Der osmotische Druck ist definiert durch das van't-Hoffsche-Gesetz:

$$\pi = zRTc \quad (17)$$

i ... dimensionsloser Van't-Hoff-Faktor

R ... universelle Gaskonstante  $R = 8,314 \left[ \frac{J}{molK} \right]$

T ... Temperatur in Kelvin  $T = 298,15[K]$

c ... molare Konzentration der Lösung

Als kleine Näherung wird  $i=1,86$ , statt 2 gewählt, obwohl NaCl sich in zwei separate Teilchen lösen sollte. Doch man kann nicht direkt davon ausgehen, dass alle Teilchen gleichermaßen gelöst werden und deswegen wird der Wert als empirisch ermittelter Korrekturfaktor herangezogen.

Wenn nun angenommen wird, dass eine Salzlösung von 0,1% Salzgehalt bei einer Temperatur von 25°C zu filtern ist, beträgt nach Gleichung 17:

$$\pi = 1,86 \cdot 0,0831 [bar \cdot L \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}] \cdot 298,15[K] \cdot 0,017[mol \cdot L^{-1}] \approx 0,789bar \quad (18)$$

Bei einer Salzlösung mit 3,5% Salzgehalt, wie es im Meerwasser der Fall ist, und gleichen Randbedingungen, besteht hingegen ein osmotischer Druck von rund 27,6 bar.

Tabelle 1: Osmotischer Druck verschiedener Konzentrationen

C [ppm]	N [mol]	$\pi$ [bar]
1000	0,017	0,789
2000	0,034	1,577
3000	0,05	2,366
4000	0,068	3,154
5000	0,086	3,943
6000	0,103	4,73
7000	0,12	5,52
8000	0,137	6,309
9000	0,154	7,097
10000	0,17	7,886
15000	0,257	11,83
20000	0,342	15,77
32000	0,548	25,23
35000	0,60	27,60

Die Abbildung 11 zeigt deutlich den quasi-linear ansteigenden Verlauf des osmotischen Druckes mit steigendem Salzgehalt.

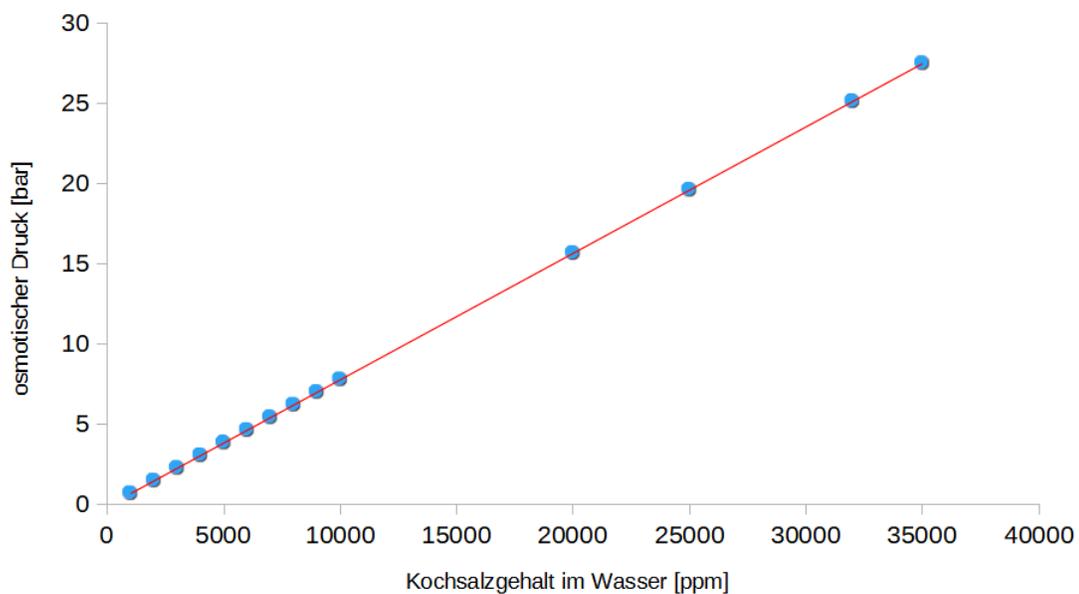


Abbildung 11: Darstellung des osmotischen Druckes von verschiedenen Salzgehalten im Wasser

### 2.3.6 Elektrische Leitfähigkeit

elektrische Leitfähigkeit ist die Fähigkeit elektrische Ladungen zu leiten. Reines Wasser hat daher keine Leitfähigkeit, da keine frei beweglichen Ladungsträger vorhanden sind. Allerdings sind in Salzwasser durch das dissoziierte NaCl sowohl  $\text{Na}^+$ - als auch  $\text{Cl}^-$ -Ionen gelöst und machen somit das Wasser leitfähig. Dadurch kann durch Messung der elektrischen Leitfähigkeit die Salzkonzentration in Salzwasser ermittelt werden. Dafür wird ausgenutzt, dass der Widerstand des elektrischen Leiters vom spezifischen Widerstand  $\rho$  abhängt.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (19)$$

Die elektrische Leitfähigkeit  $\sigma$  hängt mit dem spezifischen Widerstand wie folgt zusammen:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (20)$$

Allgemein kann man Leitfähigkeit auch schreiben als

$$\sigma = e_0 \cdot n \cdot \mu \quad (21)$$

, wobei  $e_0$  die Elementarladung,  $n$  die Ladungsträgerdichte und  $\mu$  die Beweglichkeit der Ladungsträger ist.

Die elektrische Leitfähigkeit ist stark temperaturabhängig und deshalb werden auch diese Werte nur mit zusätzlicher Temperaturangabe verwendet. Diese Abhängigkeit resultiert von den beiden Parametern  $n$  und  $\mu$ , die beide temperaturabhängig sind. Allerdings kann bei vollständig aufgelösten Anteilen die Temperaturabhängigkeit der Ladungsträgerdichte vernachlässigt werden und somit ist nur noch die Beweglichkeit der Ladungsträger ausschlaggebend für die Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit.

$\mu$  ist von der Viskosität  $\eta$  der Lösung abhängig, welche mit steigender Temperatur exponentiell sinkt

$$\eta(T) = \eta_0 \cdot e^{\frac{E_A}{k_B T}} \quad (22)$$

$\eta_0$  und  $E_A$  sind hierbei materialspezifische Konstanten

Da die Beweglichkeit der Teilchen größer wird desto kleiner die Viskosität der Lösung ist, folgt dass  $\sigma$  bei steigender Temperatur exponentiell zunimmt und der spezifische Widerstand dabei exponentiell abnimmt.

### 2.3.7 Temperaturkorrektur der elektrischen Leitfähigkeit

Da die Messwerte bei unterschiedlichen Temperaturen abgenommen werden, je nachdem wie sehr die Umgebung und die Anlage das Wasser beim Auftrennen aufheizt, ist es sinnvoll eine Temperaturkorrektur auf  $25^\circ\text{C}$  der gemessenen Werten durchzuführen, damit die gemessenen Leitfähigkeiten auch miteinander verglichen werden können. Denn wie schon im vorherigen Kapitel beschrieben ist die elektrische Leitfähigkeit stark von der Temperatur abhängig und kann um circa 2% pro Grad steigen.

<sup>3</sup>Da zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit eine Sonde verwendet wird, entspricht  $l$  der Entfernung der Elektroden und  $A$  der Elektrodenoberfläche

Hierfür kann die Beziehung von  $\sigma$  zur Viskosität über die Nernst-Einstein Gleichung und die Stokes-Einstein-Gleichung gezogen werden

$$\sigma = \frac{F^2}{RT} Dz^2 c = \text{const.} \frac{D}{T} \quad \text{Nernst-Einstein-Gleichung} \quad (23)$$

$$D = \frac{k_B}{T} 6\pi\eta r \quad \text{Stokes-Einstein-Gleichung} \quad (24)$$

Daraus folgt ein Zusammenhang, der sich durch die Annahme vereinfacht, dass  $\sigma_1$  und  $T_1$  den Messwerten entsprechen und  $\sigma_2$  und  $T_2$  den Referenzwerten bei einer Temperatur von 25°C

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{\eta_2}{\eta_1} \quad \rightarrow \quad \frac{\sigma}{\sigma_{25}} = \frac{\eta_{25}}{\eta} \quad (25)$$

Ein typischer Wert für die Viskosität von Wasser bei 25°C liegt bei  $\eta_{25} = 0,891 \text{ mPa} \cdot \text{s}$   
Über die Funktion für dynamische Viskosität aus dem Buch „Physical Chemistry“ von Atkins [19]<sup>4</sup>

$$\frac{\eta_{20}}{\eta} = 10^{\frac{A}{B}} \quad (26)$$

,die die Viskosität von Wasser in einem Bereich von 0-100°C auf eine Genauigkeit von 1% beschreibt, kann die elektrische Leitfähigkeit bei der Temperatur von 25°C berechnet werden

$$\sigma_{25} = \frac{\sigma}{0,889 \cdot 10^{\frac{A}{B}}} \quad (27)$$

---

<sup>4</sup>A und B sind auf die Temperatur von 20°C bezogen und sind definiert als  $A = 1,37023(t-20)+8,36 \cdot 10^{-4}(t-20)^2$  und  $B = 109 + t$

### 2.3.8 Referenzmessungen der Salzkonzentrationen

Allgemein kann der ppm-Wert einer Salzlösung über die elektrische Leitfähigkeit der Salzkonzentration berechnet werden. Dazu sind verschiedene Umrechner von Onlineportalen zu finden, wie zum Beispiel auf der Webseite von Lenntech [20], die eine gute und schnelle Interpretation der Messergebnisse ermöglicht.

In dieser Arbeit wurde jedoch auf diese Umrechner verzichtet, um eine genau definierbare Berechnung des ppm-Wertes aus den später gemessenen elektrischen Leitfähigkeiten  $\sigma$  zu erlangen. Hierzu wurden jeweils 100ml Referenzkonzentrationen angemischt und ihre Leitfähigkeit sowie Temperatur bestimmt.

Die erhaltenen Werte wurden, wie in Abbildung 12 grafisch dargestellt, linear approximiert. Die Steigung der Trendlinie entspricht einem Umrechnungsfaktor  $k$ . Durch diesen können die später gemessenen elektrischen Leitfähigkeiten der Proben in die dementsprechenden Konzentration  $C$  in ppm-Werte umgerechnet werden.

$$C = \frac{\sigma}{k} \quad (28)$$

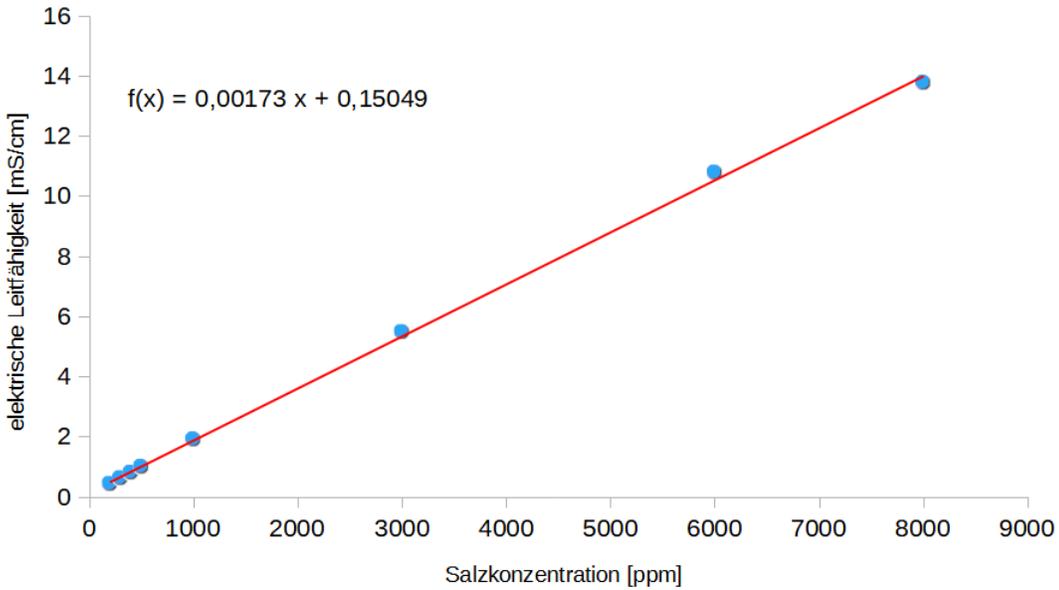


Abbildung 12: Der Einfluss unterschiedlicher Salzkonzentrationen auf die elektrische Leitfähigkeit und deren Trendlinie

Der erhaltene Faktor  $k$  aus den Referenzmessungen beträgt 0,0017. Für kleine Konzentrationswerte, unterhalb von 1.000ppm, ist  $k$  annähernd exakt für eine Umrechnung, da der Anstieg näherungsweise linear ist. Jedoch ist dies für die höheren Werte, ab 1.000ppm und höher, nicht mehr der Fall. Für diese Arbeit sind diese Schwankungen, vor Allem bei den Hohen Salzgehalten, nicht relevant, da sie keine großen Effekte auf die Ergebnisse und daraus geschlossenen Erkenntnisse haben.

Allgemein sind die berechneten ppm-Werte, wie in der untenstehenden Tabelle gezeigt, tendenziell höher als die angenommenen Ausgangskonzentrationen. Die berechneten Werte sollten folglich nur als ungefährender Wert angesehen werden und werden auch in dieser Arbeit nur für eine Einschätzung der gemessenen Resultate verwendet.

Tabelle 2: Leitfähigkeit von verschiedenen Referenzmessungen

C [ppm]	$\sigma$ [mS/cm]	T [°C]	$C_{ber}$ [ppm]
200	0,4045	24,4	247
300	0,5995	24,2	359
400	0,7825	24,1	465
500	0,9745	24,0	576
1000	1,8845	24,0	1102
3000	5,4575	24,0	3166
6000	10,7609	26,0	6227
8000	13,7571	25,8	7954

### 2.3.9 Druckaustauscher

Die Energieeffektivität eines Druckaustauschers kann wie folgt berechnet werden [21]

$$\eta_{PX} = \frac{\sum Q_{R,out} P_{R,out}}{\sum Q_{R,in} P_{R,in}} \cdot 100\% \quad (29)$$

$Q_{R,out}$  und  $Q_{R,in}$  sind dabei der Retentatsfluss in beziehungsweise aus dem Druckaustauscher und  $P_{R,out}$  und  $P_{R,in}$  der entsprechende Druck. Der Fluss in den Druckaustauscher besitzt einen Hochdruck, der in dem System herrscht. Der Fluss hinaus hat dagegen den normalen Atmosphärendruck.

Der Druckaustauscher hat aber auch den Effekt, dass er die Salinität im Feed- oder Rohwasser leicht erhöht, da ein Teil der aufkonzentrierten Sole mit dem in das System zugeführten Salzwasser vermischt wird. Dies führt zu einer Erhöhung des osmotischen Drucks, was wiederum eine Erhöhung des Druckes auf das System zur Folge hat, um die Filtration konstant zu halten.

Das volumetrische Mischen dieser beiden Wasseranteile kann berechnet werden durch die Formel [22]

$$M = \frac{S_{HP,out} - S_F}{S_{HP,in} - S_F} \quad (30)$$

wobei  $S_{HP,out}$  beziehungsweise  $S_{HP,in}$  die Salinität der Sole zurückgehend von der Energierückgewinnung und Salinität des Retentats der Membran ist.

Daraus folgt für die Erhöhung der Salinität durch den Druckaustauscher

$$SI = SR \cdot M \cdot 1,025\% \quad (31)$$

Wobei SR wie in Gleichung 3 beschrieben der Salzurückhalt des Systems ist.

Die Gleichung 31 kann noch weiter vereinfacht werden, wie Gude et al. [21] zeigen und daraus folgt:

$$SI = SR \cdot 6,15\% \quad (32)$$

## 2.4 Voraussetzungen an die Membran und das System

Zu Beginn wurde durch eine Überschlagsrechnung ermittelt welche Grundvoraussetzungen das Membranmodul erfüllen muss, und welche Förderleistung der Pumpe benötigt wird um eine gewünschte Menge Wasser innerhalb einer Stunde zu filtern. Dieser wichtige Schritt ermöglichte eine gezielte Suche für eine passende Membran und eine Pumpe mit den geforderten Eigenschaften. Die fix gewählten Parameter waren hierfür:

- Permeatfluss  $Q_P = 10 \text{ l/h}$
- Druck  $p = 55 \text{ bar} = 5,5 \text{ MPa}$
- Trinkwassergewinnung  $R = 10\%$
- Druckabfall  $\Delta p = 1 \text{ bar} = 0,1 \text{ MPa}$
- NaCl-Konzentration im Wasser  $C_S = 4 \text{ w\%}$

Daraus wird der Feedfluss  $Q_F$  berechnet mittels

$$Q_F = \frac{Q_P}{R} = 100 \frac{\text{l}}{\text{h}} \quad (33)$$

wodurch der Retentatfluss  $V_R$  ermittelt werden kann

$$Q_R = Q_F - Q_P = 90 \frac{\text{l}}{\text{h}} \quad (34)$$

Nun ist bekannt welcher Förderstrom von der Membran benötigt wird und welchen Retentatfluss man daraus erwarten kann. Daraus können folgend die ersten Anforderungen an die Pumpe gestellt werden, damit das System auch funktionsfähig wird. Gewählt wird hier ein Pumpenwirkungsgrad von  $\eta = 1$  um die reine Motorleistung ohne Einflüsse zu berechnen, daraus folgt

$$P_0(\eta = 1) = p \cdot Q_F = 152,78 \text{ W} \quad (35)$$

Da ein Pumpenwirkungsgrad von 1 aber nicht der Wirklichkeit entspricht wurde ein realistischerer Wert von  $\eta = 70\%$  gewählt und daraus eine Motorleistung berechnet.

$$P_{nR} = \frac{P_0}{\eta_{70\%}} = 218,25 \text{ W} \quad (36)$$

Was nun noch beachtet werden muss ist, dass das System später mit einer Energierückgewinnung, oder auch Recovery, arbeiten wird. Das bedeutet, dass ein geringer Strom des gefilterten Wassers wieder zurück in das Pumpensystem gespeist wird und somit die Pumpe in seiner Arbeit unterstützt und der Kraftaufwand von der Person auf dem Fahrrad etwas entlastet wird. Dafür wurde eine Recovery von  $\eta_R = 50\%$  gewählt und der effektive Energieaufwand berechnet

$$P_{\text{eff}} = P_{nR} - Q_R \cdot (p - \Delta p) \cdot \eta_R = 150,75 \text{ W} \quad (37)$$

Schlussendlich kann man daraus schließen, dass eine Pumpe mit einer Motorleistung von rund 150 W nötig sein wird um eine Membran mit einem Feedfluss von 100 l/h zu nutzen.

Bei der letzten Überlegung wurde überprüft, welche Fläche eine schon im Handel erhältliche Membran mit bestimmten Eigenschaften rein theoretisch haben kann, damit sie mit unseren Anfangswerten noch funktioniert. Für diese Berechnung wurde die Membran SW30HRLE-400 von Filmtec als Beispiel benutzt und die wichtigsten Daten aus dem Informationsblatt [23] bezogen.

- Feedfluss  $Q_F = 28 \frac{m^3}{d}$
- Druck Feedseitig  $p_F = 5,5 \text{ MPa}$
- NaCl-Gehalt im Wasser  $C_S = 3,2 \text{ w\%}$
- osmotischer Koeffizient für Kochsalz  $b = 8 \frac{\text{bar}}{\text{w\%}}$  [24]
- Fläche  $A = 37 \text{ m}^2$

Aus diesen Werten kann dann die Permeabilität der Membran berechnet werden:

$$P = \frac{Q_F}{A \cdot (p_F - p_P)} = 2,979 \cdot 10^{-6} \frac{m}{s \cdot MPa} \quad (38)$$

wobei  $p_P$  der Druck auf der Permeatseite [24] ist und mittels dem Salzgehalt des zu filternden Wassers und dem osmotischen Koeffizienten von Salzwasser berechnet wird

$$p_P = c_S \cdot b = 2,56 \text{ MPa} \quad (39)$$

Durch umformen der Formel für die Permeabilität erhält man die gewünschte Gleichung zur Berechnung der Fläche der Membran unter unserer geforderten Flussrate  $Q_P = 10 \text{ l/h}$  und einem angelegten Druck von  $5,5 \text{ MPa}$  auf das System:

$$A = \frac{Q_P}{P \cdot (p_F - p_P)} = 0,317 \text{ m}^2 \quad (40)$$

Daraus kann man schließen, dass eine deutlich kleinere Membranfläche möglich ist und unsere geforderte Flussrate von  $10 \text{ l/h}$  erreicht wird.

Diese Erkenntnis ist besonders wichtig, nicht nur zur Suche eines passenden Membranmoduls bei Anbietern, sondern auch wenn eine dementsprechend kleine Membran hergestellt werden muss. Denn mit den obigen Parametern ist klar welche Voraussetzungen für das System notwendig sind.

#### 2.4.1 Vergleich verschiedener Wickelmembranmodule

Aufgrund der vorgegebenen Daten wurde nun nach passenden, möglichst kleinen Wickelmodulen gesucht. Dabei wurde nicht nur ein Augenmerk auf Membrane zur Meerwasser Auftrennung, sondern auch Brackwasser gerichtet, da der erste Versuchsaufbau für beide NaCl-haltige Gewässer getestet werden sollte.

Schon zu Beginn der Suche stellte sich aber heraus, dass viele, von Firmen vertriebene, kleine Membranmodule aufgrund mangelnder Nachfrage nicht mehr in Produktion sind. Unter den Firmen, die angeschrieben wurden, waren aber noch geringe Lagerbestände vorhanden und wurden dem Projekt zur Verfügung gestellt. Zusätzlich wurde auch seitens der Firma Oltremare erwähnt, dass Module in bestimmter Baugröße auf Anfrage gefertigt werden können. Dies könnte für die zukünftige Weiterführung des Projektes durchaus von Interesse sein.

Nach gründlicher Recherche von verschiedenen Anbietern wurde eine Vorauswahl getroffen. Zum einen überzeugte die Firma Oltremare (Microdyn Nadir) und zum anderen die Firma SUEZ, wobei nur die Module von Oltremare der SEA-Reihe in der Lage sind Salzkonzentrationen im Bereich von Meerwasser zu filtern und die anderen lediglich im Brackwasserbereich eingesetzt werden können.

Tabelle 3: Liste Membranmodule

Modell Oltremare	C [ppm]	R [%]	$p_{max}$ [bar]	pH-Bereich	$Q_F$ [l/m]	A [m <sup>2</sup> ]	L [cm]
SEA5-2521 [25]	32 000	99,6	69	3,0 - 10,0	23	1,1	53,34
SEA2-2521 [26]	32 000	99,4	69	3,0 - 10,0	23	1,1	53,34
COMPACT 2521-LOW2 [27]	1 500	99,4	12,4	3,0 -10,0	23	0,6	41,7
SUEZ	[ppm]	[%]	[bar]		[l/m <sup>2</sup> /h]	[m <sup>2</sup> ]	[cm]
AG-1812 [14]	2 000	99,0	41,37	2,0 - 11,0	8-34	0,38	30,48
AG-1812HR [14]	2 000	99,4	41,37	2,0 - 11,0	8-34	0,38	30,48

Schlussendlich ist die Wahl auf die Wickelmodule von Suez gefallen, aufgrund ihrer guten Rückhaltung von 99% bzw. 99,3%, der Länge von 30,48cm (0,38 m<sup>2</sup>) und dem, im Vergleich zu anderen kleinen Membranmodulen, hohen Operationsdruck von bis zu 41,37 bar.

## 2.5 Auswahl der Messbereiche

Folgende Überlegungen sind wichtige Faktoren, welche die Auswahl des zu verwendenden Messbereichs einschränken:

- Die Membran ist nur für Brackwasserkonzentrationen ausgelegt, das heißt nur im Bereich von 1.000 - 10.000ppm können gute Ergebnisse erzielt werden. Bei den Werten im Datenblatt ist nur eine Lösung von 2.000ppm verwendet worden.
- Die Membran kann nur bis zu 41bar betrieben werden, besser ist deutlich darunter zu bleiben, damit die Membran nicht überstrapaziert wird. Das bedeutet, dass ein Druck von 35bar möglichst nicht überschritten werden sollte.
- Das Leitfähigkeitsmessgerät der ersten Testmessung hatte nur einen Messbereich von 20mS/cm. Eine Salzkonzentration von 8.000ppm hat eine elektrische Leitfähigkeit von 13,8 mS/cm, eine Lösung von 10.000ppm hätte den Messbereich für dieses Gerät überschritten.

Aus diesen Gründen wurden Messungen bei der ersten Testmessung mit den Salzkonzentrationen 1.000ppm, 3.000ppm, 6.000ppm und 8.000ppm gemacht, da so sichergestellt werden konnte, dass die Parameter der Membran nicht überschritten werden und eine Entsalzung zustande kommt. Bei der zweiten Testmessung wurde das Rohwasser für höhere Konzentrationen getestet, da Interesse bestand auch Meerwasser aufzutrennen und zu sehen, wie sich das Membranmodul damit schlägt. Außerdem wurde für die elektrische Leitfähigkeit ein neues Messgerät verwendet, das Werte von Meerwasser messen kann. Darum wurden 1.000ppm, 8.000ppm und 10.000ppm getestet. Bei den entscheidenden Messreihen, bei denen die zwei verschiedenen Anlagen gegeneinander ausgetestet wurden, sind dann 2.000ppm, 10.000ppm und 20.000ppm getestet worden, da das neue

Leitfähigkeitsmessgerät auch höherer Messbereiche als 20mS/cm messen konnte und somit die Salzkonzentrationen erhöht werden konnten. Allerdings wurde die Messung auf 20.000ppm beschränkt, weil die Ausbeute der Entsalzung von 10.000ppm bei der vorherigen Testmessung schon gering war und der osmotische Druck des Rohwassers alleine so hoch war, dass der benötigte Druck für eine Entsalzung an der maximalen Druckgrenze der Membran lag.

## 2.6 Beschreibung der Messaufbauten

Zur Testung, ob eine simple Anlage zur Auftrennung ausreicht um die gewünschte Entsalzung zu erreichen, oder ob eine Energierückgewinnung, die den Antrieb der Anlage entlasten soll, zusätzlich eine bessere Ausbeute bei der Auftrennung bringt, wurden zwei verschiedene Systeme aufgebaut und hintereinander getestet. Deren Aufbau wird in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

### 2.6.1 Messaufbau ohne Druckaustauscher

Diese erste Anlage besteht aus einem einfachen Aufbau. Sie wird mittels eines Motors, welcher auf konstant 20,90Hz, beziehungsweise 1200 Umdrehungen pro Minute, betrieben und über eine Welle mit einer axialen Kolbenpumpe der Firma Janus der Serie P1 [28] angetrieben<sup>5</sup>. Hierbei muss beachtet werden, dass diese Pumpe bei Inbetriebnahme einen Druckunterschied von maximal 2,5 bar haben muss. Deswegen wurde das Wasserreservoir auf eine Erhöhung gestellt um diese Anfangsbedingung auch zu sichern.

Anschließend führte die Leitung in ein Rückschlagventil, um die Pumpe daran zu hindern das Wasser vom Membranmodul wieder zurück zu ziehen, durch ein Manometer und zuletzt in den Einlass des Membran-Gehäuses. Das Wickelmembranmodul wird im Gleichstrom betrieben, da kein großer Unterschied zu Gegenstromsystemen bestehen sollte und die meisten gefundenen Referenzsysteme so betrieben werden.

Auf der Retentatseite des Gehäuses wurde bei der ersten Testmessung ein Manometer angeschlossen, das lediglich den Zweck hatte den Druckabfall in der Membran zu messen. Bei den späteren Anlagen wurde auf das zweite Manometer verzichtet um den Aufbau um ein weiteres, nicht dringend nötiges Bauteil zu verringern.

Darauf folgend ist eine Drossel, zur Regelung des Drucks im System montiert, bevor die Sole austreten kann. In diesem Versuchsaufbau wird das Retentat direkt zurück in das Wasserreservoir geleitet, um eine stetige Messung durchzuführen, da sonst das Reservoir in wenigen Minuten leer laufen würde und laufend das System wieder aufgefüllt werden müsste. Ebenfalls wurde der Schlauch, ausgehend von der Permeatseite, wieder zurück in den Ausgangsbehälter gegeben, um das System in einem konstanten Zustand der Salzkonzentration zu halten.

Ebenfalls wurde bei der ersten Testmessung auch noch auf optische Leitmessler zurückgegriffen, die während der Messung zwischen dem Permeatausgang und dem Retentatausgang gewechselt wurden, um dem Fluss des jeweiligen Auslasses direkt in der Leitung messen zu können. Bei den späteren Messungen wurde auf diese Messgeräte verzichtet, da es zu großen Störsignalen gekommen ist und die Messungen auch mit einer einfacheren Methode gemacht werden konnten.

Der Schaltplan in Abbildung 14 soll im Zusammenhang mit dem Foto des Versuchsaufbaus ein besseres Verständnis für den Aufbau vermitteln. Dazu wurden verschiedene Marker im Bild, als Anhaltspunkte, gesetzt.

---

<sup>5</sup>Unter den bestehenden Umständen sollte die Pumpe 60l/h fördern können.

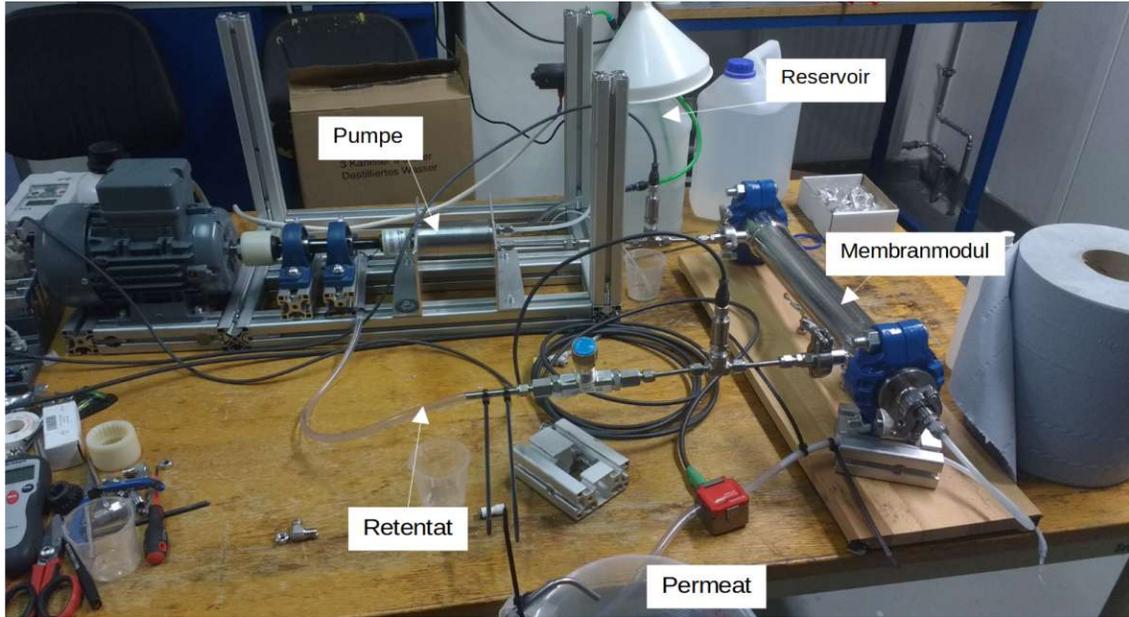


Abbildung 13: Foto des Versuchsaufbaus ohne Energierückgewinnung

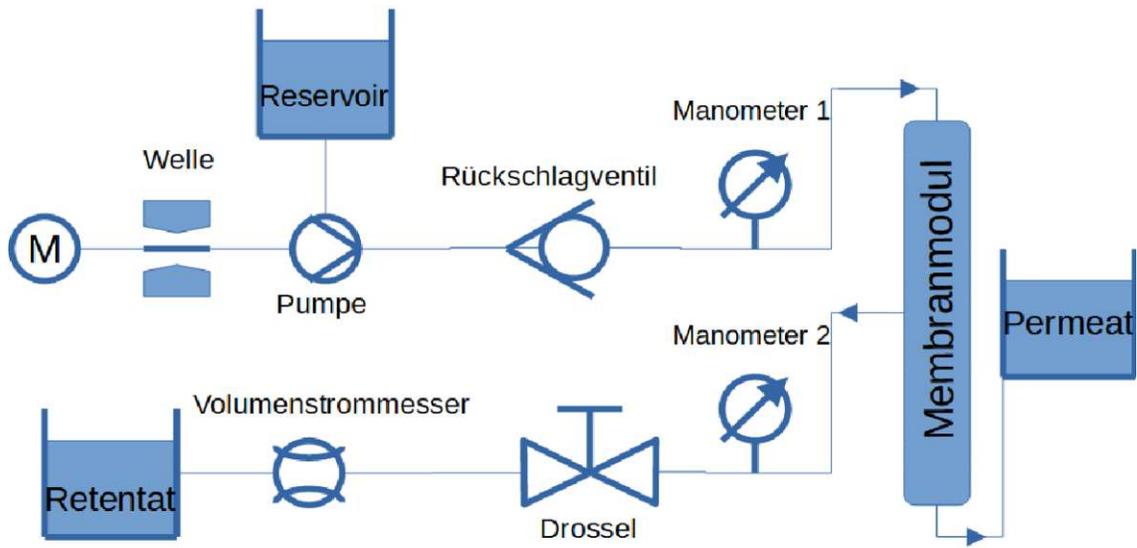


Abbildung 14: Schaltplan der Anlage ohne Energierückgewinnung

## 2.6.2 Messaufbau mit Druckaustauscher

Die zweite Anlage ist im Prinzip eine Erweiterung der ersten um eine Energierückgewinnung, bestehend aus einem Druckaustauscher, der mit einer zweiten Pumpe (mit einer Spannung von 12V ist diese Pumpe in der Lage 23l/min zu fördern) [29] zusätzlich mit Rohwasser gespeist wird, sowie einer Zirkulationspumpe.

Alle Bauteile, ausgenommen von der Pumpe für den Druckaustauscher, werden über einen Riemenantrieb durch den elektrischen Motor angetrieben. Dies hat zur Folge, dass der Antrieb des Motors im Gegensatz zum einfachen Aufbau etwas gehemmt wird und dadurch geringere Umdrehungen pro Minute und so auch weniger Feedstrom erzeugt werden.

Am Auslauf der ausgeschiedenen Sole ist noch eine Drossel angebracht. Hier dient sie aber nicht der Erhöhung des Drucks im System, sondern bestimmt den Fluss des Permeats. Bei den Messreihen wurde die Drossel auf eine bestimmte Einstellung gestellt, bei der der Fluss von Permeat und Retentat ähnlich war, aber nie ganz geschlossen.

Auch hier soll der Schaltplan in Abbildung 16 ein besseres Verständnis von Aufbau und Fluss in der Maschine bringen.

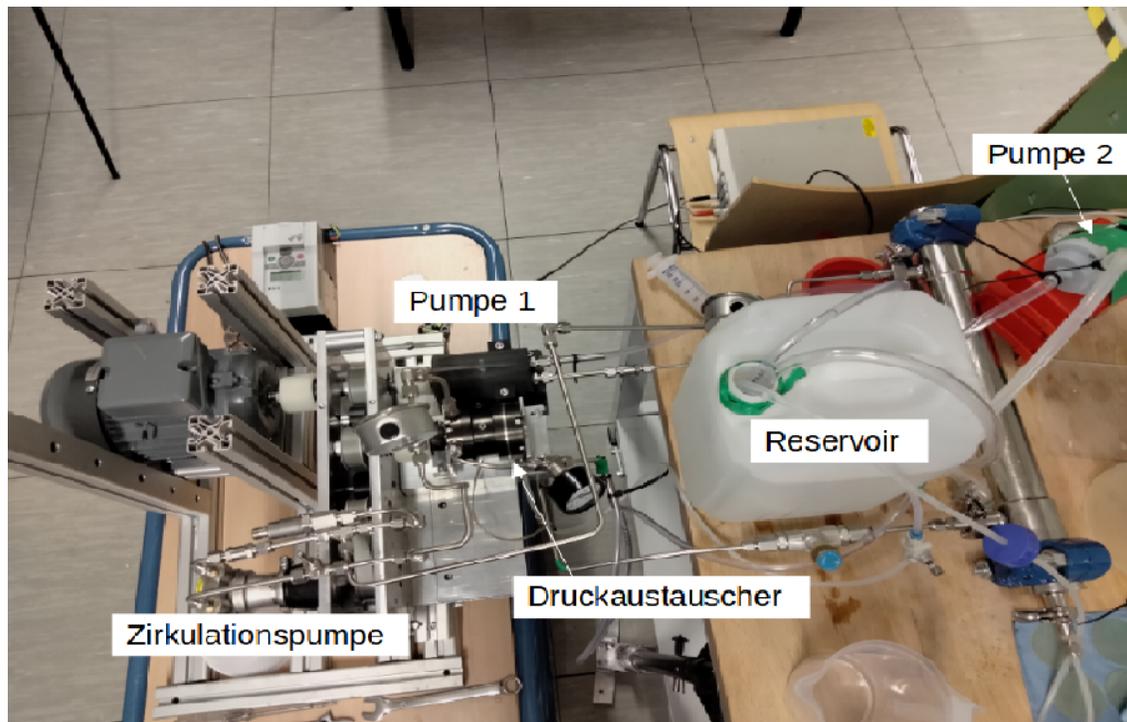


Abbildung 15: Foto des Versuchsaufbaus mit Energierückgewinnung

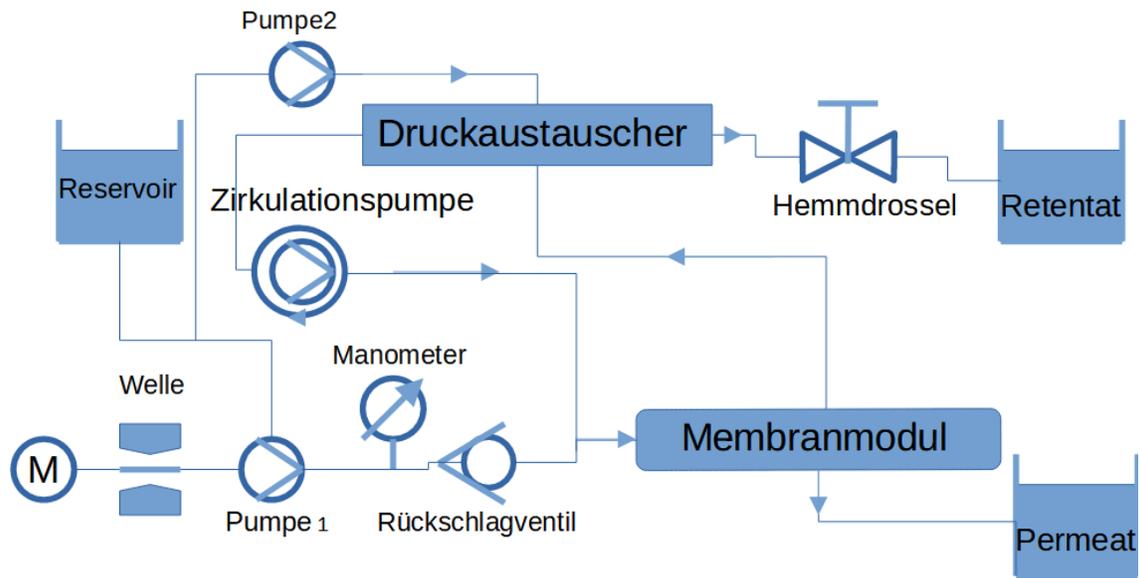


Abbildung 16: Schaltplan der Anlage mit Energierückgewinnung

Eine einstufige Entsalzungsanlage für Umkehrosmose ist nicht sehr effektiv und braucht einen erheblichen Energieaufwand um betrieben zu werden. Um dieses Problem zu lösen und die Förderleistung der Pumpe zu entlasten, wird oft auf eine Energierückgewinnung mittels Druckaustauscher und Zirkulationspumpe zurückgegriffen.

In diesem Aufbau wurde ein Rotationsdruckaustauscher, gezeigt in Abbildung 17, verwendet, der sich durch ein rotierendes Mittelteil auszeichnet. Durch dieses Mittelteil wird der Druck der Hochdruckseite auf die Niederdruckseite umgeleitet und so Energie gespart. Genauer gesagt wird der Teil, der als Retentat aus der Membran ausgefiltert wird unter Druck in den Druckaustauscher geleitet, der ebenfalls mit dem zu filternden Meerwasser unter Atmosphärendruck gespeist wird. Dabei kommt es zu einer Vermischung des Rohwassers und der aufkonzentrierten Sole, was die Salzkonzentration beim Feedeinlass des Membranmoduls beeinträchtigen kann. Durch Verwendung von Kolben zwischen der Feedwasserseite und dem Abwasser kann eine solche Vermischung aber leicht verhindert werden, allerdings ist das Gerät dann auch anfälliger für Schäden.

Die Zirkulationspumpe hält das System auf dem Druck, der auf der Hochdruckseite der Anlage herrscht und fördert das Wasser zum Feedeinlass der Membran. Bei anderen Druckaustauschern, wie zum Beispiel der Clarkpumpe kann auf diese zusätzliche Pumpe verzichtet werden, näheres wird später im Kapitel 2.9 besprochen.

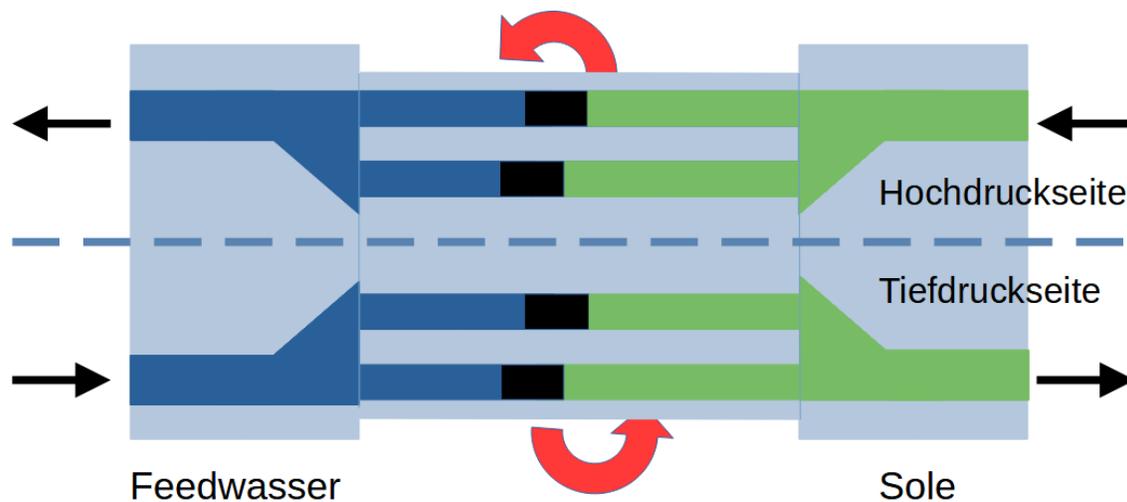


Abbildung 17: Funktionsschema eines Rotationsdruckaustauschers

Die dunkelblaue Seite in Abbildung 17 stellt das Roh- oder Feedwasser da, die grüne die aufkonzentrierte Sole. Die schwarzen Balken zwischen Feed und Retentat sollen, je nach Bauweise, entweder Kolben oder den Bereich markieren bei dem es ohne Kolben zu einer Vermischung von Feed und Retentat kommt.

## 2.7 Vorfiltration und Reinigung des Membranmoduls

Wickelmembranmodule haben eine lange Nutzungsdauer, wenn sie richtig gehandhabt werden. Dazu zählen das Vorfiltrieren des Rohwassers, um die Membran und zusätzlich die Hochdruckpumpe zu schonen, und das richtige Reinigen zur Prävention und bei Trennleistungsabfall, der durch eine Verlegung durch Scaling und/oder Fouling ausgelöst wurde.

### 2.7.1 Vorfilter

Bevor das Salzwasser in den Aufbau kommen kann, muss es gefiltert werden, da sowohl die Pumpe, als auch die Membran keine zu großen Sedimente vertragen und damit zusätzlich die Membran geschont werden kann. Wenn ein guter Filter gewählt wird, der nur kleinste Partikel durchlässt, wird damit die Lebenszeit einer Umkehrosmoseanlage um einiges verlängert.

Ein gängig eingesetzter Vorfilter bei Salzwasser Reversosmose sind Sand- oder Sedimentfilter, die zwischen Wasserreservoir und Hochdruckpumpe angebracht werden kann. Für Sedimentfilter gibt es verschiedene Anbieter wie zum Beispiel die LOFTREX Filtern aus Polypropylen von der Firma EATON [30]. Sie haben eine Filterung von 1-75  $\mu\text{m}$  und sind erhältlich in einer Größe von 12,7 bis 101,6 cm.

### 2.7.2 Reinigung des Membranmoduls

Ein großes Problem ist das Entstehen von Ablagerungen, das so genannte Scaling oder Fouling, dass nach einer Zeit beim Entsalzungsbetrieb entsteht. Diese Verunreinigungen sind nur schwer zu entfernen und beeinträchtigen die Filtrierleistung erheblich, da sie die Poren der Membranschichten verlegen.

Eine einfache und effiziente Methode vor allem dem Scaling entgegen zu wirken ist das Durchspülen der Membran nach der Filterung mit einem Teil des gereinigten Permeats. Dazu werden 1-2 Liter vom gefilterten Wasser durch die Membran geschickt um sicher zu gehen, dass das ganze Salzwasser aus dem System gespült wurde. Danach wird 5 Minuten lang sauberes Wasser im Kreislauf durch das Gerät gespült, sodass sicher gegangen werden kann, dass Ablagerungen an der Membran durch den Strom gelöst und aus dem Gerät gespült werden. Das muss besten Falls immer nach einer fertigen Salzwasserauftrennung gemacht werden. Ein großer Nachteil ist dabei der große Verlust des zuvor entsalzten Wassers, wenn man bedenkt, dass 1-2 Liter der zuvor aufbereiteten 10 Liter wieder wegfallen.

Ein großes Problem bei Entsalzung mit Wickelmodulen ist das Fouling, also Ablagerungen von Mikroorganismen an der Membranoberfläche, die die Membran so verlegen, dass keine gute Auftrennung mehr möglich ist. Deswegen sollte eine Membran möglichst mit speziellen Mitteln gereinigt werden, wenn ein Abfall der Filtrierleistung beobachtet wird. Dies kann auch als Prävention alle 1-2 Monate geschehen, oder falls die Membran längere Zeit nicht in Betrieb genommen wird.

Es gibt viele am Markt erhältliche Mittel für eine solche Reinigung, die meisten Hersteller von Membranen haben ihre eigenen speziell zusammengestellten Mittel und Erklärungen zur richtigen Durchführung der Reinigung, wie zum Beispiel die SUEZ Cleaning Guidelines [31].

Häufig sind diese Reinigungsmittel aber nicht zur Hand, schwer zu bekommen oder im Allgemeinen zu kostspielig, deswegen wurde versucht eine Methode zur Reinigung mit zugänglicheren Mitteln zu gestalten, die mit der Beschreibung der SUEZ Cleaning Guidelines und dem pH-Bereich der Membran übereinstimmen und die empfohlene Weise der Reinigungsdurchführung adaptieren.

Grundlegend besteht dieser Reinigungszyklus aus zwei verschiedenen Lösungen. Einer säurehaltigen, zum Entfernen von eventuellen Rostbefällen im System, und einer basischen Lösung zum Entfernen etwaiger Proteine oder Algen.

Zuerst wird das System mit frischem Wasser (RO-Permeat, Deionisiertes Wasser oder destilliertes Wasser) für 10 Minuten durchgespült, um Reste des Salzwassers aus dem System zu entfernen.

Anschließend wird eine Lösung mit 0,2 g/L Zitronensäure, mit einem pH Wert von 3, angesetzt und in das System zugeführt. Da zuerst das eingefüllte Wasser aus dem System mit dem Reinigungsmittel ersetzt werden muss, muss darauf geachtet werden, dass 2-3 Liter durchgepumpt und entsorgt werden müssen, bevor die Zirkulation der Reinigung durchgeführt werden kann. Ist das Gerät mit der Lösung befüllt, muss diese 10-30min im System zirkulieren und stetig der pH-Bereich kontrolliert werden, um sicher zu gehen, dass die Reinigungslösung nicht den Wert von pH 3 ändert. Falls doch, muss die Lösung neu angemischt und ausgetauscht oder bei Bedarf nachjustiert werden. Zusätzlich muss, falls eine Verfärbung zu erkennen ist, die Reinigungslösung ebenfalls entsorgt und durch eine Neue ersetzt werden. Als nächster Schritt muss nun die Membran 10-30min in der Lösung einwirken, bevor abschließend gut mit, zum Beispiel destilliertem Wasser, durchgespült werden kann und die nächste Reinigungslösung verwendet werden kann.

Bei der zweiten Lösung handelt es sich um 0,2 g/L Natriumhydroxid NaOH (auch bekannt als Natronlauge), die einen pH Wert von 11-12 besitzen soll. Die Schritte sind wie zuvor bei der Zitronensäure, befüllen des Systems, zirkulieren der Flüssigkeit mit Überprüfung des pH Werts und Einwirken, gefolgt von einem gründlichen Ausspülen mittels sauberem Wasser.

Sehr wichtig ist, dass beim Spülen der Feed Fluss nicht zu groß gewählt wird (am besten nicht hö-

her als 30 l/min), da es sonst schäumen könnte und die Reinigung somit erschwert wird. Außerdem sollte der Druck im System so gering wie möglich eingestellt werden, sodass nur eine minimale Menge an Permeat entsteht, da bei zu viel Permeat die Ablagerungen an die Oberfläche der Membran gedrückt und nicht weggespült wird.

## 2.8 Nachbehandlung des gefiltertem Permeats

Das gefilterte Wasser der Anlage ist sogenanntes „reines“ Wasser, da sämtliche Moleküle und damit zusätzlich zum Salz auch größtenteils alle anderen Mineralien aus dem Wasser gefiltert wurden. Das ist zum einen wünschenswert, da ein dermaßen sauberes Wasser so gut wie keine Gefahr läuft schädliche Keime zu haben, aber es hat einen großen Nachteil. Durch den Entzug aller Mineralien wie zum Beispiel Kalzium und Magnesium hat das Wasser keinerlei Geschmack und Nährstoff für Menschen. Es gibt Diskussionen wie wichtig die im Wasser enthaltenen Mineralien für unseren Körper sind und viele verschiedene Meinungen dazu.

Fakt ist, dass nur geringe Mengen an wichtigen Mineralien in Trinkwasser vorhanden sind. Der Konsum von 2-3l Wasser am Tag deckt nach aktuellen Trinkwasserwerten nur einen sehr kleinen Teil des täglichen Bedarfs an Nährstoffen (siehe Tabelle 4). Denn die meisten Mineralstoffe nimmt der Mensch durch die Nahrung und nicht durch Wasser auf.

Tabelle 4: Wichtiger Elektrolytbedarf des Körpers und Werte im Trinkwasser

Elektrolyte	Bedarf [2] [g/d]	Werte Trinkwasser [11] [mg/l]
Natrium	5 - 15	1 - 1,1
Kalium	2 - 6	≤ 1
Kalzium	0,8 - 1,2	38 - 48
Phosphat	0,7 - 1,3	-
Magnesium	5 mg/KG	6,5 - 9,7

Somit ist das Nachbehandeln von Trinkwasser für den Menschen nicht essenziell nötig und kann unterlassen werden. Ist jedoch eine Anreicherung gewünscht oder sogar nötig, da durch das Essen nicht genug Mineralstoffe aufgenommen werden können, gibt es verschiedene Möglichkeiten dies zu bewerkstelligen. Zum einen kann man überlegen einen Mineralisierungsfilter, wie zum Beispiel das Model M-120L von Wasserhaus.de [32], hinter den Permeatausgang der Membran anzubringen und das gefilterte Wasser damit anzureichern. Das hat den Nachteil eines weiteren Bauteiles, der nach einiger Zeit ausgetauscht werden sollte und eine weitere Angriffsstelle für Verunreinigungen darstellt.

Eine weitere Möglichkeit wäre Magnesium-Kalzium Tabletten in das aufbereitete Wasser zu geben, da diese zwei Mineralien die wichtigsten für den Körper sind und bei Mangel einen kardiovaskulären Schaden bewirken können [2] [33] [34]. Präparate gibt es von verschiedenen Herstellern und je nach Angaben müssen unterschiedliche Dosen gelöst werden. Die Firma BWT stellt zum Beispiel Filterkartuschen her, die einfach in einen Wasserbehälter gegeben werden und so das Wasser anreichern, aber auch gleichzeitig bestimmte Partikel herausfiltern [35]. Der Vorteil wäre das Vermeiden eines weiteren Bauteiles in dem System und eine genaue Bestimmung wie viel Mineralien in das gefilterte Wasser zugegeben werden können.

Da das Wasser durch das Aufbereiten sehr weich ist und damit ein hohes Korrosionspotential hat, wäre dies ein weiterer Grund es anzureichern. Das ist ein großes Problem zwecks Lagerung oder

Leitung in Metallrohren. Entweder sollte auf jegliches solches Material verzichtet werden oder wie oben erwähnt das Wasser mittels Filter oder Tabletten nachbehandelt werden.

## 2.9 Vergleich verschiedener Entsalzungsanlagen aus der Literatur

Zum Thema kleine Wasserentsalzungsanlagen finden sich viele verschiedenen Herangehensweisen, von mehrstufigen bis einstufigen Systemen, die mittels Verbrennungsmotoren oder erneuerbaren Energien, wie Windmühlen und Photovoltaikanlagen, gekoppelt an Batterien und ohne, betrieben werden können. Alle diese Anlagen haben aber immer gemeinsam, dass für einen kosten- und energieeffizienten Betrieb eine Form von Energierückgewinnung benötigt wird. Vor allem bei einstufigen Anlagen, die nicht durch Verbrennungsmotoren, sondern rein durch erneuerbare Energien betrieben werden sollen ist eine Energierückgewinnung mittels Druckaustauscher unumgänglich um eine gute Filterleistung zu bekommen.

Die Arten des kompakten Aufbaues variieren und es gibt unterschiedliche Versionen für Druckaustauscher, wie zum Beispiel die Clark Pumpe der Firma Spectra Watermakers Inc.. In M.Thomson et al. [36] wird eine kleine Entsalzungsanlage beschrieben, die mittels dieser dualen Kolbenpumpe gute Ergebnisse erzielt, mit einer Trinkwassergewinnung von 460 l/h bei einem Energieverbrauch von unter 1.600W. Sie sticht zusätzlich durch die Möglichkeit heraus, dass sie ohne eine zweite motorisierte Pumpe und durch ihre Funktionsweise mit verschiedenen Flüssen betrieben werden kann. Jedoch wird im selben Paper auch empfohlen eine zweite Pumpe zu verwenden um den Fluss des aufgetrennten Produkts zu verbessern und den spezifischen Energieverbrauch über unterschiedliche Ströme zu gewährleisten.

Im Artikel von T.M.Mansour et al. [37] wurde ein System getestet, das zwei dieser Clark Pumpen parallel und alternierend voneinander verwendet und 100 l/h an Wasser fördert. Das Projekt von der Faculty of Engineering der Suez Canal Universität in Ägypten hat zusätzlich zu Tests direkt an der Anlage eine Simulation über MATLAB durchgeführt und ist zum Schluss gekommen, dass je geringer die Rückgewinnung ist, desto mehr Energie gespart werden konnte. Bei einer Rückgewinnung von 10% konnte so 80% Energie gespart werden und die ökonomische Analyse hat eine Kostenverringerung um 65% bei einer Produktion von 500 l/h ergeben.

Bei der Energieversorgung für kleine und auch transportable Umkehrosmosanlagen zeichnet sich ein Trend zu Antrieben durch Photovoltaik- und Windanlagen ab. Das liegt daran, dass in abgelegenen Gegenden die Energie zum Betrieb der Pumpen nur aus solchen lokalen Energiequellen gewonnen werden kann, da die großen Energielieferanten im Normalfall zu weit entfernt liegen und das Stromnetz nicht in diese Regionen geleitet werden kann.

In dem Paper von D.P.Clarke et al. [38] wird besprochen welche wichtigen Faktoren zum Erstellen einer kleinen, eigenständigen Entsalzungsanlage, betrieben durch Solarenergie, berücksichtigt werden müssen. Konkret geht es um eine Anlage, die mit einem  $0,87m^2$  großen Solarpanel betrieben werden und dabei 5,5 l/h Trinkwasser produzieren soll. Aus dem Artikel geht hervor, dass zu einem sinnvollen Betrieb eine zusätzliche Batterie unumgänglich ist, da sonst durch die unregelmäßige Energieproduktion es pro Jahr zum Aussetzen der Produktion im Ausmaß von Tagen kommen kann. Generell gilt aber, wenn keine Batterie in der Schaltung vorhanden ist, kann die Produktion von Süßwasser nur gesteigert werden, wenn die Solarfläche erweitert wird. Wird jedoch eine Batterie im System inkludiert, ist die generelle Produktion schon angehoben. Durch die Vergrößerung des Panels kann die Trennleistung noch gesteigert werden, da durch die größere Fläche mehr Überschuss an Energie gewonnen werden und somit diese gespeichert und zum schnelleren Laden der Batterie genutzt werden kann.

Der direkte mechanische Betrieb eines Umkehrosmosesystems durch eine Windmühle hingegen

kommt ohne eine zusätzliche Batterie zur Überbrückung aus.

Eine erste Simulation eines solchen Aufbaues wurde von M.S. Miranda und D.Infield [39] durchgeführt, bei der eine 2,2kW Windturbine verwendet wurde, um eine Umkehrosmose zu betreiben, die mit variablen Strömen zurecht kommt. Dafür wurde unter anderem eine Clarkpumpe verwendet, die gut auf unterschiedliche Ströme reagiert und es wurde auf jegliche Art von Backup verzichtet, da ein möglichst einfaches und robustes System für abgelegene Gegenden angenommen wurde. Es wurde eine MATLAB Simulation mit einer Feedwasser Salzkonzentration von 40.000ppm bei 25°C für kurze Messungen bei starken Windböen und lange Messungen bei gleichmäßigen Windgeschwindigkeiten durchgeführt. Das System war vielversprechend, aber musste noch praktisch getestet werden.

S.G.J. Heijman et al. [40] machten praktische Versuche mit einer solchen Konstruktion. Es wurde eine kommerzielle Windmühle benutzt, die durch ein Bremssystem davon abgehalten wird die Pumpe trocken laufen zu lassen, was wiederum bedeutet, dass wenn zu wenig Wind vorhanden ist, um das Rad zu bewegen, der Antrieb blockiert wird. Das ist der Fall bei einer Windstärke von 7 m/s. Durch eine zusätzliche Energierückgewinnung wird die Stärke von 7 m/s nur zum Starten des Systems benötigt und kann im Betrieb auf eine Windstärke von 5 m/s gedrückt werden. Mit diesem Aufbau konnte eine konstante Trinkwassergewinnung von rund 20% erreicht werden, auch ohne zusätzlicher elektrischer Energie. Damit sich in der Anlage bei einer Stehzeit nicht Ablagerungen bilden können, wird eine kleine Menge gefiltertes Wasser in einer gewissen Höhe gespeichert und kann manuell benutzt werden um das System mit diesem durchzuspülen.

Der Prototyp einer mobilen Wasserentsalzungsanlage, die 15 kg wiegt und in einen Koffer passt, wird beschrieben von Q. Li et al. [41]. Dieser folgt dem gleichen Gedanken wie der in dieser Arbeit beschriebene Aufbau und das Projekt des „Wasserfahrrades“. Der Unterschied liegt in der verwendeten Umkehrosmosemembran, die kein Wickelmembranmodul ist, sondern eine besondere Art von Hohlfaser-Membran, die aus 9 austauschbaren dünnen RO- Membranen besteht. Sie sind sehr kompakt in der Bauweise und ihre Trennleistung ist vergleichbar mit Wickelmembranmodulen für Brackwasserentsalzung. In einem kompletten Koffersystem befinden sich unter anderem eine Hochdruckpumpe und gleich 3 solcher Umkehrosmosemodule und ergeben damit insgesamt eine Filterfläche von 0,7m<sup>2</sup>. Angetrieben wird die Pumpe mit einer Autobatterie, die entweder mit einem Autoantrieb oder einer faltbaren Photovoltaikplatte aufgeladen wird. Es wird ein Salzurückhalt von 96% bei Brackwasser von 1.000 - 2.000ppm erreicht und eine Produktion von ungefähr 8 l/h. Einen Vergleich von verschiedenen Energielieferanten für kleine RO-Anlage wurde von M.Gökçek [42] unternommen. In dem Projekt wurden 7 verschiedene Systeme getestet, die Variationen aus Zusammenstellungen von Dieselmotor, Windanlage und Photovoltaikanlagen sind. Es wurden alle Antriebe separat getestet und in Kombinationen wie Photovoltaik- und Windenergie oder Windenergie und Dieselmotor. Angetrieben wurde mit diesen unterschiedlichen Energielieferanten eine mittelgroße Entsalzungsanlage mit einer Produktion von 1.000 l/h, die keine Energierückgewinnung verwendet. Gefiltert wurde Meerwasser mit einer Konzentration von 37.000-38.000ppm. Es stellte sich heraus, dass der geringste Anschaffungspreis bei einem Dieselmotorantrieb liegt, der durch hohe Dieselmotorkosten im Betrieb negativ beeinträchtigt wird und der höchste Anschaffungspreis bei reiner Windenergie liegt. Die geringeren Kosten in Bezug auf Anschaffung und Betrieb liegen bei Systemen, die zwei Systeme miteinander kombinieren, wobei ein Antriebssystem bestehend aus Photovoltaik-Windenergie und Dieselmotor die besten Energiekosten hatte. Wenn die Umweltbelastung durch die Antriebe zusätzlich betrachtet wird, ist der Antrieb durch Dieselmotoren der schlechteste. Unter den Antrieben, die den Dieselmotor kombinieren stellte sich das System mit Photovoltaik-Wind und Diesel als umweltverträglichstes heraus, da die meiste Energie die erneuerbaren Energien produzieren und der Motor lediglich als Unterstützung verwendet wird.

Ein neues Projekt verwendet eine Entsalzungsanlage, die mittels Wellen direkt betrieben wird. K.M. Brodersen et al. [43] beschreiben eine Anlage, die mit einer hydromechanischen Kopplung direkt Meerwasser unter Hochdruck der Membran zuführt. Dabei kann auf eine Hochdruckpumpe verzichtet werden, was weniger Bauteile und eine bessere Effizienz bedeutet, da kein Verlust durch die Pumpe entsteht. Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass eine dynamische Kopplung von Energie mit „batch reverse osmosis“ BRO (Umkehrosmose, bei der die Sole ohne Vermischung mit dem Feedwasser erneut in den Feedeinlass des Systems zurückgeführt wird) verschiedene Meereszustände toleriert und dabei eine gute Produktion ergibt, was zu einer deutlich besseren Energieeffizienz führt als es bei konventionellen Umkehrosmoseanlagen der Fall ist.

Eine Umlegung von kleinen Umkehrosmoseanlagen, die mit erneuerbaren Energien betrieben werden, auf große oder mittelgroße Kraftwerke gestaltet sich schwer. Im Paper von M.T. Mito et al. [44] wird auf dieses Problem eingegangen, denn große wie auch kleine Entsalzungsanlagen benötigen einen kontinuierlichen Fluss um effizient zu filtern und um dies zu bewerkstelligen werden Anlagen, die überwiegend mit erneuerbaren Energien betrieben werden, zusätzlich aus dem kommerziellen Stromnetz unterstützt. Dies belastet die Stromnetze aber stark und deswegen ist eine Umstellung auf autarke erneuerbare Energie ein wichtiger Punkt. Dafür muss laut Mito et al. aber noch eine effizientere Energierückgewinnung entwickelt werden und mehr über das Betreiben von Anlagen mittels erneuerbaren Energien ohne zusätzlichen Batteriespeicher geforscht werden, da diese zwei Punkte die größten Probleme in großen Kraftwerken darstellen.

Auf den kanarischen Inseln wurde ebenfalls eine eigenständige Entsalzungsanlage, die nur durch Windenergie betrieben wird getestet. B.Peñate et al. [45] beschreibt dazu eine Anlage, die auf zwei verschiedene Arten betrieben wurde. Dafür wurden einmal ein Kraftwerk mit einer zentralen Windanlage betrieben, bei dem die Produktion nur vorstättenging, wenn genügend Wind vorhanden war, und einmal drei verschiedene kleinere Anlagen, die zusammengeschlossen waren und zusammen die gleiche Trinkwassergewinnung hatten wie das andere System. Es wurde damit einerseits eine fixe Produktion von Trinkwasser simuliert und andererseits eine graduelle Produktion. Es stellte sich heraus, dass die fixe Produktion zwar eine größere Menge an Wasser im Jahr filtert, obwohl sie nicht länger läuft, aber sie dafür in Hinblick auf eigenständige Energieversorgung gegenüber der graduellen Produktion das Nachsehen hat. Denn durch die einzelnen kleineren Teile des zweiten Systems wird keine Energie überproduziert und die Nachfrage des Systems besser deckt.

X.Zahng et al. [46] beschreibt das Gleichgewicht zwischen produziertem Trinkwasser einer Anlage und dem Wasserverbrauch um die Membran zum Beispiel zu Reinigen oder selbst herzustellen. Diese Balance wird auch „water footprint“ genannt und wird in den meisten Studien nicht hinterfragt. Ein wichtiger Aspekt bei Reverseosmosis-Anlagen ist aber die Pflege des Systems durch Reinigung um eine gute Trennleistung zu garantieren. In diesem Artikel wurde anhand eines realen Kraftwerkes in Australien, das eine Produktion von  $363.00m^3$  Süßwasser am Tag hat, berechnet welche Faktoren den „water footprint“ von Entsalzungsanlagen am meisten beeinträchtigen. Es stellte sich heraus, dass der größte Verbrauch, mit über 80%, des produzierten Wassers durch die chemische Reinigung, die als Vorbeugung von Scaling und Fouling an der Membran alle 2-3 Monate, oder bei akuter Verschlechterung des Permeatflusses durchgeführt werden muss, verursacht wird. Ebenfalls wird angemerkt, dass in dieser speziellen Anlage genug Trinkwasser produziert wird, sodass der Verbrauch keine große Einbuße auf die Produktion hat, aber dass es angebracht ist zu Untersuchen wie sich der Rückfluss der von der Entsalzungsanlage ausgeschiedenen Sole in das Meer auf die Umwelt auswirkt. Denn durch die erhöhten Temperaturen und den hohen Salzgehalt in diesem Nebenprodukt könnte besonders die unmittelbare Region schwer betroffen werden.

Gedanken zu Charakter und eventuellem Nutzen von ausgeschiedener Sole, oder Brine, aus Entsalzungsanlagen machte sich die Studie von M. Khan et al. [47]. In diesem Artikel wird auf die

physikalischen, chemischen und mineralogischen Eigenschaften der Sole eingegangen und dabei kam heraus, dass eine Vielzahl von wichtigen Elementen und Metallen sich in diesem Abwasser befinden. Angefangen von Calcium, Natrium, Lithium, Barium über Caesium, Eisen und Magnesium. Durch diese Erkenntnis ist es naheliegend ein Verfahren zu entwickeln, das das Metall aus der Sole extrahieren kann, was in anderen Studien schon versucht wird. Ebenfalls kann man dieses sehr salzhaltige Wasser auch zur Landwirtschaft einsetzen, sofern keine giftigen Stoffe enthalten sind und die TDS-Grenze im Rahmen des jeweiligen Landes ist, oder durch Entfernen des Natriums kann flüssiger Dünger gewonnen werden. Ein weiterer Verwendungszweck wäre das Gewinnen von Salz für die industrielle Herstellung von Chemikalien.

Alle diese Weiterverwendungen wären eine Möglichkeit das Abwasser weiter zu nutzen und nicht direkt zurück ins Meer zu leiten. Denn dies wirkt sich äußerst schädlich auf den umliegenden maritimen Lebensraum aus. Durch die Entsalzung wird das Retentat nicht nur aufkonzentriert im Salzgehalt, sondern auch noch erhitzt. Wenn dieses dann in das Gewässer zurückgeführt wird, könnte es zu einer Erhöhung der Oberflächentemperatur und einer Erhöhung des Salzgehaltes kommen. Das wiederum beeinträchtigt das Ökosystem in der Region maßgeblich. T.T. Missimer und R.G. Maliva [48] geben zu bedenken, dass man den umliegenden Lebensraum beim Aufbau eines Entsalzungssystems beachten soll, um es umweltfreundlicher zu gestalten und das Meeresleben nicht zu beeinträchtigen.

In den Abwässern oder der Sole von Umkehrosmoseanlagen befinden sich nicht nur nützliche Elemente, sondern auch Chemikalien, die genutzt werden um Membrane zu reinigen oder vor Fouling zu schützen. Was die Membran schützt und eine längere Lebensdauer bewirkt, schadet der Umwelt, deswegen gibt es Studien, die versuchen ohne den Einsatz von Chemikalien die Membranoberfläche zu reinigen. Eine Variante ist das Reinigen mittels Ultraschall, wie beschrieben von M. Qasim et al. [49]. Ultraschall kann theoretisch drei physikalische Phänomene auf der Membranoberfläche bewirken: akustisches Strömen, Mikroströmungen und das Erzeugen von Mikroströmen und -strahlen. Alle drei Effekte beruhen auf der Entwicklung von kleinen sphärischen Blasen und haben jeweils andere Auswirkungen auf die Oberfläche. Es wird in dem Paper aber auch beschrieben, dass diese Art der Entfernung von Ablagerungen auch zu Membranschäden führen kann und somit die Lebensdauer wieder verkürzt wird.

## 3 Versuchsergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der verschiedenen Messreihen vorgestellt.

Die Testmessungen wurden alle mit dem Aufbau ohne Energierückgewinnung durchgeführt, aber mit unterschiedlichen Salzkonzentrationen und angelegten Drücken. Dies gibt einen guten Grund-  
eindruck wie sich das Membranmodul im Allgemeinen verhält.

Die eigentlichen Messreihen enthalten Messungen von beiden Systemen, mit und ohne Energierück-  
gewinnung, und sind die essentiellen Resultate für diese Arbeit, da durch sie ein Vergleich gemacht  
werden kann, welcher Aufbau für die beste Auftrennung von Wasser und Salz in einer kleinen An-  
lage sorgt. Dieser Vergleich und welches Schlüsse daraus gezogen werden können wird in Kapitel 4  
besprochen.

### 3.1 Ergebnisse der Testmessungen

Alle Testmessungen wurden mit dem Wickelmodul Model AG1812 von Suez durchgeführt. Der  
Frequenzumrichter, mit dem der Motor betrieben wurde, war bei der ersten Messreihe auf 20,90Hz  
eingestellt, was im Idealfall 1200 Umdrehungen pro Minute und einem Feedfluss von 57,6 l/h durch  
die Axialkolbenpumpe entspricht. Der Druck wurde mittels der Drossel hinter dem Auslass des Ab-  
wassers des Membranmoduls geregelt. Die Durchflussgeschwindigkeit wurde mit einem optischen  
Sensor vor allem auf der Retentatseite gemessen und zusätzlich sporadisch auf der Permeat-Seite.  
Ergänzend wurde der Permeatfluss durch das Gewicht des aufgefangenen Produkts über einen  
Zeitraum von 90 Sekunden berechnet.

Da es sich bei diesen Ergebnissen nur um einen Test bezüglich der Membran und deren Reaktion  
auf unterschiedliche Drücke und Konzentrationen handelt, wurden auch während der Messung die  
Drücke stetig geändert, um eine größere Bandbreite der Effekte zu erfahren. Ebenfalls wurden die  
Salzkonzentrationen im Brackwasserbereich gehalten, da die Membran nur für diesen Bereich aus-  
gelegt ist und höhere Konzentrationen nicht zum Testen sinnvoll gewesen wären.

Bei diesen Messreihen wurden für jede Messung die entsprechenden Salzkonzentrationen in einem  
5 Liter Kanister mit deionisiertem Wasser angemischt, um ein klares und unverfälschtes Bild der  
Trennleistung des Membranmoduls zu bekommen. Von jedem dieser Reservoirkanister wurde dann  
der jeweilige Anfangswert der elektrischen Leitfähigkeit und die Temperatur vor der Messung be-  
stimmt.

Während der Messung wurden alle 5 Minuten 90 Sekunden lang Proben des Permeats entnommen,  
indem sie in einem Behälter aufgefangen wurden. Diese Proben wurden anschließend gewogen und  
dann die mS/cm Werte und die Temperatur mit einem Leitfähigkeitsmessgerät bestimmt.

In den folgenden Unterkapiteln behandelt die erste Tabelle zu jeder Salzkonzentration die Mess-  
ergebnisse, die zweite Tabelle hingegen zeigt die aus den gemessenen Werten berechneten Ergebnisse.  
Genauer gesagt den Feedfluss [l/h], den spezifischen Transmembranfluss [ $l/m^2h$ ], sowie den Salz-  
rückhalt [%], die Wasserrückgewinnung, beziehungsweise die Ausbeute, durch das Permeat [%] und  
der Salztransport  $Q_S$  durch die Membran [g/h].

Außerdem ist eine Temperaturkorrektur der gemessenen elektrischen Leitfähigkeiten auf 25°C vor-  
genommen worden, da die Temperaturen der gemessenen Werte sehr unterschiedlich sind und ein  
Vergleich sonst schwierig wäre.

### 3.1.1 Ergebnisse der 1. Testmessung

Bei einer Salzkonzentration von 1.000ppm, oder 1g Salz pro Liter, betrug die elektrische Leitfähigkeit des Feedwassers  $\sigma_F=1,91$  mS/cm bei einer Temperatur von 25°C. Dieser Wert beträgt, laut dem ermittelten Umrechnungsfaktor aus dem Unterkapitel „Referenzmessung der Salzkonzentrationen“, 1.106ppm NaCl. Tabelle 5 und 6 zeigen die Messergebnisse für diese Salzlösung und die daraus berechneten Ergebnisse.

Tabelle 5: Messergebnisse der 1. Testmessung einer Salzkonzentration von 1.000ppm

p [bar]	$Q_{P,gem}$ [l/h]	$Q_{P,ber}$ [l/h]	$Q_R$ [l/h]	$\sigma_P$ [mS/cm]	$T_P$ [°C]	$C_P$ [ppm]
15	11,84	-	-	-	-	-
16	-	13,17	38,54	0,1663	24,9	96
15	-	13,17	37,99	0,1585	25,5	92
18	-	13,17	35,29	0,1525	25,6	88
19	-	15,32	34,78	0,1970	26,4	114
21	-	15,82	32,57	0,2410	26,6	139
25	-	18,44	28,43	0,3280	27,5	189
26	16,11	-	-	-	-	-

Tabelle 6: Berechnete Ergebnisse der 1. Testmessung einer Salzkonzentration von 1.000ppm

p [bar]	$Q_F$ [l/h]	$Q_{Op}$ [l/m <sup>2</sup> h]	SR [%]	R [%]	$Q_S$ [g/h]	$\sigma_{P,25}$ [mS/cm]	$C_{P,25}$ [ppm]
16	51,71	34,65	91,32	25,47	1,26	0,167	96
15	51,16	34,65	91,72	25,74	1,21	0,157	90
18	48,46	34,65	92,04	27,17	1,16	0,150	87
19	50,10	40,33	89,71	30,58	1,74	0,191	110
21	48,39	41,63	87,41	32,69	2,20	0,232	134
25	46,87	48,51	82,87	39,34	3,49	0,310	179

Im nächsten Schritt wurde die Salzkonzentration auf 3.000ppm erhöht. Die elektrische Leitfähigkeit des Rohwassers  $\sigma_F$  dieser Lösung lag bei 5,28 mS/cm bei einer Temperatur von 25°C, dies entspricht ungefähr einem Wert von 3.048ppm NaCl. Die Tabellen 7 und 8 beschreiben die Resultate dieser Messreihen.

Tabelle 7: Messergebnisse der 1. Testmessung einer Salzkonzentration von 3.000ppm

p [bar]	$Q_{P,gem}$ [l/h]	$Q_{P,ber}$ [l/h]	$Q_R$ [l/h]	$\sigma_P$ [mS/cm]	$T_P$ [°C]	$C_P$ [ppm]
20	-	-	38,18	-	-	-
25	-	12,32	34,17	0,501	26,6	289
28	15,08	-	-	-	-	-
29	-	15,46	33,25	0,813	27,3	470
20	-	12,22	39,26	0,504	27,6	291
27	-	14,22	35,62	0,706	28,0	408
16	-	-	46,58	-	-	-
17	-	10,87	42,92	0,471	28,2	272

Tabelle 8: Berechnete Ergebnisse der 1. Testmessung einer Salzkonzentration von 3.000ppm

p [bar]	$Q_F$ [l/h]	$Q_{Op}$ [l/m <sup>2</sup> h]	SR [%]	R [%]	$Q_S$ [g/h]	$\sigma_{P,25}$ [mS/cm]	$C_{P,25}$ [ppm]
25	46,49	32,41	90,51	26,49	3,56	0,483	279
29	48,71	40,69	84,59	31,74	7,26	0,772	446
20	51,48	32,15	90,45	23,73	3,56	0,475	275
27	49,84	37,41	86,62	28,53	5,80	0,660	381
17	53,79	28,60	91,07	20,21	2,96	0,438	253

Bei der nächsten Messreihe wurde die Konzentration verdoppelt auf 6.000 ppm. Die Resultate werden in Tabelle 9 und 10 behandelt. Gestartet wurde bei einem Anfangswert von  $\sigma_F$  bei 10,44 mS/cm bei einer Temperatur von 25°C, dies entspricht in etwa einer Salzkonzentration 6.033ppm.

Tabelle 9: Messergebnisse der 1. Testmessung einer Salzkonzentration von 6.000ppm

p [bar]	$Q_{P,gem}$ [l/h]	$Q_{P,ber}$ [l/h]	$Q_R$ [l/h]	$\sigma_P$ [mS/cm]	$T_P$ [°C]	$C_P$ [ppm]
19	-	-	42,61	-	-	-
19	11,83	-	-	-	-	-
17	8,19	6,52	-	1,119	27,2	646
18	-	7,50	41,71	1,007	27,3	582
20	-	8,14	40,15	1,042	27,8	602
27	-	9,11	35,50	1,093	28,1	631
23	-	10,16	39,29	1,388	29,4	802

Tabelle 10: Berechnete Ergebnisse der 1. Testmessung einer Salzkonzentration von 6.000ppm

p [bar]	$Q_F$ [l/h]	$Q_{Op}$ [l/m <sup>2</sup> h]	SR [%]	R [%]	$Q_S$ [g/h]	$\sigma_{P,25}$ [mS/cm]	$C_{P,25}$ [ppm]
17	-	17,16 <sup>6</sup>	89,29	-	4,21	1,065	615
18	49,21	19,73	90,36	15,23	4,36	0,956	552
20	48,29	21,42	90,02	16,86	4,90	0,978	565
27	44,61	23,97	89,53	20,42	5,75	1,019	589
23	49,45	26,75	86,71	20,55	8,15	1,259	727

Schließlich wurden die Konzentration nochmal auf 8.000 ppm gesteigert. Die elektrische Leitfähigkeit betrug 13,69 mS/cm bei einer Temperatur von 25°C (beträgt ungefähr 7.910ppm NaCl). Die Resultate dieser Messungen werden in den folgenden Tabellen 11 und 12 behandelt.

Tabelle 11: Messergebnisse der 1. Testmessung einer Salzkonzentration von 8.000ppm

p [bar]	$Q_{P,gem}$ [l/h]	$Q_{P,ber}$ [l/h]	$Q_R$ [l/h]	$\sigma_P$ [mS/cm]	$T_P$ [°C]	$C_P$ [ppm]
17	8,76	-	-	-	-	-
17	-	5,632	43,089	1,268	27,2	732
17	-	5,632	43,089	1,293	27,5	747
17	-	5,632	43,089	1,312	27,9	758
21	-	7,496	42,742	1,435	28,2	829
24	-	8,140	41,962	1,574	28,5	909

Tabelle 12: Berechnete Ergebnisse der 1. Testmessung einer Salzkonzentration von 8.000ppm

p [bar]	$Q_F$ [l/h]	$Q_{Op}$ [l/m <sup>2</sup> h]	SR [%]	R [%]	$Q_S$ [g/h]	$\sigma_{P,25}$ [mS/cm]	$C_{P,25}$ [ppm]
17	48,72	14,82	90,74	11,56	4,13	1,206	697
17	48,72	14,82	90,56	11,56	4,21	1,222	706
17	48,72	14,82	90,42	11,56	4,27	1,229	710
21	50,24	19,73	89,52	14,92	6,21	1,336	771
24	50,10	21,42	88,51	16,25	7,40	1,455	841

<sup>6</sup>berechnet aus dem Permeatfluss ermittelt über das Gewicht. Der spezifische Transmembranfluss  $Q_{Op}$  berechnet von dem gemessenen Fluss mittels dem optischen liegt bei 21,55 l/m<sup>2</sup>h.

Um ein besseres Bild über die Messergebnisse zu bekommen wurden die Resultate aus den Tabellen 5 bis 12 noch grafisch aufgearbeitet. Hierzu wurde in Abbildung 18 der Salzgehalt des austretenden Permeats gegenüber dem jeweils angelegten Druck aufgetragen. Die Farbe der Punktwerte entspricht dem Salzgehalt der jeweils zu entsalzenden Lösung.

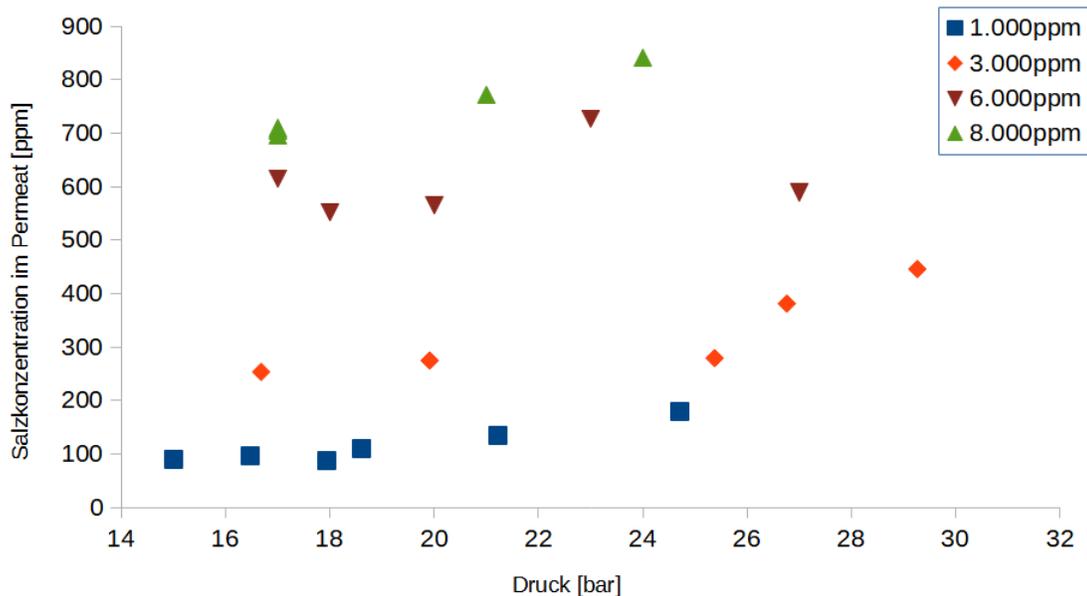


Abbildung 18: Salzgehalte im Permeat der 1. Testmessung bei unterschiedlichen angelegten Drücken auf das System

Es ist durch die Werte der  $C_{P,25}$  aus den Tabellen 6,8,10 und 12 deutlich zu erkennen, dass alle gefilterten Produkte zum einen den EU-Grenzwert für elektrische Leitfähigkeit im Trinkwasser von 2,81 mS/cm bei 25°C weit unterschreiten und dass ab einer Konzentration von 6.000ppm ein großer Unterschied beim Salzgehalt des Permeates auftritt.

Zum anderen ist auch ein Anstieg des Salzgehaltes ab einem angelegten Druck von 24bar zu erkennen und im Fall von 3.000ppm ist die Salzkonzentration des gewonnen Permeats bei 30bar fast doppelt so hoch wie bei 16bar.

Abbildung 19 zeigt den Rückhalt des Salzes durch die Membran bei sich änderndem spezifischem Transmembranfluss (Flux)

Hier zeigt sich, dass bei allen Salzkonzentrationen der niedrigste spezifische Flux den besten Salzurückhalt hat. Daraus lässt sich schließen, dass für 1.000ppm, 3.000ppm und 6.000ppm ein Transmembranfluss von circa 35l/m<sup>2</sup>h, 29-32 l/m<sup>2</sup>h, beziehungsweise 20l/m<sup>2</sup>h bei 17-20bar am besten ist. Bei 8.000ppm liegt hingegen ein Transmembranfluss von 15l/m<sup>2</sup>h bei 17bar optimal.

Es lässt also vermuten je höher die initiale Salzkonzentration ist, desto geringer sollte der Transmembranfluss über sein und der optimale Druck für den Bereich von 1.000ppm bis 8.000ppm ist zwischen 16 und 20bar.

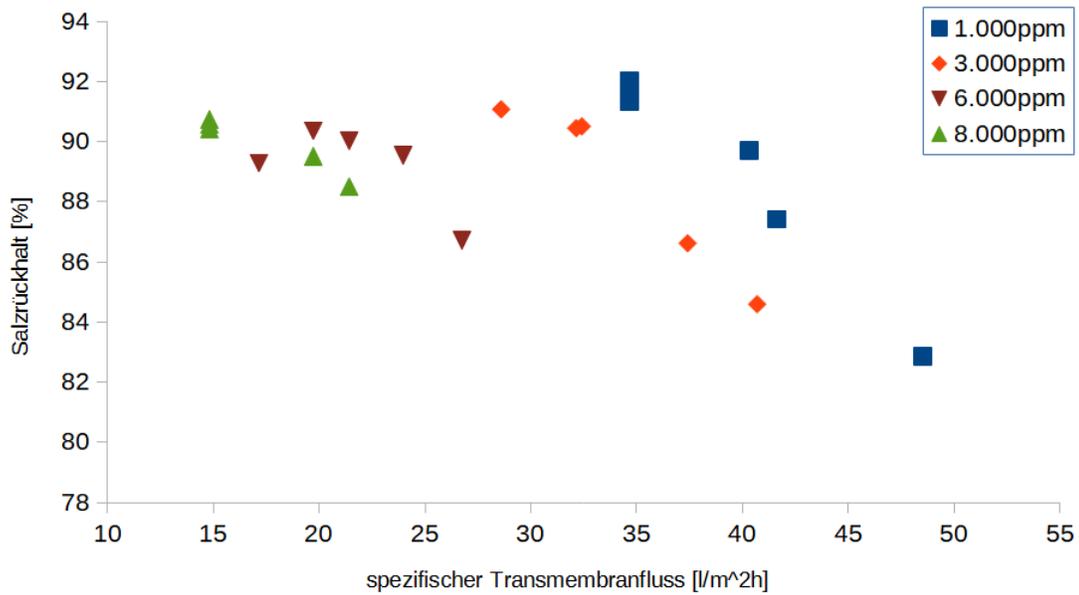


Abbildung 19: Salzrückhalt der Membran der 1. Testmessung bei unterschiedlichen Transmembranflusses

Eine zusätzliche Testmessung mit einem erweiterten Aufbau, der eine Energierückgewinnung beinhaltet, wurde bei dieser Testmessung spontan durchgeführt. Diese Messung wurde nur als kurzer Test für die später noch verwendete Anlage gemacht, deswegen gibt es nur insgesamt drei Messungen von  $\sigma$  der Produkte, wobei eine davon vom Retentat entnommen wurde.

Die Maschine wurde mit 25bar betrieben, wobei der Hochdruckausgang des Druckaustauschers bei 20bar lag. Der Ausgangswerte der elektrischen Leitfähigkeit des Reservoir-Kanisters betrug 11,76mS/cm (6.796ppm) bei 25°C.

Bei der Messung des Retentats wurde ein Wert von 16,75 mS/cm bei einer Temperatur von 25°C gemessen. Dies entspricht umgerechnet einer Konzentration von 9.676 ppm.

Die erste Messung des Permeats war 1,070 mS/cm bei 25°C und die zweite ergab 0,455 mS/cm bei 25°C, was umgerechnet die Werte 618 ppm und 263 ppm ergibt. Daraus kann der Salzrückhalt der beiden Messungen berechnet werden, der bei 91,11% und 96,14% liegt, einem viel versprechendem Resultat für die späteren Messungen.

### 3.1.2 Ergebnisse der 2. Testmessung

Eine zweite Testmessung war erforderlich, da das System zwischenzeitlich umgebaut wurde, um eine bessere Ausgangslage für das Umrüsten auf Energierückgewinnung mittels Druckaustauscher zu sichern. Dadurch konnte überprüft werden, ob die Entsalzung keine Beeinträchtigung erfährt und auch hier befriedigende Ergebnisse erzielt werden. Deswegen wurde wieder die Wahl getroffen den Brackbereich mit dieser Messreihe nicht zu verlassen und mit den Konzentrationen von 1.000ppm, 8.000ppm und 10.000ppm zu messen.

Auch hier sind alle Messungen mit dem Wickelmodul Model AG1812 von Suez durchgeführt worden. Der Frequenzumrichter, mit dem der Motor der Hochleistungspumpe betrieben wurde, war bei der Messung der 1.000ppm auf 21,98 Hz (1319 Umdrehungen pro Minute) eingestellt und bei den anderen auf 21,17 Hz (1270 Umdrehungen pro Minute). Das bedeutet in der Theorie sollte ein Feedfluss von 63,3l/h und 58,4l/h erreicht werden. Das wurde aber mit den Messungen nicht erreicht, das liegt einerseits an den unterschiedlichen Salzkonzentrationen, die einen Effekt auf die Förderleistung der Pumpe haben und andererseits an der verwendeten Riemenwelle, die die Leistung der Pumpe zusätzlich hemmt.

Der Druck wurde abermals mittels der Drossel hinter dem Auslass des Abwassers vom Membranmodul auf 16 und 24 bar geregelt. Diese zwei Drücke haben sich durchgesetzt, da sich aus dem ersten Test gezeigt hat, dass diese Bereiche große Unterschiede in der Fördermenge und dem Salzgehalt des gefilterten Wassers zeigen.

Bei dieser Messung wurden Proben sowohl vom Permeat, als auch vom Retentat, in einer Messdauer von jeweils 90 Sekunden in einem Behälter aufgefangen und ihre jeweilige elektrische Leitfähigkeit, Temperaturen und ihr Gewicht gemessen.

Die entsprechenden Salzkonzentrationen wurden in einen 10 Liter Kanister mit Leitungswasser angemischt. Diesmal wurde auf deionisiertes Wasser verzichtet, da zum einen die Beschaffung ein Hindernis darstellte und zum anderen versucht wurde die spätere Verwendung besser zu simulieren. Von jedem dieser Reservoirkanister wurde auch hier der jeweilige Anfangswert  $\sigma_F$  und die Temperatur vor der Messung bestimmt.

Die Messung einer Lösung mit einem Salzgehalt von 1.000 ppm wird in den Tabellen 13 und 14 behandelt, wobei Tabelle 13 die gemessenen Werte wiedergibt und die Tabelle 14 die daraus berechneten Flüsse, die Auftrennung und die Temperaturkorrektur auf 25°C der elektrischen Leitfähigkeit des Retentats und des Permeats beschreibt. Das Reservoirwasser zeigte eine elektrische Leitfähigkeit von 2,29mS/cm bei 25°C, was umgerechnet eine Wert von 1.324ppm entspricht.

Tabelle 13: Messergebnisse der 2. Testmessung einer Salzkonzentration von 1.000ppm

p [bar]	$Q_P$ [l/h]	$Q_R$ [l/h]	$\sigma_P$ [mS/cm]	$C_P$ [ppm]	$T_P$ [°C]	$\sigma_R$ [mS/cm]	$C_R$ [ppm]	$T_R$ [°C]
16	15,21	26,40	0,821	474	26	2,74	1583	26,8
16	13,84	27,01	0,730	422	26	2,83	1635	26,8
16	12,96	27,20	0,643	371	26,2	2,83	1635	26,7
24	18,06	20,50	0,786	454	27,4	2,63	1519	28,9
24	17,65	21,36	0,840	485	27,8	2,75	1589	28,6
24	17,58	20,24	0,798	461	28,5	2,71	1565	28,3

Tabelle 14: Berechnete Ergebnisse der 2. Testmessung einer Salzkonzentration von 1.000ppm

p [bar]	$Q_F$ [l/h]	$Q_{Op}$ [l/m <sup>2</sup> h]	SR [%]	R [%]	$Q_S$ [g/h]	$\sigma_{P,25}$ [mS/cm]	$C_{P,25}$ [ppm]	$\sigma_{R,25}$ [mS/cm]	$C_{R,25}$ [ppm]
16	41,61	40,03	64,17	36,56	7,21	0,802	463	2,63	1.519
16	40,85	36,43	68,14	33,89	5,84	0,713	412	2,72	1.569
16	40,16	34,11	71,94	32,27	4,81	0,626	361	2,72	1.573
24	38,55	47,52	65,70	46,84	8,20	0,744	430	2,41	1.393
24	39,01	46,44	63,34	45,24	8,56	0,789	456	2,54	1.466
24	37,82	46,26	65,18	46,48	8,10	0,738	426	2,52	1.454

Bei der nächsten Messung mit einer Salzkonzentration von 8.000ppm lag der Anfangswert der Leitfähigkeit des Reservoirs bei 14,47 mS/cm bei 25°C, was einem ppm-Wert von 8.360 entspricht. Die genauen gemessenen Werte sind aus der Tabelle 15 zu entnehmen und die berechneten Werte aus der Tabelle 16.

Tabelle 15: Messergebnisse der 2. Testmessung einer Salzkonzentration von 8.000ppm

p [bar]	$Q_P$ [l/h]	$Q_R$ [l/h]	$\sigma_P$ [mS/cm]	$C_P$ [ppm]	$T_P$ [°C]	$\sigma_R$ [mS/cm]	$C_R$ [ppm]	$T_R$ [°C]
16	4,54	32,88	2,89	1.669	25,4	15,71	9.075	26,3
16	4,58	32,99	2,92	1.687	25,5	15,73	9.087	26,6
16	4,70	33,11	2,91	1.681	25,5	15,78	9.115	26,9
24	7,08	28,83	3,65	2.108	26,8	16,71	9.653	28
24	7,10	28,7	3,61	2.085	27	16,53	9.549	28,8
24	7,25	28,92	3,56	2.056	27,4	16,52	9.543	29

Tabelle 16: Berechnete Ergebnisse der 2. Testmessung einer Salzkonzentration von 8.000ppm

p [bar]	$Q_F$ [l/h]	$Q_{Op}$ [l/m <sup>2</sup> h]	SR [%]	R [%]	$Q_S$ [g/h]	$\sigma_{P,25}$ [mS/cm]	$C_{P,25}$ [ppm]	$\sigma_{R,25}$ [mS/cm]	$C_{R,25}$ [ppm]
16	37,41	11,94	80,03	12,12	7,57	2,863	1.654	15,25	8.808
16	37,57	12,05	79,82	12,19	7,73	2,886	1.667	15,17	8.761
16	37,81	12,37	79,89	12,43	7,90	2,876	1.661	15,11	8.730
24	35,91	18,62	74,78	19,71	14,92	3,503	2.024	15,62	9.023
24	35,80	18,67	75,06	19,82	14,80	3,450	1.993	15,18	8.771
24	36,17	19,07	75,40	20,04	14,91	3,372	1.948	15,11	8.728

Schließlich enthalten die Tabellen 17 und 18 die Ergebnisse, die durch das Entsalzen einer Salzlösung von 10.000ppm gewonnen wurden. Das Feedwasser hatte einen Wert von  $\sigma_F=17,04$  mS/cm bei 25°C und folglich einen errechneten Salzgehalt von 9.843ppm.

Tabelle 17: Messergebnisse der 2. Testmessung einer Salzkonzentration von 10.000ppm

p [bar]	$Q_P$ [l/h]	$Q_R$ [l/h]	$\sigma_P$ [mS/cm]	$C_P$ [ppm]	$T_P$ [°C]	$\sigma_R$ [mS/cm]	$C_R$ [ppm]	$T_R$ [°C]
16	3,71	34,02	3,8	2.195	26,5	18,63	10.762	27,8
16	3,86	34,92	3,8	2.195	26,9	18,62	10.756	28,2
16	3,50	34,14	3,79	2.189	27	18,46	10.664	28,6
24	5,83	30,36	4,36	2.519	28,5	20,7	11.957	30
24	6,02	30,82	4,43	2.559	28,6	20,7	11.957	30,1
24	6,08	30,49	4,46	2.576	29	20,5	11.842	30,5

Tabelle 18: Berechnete Ergebnisse der 2. Testmessung einer Salzkonzentration von 10.000ppm

p [bar]	$Q_F$ [l/h]	$Q_{Op}$ [l/m <sup>2</sup> h]	SR [%]	R [%]	$Q_S$ [g/h]	$\sigma_{P,25}$ [mS/cm]	$C_{P,25}$ [ppm]	$\sigma_{R,25}$ [mS/cm]	$C_{R,25}$ [ppm]
16	37,73	9,77	77,70	9,84	8,15	3,672	2.121	17,49	10.104
16	38,78	10,15	77,70	9,94	8,46	3,639	2.102	17,33	10.010
16	37,64	9,20	77,76	9,29	7,65	3,622	2.092	17,03	9.838
24	36,19	15,34	74,41	16,10	14,68	4,031	2.329	18,53	10.704
24	36,84	15,84	74,00	16,34	15,41	4,087	2.361	18,49	10.681
24	36,57	15,99	73,82	16,62	15,65	4,079	2.356	18,16	10.489

In der Abbildung 20 wird die Abhängigkeit der Salzkonzentration im aufgetrennten Wasser aller gemessenen Werte im Bezug auf den angewandten Druck gezeigt. Als Richtwert ist die EU-Grenze von 2,81 mS/cm bei 25°C, oder 1.632 ppm Salzgehalt im Wasser, eingezeichnet, um die Ergebnisse besser einordnen zu können. Der unterschiedliche Salzgehalt des Feedwassers ist wiederum farblich markiert.

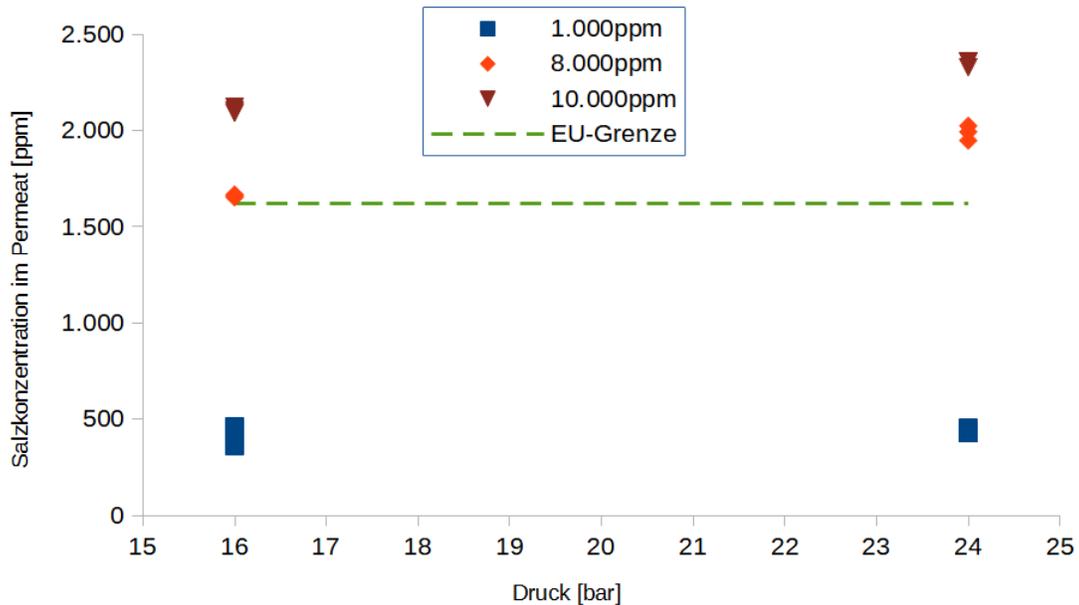


Abbildung 20: Salzkonzentrationen im Permeat bei angewendeten Drücken von 16 und 24 bar bei der 2. Testmessung

Deutlich zu erkennen ist hier, dass nur die 1.000ppm Ergebnisse unter dem Grenzwert der EU für Trinkwasser liegen. Allerdings liegen die Messungen von 8.000ppm bei 16bar nur knapp über den EU-Grenzwert und könnten bei dringenden Bedarf und ausnahmsweise als Trinkwasser verwendet werden.

Die Ergebnisse von 8.000ppm bei 24bar und beide von 10.000ppm hingegen liegen zu weit über der Grenze, aber das entsalzte Wasser wäre in einer sehr guten Ausgangslage um es nochmals mit der Anlagen aufzutrennen.

Ebenfalls sollte auch bei dieser Testreihe der Trend beachtet werden, dass ein besseres Trennergebnis bei niedrigeren Drücken um die 16bar zu erwarten ist.

Abbildung 21 lässt erkennen, dass der Transmembranfluss bei 1.000ppm deutlich höher ist, als der von 8.000ppm und 10.000ppm. Es zeigt sich auch, dass der Salzurückhalt bei 1.000ppm bei diesem Flux, im Gegensatz zu den anderen beiden, mehr schwankt und ebenfalls niedriger ist. Das liegt vermutlich daran, dass der Richtwert für den Flux bei der verwendeten Membran bei  $8-34l/m^2h$  liegt und dementsprechend mit dem vorliegenden Werten von fast  $50l/m^2h$  überschritten wird.

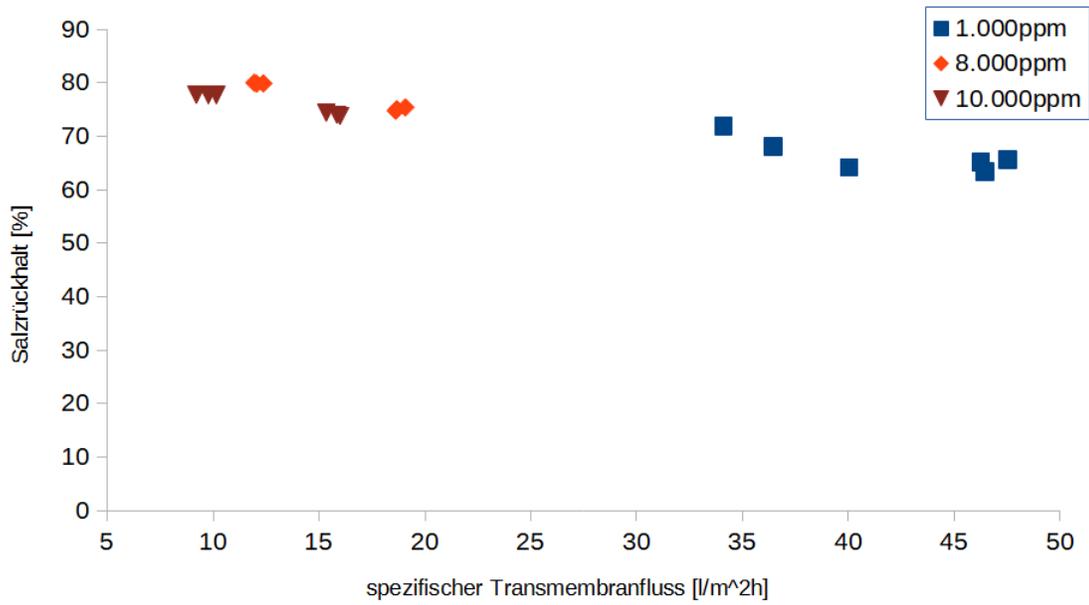


Abbildung 21: Salzurückhalt der Membran bei unterschiedlichen Transmembranflüssen bei der 2. Testmessung

In Abbildung 22 ist das Verhältnis des spezifischen Transmembranfluss  $Q_{Op}$  zur Ausbeute  $R$  zu sehen und es zeigt sich, dass mit steigendem Flux die Trinkwasserrückgewinnung annähernd linear ansteigt. Das ist ein wichtiger Punkt, denn es bedeutet, dass man bei dieser Anlage entscheiden muss ob mehr gefiltertes Wasser auf Kosten der Qualität gewünscht ist, oder das Gegenteil.

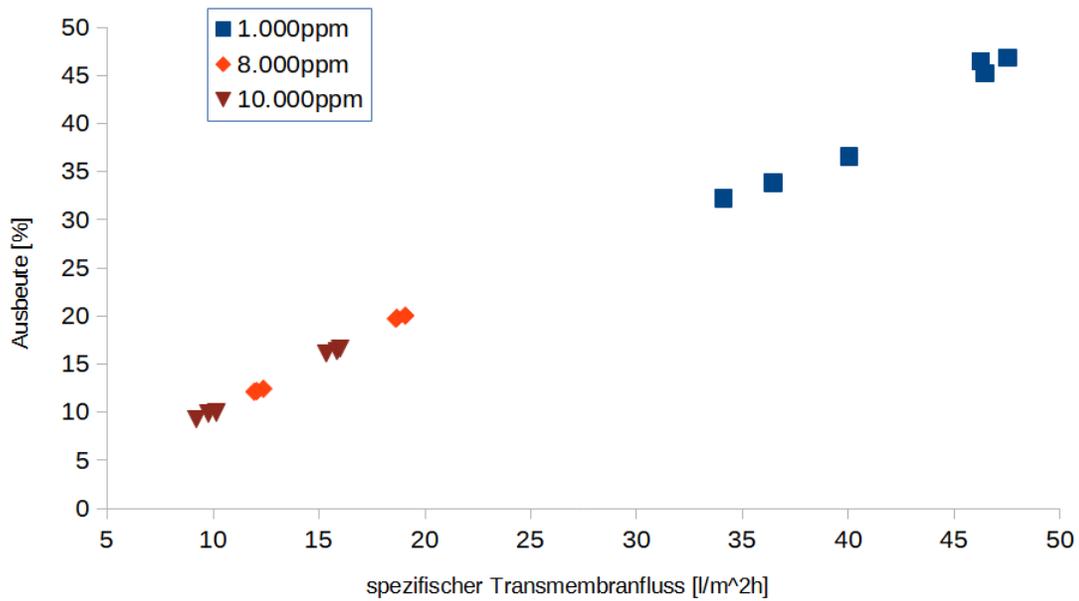


Abbildung 22: Das Verhältnis der Trinkwasserausbeute der Membran zu unterschiedlichen Transmembranflüssen und Salzkonzentrationen des Rohwassers bei der 2. Testmessung

### 3.2 Ergebnisse der 1. Messreihe

Bei den eigentlichen Messreihen für das System zum Vergleichen der beiden Anlagen, wurden Salzkonzentrationen von 2.000ppm, 10.000ppm und 20.000ppm verwendet. Dies hat den Grund, dass die Anlage im späteren Projekt höhere Salzkonzentrationen filtern sollte und somit das Verhalten in diesen Regionen auch untersucht werden musste.

Das Membranmodul ist wie in den vorherigen Messungen das Model AG1812 von Suez und der Motor der Pumpe wird mit der gleichen Frequenz von 21,17 Hz, 1270 Umdrehungen pro Minute, wie im zweiten Testdurchlauf, betrieben und sollte einen Feedstrom von bis zu 58l/h befördern. Der Druck wurde bei dem System ohne Energierückgewinnung mittels der Drossel am Retentatsauslauf wieder auf 16 und 24 bar in den ersten beiden Konzentrationen geregelt und auf 25 und 35 bar bei 20.000ppm. Der erhöhte Druck bei der Entsalzung der höchsten Salzkonzentration des Feedwassers war nötig, da der osmotische Druck der Sole schon bei knapp 16 bar liegt und bei geringeren Drücken keine, beziehungsweise ein sehr schlechter Salzurückhalt zustande kommen würde.

Der Druck bei der Anlage mit Energierückgewinnung konnte in diesem Aufbau nicht reguliert werden, was zur Folge hat, dass die Messungen nicht beim gleichen Druck wie beim ersten System gemessen werden konnten. In der Regel lagen die Drücke deutlich darunter.

Zuerst werden die Messergebnisse für das System ohne Energierückgewinnung, oder ohne Druck-austauscher (PX) durch die Tabellen 19 bis 24 behandelt, anschließend werden die Resultate für die Anlage mit Energierückgewinnung in den Tabellen 25 - 30 angeführt. Zusätzlich werden die Messungen in den Abbildungen 23 bis 26 grafisch aufgearbeitet, um das Verständnis zu erleichtern.

Die entsprechenden Salzkonzentrationen wurden auch hier in einem 10 Liter Kanister mit Leitungswasser angemischt und die elektrische Leitfähigkeit mit dazugehöriger Temperatur bestimmt. Es wurden jeweils 90 Sekunden Proben von Permeat und Retentat genommen und wiederum deren  $\sigma$ , T und Gewicht gemessen.

### 3.2.1 Messungen ohne Energierückgewinnung

Die Ergebnisse des Feedwassers mit einer Salzkonzentration von 2.000 ppm lassen sich den Tabellen 19 und 20 entnehmen. Der Anfangswert der elektrischen Leitfähigkeit des Reservoirs lag bei 4,15mS/cm bei 25°C. Umgerechnet beträgt das einem Salzgehalt von 2.397 ppm.

Tabelle 19: Messergebnisse der 1. Messreihe ohne Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 2.000ppm

p [bar]	$Q_P$ [l/h]	$Q_R$ [l/h]	$\sigma_P$ [mS/cm]	$C_P$ [ppm]	$T_P$ [°C]	$\sigma_R$ [mS/cm]	$C_R$ [ppm]	$T_R$ [°C]
16	8,67	28,81	0,811	468	26	4,9	2.831	27,1
16	9,45	29,15	0,845	488	26,5	5	2.888	27,5
16	9,12	28,93	0,832	481	26,7	5	2.888	27,7
24	12,93	23,26	1,325	765	28,3	5,08	2.934	29,2
24	12,80	21,00	1,278	738	28,8	4,78	2.761	29,6
24	12,87	22,68	1,29	745	29	5,08	2.934	30,1

Tabelle 20: Berechnete Ergebnisse der 1. Messreihe ohne Energierückgewinnung einer Salzkonzentration von 2.000ppm

p [bar]	$Q_F$ [l/h]	$Q_{Op}$ [l/m <sup>2</sup> h]	SR [%]	R [%]	$Q_S$ [g/h]	$\sigma_{P,25}$ [mS/cm]	$C_{P,25}$ [ppm]	$\sigma_{R,25}$ [mS/cm]	$C_{R,25}$ [ppm]
16	37,48	22,82	80,45	23,14	4,06	0,792	458	4,67	2.699
16	38,60	24,86	79,63	24,48	4,61	0,817	472	4,73	2.730
16	38,05	24,00	79,95	23,97	4,38	0,800	462	4,70	2.718
24	36,19	34,03	68,07	35,74	9,90	1,230	711	4,63	2.672
24	33,81	33,69	69,20	37,87	9,45	1,174	678	4,32	2.493
24	35,55	33,86	68,91	36,19	9,59	1,180	682	4,54	2.621

Bei der zweiten Messung mit erhöhtem Salzgehalt von 10.000 ppm betrug die elektrische Leitfähigkeit des Rohwassers 17,01 mS/cm bei einer Temperatur von 25°C (umgerechnet ein Salzgehalt von 9.825ppm). Die Messergebnisse sind in der Tabelle 21 aufgelistet und die daraus berechneten Werte in der Tabelle 22.

Tabelle 21: Messergebnisse der 1. Messreihe ohne Energierückgewinnung einer Salzkonzentration von 10.000ppm

p [bar]	$Q_P$ [l/h]	$Q_R$ [l/h]	$\sigma_P$ [mS/cm]	$C_P$ [ppm]	$T_P$ [°C]	$\sigma_R$ [mS/cm]	$C_R$ [ppm]	$T_R$ [°C]
16	3,27	34,69	3,64	2.103	26,8	18,68	10.791	27,5
16	3,24	35,10	3,63	2.097	26,9	18,59	10.739	27,8
16	3,38	34,84	3,73	2.155	27	18,62	10.756	28
24	5,54	29,00	4,22	2.438	28	19,02	10.987	29,3
24	5,49	29,62	4,17	2.409	28,1	20,5	11.842	29,2
24	5,54	30,06	4,30	2.484	28,4	20,4	11.784	29,6

Tabelle 22: Berechnete Ergebnisse der 1. Messreihe ohne Energierückgewinnung einer Salzkonzentration von 10.000ppm

p [bar]	$Q_F$ [l/h]	$Q_{Op}$ [l/m <sup>2</sup> h]	SR [%]	R [%]	$Q_S$ [g/h]	$\sigma_{P,25}$ [mS/cm]	$C_{P,25}$ [ppm]	$\sigma_{R,25}$ [mS/cm]	$C_{R,25}$ [ppm]
16	37,96	8,61	78,60	8,62	6,88	3,494	2.018	17,65	10.198
16	38,35	8,54	78,66	8,46	6,80	3,476	2.008	17,45	10.082
16	38,22	8,89	78,07	8,84	7,28	3,564	2.059	17,40	10.054
24	34,54	14,58	75,19	16,04	13,50	3,945	2.279	17,28	9.984
24	35,12	14,45	75,48	15,64	13,23	3,889	2.247	18,67	10.784
24	35,60	14,58	74,72	15,56	13,76	3,984	2.302	18,42	10.640

Die Messungen der dritten und höchsten Salzkonzentration des Feedwassers von 20.000 ppm im System ohne Energierückgewinnung können aus den Tabellen 23 und 24 entnommen werden. Die elektrische Leitfähigkeit dieser Lösung lag zu Beginn bei 35,56 mS/cm bei 25°C, umgerechnet liegt dies bei einem ppm-Wert von 20.539.

Tabelle 23: Messergebnisse der 1. Messreihe ohne Energierückgewinnung einer Salzkonzentration von 20.000ppm

p [bar]	$Q_P$ [l/h]	$Q_R$ [l/h]	$\sigma_P$ [mS/cm]	$C_P$ [ppm]	$T_P$ [°C]	$\sigma_R$ [mS/cm]	$C_R$ [ppm]	$T_R$ [°C]
25	2,66	32,65	8,23	4.754	25,9	35,5	20.507	26,1
25	2,70	32,78	8,42	4.864	25,7	35,7	20.622	26,4
25	2,84	32,32	8,62	4.979	25,9	35,7	20.622	26,7
35	5,13	26,04	9,32	5.332	26,9	37,3	21.547	28,1
35	4,97	24,84	9,50	5.488	27,1	37,1	21.431	28,5
35	5,11	25,12	9,55	5.517	27,4	37,3	21.547	29

Tabelle 24: Berechnete Ergebnisse der 1. Messreihe ohne Energierückgewinnung einer Salzkonzentration von 20.000ppm

p [bar]	$Q_F$ [l/h]	$Q_{Op}$ [l/m <sup>2</sup> h]	SR [%]	R [%]	$Q_S$ [g/h]	$\sigma_{P,25}$ [mS/cm]	$C_{P,25}$ [ppm]	$\sigma_{R,25}$ [mS/cm]	$C_{R,25}$ [ppm]
25	35,32	7,01	76,85	7,54	12,66	8,060	4.656	34,61	19.994
25	35,49	7,12	76,32	7,62	13,15	8,284	4.785	34,57	19.972
25	35,16	7,47	75,76	8,08	14,14	8,442	4.877	34,34	19.838
35	31,16	13,49	74,04	16,45	27,34	8,840	5.106	34,79	20.097
35	29,80	13,07	73,28	16,67	27,26	9,058	5.232	34,30	19.815
35	30,23	13,45	73,14	16,91	28,20	9,045	5.225	34,12	19.707

Auch bei dieser Messung zeigt sich wieder das gleiche Bild wie bei den Testmessungen zuvor. Die Entsalzung bei niederen Drücken liefert bessere Resultate in Form von geringeren  $\sigma_P$ -Werten als bei höheren Drücken.

Die Ergebnisse der 2.000ppm Messung liegen, wie erwartet, deutlich unter dem EU-Grenzwert, jedoch liegen die weiteren Messwerte deutlich oberhalb dieser Grenze. Allerdings sollten alle dieser gefilterten Produkte nach einer weiteren Entsalzung durch die Anlage auch im trinkbaren Bereich liegen und sind somit eine gute Grundlage, sofern genug Wasser zum erneuten Auftrennen überhaupt zur Verfügung steht. Bei einem Permeatfluss von 2-3 l/h ist es zum Beispiel unwahrscheinlich, dass der Aufwand einer erneuten Aufarbeitung mit der Anlage sinnvoll ist.

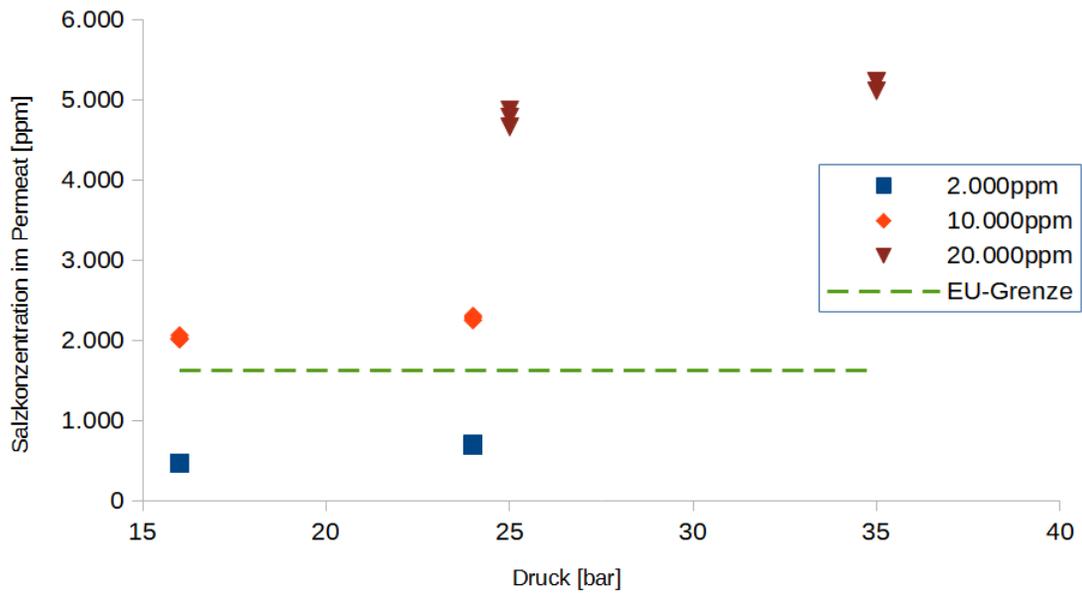


Abbildung 23: Salzgehalt des Permeats bei den angelegten Drücken von 16, 24, 25 und 35 bar bei unterschiedlichen Ausgangskonzentrationen des Feedwassers ohne Energierückgewinnung bei der 1. Messreihe

Ebenfalls hat sich die Vermutung bestätigt, dass die verwendete Membran für Salzkonzentrationen im Meerwasserbereich, wie 20.000ppm, nicht geeignet ist, wenn man die Abbildung 24 betrachtet. Der spezifische Transmembranfluss sinkt zu Werten von  $7l/m^2h$ , was unterhalb des optimalen Nutzungsbereichs der Membran liegt und zu einem Salzurückhalt um die 75% und darunter führt. Zusätzlich ist der schlechte Rückhalt der 2.000ppm Salzkonzentration bei einem Druck von 24bar hervorzuheben. Im Vergleich zu den Werten der Messung bei 16bar ist dieser um 20% gesunken.

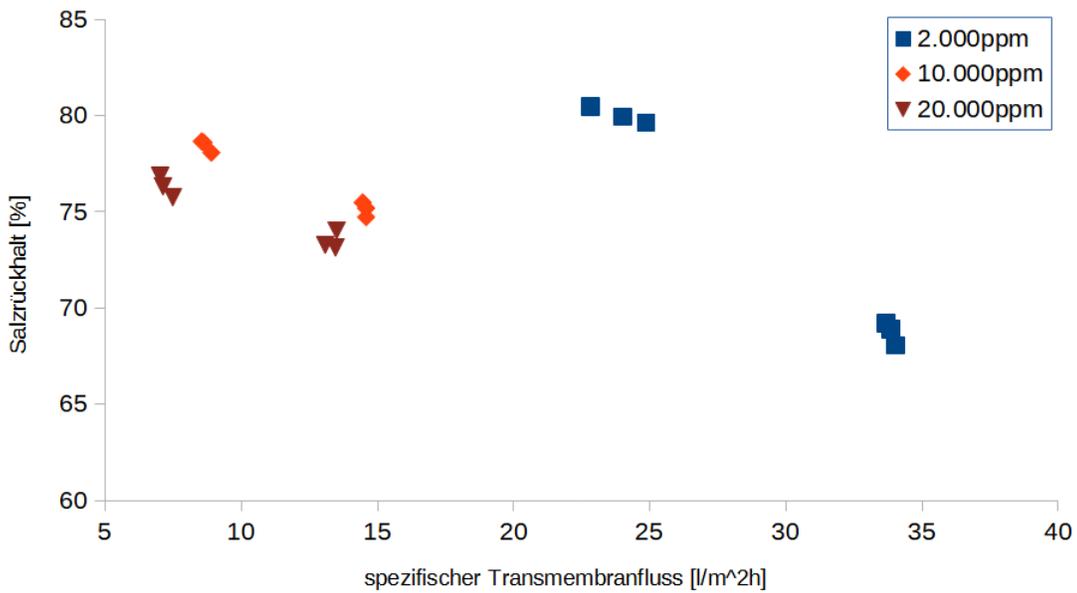


Abbildung 24: Salzrückhalt SR der Membran bei unterschiedlichen spezifischen Transmembranflüssen  $Q_{Op}$  der 1. Messreihe ohne Verwendung einer Energierückgewinnung

### 3.2.2 Messungen mit Energierückgewinnung

Die erste Messung an der modifizierten Anlage barg, wie erwähnt, einige Überraschungen. Durch den Druckaustauscher, der unabhängig von der restlichen Anlage mit einer zweiten Pumpe<sup>7</sup> mit Feedwasser gespeist wird, konnte der Druck nicht wie in den vorherigen Messungen mittels einer Drossel am Retentatausgang reguliert werden. Das Schließen der Drossel hatte lediglich den Effekt, dass der Solefluss gehemmt wurde und zwei Problemen hervorgerufen hat.

Ein Problem war, dass durch das Schließen die Pumpe des Druckaustauschers gegen einen erhöhten Widerstand pumpen muss und somit nahezu kein Wasser fördert. Dies beeinträchtigt die Effizienz des Druckaustauschers und dadurch schlussendlich die Messergebnisse.

Das andere Problem ist, dass durch den erhöhten Widerstand die Hochleistungspumpe auch gegen einen höheren Widerstand ankämpfen muss. Das hat wiederum zur Folge, dass es nach längerem Betrieb zu einer Überhitzung des Motors gekommen ist und der Betrieb für längere Zeit eingestellt werden musste.

Die Einstellung der Drossel wurde so gewählt, dass der Fluss von entsalztem Produkt und Sole bei reinem Wasser annähernd gleich ist. Diese Einstellung wurde dann für alle Messungen beibehalten und nicht mehr verändert.

<sup>7</sup> da diese Pumpe eigentlich zu stark für unsere Verwendung ist musste sie zusätzlich gekühlt werden, da sie sonst Gefahr lief zu überhitzen.

Die erste Messung mit Energierückgewinnung erfolgte wieder bei einer Salzkonzentration von 2.000 ppm. Die gemessene elektrische Anfangsleitfähigkeit betrug 3,98 mS/cm bei 25°C, dies entspricht einer Salzkonzentration von knapp 2.300 ppm. Die Ergebnisse dieser Messung sind in den Tabellen 25 und 26 aufgeführt.

Tabelle 25: Messergebnisse der 1. Messreihe mit Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 2.000ppm

p [bar]	$Q_P$ [l/h]	$Q_R$ [l/h]	$\sigma_P$ [mS/cm]	$C_P$ [ppm]	$T_P$ [°C]	$\sigma_R$ [mS/cm]	$C_R$ [ppm]	$T_R$ [°C]
13,5	12,32	5,75	0,348	201	30,5	6,08	3.512	29,8
13,5	13,11	5,83	0,328	189	30,7	6,85	3.957	31,7
12,75	12,84	5,68	0,428	247	30,7	6,65	3.841	32,3

Tabelle 26: Berechnete Ergebnisse der 1. Messreihe mit Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 2.000ppm

p [bar]	$Q_{Op}$ [l/m <sup>2</sup> h]	SR [%]	$Q_S$ [g/h]	$\sigma_{P,25}$ [mS/cm]	$C_{P,25}$ [ppm]	$\sigma_{R,25}$ [mS/cm]	$C_{R,25}$ [ppm]
13,5	32,42	91,26	2,48	0,308	178	5,47	3.158
13,5	34,51	91,76	2,48	0,289	167	5,92	3.417
12,75	33,78	89,25	3,17	0,377	218	5,67	3.277

Die nächsten Messergebnisse einer Auftrennung einer Salzlösung von 10.000 ppm sind aus den Tabellen 27 und 28 zu entnehmen. Der Startwert der elektrischen Leitfähigkeit des Rohwassers lag bei 17,25 mS/cm bei 25°C, dies entspricht umgerechnet ungefähr einer Salzkonzentration von 9.963ppm.

Tabelle 27: Messergebnisse der 1. Messreihe mit Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 10.000ppm

p [bar]	$Q_P$ [l/h]	$Q_R$ [l/h]	$\sigma_P$ [mS/cm]	$C_P$ [ppm]	$T_P$ [°C]	$\sigma_R$ [mS/cm]	$C_R$ [ppm]	$T_R$ [°C]
18	6,78	-	1,9	1.098	28,6	-	-	-
18	5,74	-	2,51	1.450	29,6	-	-	-
16,5	5,68	10,94	3,18	1.837	30,7	24,4	14.095	32,7
16	5,63	11,36	2,79	1.612	30,5	23,1	13.344	33,6

Tabelle 28: Berechnete Ergebnisse der 1. Messreihe mit Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 10.000ppm

p [bar]	$Q_{Op}$ [l/m <sup>2</sup> h]	SR [%]	$Q_S$ [g/h]	$\sigma_{P,25}$ [mS/cm]	$C_{P,25}$ [ppm]	$\sigma_{R,25}$ [mS/cm]	$C_{R,25}$ [ppm]
18	17,84	88,98	7,44	1,753	1.013	-	-
18	15,09	85,45	8,32	2,266	1.309	-	-
16,5	14,95	81,56	10,44	2,805	1.620	20,64	11.923
16	14,81	83,82	9,07	2,471	1.427	19,18	11.082

Bei der abschließenden Messung einer Salzkonzentration von 20.000ppm des Rohwassers lag die elektrische Leitfähigkeit des Reservoirs bei 33,12 mS/cm bei 25°C, also bei einer Salzkonzentration von 19.132 ppm. Die Messresultate sind in den Tabellen 29 und 30 aufgeführt.

Tabelle 29: Messergebnisse der 1. Messreihe mit Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 20.000ppm

p [bar]	$Q_P$ [l/h]	$Q_R$ [l/h]	$\sigma_P$ [mS/cm]	$C_P$ [ppm]	$T_P$ [°C]	$\sigma_R$ [mS/cm]	$C_R$ [ppm]	$T_R$ [°C]
22	3,46	1-	5,97	3.449	27,9	-	-	-
16	1,48	-	9,54	5.511	28,1	-	-	-
14	1,29	-	11,21	6.476	29	-	-	-
14	1,18	-	11,92	6.886	29,5	-	-	-
17	1,78	-	15,72	9.081	28	-	-	-
14	1,40	-	6,52	3.766	28,9	-	-	-
13,5	1,32	12,12	12,82	7.406	29,1	34,4	19.871	32,5
13	1,21	10,97	12	6.932	30,1	33,8	19.525	32,7

Tabelle 30: Berechnete Ergebnisse der 1. Messreihe mit Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 20.000ppm

p [bar]	$Q_{Op}$ [l/m <sup>2</sup> h]	SR [%]	$Q_S$ [g/h]	$\sigma_{P,25}$ [mS/cm]	$C_{P,25}$ [ppm]	$\sigma_{R,25}$ [mS/cm]	$C_{R,25}$ [ppm]
22	9,11	81,98	11,93	5,593	3.231	-	-
16	3,89	71,20	8,16	8,898	5.140	-	-
14	3,40	66,15	8,37	10,253	5.923	-	-
14	3,11	64,01	8,13	10,786	6.230	-	-
17	4,69	52,54	16,20	14,694	8.488	-	-
14	3,67	80,31	5,26	5,976	3.452	-	-
13,5	3,47	61,29	9,78	11,700	6.759	29,22	16.879
13	3,19	63,77	8,40	10,719	6.192	28,59	16.517

Dadurch, dass die Drücke der beiden Systemen nicht miteinander übereinstimmten, ist ein Errechnen des eingehenden Feedflusses in das System nicht möglich und daraus folgend kann die Süßwassergewinnung R auch nicht berechnet werden.

Ebenfalls kam es bei der letzten Messung zu schweren Schwankungen, die zuerst unter dem Verdacht von Scaling auf der Membran standen, doch nach einer Reinigung der Membran wurden die Messwerte nicht besser. Schon während der letzten drei Messungen an der Anlage, war ein stetiges Absinken des Druckes zu erkennen, was einen Fehler in oder an der Membran nahelegen ließ. Deswegen wurde nach der Messung das Membranmodul ausgebaut und auf Fehlstellen kontrolliert. Neben einer Verschmutzung durch Metallreste, vermutlich hervorgerufen durch Reste beim Zurechtschneiden der Rohrleitungen, wurden dabei Fehlstellen beziehungsweise Ausbeulungen an der Membran sichtbar. Eine Abbildung dieser Ausbeulungen zeigt Abbildung 41 im Anhang.

Mit größter Wahrscheinlichkeit wurde bei der letzten Messung ohne Energierückgewinnung der Druck von 35bar kurzzeitig durch kleine Schwankungen an der Drossel überschritten. Da die Membran nur einen maximalen Operationsdruck von 41bar aushält, könnten dadurch die Fehlstellen entstanden sein, was bei der letzten Messung mit dem Druckaustauscher sichtbar wurde, da der zusätzliche Widerstand durch die geschlossene Drossel und die hohe Salzkonzentration zu viel für die Membran war.

Überraschenderweise zeigte sich bei dieser Messung, dass die Energierückgewinnung einen positiven Effekt auf den Salzurückhalt hat. In Abbildung 25 ist ersichtlich, dass diesmal nicht nur die ppm-Werte des Permates der 2.000 ppm Lösung, sondern auch alle Salzgehalte des entsalzten Wassers der 10.000ppm Salzkonzentration unterhalb der EU-Grenze liegen.

Interessant ist, dass das System sich von alleine, auch bei hoher Salzkonzentration, auf einen niedrigen Druck eingependelt hat, der sich bei den Messungen zuvor als guter Wert herausstellte und dabei gute Permeatflüsse produzierte.

Erstaunlich ist auch, dass es bei Drücken um die 14bar überhaupt zu einer Entsalzung der Lösung mit 20.000ppm kam, da allein der osmotische Druck dieser Konzentration schon bei ungefähr 16bar liegt. Das lässt weiter vermuten, dass der aufgebaute Widerstand durch Drossel und Druckaustauscher einen gewissen Einfluss auf das System hat.

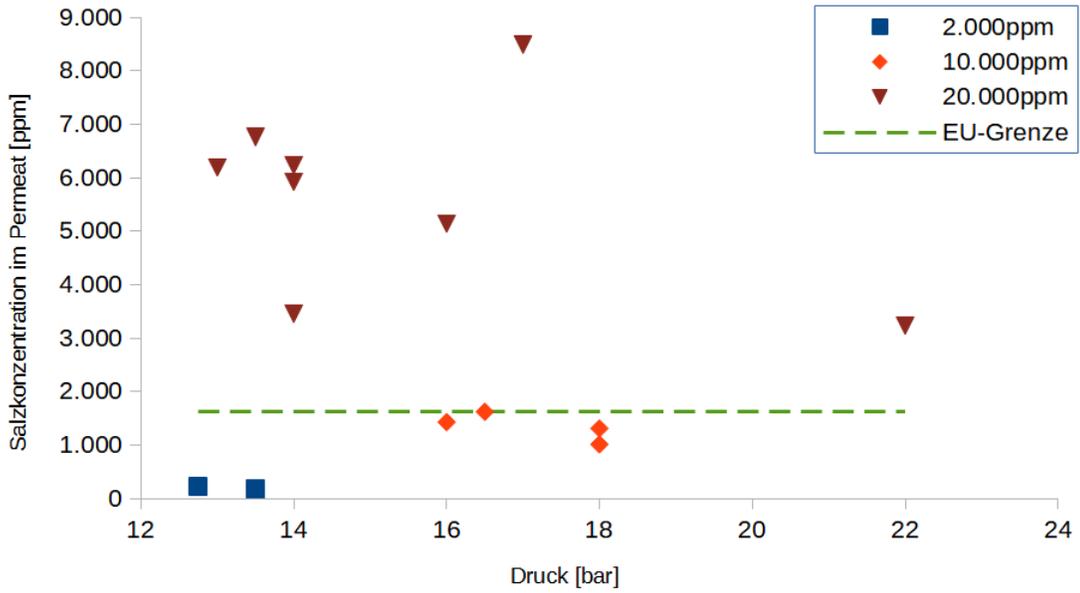


Abbildung 25: Salzkonzentrationen des Permeats der 1. Messreihe unter variierenden Drücken und Einsatz einer Energierückgewinnung

Auch Abbildung 26 zeigt den positiven Effekt der Energierückgewinnung auf das System. Ausgenommen dem Ergebnis der Entsalzung der 20.000ppm Salzlösung, sind alle Werte des Salzurückhaltes bei über 80% und sogar teilweise bei über 90%. Dies ist ein vielversprechender Punkt, der in der zweiten Messreihe nur noch bestätigt werden konnte.

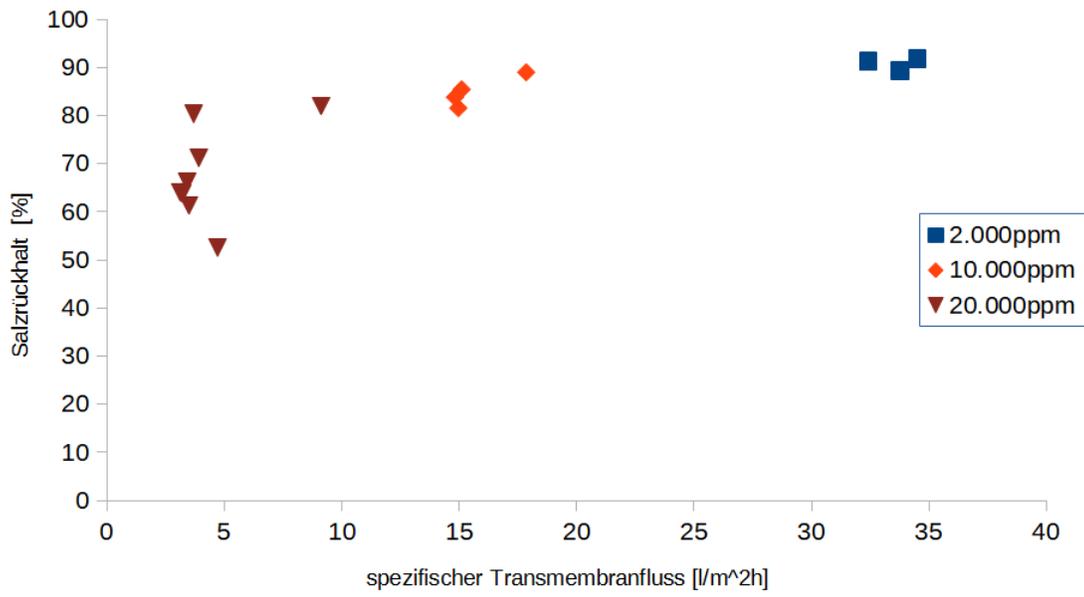


Abbildung 26: Salzrückhalts SR der 1. Messreihe bei unterschiedlichen spezifischen Transmembranflüssen  $Q_{Op}$  unter Verwendung einer Energierückgewinnung

### 3.3 Ergebnisse der 2. Messreihe

Aufgrund der großen Schwankungen der letzten Messreihe, dem Fehlen bestimmter Messungen zur Berechnung des Feedstroms im System und um den Effekt einer geschlossenen und offenen Drossel speziell auf den Aufbau mit Energierückgewinnung zu sehen, wurden die Messungen ein weiteres Mal wiederholt.

Diesmal wurde die Membran AG1812HR von Suez [14] verwendet. Grundsätzlich sind die Eigenschaften der Membran die Gleichen wie bei der vorherigen verwendeten Membran, lediglich der durchschnittliche Salzzückhalt liegt laut Datenblatt bei 99,3% anstatt bei 99,0%. Die Salzkonzentrationen von 2.000, 10.000 und 20.000ppm wurden beibehalten und der Aufbau der Systeme wurde sonst nicht verändert. Außerdem wurde versucht bei der Messreihe ohne Energierückgewinnung den vorgegebenen Druck der Anlage mit Energierückgewinnung zu imitieren, um einen noch besseren Vergleich zu erzielen.

Bei diesen Messungen wurden jeweils nur drei Messungen durchgeführt, dafür über einen Zeitraum von jeweils 3 Minuten. Danach wurden wie gewohnt die elektrische Leitfähigkeit des gefilterten Wassers und der Sole, deren Gewicht und die dazugehörige Temperatur gemessen. Während der Messung wurde zusätzlich noch die vom Motor geleistete Drehzahl mittels eines Laser-Drehzahlmessers erfasst. Dies erlaubte zu erkennen, ob sich die aufgewendete Leistung des Motors in Bezug auf die verschiedenen Anlagen, Einstellungen und Salzlösungen ändert.

Wie schon bei den Ergebnissen der 1. Messreihe werden auch hier zuerst die Ergebnisse der Anlage ohne Energierückgewinnung in den Tabellen 31 bis 36, und dann die mit Energierückgewinnung in den Tabellen 37 - 42 aufgeführt. Wobei in den Tabellen 37 bis 42 die Auswertungen sowohl der gehemmten als auch ungehemmten Einstellungen zu finden sind.

Zwecks besserem Verständnis der Resultate werden in den Abbildungen 27 bis 32 die unterschiedlichen Ergebnisse der Entsalzungen grafisch aufgearbeitet.

Wie in der vorherigen Messreihe wurde auch hier der Frequenzumrichter des Motors der Hochdruckpumpe auf 21,17 Hz eingestellt, was umgerechnet einer Drehzahl von 1.270 Umdrehungen pro Minute entspricht. Die Förderleistung der Pumpe sollte, aus der Drehzahl berechnet, ungehindert 58 l/h erreichen.

#### 3.3.1 Messungen ohne Energierückgewinnung

Bei der ersten Messung ohne Energierückgewinnung betrug die elektrische Leitfähigkeit des Rohwassers von einer Salzkonzentration von 2.000ppm 4,42 mS/cm bei 25°C, das entspricht einem Salzgehalt von 2.550 ppm. Die Tabellen 31 und 32 behandeln die im Entsalzungsprozess gemessenen Resultate.

Tabelle 31: Messergebnisse der 2. Messreihe ohne Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 2.000ppm

p [bar]	Drehzahl [U/min]	$Q_P$ [l/h]	$Q_R$ [l/h]	$\sigma_P$ [mS/cm]	$T_P$ [°C]	$C_P$ [ppm]	$\sigma_R$ [mS/cm]	$T_R$ [°C]	$C_R$ [ppm]
14	1210	5,90	35,74	1,55	21,9	895	4,13	22	2.386
14	1210	5,51	35,18	1,583	21,5	914	4,28	22	2.472
15	1210	5,72	34,70	1,668	21,7	964	4,3	21,9	2.484

Tabelle 32: Berechnete Ergebnisse der 2. Messreihe ohne Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 2.000ppm

p [bar]	$Q_F$ [l/h]	$Q_{Op}$ [l/m <sup>2</sup> h]	SR [%]	R [%]	$Q_S$ [g/h]	$\sigma_{P,25}$ [mS/cm]	$C_{P,25}$ [ppm]	$\sigma_{R,25}$ [mS/cm]	$C_{R,25}$ [ppm]
14	41,64	15,53	65,06	14,17	5,28	1,665	962	4,43	2.557
14	40,69	14,50	63,89	13,54	5,04	1,717	992	4,59	2.650
15	40,41	15,04	62,31	14,14	5,51	1,801	1.040	4,62	2.669

Die Ergebnisse der nächsten Entsalzung bei einer Salzkonzentration von 10.000 ppm können aus den Tabellen 33 und 34 entnommen werden. Das Feedwasser im Reservoir besaß eine elektrische Leitfähigkeit von 19,95 mS/cm bei 25 °C, was ungefähr einer Konzentration von 11.524ppm entspricht.

Tabelle 33: Messergebnisse der 2. Messreihe ohne Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 10.000ppm

p [bar]	Drehzahl [U/min]	$Q_P$ [l/h]	$Q_R$ [l/h]	$\sigma_P$ [mS/cm]	$T_P$ [°C]	$C_P$ [ppm]	$\sigma_R$ [mS/cm]	$T_R$ [°C]	$C_R$ [ppm]
16	1210	2,31	41,55	6,19	18,3	3.576	17,22	18,3	9.947
16	1210	2,28	41,61	6,44	18,8	3.720	17,23	18,8	9.953
16	1210	2,36	39,76	6,62	19,5	3.824	17,25	19,4	9.965

Tabelle 34: Berechnete Ergebnisse der 2. Messreihe ohne Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 10.000ppm

p [bar]	$Q_F$ [l/h]	$Q_{Op}$ [l/m <sup>2</sup> h]	SR [%]	R [%]	$Q_S$ [g/h]	$\sigma_{P,25}$ [mS/cm]	$C_{P,25}$ [ppm]	$\sigma_{R,25}$ [mS/cm]	$C_{R,25}$ [ppm]
16	43,87	6,09	69,58	5,27	8,27	7,262	4.195	20,20	11.670
16	43,90	6,01	68,35	5,20	8,50	7,462	4.310	19,96	11.532
16	42,12	6,21	67,46	5,60	9,02	7,539	4.355	19,69	11.375

Die Tabellen 35 und 36 zeigen die Messungen von der abschließenden Auftrennung einer 20.000ppm Salzlösung. Die elektrische Leitfähigkeit des Rohwassers ergab 35,19 mS/cm bei 25°C, umgerechnet ergibt das einer Salzkonzentration von ungefähr 20.326 ppm.

Obwohl der Aufbau mit Energierückgewinnung nur einen Druck von 16bar bei der Entsalzung von 20.000ppm aufgebracht hat, wurden noch zusätzliche Messungen bei 24bar (beziehungsweise 25bar) durchgeführt, um zu überprüfen wie sich die Trennleistungen bei einem höheren Druck verändern. Denn bei einem Druck von 16bar war zu erwarten, dass nur eine sehr geringe Ausbeute mit schlechten Ergebnissen erzeugt wird, da der osmotische Druck der Lösung nur marginal überschritten wird.

Tabelle 35: Messergebnisse der 2. Messreihe ohne Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 20.000ppm

p [bar]	Drehzahl [U/min]	$Q_P$ [l/h]	$Q_R$ [l/h]	$\sigma_P$ [mS/cm]	$T_P$ [°C]	$C_P$ [ppm]	$\sigma_R$ [mS/cm]	$T_R$ [°C]	$C_R$ [ppm]
16	1210	1,52	38,08	19,52	21,3	11.276	32,6	22	18.832
16	1210	1,08	38,73	18,6	21,3	10.744	32,8	21,9	18.947
16	1210	1,29	38,81	17,3	21,1	9.993	33,1	21,7	19.120
25	1200	1,92	31,42	12,64	21,4	7.302	32,9	22,1	19.005
24	1200	1,96	33,40	15,24	21,6	8.803	33,1	22	19.120

Tabelle 36: Berechnete Ergebnisse der 2. Messreihe ohne Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 20.000ppm

p [bar]	$Q_F$ [l/h]	$Q_{Op}$ [l/m <sup>2</sup> h]	SR [%]	R [%]	$Q_S$ [g/h]	$\sigma_{P,25}$ [mS/cm]	$C_{P,25}$ [ppm]	$\sigma_{R,25}$ [mS/cm]	$C_{R,25}$ [ppm]
16	39,60	4,00	44,87	3,84	17,14	21,276	12.290	34,94	20.185
16	39,81	2,84	47,47	2,71	11,58	20,274	11.711	35,24	20.358
16	40,10	3,38	51,14	3,21	12,85	18,947	10.945	35,73	20.642
25	33,34	5,06	64,30	5,77	14,05	13,744	7.939	35,18	20.323
24	35,36	5,16	56,96	5,54	17,26	16,492	9.527	35,48	20.495

Wie erwartet zeigten sich bei dieser Messung nicht die gleichen Resultate wie bei der 1. Messung. Das liegt daran, dass eine andere Membran mit etwas unterschiedlichen Eigenschaften verwendet wurde und der Transmembranfluss durch den geringen Druck sehr gering ausfällt.

Selbst der deutlich höhere Fluss der 2.000ppm Lösung zeigt bei dieser Auftrennung schlechtere Ergebnisse. In der 1. Messung wurde bei der gleichen Salzkonzentration eine bessere Entsalzung bei einem Fluss von rund 25l/m<sup>2</sup>h unter einem Druck von 16bar gefunden. Das bedeutet, dass der angelegte Druck selbst für die niedrigste Salzlösung zu gering ist, um das Salzwasser optimal aufzutrennen.

In Abbildung 27 ist ersichtlich, dass die Erhöhung des Drucks auf 25 bar bei der Entsalzung der 20.000 ppm Lösung bessere Resultate erzielt, als beim geringeren Druck von 16 bar.

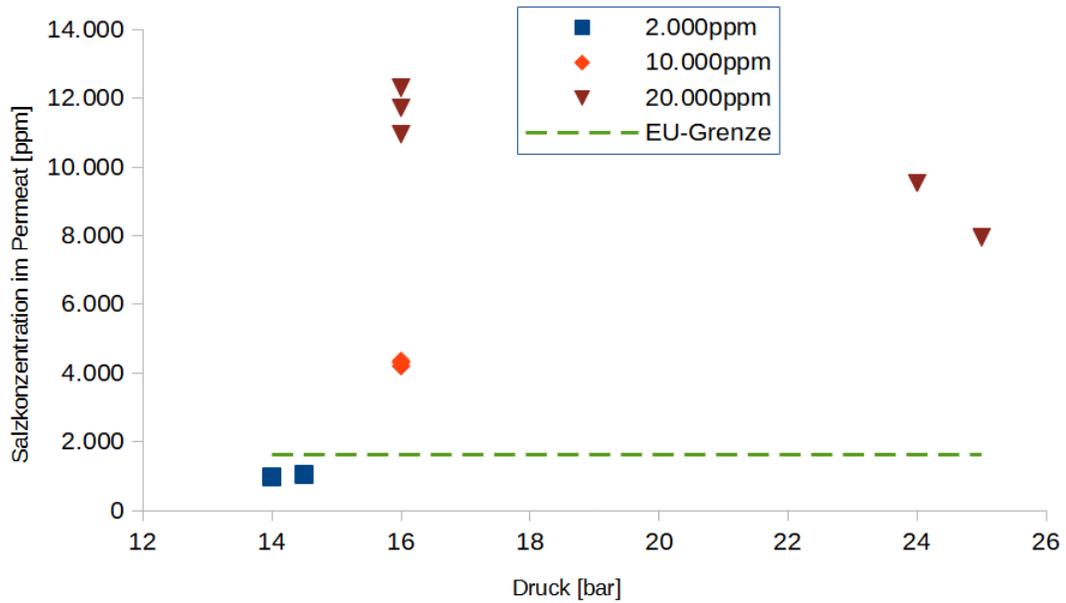


Abbildung 27: Salzkonzentrationen des Permeats der 2. Messreihe unter bestimmten Drücken ohne Einsatz einer Energierückgewinnung

In Abbildung 28 ist gut zu erkennen, dass durch Erhöhung des spezifischen Transmembranflusses, ausgelöst durch Erhöhung des Druckes auf 24 bar, der Salzurückhalt deutlich verbessert wurde. Somit hat sich erwiesen, dass der geringe Druck von 16bar für eine Entsalzung von Meerwasser nur zu sehr schlechten Resultaten führt.

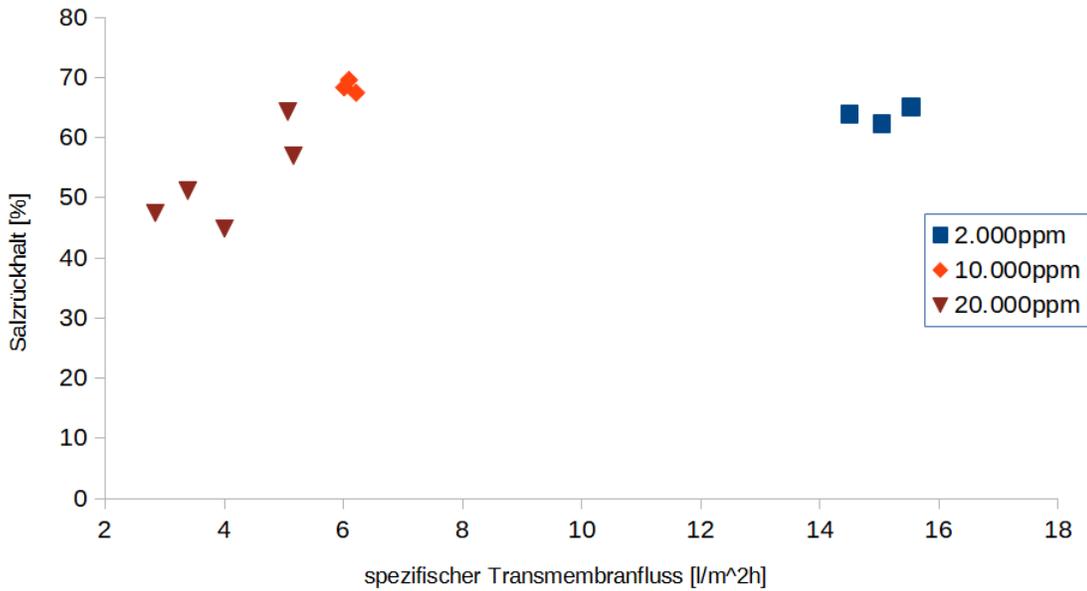


Abbildung 28: Salzrückhalt SR in der 2. Messreihe bei unterschiedlichen spezifischen Transmembranflüssen  $Q_{Op}$  ohne Verwendung einer Energierückgewinnung

### 3.3.2 Messungen mit Energierückgewinnung

Die Auswertung dieser Messreihe beinhaltet zwei verschiedenen Einstellungen im System. Bei der einen Messung wurde der Retentatfluss mit einer Drossel, die zur Hälfte geschlossen war, gehemmt, bei der Anderen war die Drossel vollkommen geöffnet und die Sole konnte ungehindert ausströmen. In den Tabellen 37 bis 42 sind diese unterschiedlichen Einstellungen durch eine Trennlinie gekennzeichnet, wobei die oberen Ergebnisse das gedrosselte und die unteren das offene System beschreiben.

Für die ersten Messungen wurde wieder Rohwasser mit 2.000ppm angemischt. Die elektrische Leitfähigkeit betrug bei den ersten drei Messungen 4,43mS/cm bei 25°C (2.560ppm) und bei den letzten drei Messungen 4,66mS/cm bei 25°C (2.689ppm). Die Messergebnisse sind aus den Tabellen 37 und 38 zu entnehmen.

Tabelle 37: Messergebnisse der 2. Messreihe mit Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 2.000ppm

p [bar]	Drehzahl [U/min]	$Q_P$ [l/h]	$Q_R$ [l/h]	$\sigma_P$ [mS/cm]	$T_P$ [°C]	$C_P$ [ppm]	$\sigma_R$ [mS/cm]	$T_R$ [°C]	$C_R$ [ppm]	
12	910	8,40	-	0,641	24,7	370	-	-	-	<sup>8</sup>
11	890	7,93	8,99	0,672	28	388	5,15	29,6	2.975	<sup>8</sup>
11	869	-	9,43	-	-	-	5,4	30,8	3.119	<sup>8</sup>
14	965	8,19	61,70	0,62	21,8	358	4,52	22	2.611	
14	960	8,35	60,28	0,515	20,6	297	4,5	21	2.599	
14	960	8,59	62,99	0,529	21,9	306	4,53	22,2	2.617	

Tabelle 38: Berechnete Ergebnisse der 2. Messreihe mit Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 2.000ppm

p [bar]	$Q_F$ [l/h]	$Q_{Op}$ [l/m <sup>2</sup> h]	SR [%]	R [%]	$Q_S$ [g/h]	$\sigma_{P,25}$ [mS/cm]	$C_{P,25}$ [ppm]	$\sigma_{R,25}$ [mS/cm]	$C_{R,25}$ [ppm]	$\eta$ [%]
12	43,68 <sup>9</sup>	22,12	85,54	19,24	3,11	0,645	373	-	-	-
11	42,72 <sup>9</sup>	20,87	84,84	18,57	3,08	0,628	363	4,65	2.686	-
11	41,71 <sup>9</sup>	-	-	-	-	-	-	4,75	2.745	-
14	43,93	21,57	87,29	18,65	2,93	0,668	386	4,84	2.799	27,87
14	43,53	21,98	88,89	19,19	2,48	0,571	330	4,94	2.854	33,54
14	43,28	22,60	88,13	19,84	2,62	0,568	328	4,83	2.792	33,71

Die Tabellen 39 und 40 zeigen die Resultate der Entsalzung der folgenden Salzlösungen mit je 10.000ppm. In dieser Messung betrug die elektrische Leitfähigkeit des Feedwassers bei den ersten drei Messungen 18,13mS/cm bei 25°C (10.471ppm) und bei den letzten drei Messungen 19,81mS/cm bei 25°C (11.440ppm).

<sup>8</sup>Bei diesen Messungen war die Drossel am Retentatausfluss zur Hälfte geschlossen

<sup>9</sup>Der Feedfluss wurde hier mittels der Drehzahl berechnet und ist nur bedingt richtig

Tabelle 39: Messergebnisse der 2. Messreihe mit Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 10.000ppm

p [bar]	Drehzahl [U/min]	$Q_P$ [l/h]	$Q_R$ [l/h]	$\sigma_P$ [mS/cm]	$T_P$ [°C]	$C_P$ [ppm]	$\sigma_R$ [mS/cm]	$T_R$ [°C]	$C_R$ [ppm]	
14,5	900	3,62	-	3,6	23,5	2.080	-	-	-	<sup>10</sup>
14	875	3,35	-	4,14	24,5	2.391	-	-	-	<sup>10</sup>
13	855	-	8,39	-	-	-	19,4	26,4	11.207	<sup>10</sup>
13	845	-	8,45	-	-	-	20	26,4	11.553	<sup>10</sup>
16	960	3,53	63,20	3,35	19,9	1.935	17,5	20,4	10.109	
16	955	3,05	61,68	3,88	20	2.241	17,45	20	10.080	
16	950	3,33	63,85	3,79	19,7	2.189	17,54	20,6	10.132	

Tabelle 40: Berechnete Ergebnisse der 2. Messreihe mit Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 10.000ppm

p [bar]	$Q_F$ [l/h]	$Q_{Op}$ [l/m <sup>2</sup> h]	SR [%]	R [%]	$Q_S$ [g/h]	$\sigma_{P,25}$ [mS/cm]	$C_{P,25}$ [ppm]	$\sigma_{R,25}$ [mS/cm]	$C_{R,25}$ [ppm]	$\eta$ [%]
14,5	43,20 <sup>11</sup>	9,54	80,14	8,39	7,54	3,725	2.152	-	-	
14	42,00 <sup>11</sup>	8,82	77,16	7,98	8,02	4,186	2.418	-	-	
13	41,04 <sup>11</sup>	-	-	-	-	-	-	18,79	10.853	
13	40,56 <sup>11</sup>	-	-	-	-	-	-	19,37	11.189	
16	45,08	9,28	83,23	7,82	6,82	3,778	2.182	19,49	11.261	30,29
16	44,67	8,04	80,70	6,84	6,85	4,364	2.521	19,63	11.339	30,76
16	43,09	8,76	80,40	7,73	7,29	4,295	2.481	19,44	11.232	28,68

Die Ergebnisse der Auftrennung der höchsten Salzkonzentration von 20.000ppm im Rohwasser werden in den Tabellen 41 und 42 behandelt. Bei den ersten drei Messungen hatte das Reservoir eine elektrische Leitfähigkeit von 39,62mS/cm bei 25°C (22.886ppm) und bei den letzten drei Messungen von 34,90mS/cm bei 25°C (20.158ppm).

<sup>10</sup>Bei diesen Messungen war die Drossel am Retentatausfluss zur Hälfte geschlossen

<sup>11</sup>Der Feedfluss wurde hier mittels der Drehzahl berechnet und ist nur bedingt richtig

Tabelle 41: Messergebnisse der 2. Messreihe mit Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 20.000ppm

p [bar]	Drehzahl [U/min]	$Q_P$ [l/h]	$Q_R$ [l/h]	$\sigma_P$ [mS/cm]	$T_P$ [°C]	$C_P$ [ppm]	$\sigma_R$ [mS/cm]	$T_R$ [°C]	$C_R$ [ppm]	
17	865	1,73	-	9	20,4	5.199	-	-	-	<sup>12</sup>
16	855	1,50	-	10,51	20,6	6.071	-	-	-	<sup>12</sup>
16	840	-	10,29	-	-	-	33,3	22,1	19.236	<sup>12</sup>
15	835	-	10,51	-	-	-	33,7	23,1	19.467	<sup>12</sup>
16	960	1,68	64,50	13,35	21,7	7.712	32,7	22,8	18.889	
16	935	1,13	64,88	14,52	22,3	8.388	32,8	23,6	18.947	
16	945	1,41	63,14	15,62	22	9.023	33,1	23,5	19.120	

Tabelle 42: Berechnete Ergebnisse der 2. Messreihe mit Energierückgewinnung bei einer Salzkonzentration von 20.000ppm

p [bar]	$Q_F$ [l/h]	$Q_{Op}$ [l/m <sup>2</sup> h]	SR [%]	R [%]	$Q_S$ [g/h]	$\sigma_{P,25}$ [mS/cm]	$C_{P,25}$ [ppm]	$\sigma_{R,25}$ [mS/cm]	$C_{R,25}$ [ppm]	$\eta$ [%]
17	41,52 <sup>13</sup>	4,55	77,28	4,16	8,98	10,025	5.791	-	-	
16	41,04 <sup>13</sup>	3,94	73,47	3,65	9,08	11,651	6.730	-	-	
16	40,32 <sup>13</sup>	-	-	-	-	-	-	35,61	20.570	
15	40,08 <sup>13</sup>	-	-	-	-	-	-	35,20	20.332	
16	39,75	4,41	61,54	4,22	12,93	14,412	8.325	34,39	19.868	26,91
16	39,86	2,96	57,57	2,82	9,44	15,454	8.927	33,86	19.560	26,25
16	40,22	3,72	56,32	3,51	12,74	16,743	9.672	34,25	19.784	29,06

Die Abbildungen 29 und 30 zeigen die Resultate der Entsalzung der unterschiedlichen Salzkonzentrationen bei einer halb geschlossenen Drossel und dadurch gehemmtem Retentatfluss. Die Ergebnisse zeigen ein ähnliches, wenn auch etwas schlechteres Bild als die Messungen in der ersten Messreihe. Auffallend ist, dass der Druck hier bei 2.000ppm und 10.000ppm konstant niedriger und der Druck bei 20.000ppm höher ist als bei der ersten Messung mit der anderen Membran. Dadurch ist der Verdacht verstärkt, dass die Messungen der 1. Reihe durch die Fehlstellen in der Membran erheblich beeinträchtigt waren und ein ungewohnt niedriger Druck, der deutlich kleiner als der osmotische Druck der verwendeten Salzlösung war, im System mit Druckaustauscher auf ein Problem in oder an der Membran hinwies.

<sup>12</sup>Bei diesen Messungen war die Drossel am Retentatausfluss zur Hälfte geschlossen

<sup>13</sup>Der Feedfluss wurde hier mittels der Drehzahl berechnet und ist nur bedingt richtig

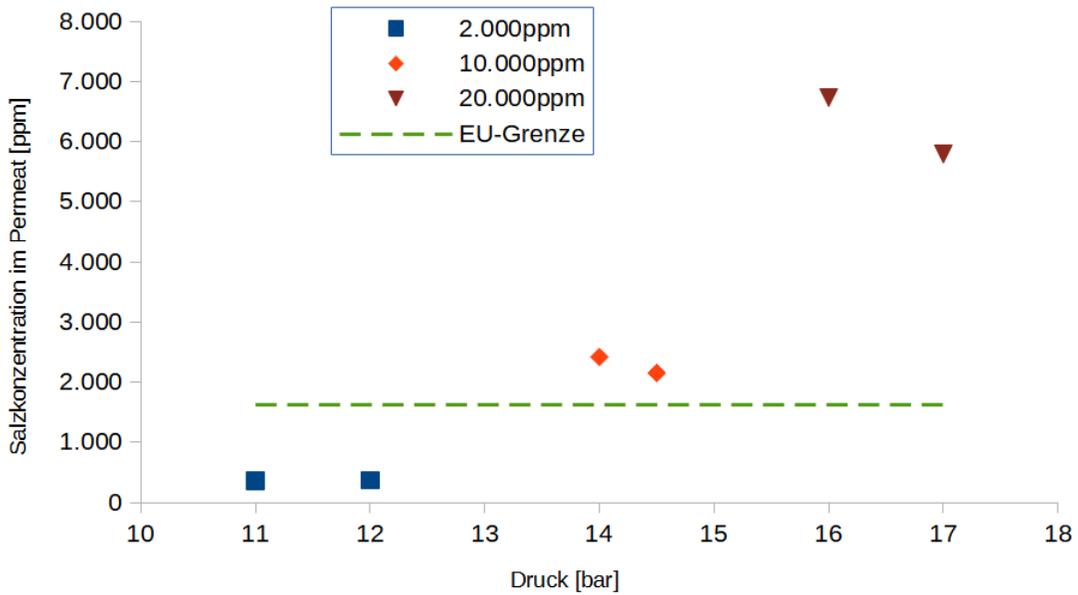


Abbildung 29: Salzkonzentration im Permeat der 2. Messreihe bei unterschiedlichen Drücken unter Einsatz einer Energierückgewinnung und gehemmten Retentatfluss

Der Salzurückhalt der Membran, ersichtlich in Abbildung 30, ergibt erstaunlich gute Werte in Hinblick auf die geringen Flüsse über die Membran. Es scheint, dass im 2.000ppm Bereich der ideale Transmembranfluss für die Membran getroffen wurde, denn der Salzurückhalt ist, im Vergleich zu den vorherigen Messungen, in der Lage mitzuhalten, was ein gutes Zeichen für die Verwendung einer Energierückgewinnung ist.

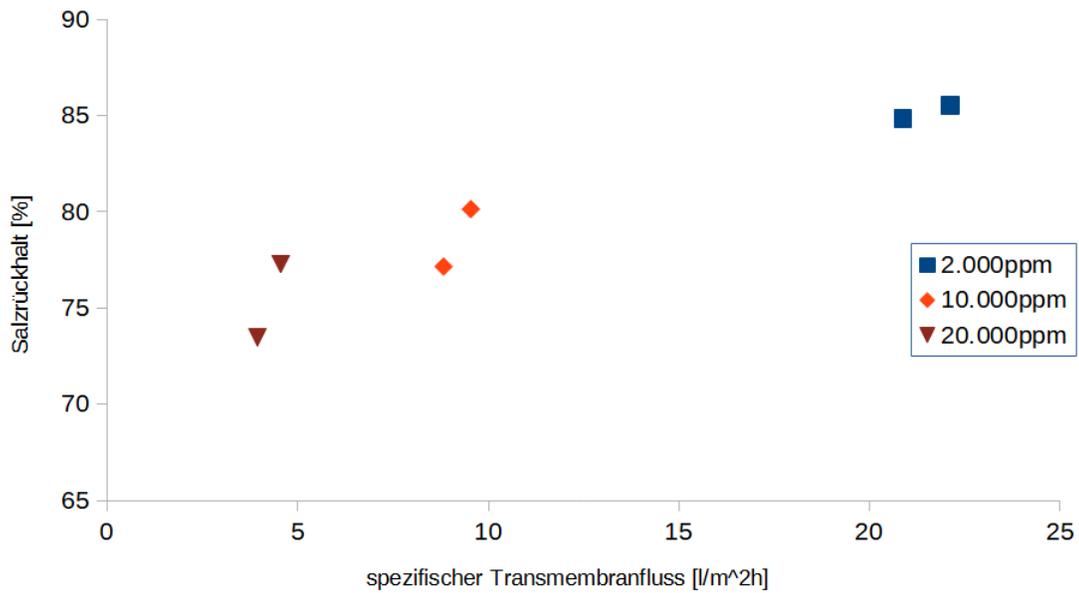


Abbildung 30: Salzrückhalt SR der Membran der 2. Messreihe unter unterschiedlichen spezifischen Transmembranflüssen  $Q_{Op}$  unter Verwendung einer Energierückgewinnung und gehemmen Retentatfluss

Betrachtet man nun die Ergebnisse der Messreihe, bei der das Retentat nicht gehemmt wurde, dargestellt in den Abbildungen 31 und 32, erkennt man zuallererst den starken Anstieg des Drucks im System bei den niedrigeren zwei Salzkonzentration. Ebenfalls lässt sich in diesem Bereich eine Verbesserung der Salzkonzentration im Permeat feststellen, was das gefilterte Produkt von 10.000ppm nahe an den Grenzwert der EU bringt. Allerdings zeigt die Entsalzung der Konzentration von 20.000ppm eine leichte Verschlechterung der Werte. Das könnte bedeuten, dass für den Bereich der Meerwasserentsalzung, zumindest bei Verwendung dieser Membran, eine Restriktion des Retentatausflusses einen positiveren Effekt auf das gefilterte System hat.

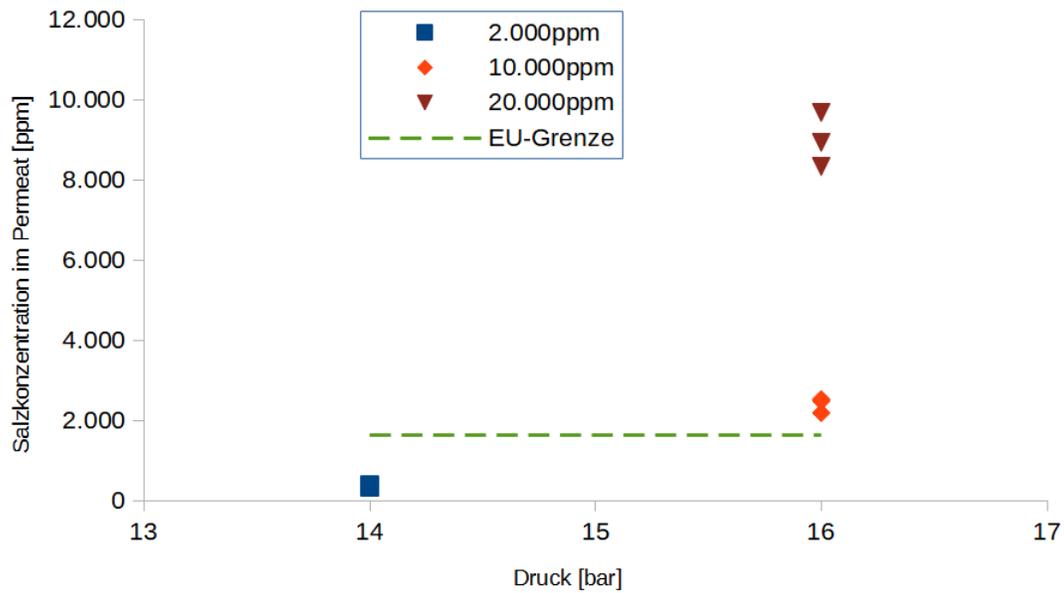


Abbildung 31: Salzkonzentration der Permeats der 2. Messreihe bei unterschiedlichen Drücken unter Einsatz einer Energierückgewinnung und ungehemmten Retentatfluss

Abbildung 32 zeigt den Salzurückhalt der Membran bei unterschiedlichen Salzkonzentrationen mit ungehindertem Fluss der aufkonzentrierten Sole.

Auch im Vergleich der beiden Einstellungen der Drossel am Retentatausfluss erkennt man, dass der Salzurückhalt der Membran eine Verbesserung im niedrigen Konzentrationsbereich des Feedwassers erfährt und dagegen eine deutliche Verschlechterung im hohen Bereich. Dabei wird der spezifische Transmembranfluss durch die Stellung der Drossel und dadurch verändertem Fluss des Retentats nicht beeinflusst.

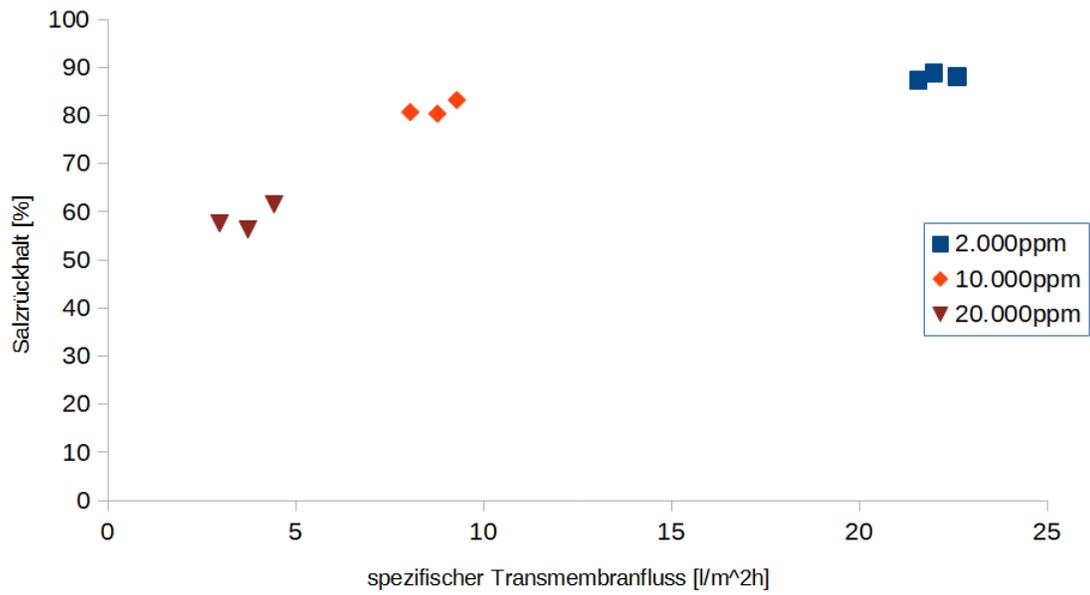


Abbildung 32: Salzrückhalt SR der Membran der 2. Messreihe bei unterschiedlichen spezifischen Transmembranflüssen  $Q_{Op}$  unter Verwendung einer Energierückgewinnung und ungehemmtem Retentatfluss

## 4 Diskussion der zusammengefassten Messergebnisse

### 4.1 Vergleich der Testmessungen

Der erste Testversuch bewegt sich, wie aus der Tabellen 5-10 zu entnehmen ist, ausschließlich im Brackwasserbereich. Das hat den Grund, dass die Spezifikationen der Membran [14] einen Gebrauch nur in diesen Salzkonzentrationen empfiehlt und weil die Membran für die eigentlichen Messreihen noch geschont werden sollte.

Es wurde versucht die angelegten Drücke an das System bei diesem Versuch möglichst zu variieren, um einen besseren Eindruck vom Einfluss des Drucks auf das System zu bekommen und bei der nächsten Messung gezieltere Bereiche zu untersuchen.

Die Resultate zeigten in allen Konzentrationen, dass mit steigendem Druck die elektrische Leitfähigkeit  $\sigma$  des entsalzten Wassers deutlich ansteigt, aber gleichzeitig auch der Fluss des Permeats erhöht wird.

Zusätzlich ist anzumerken, dass das gefilterte Wasser aus diesem Versuch nie den EU-Grenzwert von 2,81 mS/cm, oder 1.623 ppm, überschreitet, was bedeutet, dass alles gefiltertes Wasser bedenkenlich für den menschlichen Gebrauch ist.

Beim zweiten Testversuch an der leicht modifizierten Anlage, wurden die Salzkonzentrationen ebenfalls im Brackbereich gehalten, jedoch eher im oberen Grenzbereich, da die Auftrennung von salzhaltigerem Wasser für den angestrebten Verwendungszweck interessant waren.

Zum Unterschied zur 1. Testmessung werden hier zwei fixe Bereich von 16 und 24 bar für den Druck gewählt, da in diesen Bereichen größere Veränderung in der vorherigen Testung beobachtet wurden.

Wie zuvor zeigt sich auch hier, dass mit steigendem Druck der Permeatfluss zwar angehoben wird, aber auch gleichzeitig der Salzgehalt im Permeat steigt.

Demnach ist der erste Schluss, den man aus den beiden Testmessungen ziehen kann, dass mit steigenden Druck die elektrische Leitfähigkeit und somit die Salzkonzentration des gefilterten Wassers, in einem System ohne Energierückgewinnung, steigen wird. Gleichzeitig beobachtet man, dass der Fluss des Permeats mit dem Druck ansteigt und somit größere Mengen „sauberes“ Wasser gefördert werden.

Das bedeutet, dass man für diesen Aufbau abwägen muss ob man bessere Auftrennungsergebnisse haben möchte oder eine größere Menge an gefiltertem Wasser.

Die Abbildungen 33 und 34 zeigen den direkten Vergleich der beiden Testmessungen anhand der Salzkonzentrationen im Permeat und den Salzurückhalt der Membran bezüglich eines unterschiedlichen Druckes beziehungsweise unterschiedlicher Transmembranflüsse. Auf eine genaue Markierung der verschiedenen Salzkonzentrationen des Rohwassers wurde hier verzichtet, da die Systeme im Allgemeinen miteinander verglichen werden.

In Abbildung 33 ist zu erkennen, dass ein starker Unterschied zwischen dem Salzgehalt im Permeat herrscht. Zum einen liegt das an den unterschiedlichen Ausgangswerten des Feedwassers, da bei der erste Testmessung eher niedrige Brackwasserkonzentrationen entsalzt wurden und in der Zweiten vernehmlich höhere verwendet wurden. Zum anderen liegt es vermutlich auch daran, dass angemischten Salzlösungen des Feedwassers nicht genau denselben Salzgehalt hatten bei den beiden Testmessungen. Die Konzentrationen, die gleich sind, liegen um rund 400ppm auseinander, was einen Unterschied im Endergebnis bedeuten kann.

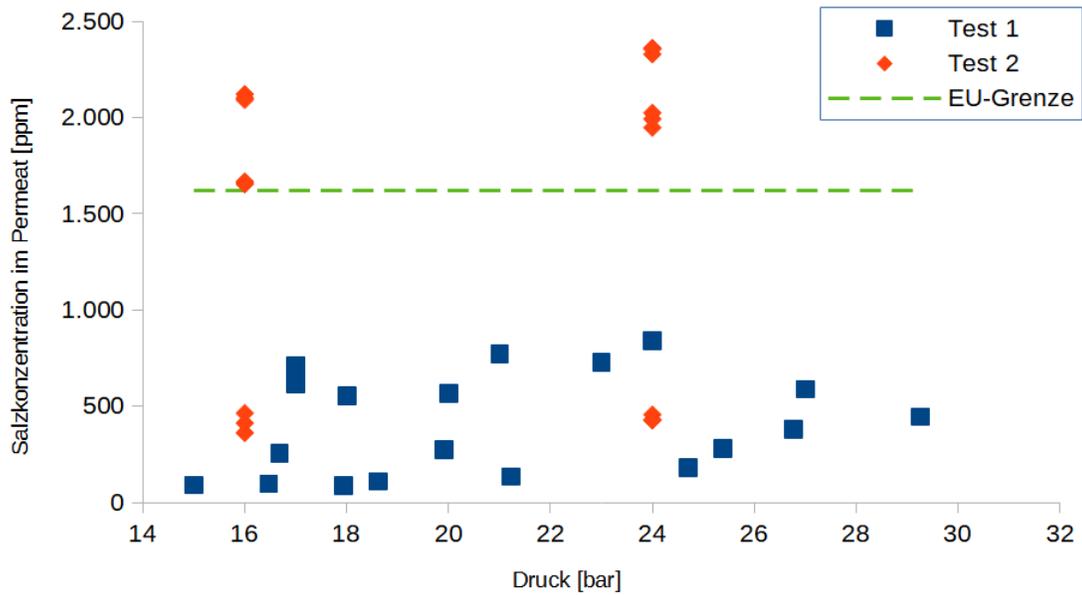


Abbildung 33: Vergleich des Unterschiedes in der Salzkonzentration des Permeats der beiden Testmessungen

Abgesehen von den Salzkonzentrationen kann auch der Aufbau an sich ein weiterer Grund für die ungleichen Messergebnisse sein. Bei der ersten Testmessung wurde die Hochdruckpumpe über eine einzelne Welle mit einem elektrischen Motor betrieben, bei der zweiten war, für den späteren Aufbau, aber der Motor und die Pumpe über einen Riemen verbunden. In Abbildung 34 sieht man, dass der Transmembranfluss bei der zweiten Messung deutlich niedriger ist als bei der Ersten und dass der Salzurückhalt auch gehemmter ist.

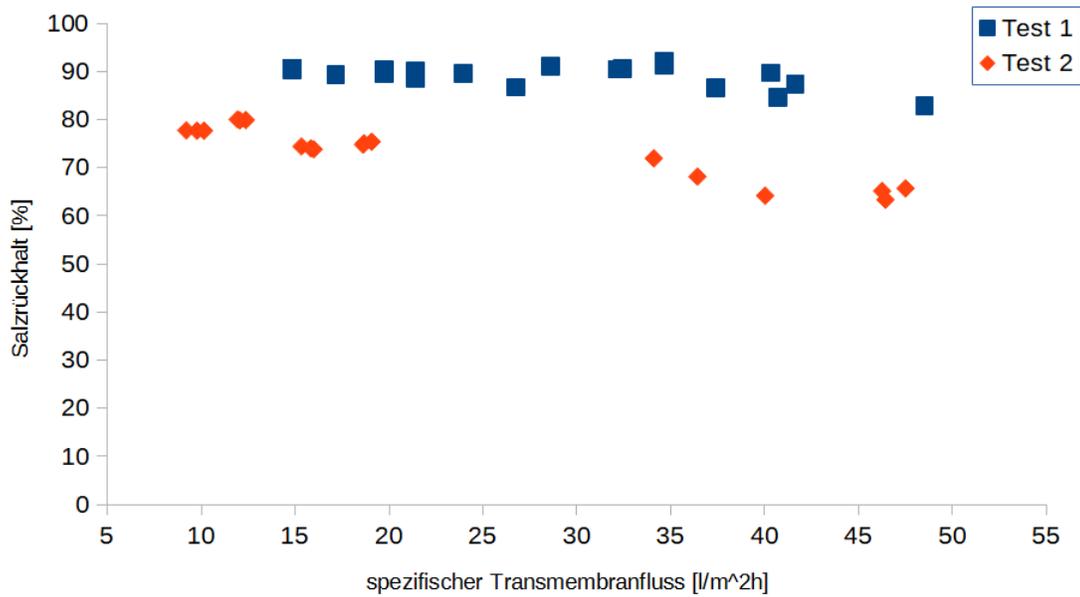


Abbildung 34: Vergleich des Salzrückhaltes der Membran der beiden Testmessungen

Betrachtet man zusätzlich den berechneten Feedfluss aus den Messdaten, im Besonderen in den Tabellen 6, 12, 14 und 16, erkennt man das Ausmaß dieser Hemmung. Bei der Entsalzung von 1.000 ppm und 8.000 ppm ist der Feedfluss der 1. Testmessung um gute 10l/h höher als bei der 2. Testmessung, jedoch ist die Ausbeute vom Permeat gegensätzlich bei der 2. Testmessung höher als bei der ersten.

Dadurch lässt sich abschließend feststellen, dass die Konzentrationspolarisation an der Membranoberfläche ebenfalls einen großen Effekt auf die Testmessungen hat. Denn durch den geringeren Transmembranfluss und den geringeren Feedfluss in der 2. Testmessung bewirkt die Konzentrationspolarisation eine schlechtere Trennleistung als bei der 1. Testmessung, was sich in den Ergebnissen zeigt.

## 4.2 Vergleich der Resultate der 1. Messreihen

Bei der 1. Messreihe, in der die beiden verschiedenen Aufbauten das erste Mal miteinander verglichen werden, zeigt sich in den Tabellen 19 bis 30, dass die Verwendung einer Energierückgewinnung, neben der Energieeinsparung, auch einen positiven Effekt auf die Entsalzungseffizienz hat.

Der Druck, der angewendet wird, ist bei der Anlage mit Energierückgewinnung deutlich geringer, jedoch ist sowohl der Permeatfluss, als auch die Salzkonzentration im Permeat, zumindest bei den bei Rohwasser mit 2.000ppm und 10.000ppm, ebenfalls verringert.

In Abbildung 35 ist diese Feststellung gut zu erkennen, aber auch die Schwankung und Verschlechterung der Ergebnisse für die Messung von 20.000ppm. Wie schon in Kapitel 3.2.2 liegt dies an den Fehlstellen der Membran und sollte hier nicht weiter beachtet werden.

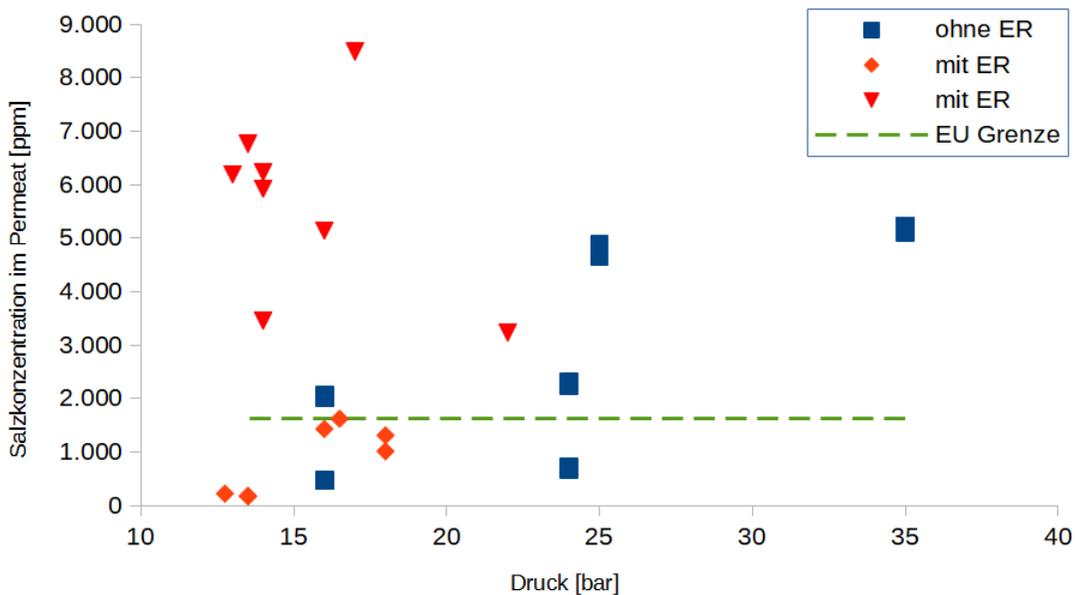


Abbildung 35: Vergleich der Salzkonzentrationen des Permeats von einem Aufbau mit Energierückgewinnung und einem ohne für die 1. Messreihe

Um die vermeintlich falschen Ergebnisse der Messung an der 20.000ppm Salzlösung für die Anlage mit Energierückgewinnung zu markieren, sind diese durch rote Dreiecke in der Abbildung 35 und 36 gekennzeichnet.

Auch bei den Transmembranflüssen und dem Salzurückhalt konnte mittels einer Energierückgewinnung das Resultat nur zum Positiven verändert werden, wie Abbildung 36 präsentiert. Diese Aussage ist natürlich unter Ausschluss der 20.000ppm Ergebnisse, da diese eine deutliche Verschlechterung aufweisen.

Es kann aber ein Verdacht ausgesprochen werden, dass der Druck von 13 beziehungsweise 14 bar auch bei einer fehlerfreien Membran nicht zu guten Entsalzungsergebnissen führen kann. Jedenfalls ist der Permeatfluss zu gering, um für das Projekt in Betracht gezogen zu werden, und der Salzurückhalt durch die Membran auch auf einen Wert verringert, der keine guten Aussichten für die nächste Messreihe bietet.

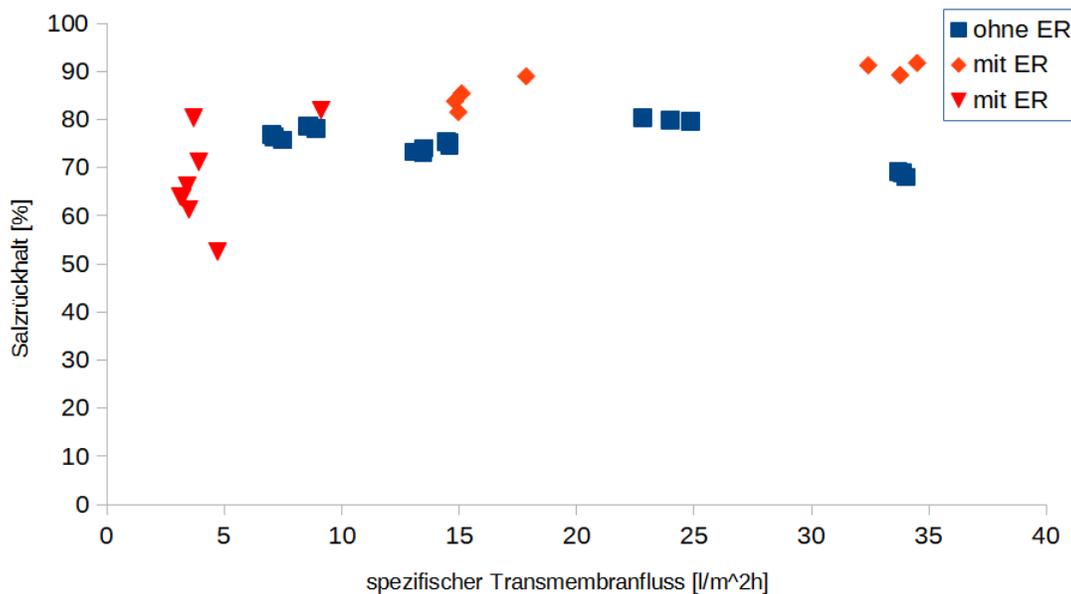


Abbildung 36: Vergleich des Salzrückhalts der Membran bei Anlagen mit und ohne Energierückgewinnung für die 1. Messreihe

### 4.3 Vergleich der Resultate der 2. Messreihen

Allgemein zeigte sich in der zweiten Messreihe, dass alle anfänglichen Annahmen richtig waren und die Energierückgewinnung überwiegend gute Resultate erzielt.

Durch den Einbau eines Rotationsdruckaustauschers konnte die Drehzahl des Motors verringert, jedoch der Feedfluss im System sogar etwas erhöht werden, im Gegensatz zum System ohne Energierückgewinnung. Abgesehen vom Feedfluss der Meerwasserkonzentration von 20.000ppm, der annähernd gleich bei beiden Anlagen war.

Ebenfalls kann bei den Salzkonzentrationen im Brackwasserbereich sowohl der Salzrückhalt der Membran, als auch die Ausbeute an entsalztem Wasser und der spezifische Transmembranfluss durch den modifizierten Aufbau erhöht werden.

Einer der wichtigsten Punkte für das System, die Salzkonzentration im Permeat, konnte bei der Auftrennung der Salzlösungen von 2.000ppm und 10.000ppm deutlich verringert werden, egal, ob der Retentatfluss gehemmt wird oder nicht, dies veranschaulichen die Abbildungen 37 und 38. Bei beiden wird die Salzkonzentration des „Trinkwassers“ stark gesenkt und das Ergebnis der Messung des 10.000ppm Rohwassers liegt sogar nach einmaliger Behandlung durch die Anlage nur noch knapp über dem EU-weiten Grenzwert für Trinkwasser. Dies liegt vermutlich auch am Phänomen der Konzentrationspolarisation an der Membranoberfläche.

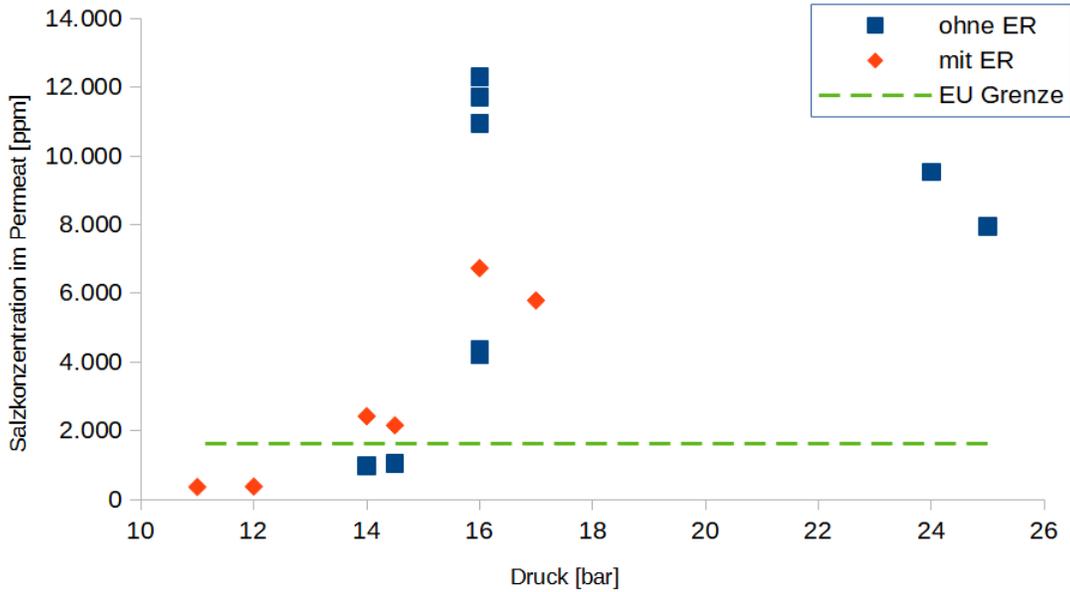


Abbildung 37: Vergleich der Salzkonzentrationen bei Anlagen mit und ohne Energierückgewinnung und gehemmten Retentatfluss für die 2. Messreihe

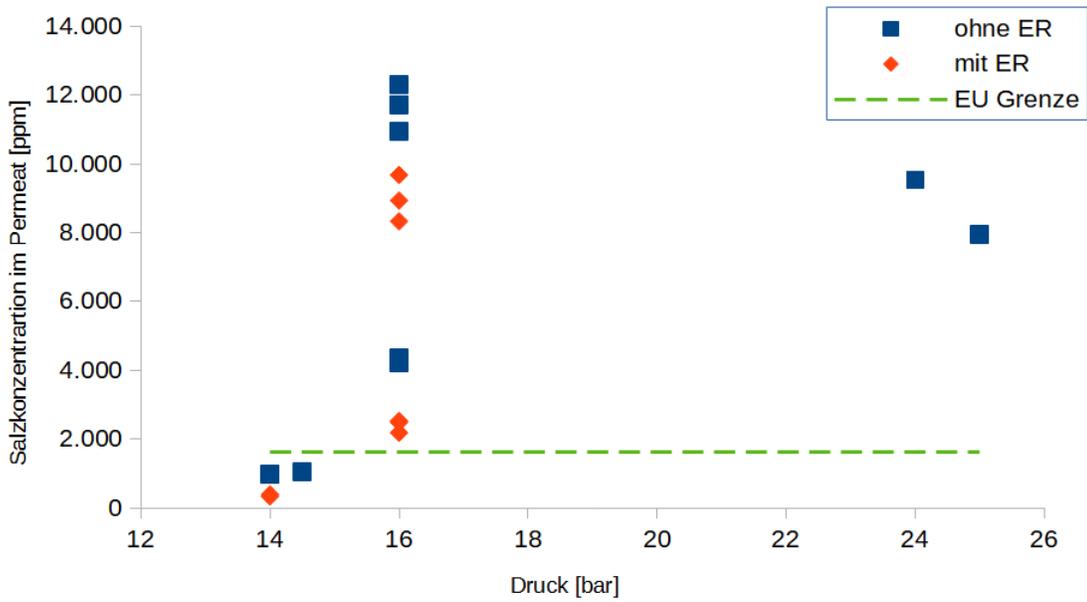


Abbildung 38: Vergleich der Salzkonzentrationen bei Anlagen mit und ohne Energierückgewinnung und ungehemmten Retentatfluss für die 2. Messreihe

Abbildung 39 und 40 zeigen wie sich der Transmembranfluss durch das Schließen und Öffnen der Drossel am Retentatausfluss nicht verändert, und bei den Brackwasserkonzentrationen der Salzzückhalt auch nur geringfügig verändert wird. Aber bei einem Salzgehalt im Meerwasserbereich lässt sich etwas Interessantes feststellen, denn durch den gehemmt Retentatfluss steigt der Salzzückhalt der Anlage mit Energierückgewinnung ähnlich dem der anderen Salzlösungen. Dagegen sinkt der Rückhalt bei offener Drossel, oder ungehemmtem Retentatfluss, in den Bereich ab, der ungefähr mit der Anlage ohne Energierückgewinnung erreicht wird. Dies ist dargestellt in beiden Abbildungen durch die roten Dreiecke und blauen Kreise, die beide die Ergebnisse der Rohwasserkonzentrationen von 20.000ppm beschreiben.

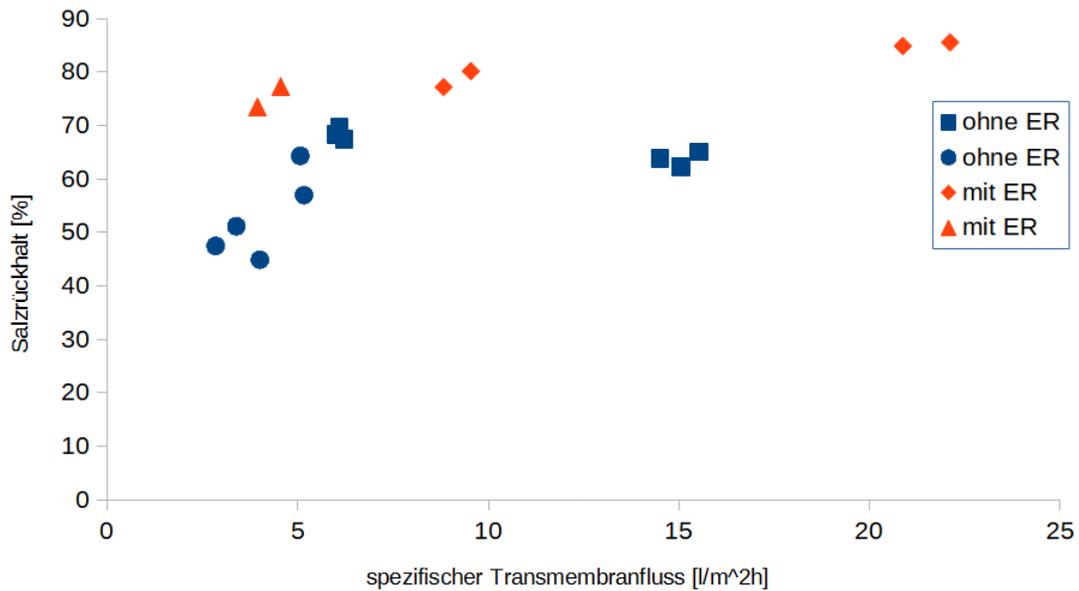


Abbildung 39: Vergleich des Salzzückhalts der Membran bei Anlagen mit und ohne Energierückgewinnung und gehemmt Retentatfluss für die 2. Messreihe

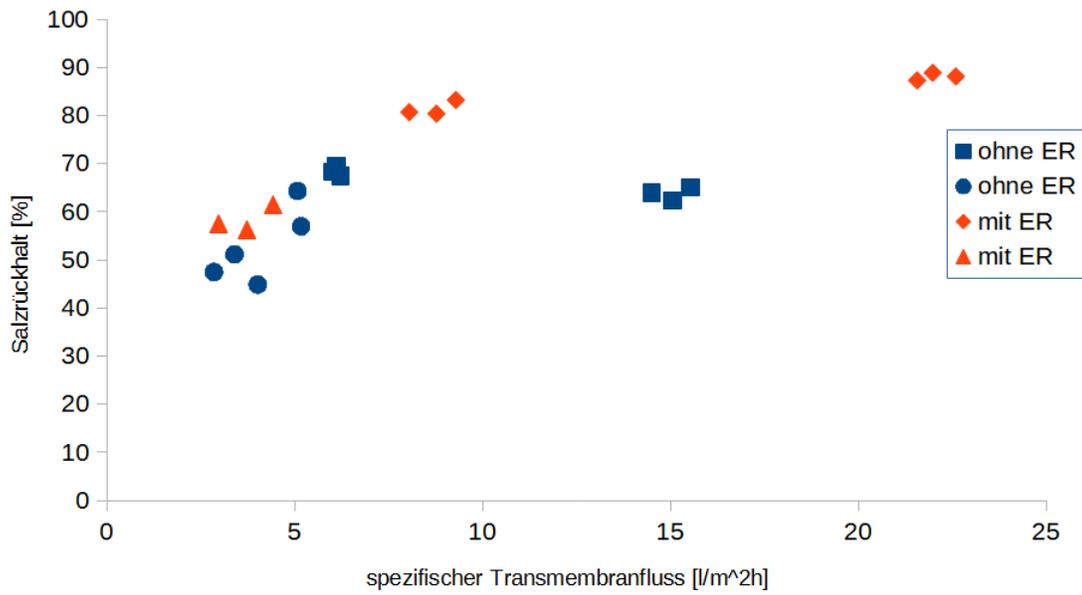


Abbildung 40: Vergleich des Salzrückhalts der Membran bei Anlagen mit und ohne Energierückgewinnung und ungehemmten Retentatfluss für die 2. Messreihe

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Zuge der Arbeit an den untersuchten Systemen hat sich gezeigt, dass die Ziele des angedachten Systems von Seiten der Umkehrosmose-Entsalzung erreichbar sind. Jedoch gilt es eine Reihe von Dingen im weiteren Vollzug zu beachten, mögliche Fehlerquellen zu minimieren, und auf die in dieser Arbeit gestellten Empfehlungen einzugehen.

Zunächst hat sich klar gezeigt, dass der Einsatz einer Energierückgewinnung mittels eines Rotationsdruckaustauschers die Ergebnisse der Trennleistung von salzhaltigem Wasser ausdrücklich verbessert. Fast sämtliche relevanten Werte zeigen eine deutliche Verbesserung, die für das komplexere Modell sprechen. Im Weiteren könnte allerdings überlegt werden den Rotationsdruckaustauscher durch eine Clarkpumpe zu tauschen. Dadurch würde die zweite Pumpe für den Druckaustauscher entfallen. Allerdings müsste genau geprüft werden, ob diese Umstellung auch klein genug skaliert werden kann und eine ähnliche Leistung erbringen kann.

Weiters hat sich gezeigt wie wichtig eine adäquate Lagerung, Wartung und Reinigung des Systems für die bestehende Funktion ist. Dafür darf bei der zukünftigen Anwendung des Systems eine Einschulung der Nutzer und Nutzerinnen nicht vernachlässigt werden. Die einzelnen hierbei nötigen Schritte sind einfach und ohne großen Aufwand zu bewerkstelligen, eine Vernachlässigung führt jedoch zu stark reduzierten Trennleistungen, bis hin zum vollständigen Verlust der Membran.

Auch die richtige Wahl des Membranmoduls ist zu beachten. Die für diese Messungen verwendete Membran würde in der Praxis nur für Brackwasserentsalzungen gute Ergebnisse bei einem Filter-Zyklus liefern. Mehrfache Zyklen zur Auftrennung sind in der Realität viel zu unpraktikabel. Denn die Ausbeute pro Zyklus ist zu gering und der Arbeits- und Zeitaufwand zu hoch. Dementsprechend muss ein Membranmodul gewählt werden, welches für die Entsalzung von Meerwasserkonzentrationen konzipiert ist. Ein Beispiel für ein geeignetes Wickelmembranmodul wäre Filmtec SW30-2514 der Firma DuPont [50].

Bei Verwendung einer geeigneten Membran für die Entsalzung von Meerwasser, könnte eine Modifikation wie beschrieben in der Arbeit von W. Lin et al. [16] angedacht werden, um die Membranfläche noch besser auszunutzen. Ebenfalls sollte in weiterer Folge nochmals der Effekt eines gehemmten und ungehemmten Retentatflusses bei den höheren Salzkonzentrationen von Meerwasser getestet werden. Die Messergebnisse dieser Arbeit deuten darauf hin, dass bei hohen Salzkonzentrationen eine bessere Auftrennung im Permeat bei gehemmtem Retentatfluss erzielt werden kann. Allerdings sollte man beachten, dass dadurch der Widerstand im System erhöht wird und es schlimmstenfalls zu Schäden an der Pumpe oder in anderen Teilen der Anlage kommen könnte. Deswegen sollten weitere Untersuchungen dazu unbedingt mit dem Gesamtaufbau des Systems einbezogen werden. Ein weiterer Gedanke für die Zukunft wäre eine Aufarbeitung der erzeugten Sole in einem späteren Projekt ins Auge zu fassen. Wie in dem Paper von Khan et al. [47] besprochen finden sich viele wertvolle Metalle in dem aufkonzentrierten Wasser. Diese könnten aufbereitet werden und zusätzlich zum Trinkwasser Einkünfte durch die Maschinen ermöglichen. Hierzu müsste jedoch noch ein passendes Filtrationsverfahren entwickelt werden und würde noch einiges an Forschungsaufwand benötigen um in der Praxis anwendbar zu werden.

Abschließend muss nochmal betont werden, dass eine mobile, vom Stromnetz unabhängige Wasseraufbereitungsanlage nicht nur für Gebiete mit chronischer Wasserknappheit, sondern auch akut für Katastrophengebiete eine wichtige Versorgungslücke schließen könnte. Denn häufig sind es auch Überschwemmungsgebiete, oder Gebiete die durch Naturkatastrophen von dem Stromnetz und der Wasserversorgung getrennt sind, in welchen eine flexible und günstige Filtrationsmöglichkeit unentbehrlich ist. Durch den autarken Antrieb mit Muskelkraft und die Mobilität könnte so kurzfristig die Wasserversorgung unterstützt beziehungsweise überbrückt werden. Hierfür wären mitunter sogar

die in dieser Arbeit erfolgreich getesteten Entsalzungen von Brackwasser-Konzentrationen ausreichend. Das System mit Energierückgewinnung könnte ohne weitere Modifikationen in Gegenden mit Brackwasserzugang verwendet werden und durchwegs trinkbares Wasser produzieren.

## Anhang



Abbildung 41: Fotografie, die die Ausbeulungen und die metallischen Ablagerungen an der Membran zeigt

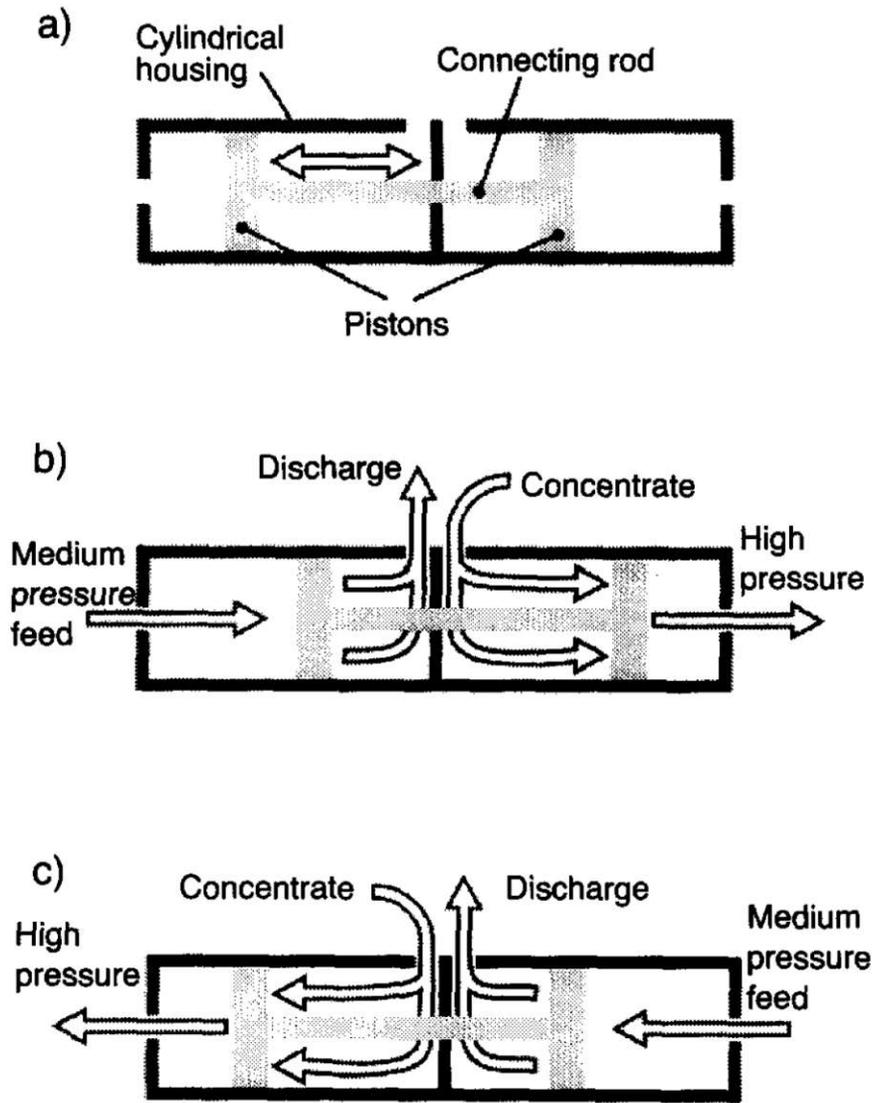


Fig. 1. Basic mechanics of a Clark pump.

Abbildung 42: Funktionsweise einer Clarkpumpe [36]



Abbildung 43: Fotografie des Aufbaus der Entsalzungsanlage auf einem Fahrrad

# Formelzeichen und Indizierung

## Tabellenzeichen

C	ppm (parts per Million)	Konzentration
N	[mol]	Stoffmenge
$\sigma$	[mS/cm]	elektrische Leitfähigkeit
$\pi$	[bar]	osmotischer Druck
T	[°C]	Temperatur
Q	[l/h]	Fließrate
p	[bar]	Druck
SR	[%]	Salzrückhalt der Membran
R	[%]	Ausbeute
$\Delta p$	[bar]	Druckabfall
A	[m <sup>2</sup> ]	Fläche
L	[cm]	Länge
t	[min]	Zeit
$Q_{Op}$	[l/(m <sup>2</sup> h)]	spezifischer Transmembranfluss
$\eta$	[%]	Effektivität des Druckaustauschers

## Indizes

ber	berechnet
gem	gemessen
max	maximal
P	Permeat
R	Retentat
F	Feed
i	Komponente i
$\alpha$	Anfangswert
P,25 oder R,25	Permeat oder Retentat bei einer Temperatur von 25°C

## Literatur

- [1] Progress on drinking water, sanitation and hygiene: 2017 update and SDG baselines; Geneva: World Health Organization (WHO) and the United Nations Children's Fund (UNICEF), 2017
- [2] Jens Huppelsberg, Kerstin Walter; Kurzlehrbuch Physiologie; 2., korrigierte Auflage, Georg Thieme Verlag KG; Stuttgart 2005 ; Seite 179 ff.
- [3] <http://undocs.org/A/RES/64/292>; letzter Zugriff: 13.07.2022
- [4] <https://info.bmlrt.gv.at/themen/wasser/wasser-oesterreich/zahlen/trinkwasserverbrauch.html>; letzter Zugriff: 13.07.2022
- [5] <https://www.usbr.gov/mp/arwec/water-facts-ww-water-sup.html>; letzter Zugriff: 13.07.2022
- [6] Matthias Schaefer; Wörterbuch der Ökologie; 5. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag; Heidelberg 2012 ; Seite 285
- [7] Matthias Schaefer; Wörterbuch der Ökologie; 5. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag; Heidelberg 2012 ; Seite 253
- [8] Matthias Schaefer; Wörterbuch der Ökologie; 5. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag; Heidelberg 2012 ; Seite 52
- [9] Matthias Schaefer; Wörterbuch der Ökologie; 5. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag; Heidelberg 2012 ; Seite 168
- [10] R. Chakraborty , K.M. Khan, D.T. Dibaba, Md A. Khan, A. Ahmed, M.Z. Islam; Health Implications of Drinking Water Salinity in Coastal Areas of Bangladesh; Int J Environ Res Public Health; 2019; Volume 16(19); Article 3746
- [11] <https://www.wien.gv.at/wienwasser/qualitaet/ergebnis.html>; letzter Zugriff: 13.07.2022
- [12] C. Nishida, R. Uauy, S. Kumanyika, P. Shetty; The Joint WHO/FAO Expert Consultation on diet, nutrition and the prevention of chronic diseases: process, product and policy implications; Public Health Nutrition: 7(1A); Cambridge University Press 2004; Seiten 245–250
- [13] Richtlinie (EU) 2020/2184 des europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2020 über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Neufassung); L 435; Seite 40
- [14] [my.suezwatertechnologies.com/WTSCustomerPortal/s/content-download?DN=FSpsBiotechTestElem\\_EN.pdf](https://my.suezwatertechnologies.com/WTSCustomerPortal/s/content-download?DN=FSpsBiotechTestElem_EN.pdf); letzter Zugriff: 13.07.2022
- [15] Thomas Melin, Robert Rautenbach; Membranverfahren, Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung; 3. Auflage, Springer Verlag; Berlin Heidelberg 2007; Kapitel 5, Seite 174
- [16] W. Lin, J. Lei, Q. Wang, X. Wang, X. Huang; Performance enhancement of spiral-wound reverse osmosis membrane elements with novel diagonal-flow feed channels; Desalination 523 (2022), Artikel 115447
- [17] W. Lin, J. Lei, Q. Wang, X. Wang, X. Huang; Performance enhancement of spiral-wound reverse osmosis membrane elements with novel diagonal-flow feed channels; Desalination 523 (2022), Artikel 115447; Seite 2

- [18] Thomas Melin, Robert Rautenbach; Membranverfahren, Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung; 3. Auflage, Springer Verlag; Berlin Heidelberg 2007; Kapitel 6, Seite 206
- [19] P. Atkins, J. de Paula; Physical Chemistry; 8.Auflage; W.H. Freeman and Company New York; 2006; Seite 1019
- [20] [https://www.lenntech.de/calculators/conductivity/tds\\_engels.htm](https://www.lenntech.de/calculators/conductivity/tds_engels.htm); letzter Zugriff: 13.07.2022
- [21] Veera Gnaneswar Gude, N. Khadan, S. Deng, A. Maganati; Energy consumption and recovery in reverse osmosis, Desalination and Water Treatment; Desalination Publications 36 (2011); Seite 239–260
- [22] R.L.Stover; Seawater reverse osmosis with isobaric energy recovery devices; Desalination 203 (2007); Seite 168-175
- [23] <https://www.dupont.com/products/filmtecsw30hrle400.html>; letzter Zugriff: 13.07.2022
- [24] Thomas Melin, Robert Rautenbach; Membranverfahren, Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung; 3. Auflage, Springer Verlag; Berlin Heidelberg 2007; Kapitel 8, Seite 252, Formel 8.5
- [25] <http://www.oltremaremembrane.com/en/2017/11/28/sea-5-en/>; letzter Zugriff: 13.07.2022
- [26] <http://www.oltremaremembrane.com/en/2017/11/28/sea-2-en/>; letzter Zugriff: 13.07.2022
- [27] <http://www.oltremaremembrane.com/en/2017/11/28/compact-elements-en/>; letzter Zugriff: 13.07.2022
- [28] <https://www.waterhydraulics.co.uk/janus-p1-axial-piston-pump/>; letzter Zugriff: 13.07.2022
- [29] <https://www.xylem.com/en-us/products-services/pumps-packaged-pump-systems/pumps/end-suction-pumps/magnetically-coupled-pumps/dc155-magnetic-drive-centrifugal-pump/applications/>; letzter Zugriff: 13.07.2022
- [30] <https://www.eaton.com/de/de-de/catalog/filtration/loftrex.html>; letzter Zugriff: 13.07.2022
- [31] <https://my.suezwatertechnologies.com/WTSCustomerPortal/s/content-download?DN=TB1194EN.pdf>; letzter Zugriff: 13.07.2022
- [32] <https://www.wasserhaus.de/MineralisierungsfILTER-M120-L>; letzter Zugriff: 13.07.2022
- [33] Jens Huppelsberg, Kerstin Walter; Kurzlehrbuch Physiologie; 2., korrigierte Auflage, Georg Thieme Verlag KG; Stuttgart 2005 ; Seite 48 f.
- [34] H.G.Strühhlinger; Die Bedeutung von Magnesium bei kardiovaskulären Erkrankungen; Journal für Kardiologie - Austrian Journal of Cardiology 2002; 9. Auflage, Kapitel 9; Seiten 389-395
- [35] <https://www.bwt.com/de-at/produkte-fuer-zuhause/leitungswasser-trinken/filterkartuschen/>; letzter Zugriff: 13.07.2022
- [36] M. Thomson, M. Miranda, D. Infield; A small-scale seawater reverse-osmosis system with excellent energy efficiency over a wide operating range; Desalination 153 (2002); Seite 229-236

- [37] T.M. Mansour, T.M. Ismail, K. Ramzy, M. Abd El-Salam; Energy recovery system in small reverse osmosis desalination plant: Experimental and theoretical investigations; *Alexandria Engineering Journal* 59 (2020); Seite 3741-3753
- [38] D.P. Clarke, Y.M. Al-Abdeli, G. Kothapalli; The effects of including intricacies in the modeling of a small-scale solar-PV reverse osmosis desalination system; *Desalination* 311 (2013); Seite 127-136
- [39] M.S. Miranda, D. Infield; A wind-powered seawater reverse-osmosis system without batteries; *Desalination* 153 (2002); Seite 9-16
- [40] S.G.J. Heijman, E. Rabinovitch, F. Bos, N. Olthof, J.C. van Dijk; Sustainable seawater desalination: Stand-alone small scale windmill and reverse osmosis system; *Desalination* 248 (2009); Seite 114-117
- [41] Q. Li, H. Zhang, C. Tan, B. Lian, R. García-Pacheco, R.A. Taylor, J. Fletcher, P. Le-Clech, B. Ranasinghe, T. Senevirathna, G. Leslie; Numerical and experimental investigation of a DC-powered RO system for Sri-Lankan villages; *Renewable Energy* 182 (2022); Seite 772-786
- [42] Murat Gökçek; Integration of hybrid power (wind-photovoltaic-diesel-battery) and seawater reverse osmosis systems for small-scale desalination applications; *Desalination* 435 (2018); Seite 210 -220
- [43] K.M. Brodersen, E.A. Bywater, A.M. Lanter, H.H. Schennum, K.N. Furia, M.K. Sheth, N.S. Kiefer, B.K. Cafferty, A.K. Rao, J.M. Garcia, D.M. Warsinger; Direct-drive ocean wave-powered batch reverse osmosis; *Desalination* 523(2022); Nummer: 115393
- [44] M.T. Mito, X. Ma, H. Albuflasa, P.A. Davies; Reverse osmosis (RO) membrane desalination driven by wind and solar photovoltaic (PV) energy: State of the art and challenges for large-scale; *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 112 (2019); Seite 669-685 implementation
- [45] B. Peñate, F. Castellano, A. Bello, L. García-Rodríguez; Assessment of a stand-alone gradual capacity reverse osmosis desalination plant to adapt to wind power availability: A case study; *Energy* 36 (2011); Seite 4372-4384
- [46] X. Zhang, J. Jiang, F. Yuan, W. Song, J. Li, D. Xing, L. Zhao, W. Dong, X. Pan, X. Gao; Estimation of water footprint in seawater desalination with reverse osmosis process; *Environmental Research* 204 (2022); Nummer 112374
- [47] M.Khan, R.S. Al-Absi, M. Khraisheh, M.A. Al-Ghouti; A better understanding of seawater reverse osmosis brine: Characterizations, uses, and energy requirements; *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 4 (2021); Nummer: 100165
- [48] T.M. Missimer, R.G. Maliva; Environmental issues in seawater reverse osmosis desalination: Intakes and outfalls; *Desalination* 434 (2018); Seite: 198-215
- [49] M. Qasim, N.N. Darwish, S. Mhiyo, N.A. Darwish, N. Hilal; The use of ultrasound to mitigate membrane fouling in desalination and water treatment; *Desalination* 443 (2018); Seite: 143-164
- [50] <https://www.dupont.com/products/filmtecsw302514.html>; letzter Zugriff: 13.07.2022