

**Fakultät für Physik und Astronomie
Universität Heidelberg**

Bachelorarbeit im Studiengang Physik

vorlegt von

Florian Dinger

geboren in Aalen

Juli 2011

Osmosekraftwerke und ihr Potential

Überarbeitete Version von März 2012.

Diese Bachelorarbeit wurde von Florian Dinger ausgeführt am
Institut für Umweltphysik Heidelberg
unter der Betreuung von
Professor Ulrich Platt

KURZFASSUNG

Auf dem Weg zu einer vollständig regenerativen Energieversorgung müssen zusätzliche Alternativen zu Wind- und Sonnenenergie erforscht werden. Die Osmosekraft stellt mit einem theoretischen globalen Potential von bis zu 14000 TWh pro Jahr eine solche dar. Sie beruht darauf, dass beim Vermischen von Salz- und Süßwasser (z.B. an einer Flussmündung) pro 1 m^3 Süßwasser ungefähr 2.9 MJ Energie freigesetzt werden. In dieser Arbeit wird behandelt wie ein Osmosekraftwerk funktioniert und welche Einstellungen für die optimale Leistung erforderlich sind. Außerdem werden Investitionskosten und ökonomische Realisierung diskutiert. Die Erkenntnis ist, dass sich ein Osmosekraftwerk heute noch nicht lohnt. Mit steigendem Strompreis bringt ein Osmosekraftwerk hingegen schon mit der aktuellen Membranqualität Gewinne ein. Abschließend werden die besten Standorte Europas gesucht. Deutschlands Potential fällt dabei gering aus, während das Mittelmeer den besten Standort weltweit bietet, Salzseen ausgenommen.

ABSTRACT

On its way to a completely regenerative energy supply, additional alternatives to wind and solar power have to be investigated. Osmosis power is such an alternative with a theoretical global potential of up to 14000 TWh per year. It utilizes the fact, that when fresh and salt water get mixed together (e.g. at a river mouth) around 2.9 MJ of energy per 1 m^3 fresh water are released. In this bachelor thesis we treat how an osmotic power plant works and which settings are necessary for optimal performance. Furthermore, some approximations of the capital costs and the economic realisation are discussed. The conclusions are that today an osmotic power plant would not be efficient. But with increasing energy generation costs of the other energies already a plant with the current membranes would become competitive. Finally the best locations for an osmotic power plant in Europe are looked for. It is shown that Germany's osmotic potential is small, while the Mediterranean Sea is the best place in the world, except for salt lakes.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theorie	3
2.1	Entropie und Hauptsätze der Thermodynamik	3
2.2	Osmose	3
2.3	Osmotischer Druck	4
2.4	Permeation	6
3	Kraftwerksaufbau	7
3.1	Schematischer Aufbau	7
3.2	Die Membran	10
3.3	Der Druckaustauscher	12
3.4	Filter	14
3.5	Turbine	14
4	Prozessführung	15
4.1	Zeitlicher Verlauf der Brackwasserkonzentration	15
4.2	Optimaler Arbeitsdruck und Turbinenleistung	16
4.3	Einfluss der Parameter	18
4.3.1	Initialwerte und abgeschätzte Leistung	18
4.3.2	Einfluss der Wirkungsgrade von Turbine und Pumpe	19
4.3.3	Einfluss der Verluste des Druckaustauschers	20
4.3.4	Temperatur und Salzkonzentration	21
4.3.5	Einfluss der semipermeable Membran	21
4.4	Technische Verluste	22
5	Wirtschaftlichkeit	23
5.1	Strompreis	23
5.2	Stromgestehungskosten	23
5.3	Kraftwerksgewinn	26
5.4	Schwankungen	29
6	Potential	30
6.1	Potential in Deutschland	32
6.1.1	Elbe	32
6.1.2	Weser	34
6.2	Potential in Europa	36
6.3	Salzseen	38
6.3.1	Totes Meer	38
6.3.2	Kara-Bogas-Gol am Kaspischen Meer	40
6.4	Variationen des Kraftwerksaufbaus	42

1 Einleitung

Die moderne Welt ist von der Energieversorgung abhängig. Ohne Strom brechen nicht nur Industrie und Landwirtschaft, sondern auch jede moderne Art der Kommunikation zusammen. Dementsprechend ist es das vitale Interesse eines jeden Staates genügend Strom zur Verfügung zu haben.

Die heutige, auf fossile Brennstoffe und Uran basierende Energieversorgung ist aber so nicht zukunftsfähig. Selbst in den optimistischeren Prognosen ist ersichtlich, dass spätestens Ende des Jahrhunderts die Rohstoffe quasi vollständig aufgebraucht sind oder zumindest nicht mehr den Energiebedarf stillen können.

Eine große Aufgabe dieses Jahrhunderts wird es also sein auf ein nachhaltigeres Energieversorgungssystem umzusteigen. Lässt man die Kernfusion außer Acht, kommen dafür nur die regenerativen Energien in Frage.

Bei dem Ziel einer vollständig regenerativen Energieversorgung stellt die Versorgungssicherheit ein Problem dar. Solange keine geeigneten Langzeitspeicher entwickelt wurden, ist es unverantwortlich das Versorgungskonzept vollständig von Wind, Sonne und konventioneller Wasserkraft (also den wahrscheinlich dominierenden Energieträgern der Zukunft) tragen zu lassen. Eine gewisse Periode von wind- und sonnenarmen Tagen würde zur oben genannten Katastrophe führen. Die Lösung ist ein möglichst vielfältiger Energiemix, in dem viele leistungsschwächere Energieträger zusammen einen Einbruch der Kapazität der großen Energieträger auffangen können.

Die Forschung nach solchen Energieträgern hat in der Vergangenheit Blockheizkraftwerke, Biomasseanlagen, Geothermie- und Gezeitenkraftwerke entwickelt. Zu den gegenwärtigen Kandidaten zählen unter anderem Wellenkraftwerke und Osmosekraftwerke.

Bei der Osmosekraft wird aus dem Mischvorgang von Salz- und Süßwasser Energie gewonnen. Beide "Brennstoffe" sind in weiten Teilen der Welt kostenlos verfügbar. Außerdem ist die Technologie CO₂-neutral, wirft keine Abfallstoffe ab und ist quasi keinen Schwankungen ausgesetzt. Kurz gesagt: die perfekte Energie.

Die Schattenseite dabei ist das Gespann aus zwei Problemen: das geringe Vorkommen von großen Süßwasserzuflüssen ins Meer und der relativ geringe Membrandurchfluss.

Mit Hilfe eines Osmosekraftwerks kann aus 1 m³ Süßwasser etwa 1.5 MJ Energie gewonnen werden. Um beispielsweise die Kraftwerksleistung eines Großkraftwerks (500 MW) zu erhalten, ist schon rein theoretisch ein Meereszufluss mit einer Abflussmenge von mehr als 300 $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ nötig. Europaweit ist die Zahl der möglichen Kandidaten recht überschaubar, in Deutschland sind es sogar nur zwei. Ferner scheiden viele mögliche Kandidaten durch ein riesiges Mündungsdelta oder eine Brackwasserzone aus der Standortwahl aus.

Beschränkt man sich in der Kraftwerksplanung auf lokale Maßstäbe, so schlägt das zweite Problem besonders stark zu. Beim jetzigen Stand der Forschung können nur Membranen mit einem Durchfluss von etwa $1.4 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ pro Quadratmeter Membranfläche hergestellt werden. Folglich nimmt ein kleineres Kraftwerk (10 MW) selbst mit sehr platzsparenden

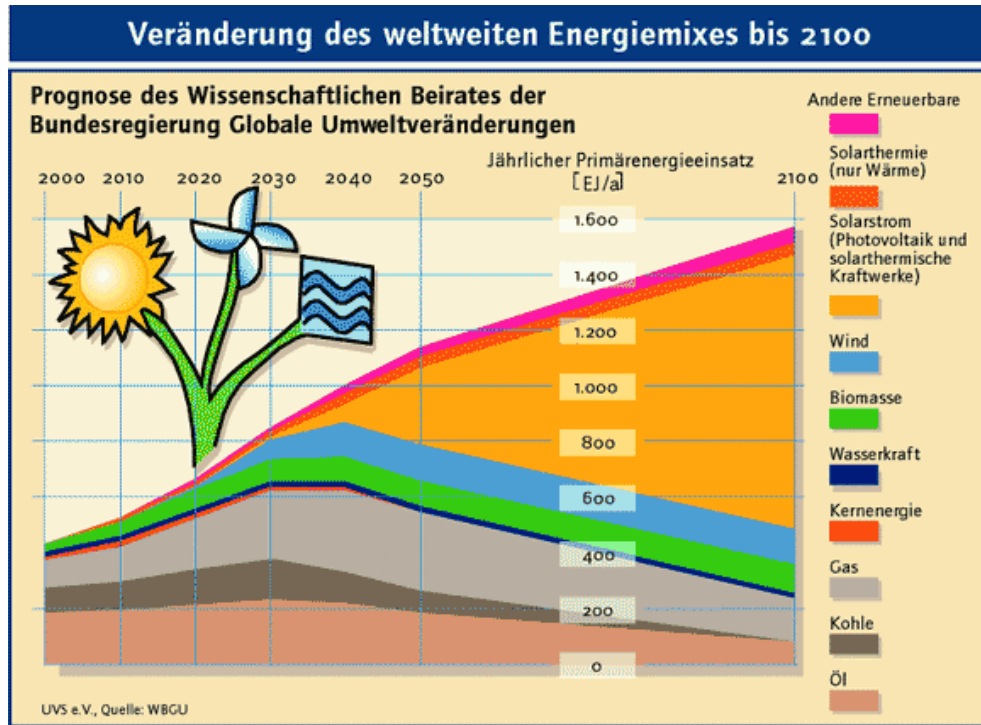


Abbildung 1: Prognose des WBGU. Die vorhergesagte Dominanz der Solarenergie ist klar erkennbar. Um mögliche Einbrüche ihrer Kapazität abzufangen ist es notwendig weitere Energieformen, wie die Osmosekraft, zu erforschen.

Membranmodulen ein Volumen von grob 10000 m^3 ein, vollständig gefüllt mit High-Tech-Komponenten. Vor allem die Membrankosten treiben dabei die Investitionskosten in die Höhe. Die Forschung konnte allerdings den Membrandurchfluss in den letzten 10 Jahren um einen Faktor 200 steigern und ist optimistisch den Wert noch mindestens zu verdoppeln.

2 Theorie

2.1 Entropie und Hauptsätze der Thermodynamik

Wegen der Brownschen Molekularbewegung ist unsere Welt auf der Längenskala von Atomen dynamisch. Daher ist es unmöglich festzustellen, in welcher Anordnung, d.h. in welchem "Zustand", sich alle Atome zu einem bestimmten Zeitpunkt befinden. Dennoch lässt sich die Zustandssumme Ω , d.h. die Anzahl aller möglichen Zustände, abschätzen. Um dies in Rechnungen einzubeziehen, wurde die sogenannte Entropie S eingeführt:

$$S := k_B \cdot \ln(\Omega)$$

mit der Boltzmann-Konstante $k_B = 1.3806504(24) \cdot 10^{-23}$ J/K

Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik besagt, dass die Entropie eines Systems nicht abnehmen kann, d.h. $dS \geq 0$.

Ferner nimmt bei jedem irreversiblen Prozess die Entropie zu. Da in der Natur fast ausschließlich irreversible Prozesse vorkommen, lässt sich der 2. Hauptsatz vereinfachen zu:

“Ein System versucht seine Entropie zu maximieren.”

Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik besagt, dass die Energie eines Systems konstant bleibt:

$$dU = dW + dQ + dN = 0$$

wobei $dW = p \cdot dV$ und $dQ = T \cdot dS$

Sofern das System versucht seine Entropie dS zu erhöhen, muss folglich eine Arbeit $-dW$ (oder ein Teilchenaustausch $-dN$) geleistet werden. Diese Arbeit soll vom Osmosekraftwerk genutzt werden.

2.2 Osmose

Standardbeispiel: Das U-Rohr Zwei Lösungen mit verschiedener Salzkonzentration befinden sich in den beiden Schenkeln eines U-Rohrs (siehe Abb.2). Sie stehen über eine semipermeable (=halbdurchlässige) Membran in Kontakt. Durch eine mikroskopische Kraft, den sogenannten osmotischen Druck (Kraft = Querschnittsfläche \cdot Druck), wird Lösungsmittel zur hohen Konzentration herübergezogen, wodurch der Wasserspiegel steigt. Theoretisch wird solange Wasser nachgezogen bis der osmotische Druck verschwindet, d.h. bis sich die Konzentrationen angeglichen haben. Im Schwerfeld der Erde entsteht wegen der Höhendifferenz der beiden Wasserspiegel allerdings eine weitere Kraft, der hydrostatische Druck. Dieser wirkt dem osmotischen Druck entgegen. Nach einer Einlaufzeit hat sich auf beiden Seiten ein stabiler Wasserspiegel eingestellt.

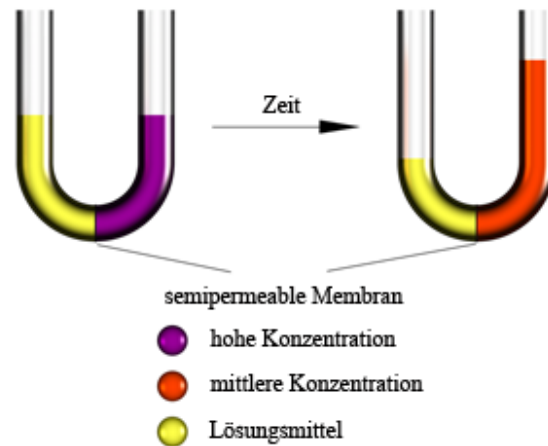


Abbildung 2: Prinzip der Osmose (Bildquelle: Wikipedia)

In diesem Versuchsaufbau lässt sich bereits der osmotische Druck bestimmen: Im Kräftegleichgewicht gilt für den, von dem gegenwärtigen Konzentrationsunterschied verursachten, osmotischen Druck:

$$p_{osm} = p_{hydrost} = g \cdot \rho \cdot h$$

mit dem (Gravitations-)Ortsfaktor g , der Dichte $\rho \approx \rho_{Wasser}$ und dem Höhenunterschied h

Es existieren mehrere Modelle und Herleitungen des osmotischen Drucks. Im Endeffekt gehen die meisten Modelle vom herkömmlichen Diffusionsmodell aus (wie beim Billiard: Man betrachtet die Wassermoleküle als Kugeln, deren Bewegung sich nur durch Stöße mit anderen Molekülen ändert. D.h. die einzelnen Moleküle interagieren jeweils nur mit ihrer nächsten Umgebung und wissen nichts von den makroskopischen Randbedingungen.) und argumentieren damit, dass es insgesamt mehr Stöße in Richtung der konzentrierten Lösung gibt. D.h. es kommt auch vor, dass Wassermoleküle von der hohen zur niedrigen Konzentration fließen. Aber es fließen eben mehr von der niedrigen zur hohen. Eine sehr prosaische Auflistung dieser Modelle findet man in (Borg, 2003), eine theoretische Herleitung in (Guell, 1996). Es folgt nun eine theoretische Herleitung des osmotischen Drucks.

2.3 Osmotischer Druck

Quelle: (Fliessbach, 2010)

Man betrachte ein geschlossenes (=konstante Teilchenzahl) System, das aus zwei Reservoiren besteht, die durch eine semipermeable Membran miteinander in Kontakt stehen. In dem einen Reservoir sei reines Lösungsmittel, in dem anderen sei eine Lösung des Mischungsverhältnisses $\frac{N_S}{N}$, wobei N_S die Teilchenzahl des gelösten Stoffes, N die Teilchenzahl

des Lösungsmittels, angibt. Die Membran sei nur für das Lösungsmittel passierbar.

Es sei Ω_{LM} die Zustandssumme des Lösungsmittel und Ω_S die des gelösten Stoffes. Sofern die Zustände von Lösungsmittel und gelöstem Stoff voneinander unabhängig sind, gilt für die Gesamtzustandssumme der Lösung $\Omega_L = \Omega_{LM} \cdot \Omega_S$.

Wird der gelöste Stoff als ideales Gas (keine gegenseitige Wechselwirkung) betrachtet, so gilt für dessen Zustandssumme folgende Volumenabhängigkeit:

$$\Omega_s \propto V^{N_s}$$

Für die Entropie S_L der Lösung folgt:

$$\begin{aligned} S_L &= k_B \cdot \ln(\Omega_L) = k_B \cdot [\ln(\Omega_{LM}) + \ln(\Omega_S)] \\ &= S_{LM} + N_S \cdot k_B \cdot \ln(V) + const \end{aligned}$$

In der Thermodynamik ist der Druck p definiert durch:

$$p := T \cdot \left. \frac{\partial S}{\partial V} \right|_{E,N}$$

Für den Gesamtdruck p_L der Lösung folgt:

$$p_L = T \cdot \left. \frac{\partial S_L}{\partial V} \right|_{E,N} = T \cdot \left. \frac{\partial S_{LM}}{\partial V} \right|_{E,N} + \frac{T \cdot N_S \cdot k_B}{V} = p_{LM} + p_{osm}$$

Im Lösungsmittel-Reservoir herrscht der Partialdruck p_{LM} des Lösungsmittels. An der Membran liegt folglich die Druckdifferenz p_{osm} , der osmotische Druck, an. Für diesen gilt:

$$p_{osm} = \frac{T \cdot N_S \cdot k_B}{V} = n_S \cdot k_B \cdot T$$

Diese Gleichung gilt für eine gelöste Stoffart. Zerfällt ein Molekül des gelöste Stoffes in i Ionen, so ist der gesamte osmotische Druck (bei vollständiger Dissoziation) der i -fache des wie oben berechneten osmotischen Drucks des gelösten Moleküls. Diese Arbeit betrachtet Salzwasser als Kochsalz(NaCl)-Lösung. Für dessen osmotischen Druck gilt:

$$p_{NaCl} = 2 \cdot n_{NaCl} \cdot k_B \cdot T$$

Es ist allerdings üblicher die Konzentration eines Stoffes (z.B. den Salzgehalt) als dessen Teilchendichte anzugeben. Wegen der Proportionalität zwischen Teilchendichte und Konzentration stellt dies auch kein mathematischen Hürden und wird im Folgenden auch gemacht. Umrechnungsformel: $c_{Stoff} = n_{Stoff} \cdot M_{Stoff}$ mit der molaren Masse M_{Stoff} .

Ist in dem einen Reservoir statt reinem Lösungsmittel eine Lösung mit niedriger Konzentration enthalten, so folgt mit gleichen Überlegungen für den osmotischen Druck:

$$p_{osm} = (n_{hoch} - n_{niedrig}) \cdot k_B \cdot T$$

2.4 Permeation

Eine semipermeable Membran ist dadurch charakterisiert, dass Atome bzw. Moleküle von gewissen Stoffen durch sie hindurch diffundieren können, während gewisse andere Stoffe dies nicht (oder zumindest nur stark unterdrückt) können. Für die in dieser Arbeit verwendeten Membran bedeutet dies, dass sie für Wassermoleküle durchlässig, für Salzionen undurchlässig ist.

Für den (Wasser-)Membrandurchfluss D_M pro Fläche gilt allgemein

$$D_M = K_M \cdot (p_{osm} - p_G)$$

wobei K_M der Wasser-Permeations-Koeffizient der Membran und p_G der Gegendruck (also evtl. der hydrostatische Druck) ist.

Diffundiert Wasser durch die Membran, so geschieht dies gegen den auf der anderen Seite herrschenden Gegendruck. Für die mechanische Leistung, des durch die Membran diffundierenden Volumenstroms gilt:

$$P_M = A \cdot D_M \cdot p_G = A \cdot K_M \cdot (p_{osm} \cdot p_G - p_G^2)$$

Die maximale Leistung entsteht folglich bei einem Gegendruck von $p_G = \frac{p_{osm}}{2}$.

Diese beträgt $P_M^{max} = \frac{A \cdot K_M \cdot p_{osm}^2}{4}$.

3 Kraftwerksaufbau

In den folgenden Kapiteln wird nicht mehr die Rede von der Entropie S sein. Um die übliche Notation beizubehalten werden von nun an Volumenströme mit S_{Index} bezeichnet. Falls nur S angegeben ist, so wird von einem Volumenstrom und nicht von der Entropie gesprochen.

3.1 Schematischer Aufbau

Da es unpraktisch und teuer ist, ein bis zu 300 m hohes Brackwasserbecken zu bauen, wird in der Praxis der osmotische Druck nicht gegen den hydrostatischen Druck aufgebaut. Stattdessen wird das Brackwasser in einer Druckkammer (= Brackwasserbecken), deren Volumen konstant ist, auf einen hohen Druck gebracht.

Im Folgenden wird sukzessive ein schematisches Osmosekraftwerk aufgebaut.

Abb.3 zeigt das Herzstück der Anlage: die beiden Wasserbecken, die mittels semipermeabler Membran in Kontakt stehen.

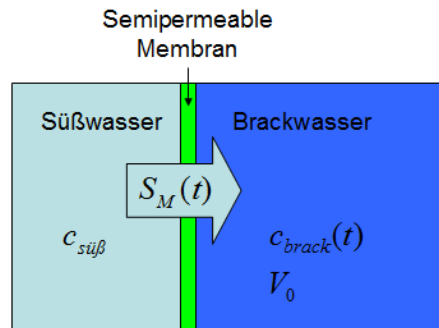


Abbildung 3: Kraftwerksaufbau, Schritt 1

Die bestimmenden Größen sind:

- Brackwasserbecken: Volumen V_0 , Konzentration $c_B(t)$
- Süßwasserbecken: Konzentration $c_S(t)$
- Membran: Kontaktfläche A , Volumendurchfluss $S_M(t) = S(\Delta c(t))$

Bei diesem Aufbau diffundiert nun das Süßwasser solange durch die Membran, bis der Druckunterschied an den beiden Membranseiten verschwindet, d.h. bis der Hochdruck in der Kammer dem gegenwärtigen osmotischen Druck entspricht.

Um Strom zu erzeugen, muss nun eine Turbine an das Brackwasserbecken angeschlossen werden. Da durch diese Wasser aus dem System entnommen wird, muss außerdem

eine Süßwasserzufuhr existieren. (siehe Abb.4)

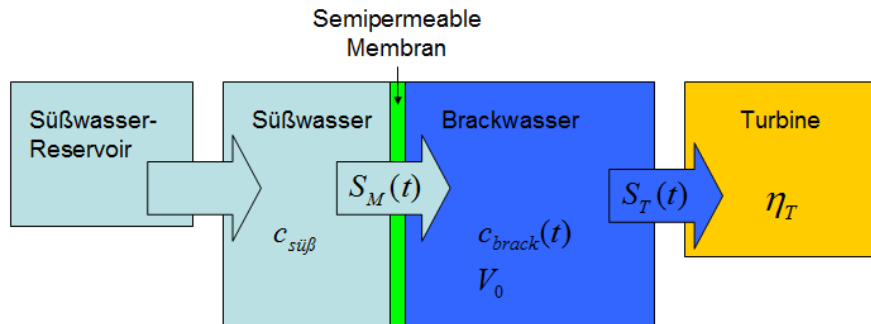


Abbildung 4: Kraftwerksaufbau, Schritt2

Es ist im Interesse des Kraftwerksbetreibers, dass es kontinuierlich mit konstanter Leistung läuft.

Um einen kontinuierlichen Prozess zu erhalten, darf die Turbine nicht mehr Brackwasser abtransportieren als durch Osmose nachgezogen wird. Dafür muss die Turbine so eingestellt werden, dass der durch sie abfließende Volumenstrom dem Membranvolumendurchfluss $S_M(t)$ entspricht.

Die Bedingung für konstante Leistung ist hingegen ein konstanter osmotischer Druck in der Druckkammer. Mit dem Aufbau in Abb.4 ist dies nicht zu bewerkstelligen. Während Süßwasser hinzudiffundiert, wird Brackwasser abgelassen. Die Folge ist eine fortlaufende Verdünnung der Brackwasserlösung bzw. eine Verringerung der Salzkonzentration.

Um einen konstanten osmotischen Druck aufrechtzuerhalten, müssen noch drei weitere Komponenten installiert werden (siehe Abb.5).

Die sinnvollste Art, den Konzentrationsabfall zu neutralisieren, ist, dem Brackwasserbecken direkt Salzwasser zuzuführen. Da Wasser praktisch inkompressibel ist, muss allerdings gleichzeitig Brackwasser abgelassen werden. Eine Möglichkeit dafür wäre, einen größeren Volumenstrom über die Turbine abzulassen und das zusätzlich abfließende Volumen durch Salzwasser zu ersetzen. Wegen der begrenzten Wirkungsgrade von Turbine und Salzwasserpumpe kostet das Pumpen des Salzwassers (gegen den Arbeitsdruck in der Druckkammer) jedoch praktisch mehr Energie, als das zusätzliche Brackwasser in der Turbine erzeugt.

Dieses Problem trat bereits bei der Planung von Meerwasserentsalzungsanlagen auf (Diese arbeiten mit der sogenannten Umkehrosmose.). Als kostengünstige Lösung wurde dort ein "Druckaustauscher" installiert. Statt den verlustreichen Weg über Turbine und Pumpe zu wählen, wird hierbei die mechanische Energie eines Brackwasservolumens ΔV

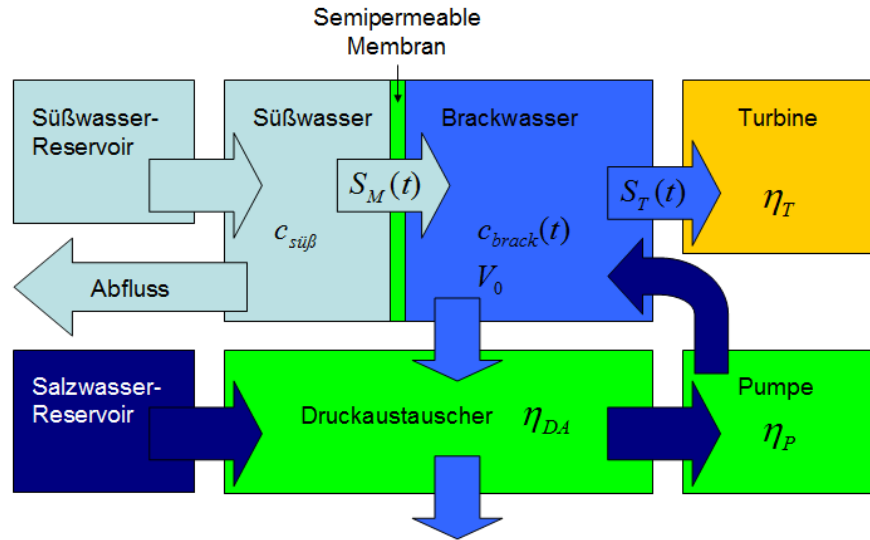


Abbildung 5: Kraftwerksaufbau, Schritt3

($E_{mech} = p_A \cdot \Delta V$, Arbeitsdruck p_A) direkt in mechanische Energie eines Salzwasservolumens gleicher Größe (und damit gleichen Drucks) umgewandelt. Der Wirkungsgrad beträgt dabei bis zu 95 % (Herstellerangabe, (Stover, 2004)) und ist damit effektiver als der Weg über Pumpe und Turbine. Wegen der Verluste des Druckaustauschers muss außerdem eine Pumpe installiert werden um das ausgetauschte Salzwasservolumen auf Arbeitsdruck zu bringen.

Genauereres siehe in Kapitel 3.3.

Ferner wurde bisher ignoriert, dass Süßwasser auch eine geringe Salzkonzentration aufweist. Durch die Osmose würde diese aber mit der Zeit auf einen beträchtlichen Wert ansteigen. Um eine konstant niedrige Konzentration zu halten, wird ein Süßwasserabfluss installiert.

3.2 Die Membran

Als Quelle für dieses Kapitel diente (Melin and Rautenbach, 2007).

Semipermeable Membranen finden schon seit längerer Zeit Anwendung in der Chemie-Industrie (Trennung von Gasen etc.) und in Wasseraufbereitungsanlagen. Mit dem Aufkommen von Meerwasserentsalzungsanlagen wurde zudem wieder besonders viel an effizienteren Membranen für die Trennung von Salzwasser geforscht.

Werkstoffe: Cellulose-Acetat oder Dünnschicht-Composite (TFC)

Um einen hohen Durchfluss zu ermöglichen, muss die semipermeable Membran möglichst dünn sein. Deswegen besteht eine Membran typischerweise aus zwei Schichten, einer omni-permeablen Stützschiicht, um mechanische Stabilität zu gewährleisten, und einer semi-permeablen Schicht mit einer Dicke von $< 1 \mu\text{m}$.

Der wesentliche Parameter für die Größe des Osmosekraftwerks ist die Packungsdichte $D = \frac{A_M}{V_{Modul}}$ der Membran. D.h. mit wie viel Membranfläche kann die Lösung innerhalb eines Volumen V_{Modul} interagieren. Um die Packungsdichte zu erhöhen, werden mehrere Membranen zu Membranmodulen zusammengefügt. Die verschiedenen Modularten lassen sich in vier Klassen zusammenfassen:

Rohrmodul, Plattmodul, Kissenmodul, Wickelmodul

Das speziell für die Umkehrosmose entwickelte Wickelmodul hat dabei mit $D_{wickel} = 1000 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3}$ die mit Abstand größte Packungsdichte. In Abb.6 ist ein solches dargestellt.

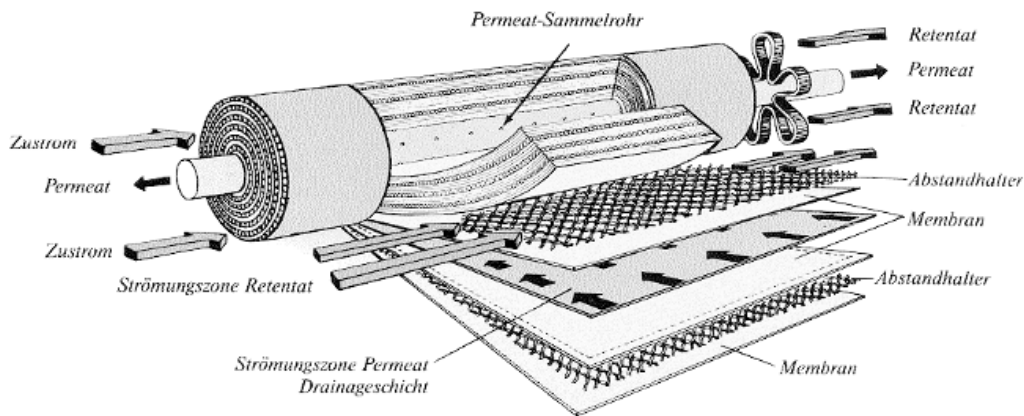


Abbildung 6: Wickelmodul, Im Osmosekraftwerk: Zustrom = Süßwasserbecken, Retentat = Süßwasserabfluss, Permeat = Brackwasserbecken (Bildquelle: (Melin and Rautenbach, 2007))

Zum Aufbau eines Wickelmoduls:

Im Prinzip besteht es aus einer Membrantasche (D.h. zwei Membranen sind an drei Seiten miteinander verbunden, es entsteht folglich ein eingeschlossenes Volumen mit Abfluss. In der Abbildung besteht die Membrantasche aus der "Strömungszone Permeat" und den beiden angrenzenden Membranen.) und einem "Spacer" (d.h. einer Abstandhalterschicht). Diese beiden Schichten werden auf einander gelegt und um das Permeatsammelrohr gewickelt. Auf diese Weise steht quasi das gesamte Wasser in Kontakt mit der semipermeablen Membran. Vom Permeatsammelrohr aus gelangt das Brackwasser schließlich zur Turbine. Die besondere Geometrie des Spacers trägt ferner dazu bei, dass sich turbulente Strömungen bilden. Diese erhöhen den Membrandurchfluss. In Rohrmodulen tritt dieser Effekt weniger stark auf.

Weitere wichtige Größen bei der Modulwahl sind:

- Kosten
- Lebensdauer
- Stoffaustausch: Ein hoher Permeationskoeffizient resultiert in einem kleineren Kraftwerk und damit in geringeren Investitionskosten.
- Reinigungsmöglichkeit: Normalerweise werden Membranen durch Durchspülen von eventuellen Ablagerungen etc. gereinigt. Bei Wickelmodulen ist dies aber quasi unmöglich. Stattdessen müssen gute Filter installiert werden und möglichst hohe Lebensdauern erreicht werden.
- Mechanische Stabilität: Wickelmodule werden erfolgreich in der Umkehrosmose eingesetzt. Sie sind folglich darauf konzipiert mehr als 80 bar auszuhalten.
- Ausbauaufwand: Jedes Wickelmodul kann mit wenig Aufwand aus der Halterung ausgebaut werden. Das Kraftwerk kann dabei weiter in Betrieb bleiben.

3.3 Der Druckaustauscher

Die Funktionsweise eines Druckaustauschers wird in diesem Kapitel anhand eines Modells aus der PX-Produktionsreihe der amerikanischen Firma "Energy Recovery Inc" vorgestellt. Quelle: (Stover, 2004)

Wie bereits in Kapitel 3.1 erwähnt, ist die Aufgabe des Druckaustauschers ein Brackwasservolumen gegen ein Salzwasservolumen auszutauschen. In Abb.10 ist das PX-Modell schematisch dargestellt:

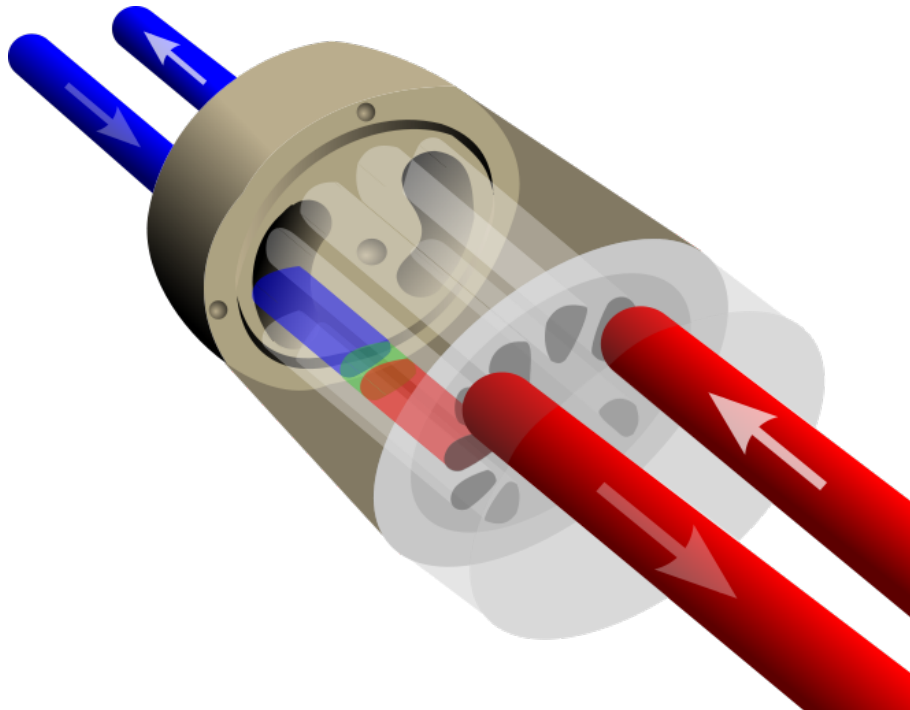


Abbildung 7: Rotations-Druckaustauscher (Bildquelle: Wikipedia)

Auf der linken Seite befindet sich ein Kopfstück mit je einem Zu- und Abfluss für Salzwasser (blau); auf der rechten Seite selbiges für Brackwasser (rot). Dabei ist darauf zu achten, dass jeweils ein Zufluss und ein Abfluss gegenüberliegen. In der Mitte befindet sich ein Rotor mit Aussparungen (=Sektoren).

Folgende Prozessschritte ereignen sich während einer Rotorumdrehung in einem Sektor:

1. Der Sektor kommt in Kontakt mit dem Salzwasserzufluss: Das Salzwasser strömt in den Sektor.
Falls sich bereits Wasser im Sektor befindet, wird dieses in den gegenüberliegenden Brackwasserabfluss gedrückt.

2. Der Rotor dreht sich weiter und schließt damit das Salzwasservolumen, mit dem Druck der Zufussleitung, ab.
3. Der Sektor kommt gleichzeitig in Kontakt mit dem Brackwasserzuffluss und dem Salzwasserabfluss: Das unter Hochdruck stehende Brackwasser drückt das eingeschlossene Salzwasservolumen in den Salzwasserabfluss.
4. Der Rotor dreht sich weiter und schließt damit das Brackwasservolumen, mit dem Druck der Zufussleitung, ab.

Das Besondere an diesem Modell ist zudem, dass sich nur ein einziges Bauteil bewegt, der Rotor. Um die Reibungsverluste zu reduzieren wird auf, sich frei verschiebbare, Trennstempel zwischen den jeweiligen Salz- und Brackwasservolumina verzichtet. An der Grenzfläche zwischen beiden Volumina gleichen sich die beiden Konzentrationen durch Diffusion und möglicherweise turbulente Strömung an. Nach Herstellerangaben tauschen sich die eingeschlossenen Volumina allerdings so schnell aus, dass sich quasi ein "Stempel aus Mischwasser (grün)" bildet.

Ferner benötigt dieses Modell keine elektrische Energie. Die Rotation entsteht durch die besondere Geometrie der Wasserzufflüsse. Das unter Hochdruck stehende Wasser gibt einen Teil seiner mechanischen Energie ab, um die Reibungsverluste des Rotors zu neutralisieren. Bei konstantem Wasserzuffluss entsteht eine konstante Rotation.

Verluste des Druckaustauschers

Der Wirkungsgrad des Druckaustauschers ist durch $\eta_{DA} = \frac{E_{mech,salz}}{E_{mech,brack}}$ definiert.

(Bzw. durch $\eta'_{DA} = E_{Abflüsse}/E_{Zufflüsse}$. Zum einen sagt diese Definition allerdings nichts über die reale "Energieumsetzung" aus, zum anderen ist der Unterschied der verschieden definierten Wirkungsgrade bei den hier verwendeten Drücken im Promillebereich.)

Der Energieverlust setzt sich dabei aus einem Strömungsverlust und einem Druckverlust zusammen. Mit der Annahme, dass die jeweiligen Verluste linear von der jeweiligen Größe abhängen, gilt:

$$\eta_{DA} = (1 - \rho_V) \cdot (1 - \rho_p)$$

mit dem Strömungsverlust ρ_V und dem Druckverlust ρ_p , beides Konstanten des Druckaustauschermodells. Durch den Salzwasserausgang fließt also nur noch ein Strom $S_S = (1 - \rho_V) \cdot S_B$ mit dem Druck $p_{salz} = (1 - \rho_p) \cdot p_A$.

Dieses Wasser soll nun in das Brackwasserbecken eingespeist werden. Dazu muss es mittels einer Pumpe wieder auf den Arbeitsdruck p_A gebracht werden. Für die dafür benötigte elektrische Leistung gilt:

$$P_{el} = \frac{\rho_p \cdot p_A \cdot S_S}{\eta_{Pumpe}} = \frac{\rho_p \cdot (1 - \rho_V)}{\eta_{Pumpe}} \cdot P_{mech,brack}$$

mit $P_{mech,brack} = p_A \cdot S_B$

Der konstante Vorfaktor sei als Verlustfaktor $\epsilon_{DA} := \frac{\rho_p \cdot (1 - \rho_V)}{\eta_{Pumpe}}$ definiert.

Wegen des Stromverlustes ρ_V entsteht außerdem eine Verlustleistung (Dieses Volumen kann nicht mehr über die Turbine abgelassen werden.) von $P_V = \rho_V \cdot S_B \cdot p_A$.

Wollte man bewerkstelligen, dass das Druckaustauschersystem dem Brackwasserbecken das gleiche Volumen entnimmt und wieder zurückgibt, so müsste mit einer weiteren Pumpe die Leistung P_V aufgebracht werden, um Salzwasser aus dem Reservoir in die Druckkammer zu pumpen. Es ist aber ineffizient Energie an einer wirkungsgradbelasteten Pumpe aufzuwenden, um diese an einer ebenfalls wirkungsgradbelasteten Turbine wieder zurückzugewinnen. Stattdessen sollte der Stromverlust durch einen kleineren Turbinenstrom (V_0 in der Druckkammer soll konstant bleiben!) neutralisiert werden. Das bedeutet für die externe Einstellung des Turbinenstroms:

$$S_T = S_M - \rho_V \cdot S_B$$

3.4 Filter

Um die Membran vor unnötiger Belastung zu schützen, müssen in den beiden Wasserzuströmen Filter installiert sein. Diese müssen folgende Funktionen erfüllen:

- mechanischer Filter: ausfiltern von Sand etc.
- chemischer Filter: ausfiltern von aggressiven Stoffen
- biologischer Filter: Es muss bewerkstelligt werden, dass die Membran weder verfäult (Bakterien) noch zuwuchert (Algen).

3.5 Turbine

Da kein Höhenunterschied zwischen Druckkammer und Turbine existiert, sollte die sogenannte Kaplan-Turbine verwendet werden. Diese eignet sich bei großen Wassermengen mit nur kleinem Gefälle. Ihr Wirkungsgrad η_T liegt zwischen 80 und 95 %, die Leistung einer Kaplan-Turbine ist etwa 100 MW.

Anschauungsmaterial: <http://www.energie.ch/wasserturbinen>

4 Prozessführung

4.1 Zeitlicher Verlauf der Brackwasserkonzentration

Für die Prozessführung ist es von essentieller Bedeutung den zeitlichen Verlauf der Brackwasserkonzentration (und damit den Arbeitsdruck) zu kennen. Für die zeitlicher Änderung der Konzentration gilt allgemein:

$$\frac{dc}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} [c(t + \Delta t) - c(t)] \quad (*)$$

Im Zeitintervall Δt fließen die Volumina $\Delta V_M, \Delta V_T, \Delta V_B, \Delta V_S$ ab/zu. Normiert mit dem Gesamtvolumen folgt für die Zusammensetzung von $c(t + \Delta t)$ und damit für (*):

$$\frac{dc}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \left[\left(c(t) \cdot \frac{V_0 - \Delta V_T - \Delta V_B}{V_0} + c_{Salz} \cdot \frac{\Delta V_S}{V_0} + c_M \cdot \frac{\Delta V_M}{V_0} - A(c(t)) \right) - c(t) \right]$$

Dabei beschreibt c_{Salz} die Konzentration des Salzwasserreservoirs und c_M die Konzentration des durch die Membran herein diffundierenden Wassers.

$A(c(t))$ beschreibt den Konzentrationsverlust, der durch Diffusion von Salzionen durch die Membran entsteht. Die Rückhaltefähigkeit der semipermeablen Membran ist inzwischen aber soweit optimiert, dass dieser Effekt vernachlässigt werden kann. Das beste Beispiel dafür sind Meerwasserentsalzungsanlagen. Die dort eingesetzten Membranen beschränken die Diffusion der Salzionen so sehr, dass Trinkwasser entsteht.

Mit dieser Annahme einer vollständig semipermeablen Membran folgt außerdem $c_M = 0$.

Ferner gilt für alle Volumina allgemein $\Delta V_i = \int_t^{t+\Delta t} S_i(t) dt$.

Die Forderung eine konstante Nettoleistung zu halten, ist allerdings am einfachsten zu kontrollieren, wenn die Prozessgrößen, insbesondere die Volumenströme, konstant gehalten werden. Im Folgenden soll dementsprechend $\Delta V_i = S_i \cdot \Delta t$ gelten.

Im Falle des Druckaustauschers ist dies leicht zu realisieren, da seine Leistung extern gesteuert werden kann. Der Membrandurchfluss $S_M(t)$ kann von temporären lokalen Konzentrationsschwankungen abhängen. Diese sollten allerdings hier auch als vernachlässigbar klein angesehen werden können.

Mit diesen Annahmen vereinfacht sich (*) zu:

$$\frac{dc}{dt} = c(t) \cdot \frac{-S_T - S_B}{V_0} + c_{Salz} \cdot \frac{S_S}{V_0}$$

Die allgemeine Lösung der Differentialgleichung lautet:

$$c(t) = \left(c(0) - \frac{S_S \cdot c_{Salz}}{S_B + S_T} \right) \cdot \exp \left[-\frac{S_B + S_T}{V_0} t \right] + \frac{S_S \cdot c_{Salz}}{S_B + S_T}$$

Nach einer Einlaufzeit hat sich also folgende Gleichgewichtskonzentration eingestellt:

$$c_\infty = \frac{S_S}{S_B + S_T} \cdot c_{Salz}$$

4.2 Optimaler Arbeitsdruck und Turbinenleistung

Im Gleichgewichtszustand gilt (bei $c_\infty > c_{S\ddot{u}B}$) für den osmotischen Druck:

$$p_\infty = [c_\infty - c_{S\ddot{u}B}] \cdot k_B \cdot T$$

Der sich in der Druckkammer einstellende Arbeitsdruck p_A kann durch das Ventil am Turbinenausgang variiert werden und ist insbesondere maximal p_∞ . Der Arbeitsdruck wird daher hier allgemein durch $p_A = f \cdot p_\infty$ mit $0 \leq f \leq 1$ definiert.

Die Turbinenleistung vom osmotischen Druck ab. Um diesen auf einem konstanten Wert p_{opt} zu halten ist es allerdings nötig, dass am Druckaustauscher Leistung abfällt, und zwar eine größere Leistung wenn ein größerer Druck gehalten werden soll. Die zentrale Frage der Prozesssteuerung ist folglich die Suche nach der optimalen Nettoleistung. Für diese gilt:

$$P_{GES} = P_T - P_{DA}$$

Die Leistung der Turbine setzt sich aus der an sie abgegebenen mechanischen Energie des Brackwassers und dem Wirkungsgrad der Turbine zusammen:

$$P_T = \eta_T \cdot p_A \cdot S_T$$

Die Leistung des Druckaustauschersystems setzt sich aus der ausgetauschten mechanischen Arbeit und dem Energieverlust ϵ_{DA} des Druckaustauschersystems zusammen:

$$P_{DA} = \epsilon_{DA} \cdot p_A \cdot S_B$$

Für die Nettoleistung folgt mit der Einstellung $S_T = S_M - \rho_V \cdot S_B$ und $S_S = (1 - \rho_V)S_B$:

$$P_{GES} = f \cdot k_B \cdot T \left(\frac{(1 - \rho_V)S_B}{(1 - \rho_V)S_B + S_M} \cdot c_{Salz} - c_{S\ddot{u}B} \right) \cdot [\eta_T \cdot S_M - (\eta_T \cdot \rho_V + \epsilon_{DA}) \cdot S_B]$$

Um die optimale Nettoleistung in Abhängigkeit vom, extern eingestellten, Volumenstrom durch den Druckaustauscher zu erhalten, muss die Ableitung verschwinden¹. Aus $\frac{dP_{GES}}{dS_B} = 0$ folgt für die optimale Einstellung von S_B :

$$S_B^{opt} = \frac{S_M}{1 - \rho_V} \left(\sqrt{1 + \phi^*} - 1 \right)$$

mit der Konstanten $\phi^* = \frac{(1 - \rho_V)\eta_T}{\rho_V\eta_T + \epsilon_{DA}} \cdot \frac{c_{Salz}}{\Delta c} + \frac{c_{S\ddot{u}B}}{\Delta c} = \left(\frac{\rho_V}{1 - \rho_V} + \frac{\rho_p}{\eta_T\eta_{Pumpe}} \right)^{-1} \cdot \frac{c_{Salz}}{\Delta c} + \frac{c_{S\ddot{u}B}}{\Delta c}$
wobei $\Delta c = c_{Salz} - c_{S\ddot{u}B}$

Für die Annahme $c_{S\ddot{u}B} = 0$ folgt: $\phi = \left(\frac{\rho_V}{1 - \rho_V} + \frac{\rho_p}{\eta_T\eta_{Pumpe}} \right)^{-1}$

¹ S_M wird als freie Variable betrachtet. Durch eine Variation der Membranfläche kann S_M in der Tat extern variiert werden.

Da $\phi \approx 14$ und $c_{Salz} \approx 300 \cdot c_{Süß}$ gilt diese Abschätzung auch für kleine $c_{Süß}$ und wird zur Vereinfachung im Folgenden verwendet. Es sei darauf hingewiesen, dass dadurch bei extremer Parameterwahl mögliche Unklarheiten entstehen können. In den Parameterbereichen, die in dieser Arbeit verwendet werden, hat diese Näherung keinen Effekt.

In Abb.8 ist die Abhängigkeit der Kraftwerksleistung, normiert auf die theoretisch maximale Leistung, von dem Verhältnis zwischen S_B und S_M dargestellt (Für die Wirkungsgrade wurden die in Kapitel 4.3.1 initialisierten Werte verwendet.):

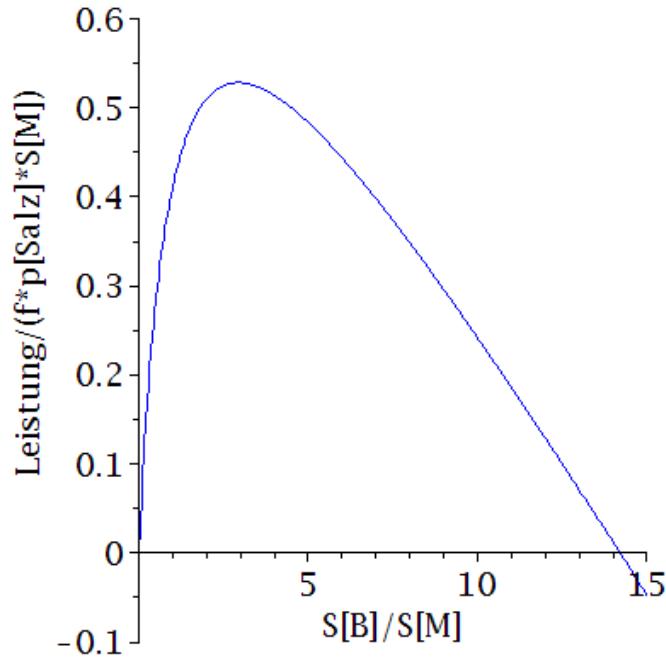


Abbildung 8: Optimierung der Kraftwerksleistung nach S_B

Das Optimum liegt bei diesen Initialwerten bei $S_B/S_M = 2.93$. Ferner sind beide erwarteten Grenzfälle sichtbar. Arbeitet der Druckaustauscher nicht, so existiert auch keine Leistung. Arbeitet er zu viel, so fällt ab $S_B/S_M \approx 14$ an der Pumpe mehr Leistung ab als die Turbine produziert.

Für die optimalen Prozessgrößen folgt daraus:

$$c_{opt} = \left(1 - 1/\sqrt{1+\phi}\right) \cdot c_{salz}$$

$$p_{opt} = \left(1 - 1/\sqrt{1+\phi}\right) \cdot c_{salz} \cdot k_B \cdot T$$

$$P_{opt} = f \cdot k_B \cdot T \cdot c_{Salz} \cdot S_M \cdot \left(1 - 1/\sqrt{1+\phi}\right) \left[\eta_T - (\eta_T \cdot \rho_V + \epsilon_{DA}) \left(\frac{\sqrt{1+\phi} - 1}{1 - \rho_V} \right) \right]$$

Es sei angemerkt, dass für ein ideales Kraftwerk (perfekte Wirkungsgrade) $\phi = \infty$ gilt. Daraus folgt $p_{opt} = p_{Salz} = c_{Salz} \cdot k_B \cdot T$. Da der Druckaustauscher in diesem Fall verlustfrei arbeitet, entspricht folglich die Brackwasserkonzentration der Salzwasserkonzentration. Für Wirkungsgrade von 0 folgt $\phi = 0$ und damit $p_{opt} = 0$. In diesem Fall lohnt sich der Druckaustauscher nicht, weshalb die Brackwasserkonzentration auf 0 sinkt. Die Gleichung liefert also in beiden Grenzfällen die erwarteten Resultate.

4.3 Einfluss der Parameter

In diesem Kapitel wird die Abhängigkeit der Kraftwerksleistung von den verschiedenen Parametern untersucht. Eine Analyse der Schlüsselvariablen der Kraftwerksleistung, also des Membrandurchflusses S_M , wird allerdings wegen seiner besonderen Rolle erst im letzten Abschnitt angestellt. In diesem Kapitel wird die Energieausbeute pro Wasservolumen, das durch die Membran diffundiert, die Energiedichte $\Pi := P_{opt}/S_M$ untersucht.

4.3.1 Initialwerte und abgeschätzte Leistung

Als Initialwerte zur Berechnung der Kraftwerksleistung werden gewählt:

- Temperatur: $T = 290 \text{ K}$
- Salzkonzentration: $c_{Salz} = 3.5 \%$ Salzgehalt (NaCl, Dissoziationsgrad 2) = $1196 \frac{\text{Mol}}{\text{m}^3}$
- Turbinenwirkungsgrad: $\eta_T = 0.9$
- Pumpenwirkungsgrad: $\eta_P = 0.8$
- Wirkungsgrad des Druckaustauschers: $\eta_{DA} = 0.94$ bzw. $\Rightarrow \rho_p = 0.03$ und $\rho_V = 0.03$

Mit diesen Werten ergibt sich für den osmotischen Druck und die Kraftwerksleistung:

$$p_{opt} = 21.7 \text{ bar}$$

$$P_{opt} = f \cdot 1.55 \text{ MW} \cdot \frac{S_M}{[\text{m}^3/\text{s}]} \quad \text{bzw.} \quad \Pi = f \cdot 1.55 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

Je größer der Arbeitsdruck und damit f gewählt wird, desto mehr Energie liefert ein Volumen Süßwasser. Für einen maximalen Kraftwerkswirkungsgrad muss f folglich maximal gewählt werden.

Es bietet sich ein Vergleich mit den theoretischen Energiedichten an. Die theoretische, thermodynamische Energie von 1 m^3 Brackwasser ist durch den maximalen osmotischen Druck $E_{TD} = c_{Salz} \cdot k_B \cdot T \cdot 1 \text{ m}^3 = 2.88 \text{ MJ}$ gegeben. Ohne die Verluste des Druckaustauschers gilt bei $p_{osm} = p_{opt}$ für die theoretische Energie $E_{theo} = p_{opt} \cdot 1 \text{ m}^3 = 2.17 \text{ MJ}$.

Das Kraftwerk hat folglich eine Energieausbeute von $(\Pi \cdot 1 \text{ m}^3)/E_{TD} = f \cdot 54 \%$. Es

ist leicht verständlich, wo der größte Teil der theoretischen Energie verloren geht. Da der osmotische Druck nicht dem des Salzwasser entspricht, wurde das osmotische Potential nicht vollständig abgebaut. Nachdem das Brackwasser über die Turbine ins Meer abgelassen wird, wird die verbleibende Energie dort in Wärme umgewandelt. Durch die Prozessführung sinkt die maximale Energieausbeute folglich auf $E_{theo}/E_{TD} = 73\%$ der theoretischen Energie.

4.3.2 Einfluss der Wirkungsgrade von Turbine und Pumpe

Der Wirkungsgrad der Turbine wurde mit $\eta_T = 0.9$ initialisiert. Eine Kaplan-Turbine hat einen Wirkungsgrad von 80–95 %, der angenommene Wert liegt folglich etwa in der Mitte des möglichen Bereichs.

Der Wirkungsgrad der Pumpe wurde mit $\eta_P = 0.8$ initialisiert. Pumpen haben allgemein einen Wirkungsgrad von etwa 70–90 %. Ein Beispiel dafür sind Pumpspeicherkraftwerke. Obwohl deren Wirkungsgrad sich nicht nur aus dem der Pumpe zusammensetzt werden dort Werte zwischen 70 und 85% erreicht. Auch hier liegt der angenommene Wert im mittleren Wertebereich.

Abb.9 zeigt die Abhängigkeit der Energiedichte von den Wirkungsgraden. Dabei wird jeweils ein Wert variiert und der andere Initialwert festgehalten.

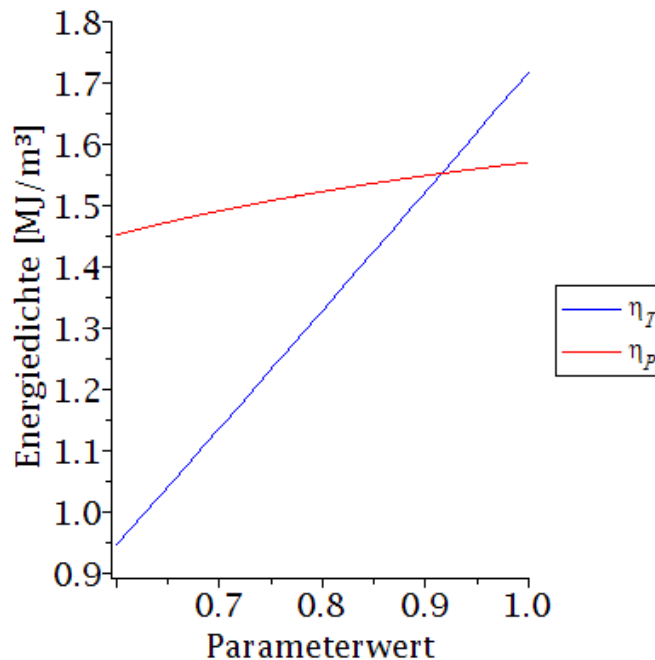


Abbildung 9: Einfluss der Wirkungsgrade von Turbine und Pumpe, $f = 1$

Es ist deutlich sichtbar, dass die Energiedichte in dem betrachteten Wertebereich in guter Näherung linear von η_T abhängt, während eine Änderung von η_P kaum Einfluss auf

diese hat. Besteht bei der Kraftwerksplanung die Option eine Pumpe mit höherem Wirkungsgrad aber auch größeren Anschaffungs- oder Wartungskosten zu kaufen, so scheint sich diese Alternative nicht zu lohnen. Bei der Turbine hingegen bedeutet eine Erhöhung des Wirkungsgrades um 0.05 % eine Steigerung der Energiedichte um grob 6 %. Je nach Volumenstrom könnte sich hier also eine teurere Turbine lohnen.

4.3.3 Einfluss der Verluste des Druckaustauschers

Nach Herstellerangaben kann der Druckaustauscher im Optimalfall einen Wirkungsgrad von 95 % erreichen. Da nicht von Optimalfall ausgegangen werden kann, wurde dieser mit $\eta_{DA} = 0.94$ initialisiert. Wie erwähnt setzen sich die Verluste des Druckaustauschers aus einem Stromverlust ρ_V und einem Druckverlust ρ_p zusammen (Annahme: $\eta_{DA} = (1 - \rho_V) \cdot (1 - \rho_p)$, siehe Kapitel 3.3). Die beiden Parameter haben einen unterschiedlichen Einfluss auf die Energiedichte. Diese sollen nun untersucht werden. Um allgemein zu bleiben, wurden beide Parameter mit dem gleichen Wert 0.03 initialisiert. In Abb.10 werden die unterschiedlichen Einflüsse der beiden Verlust-Parameter miteinander verglichen. Wieder wird ein Wert festgehalten während der andere variiert wird.

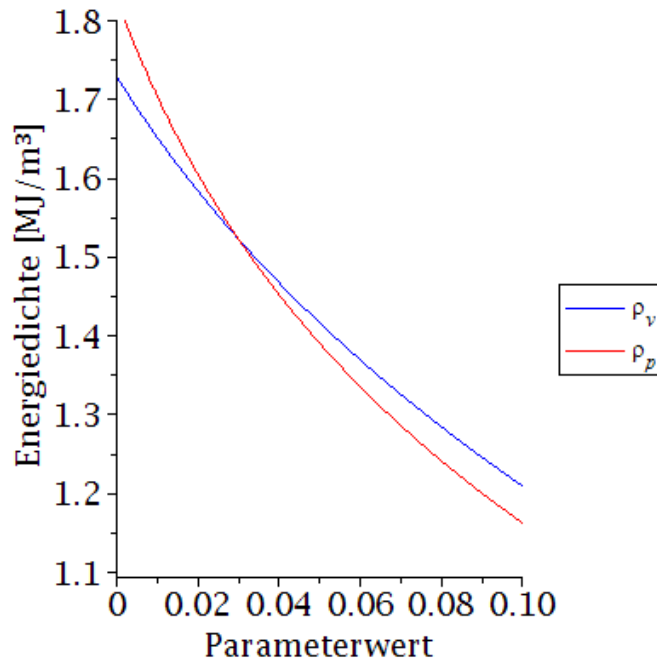


Abbildung 10: Einfluss der Parameter des Druckaustauschers, $f=1$

Es fällt auf, dass ρ_p einen größeren Einfluss als ρ_V auf die Energiedichte hat.

4.3.4 Temperatur und Salzkonzentration

Die Energiedichte hängt linear von der Temperatur und Salzkonzentration ab. Allerdings hängt der Membrandurchfluss im Allgemeinen von Temperatur und insbesondere vom Konzentrationsgradienten ab.

Als Initialwert der Temperatur wurde $T = 290 \text{ K} \approx 17^\circ\text{C}$ gewählt. Diese ist natürlich von Jahreszeit, Tageszeit und Gegend abhängig.

Als Referenz wurde die Salzkonzentration der Nordsee von $c_{\text{Salz}} = 3.5\%$ Salzgehalt gewählt.

Leistungsspanne

Um die Leistungsspanne zu bestimmen, wurden, bei festgehaltenen Initialwerten für Temperatur und Salzkonzentration, jeweils die Minimal- und Maximalwerte der 4 oben analysierten Parameter eingesetzt. Für die Leistungsspanne folgt:

$$\Pi = f \cdot 1.13 \text{ MW bis } f \cdot 1.75 \text{ MW} \quad \text{pro } 1\text{m}^3 \text{ Süßwasser}$$

4.3.5 Einfluss der semipermeable Membran

Für den durch die Membran diffundierenden Volumenstrom gilt:

$$S_M = A_{\text{Membran}} \cdot \text{Membrandurchfluss pro } m^2$$

Durch eine Vergrößerung der Membranfläche lässt sich folglich jeder beliebige Membranvolumenstrom installieren. Allerdings steigt mit größerer installierter Membranfläche die Kraftwerksgröße und damit die Investitionskosten.

Für den Membrandurchfluss D_M gilt (vgl. Kapitel 2.4 und Definition des Arbeitsdrucks):

$$D_M = K_M \cdot p_\infty \cdot (1 - f)$$

wobei K_M der Wasser-Permeations-Koeffizient der Membran ist.

In diversen Pressemitteilungen (z.B. "Unter Uns, GKSS-Mitarbeitermagazin April 2005") gibt das GKSS Forschungszentrum an, dass die gegenwärtige Forschung Membranen mit einem Membrandurchfluss von 3 W/m^2 erzeugen kann und dass etwa 5 W/m^2 für eine ökonomische Nutzung der Osmosekraft erforderlich sind. Die Einheit $[\frac{\text{W}}{\text{m}^2}]$ gibt dabei an, wie viel Leistung, d.h. Strom bei einem bestimmten Druck, durch 1 m^2 Membran fließt. Aus dieser Angabe X lässt sich der Permeations-Koeffizient K_M bestimmen (da X wohl die maximale Leistung angibt):

$$K_M = X \cdot \left(\frac{2}{p_{\text{osm}}} \right)^2$$

Für K_M folgt für 3 bzw. 5 W pro m^2 :

$$2.55 \cdot 10^{-12} \frac{\text{m}}{\text{s} \cdot \text{Pa}} \quad \text{bzw.} \quad 4.25 \cdot 10^{-12} \frac{\text{m}}{\text{s} \cdot \text{Pa}}$$

Der Faktor f

Es ist $1/2 \leq f \leq 1$. Kleinere Werte machen weder in der Leistungs- noch in der Energieoptimierung Sinn.

Die maximale Energie wird bei f nahe 1 erzielt. Allerdings ist in diesem Fall der Membrandurchfluss fast Null. Um eine große Leistung zu erhalten ist also eine riesige Membranfläche nötig, was hohe Kosten bedeutet. Für $f = 1/2$ ist hingegen die Leistung pro Fläche maximal (vgl. Kapitel 2.4). Es wird also eine kleine Fläche benötigt um die gleiche Leistung zu erzielen. Allerdings ist die eigentliche limitierende Ressource das Süßwasser. Ein kleines f bedeutet weniger Energie pro Süßwasser. Die Optimierung von f hängt also vor allem vom Strompreis und den Membrankosten ab. Bei steigendem Strompreis oder sinkenden Membrankosten steigt auch f .

4.4 Technische Verluste

Bisher wurden nur die Verluste des Druckaustauschersystems berücksichtigt.

Dabei wurde aber ignoriert, dass zumindest entweder das Salzwasser vom Meer in den Druckaustauscher oder das Brackwasser vom Druckaustauscher ins Meer gepumpt werden muss. Um den Prozess konstant zu halten, bietet es sich allerdings sowieso an, alle Wasserzuflüsse mittels Pumpen extern zu steuern. Folglich muss elektrische Leistung aufgebracht werden um die Pumpen zu betreiben.

Ein weiteres großes Verlustpotential stellen die Wasserleitungen dar. Zum einen treten im Rohr Strömungsverluste auf, zum anderen entstehen an jeder Krümmung Umlenkverluste d.h. Wärme durch den Aufprall.

Von was solche Verluste im Detail abhängen soll nicht Thema dieser Arbeit sein. Im Allgemeinen hängen sie aber auch von dem Volumenstrom S_B ab (z.B. bei den an den Druckaustauscher angrenzenden Leitungen und deren Pumpen). Für die korrigierte Kraftwerksleistung kann also genähert werden:

$$P_{KW} = P_{GES} - P_1 \cdot p_A \cdot S_B - P_2$$

mit den Konstanten P_1, P_2 wobei sich die Einheiten unterscheiden.

Wieder wird der optimale Arbeitsdruck mittels $\frac{dP_{KW}}{dS_B} = 0$ bestimmt:

$$S_B^{opt} = \frac{S_M}{1 - \rho_V} \left(\sqrt{1 + \varphi} - 1 \right) \quad \text{mit } \varphi = \frac{(1 - \rho_V)\eta_T}{\rho_V\eta_T + \epsilon_{DA} + P_1}$$

Für die optimalen Prozessgrößen folgt:

$$c_{opt} = \left(1 - 1/\sqrt{1 + \varphi} \right) \cdot c_{Salz}$$

$$p_{opt} = \left(1 - 1/\sqrt{1 + \varphi} \right) \cdot c_{Salz} \cdot k_B \cdot T$$

$$P_{opt} = p_{Salz} \cdot S_M \cdot \left(1 - 1/\sqrt{1 + \varphi} \right) \left[\eta_T - (\eta_T \cdot \rho_V + \epsilon_{DA} + P_1) \left(\frac{\sqrt{1 + \varphi} - 1}{1 - \rho_V} \right) \right] - P_2$$

5 Wirtschaftlichkeit

5.1 Strompreis

In Abb.11 sind die Stromgestehungskosten der großen regenerativen Energien dargestellt. Die Zahlen unter den Photovoltaikanlagen (PV, kleine vs. freie Anlagen) und den Sonnenwärmekraftwerken (CSP, mit oder ohne Wärmespeicher) geben die jährliche Einstrahlung in kWh pro m² und Jahr an, bei den Windenergieanlagen die jährliche Volllaststunden. Im Vergleich kann bisher nur die Onshore-Windenergie mit dem heutigen Mix aus fossiler, regenerativer und nuklearer Energie konkurrieren. Es ist aber abzusehen, dass die mittleren Stromgestehungskosten (ab nun "Strompreis" genannt) in Zukunft ansteigen werden. Unter anderem wegen Umweltabgaben bei den fossilen Energien und eines möglicherweise baldigen Ausstiegs aus der Kernenergie.

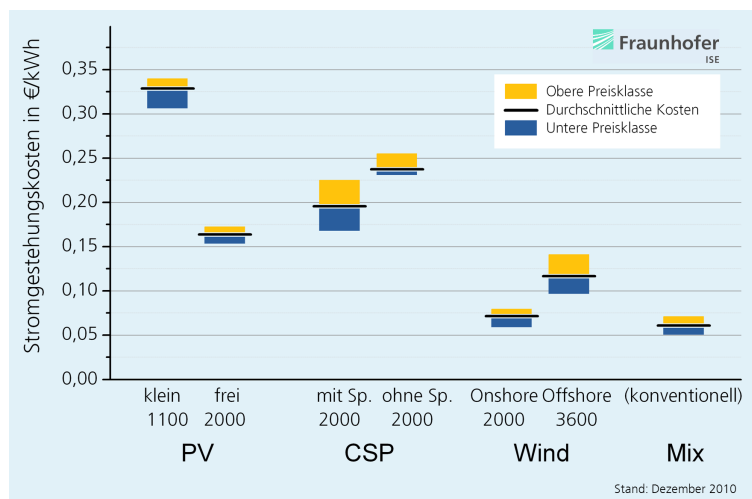


Abbildung 11: Stromgestehungskosten (Bildquelle: (Kost and Schlegl, 2010))

Im Folgenden wird daher der hier angegebene Stromgestehungspreis von Onshore-Windenergieanlagen von minimal 6 Cent/kWh als unterste Grenze für den Strompreis angesehen. Mit Blick auf die Solartechnologien wird zudem ein Stromgestehungspreis von 15 Cent/kWh als zukünftige obere Grenze für die Wirtschaftlichkeit eines Kraftwerks angenommen.

5.2 Stromgestehungskosten

Die Kosten, die entstehen, um mit einem beliebigen Kraftwerk Strom zu erzeugen, lassen sich in drei Kategorien einteilen:

Investitionskosten, Betriebskosten, Brennstoffkosten

Unter Investitionskosten laufen all jene Ausgaben, die zum Kraftwerksbau nötig sind. Das sind v.a. die Vorbereitung des Geländes, der Rohbau sowie die Kraftwerkskomponenten.

Die Betriebskosten setzen sich v.a. durch Personal- und Wartungskosten zusammen. Eventuell müssen außerdem Umweltabgaben/Entsorgungsgebühren entrichtet werden.

Außerdem muss immer davon ausgegangen werden, dass der Kraftwerksbetreiber selbst nicht genügend Kapital hat. Folglich muss im Normalfall ein Kredit aufgenommen werden. Die ratenweise Rückzahlung und die zusätzlich anfallende Zinsen werden auch zu den Betriebskosten gezählt.

Ferner sollte/muss ein Kraftwerk versichert werden. Je nach Versicherungsvertrag muss dieser Kostenpunkt entweder den Betriebskosten oder den Investitionskosten beigelegt werden.

Brennstoffkosten sind selbst erklärend. Es ist bezeichnend, dass die meisten Kraftwerke von regenerativen Energien keine Brennstoffkosten haben.

Investitionskosten

Der norwegische Energieversorger Statkraft eröffnete 2009 das weltweit erste und bisher einzige Probekraftwerk. Dieses erzeugt etwa 2 kW und hat nach eigenen Angaben etwa 13 Millionen Euro gekostet. In diesen Kosten werden allerdings wohl auch die Entwicklungskosten mit einbezogen sein, weshalb daraus keine Kostenabschätzung für kommende, ökonomisch sinnvolle Kraftwerke gezogen werden kann.

Im Prinzip lassen sich die Investitionskosten für ein solches Kraftwerk relativ leicht berechnen, und zwar indem die Kosten für alle Kraftwerkskomponenten, Installationen und Baumaßnahmen addiert werden und ein durchschnittlicher Zinssatz angenommen wird. Die wichtigsten Kostenfaktoren für ein Großkraftwerk (400 MW) sind:

1. Membranmodule: Bei Betrachtung des Permeations-Koeffizienten der heutigen Membranen wird schnell klar, dass die gesamte Membranoberfläche in der Größenordnung von 300 Million m^2 liegen muss um einen großen Wasserlauf wie z.B. die Elbe vollständig oder zumindest weitgehend zu nutzen.
2. Druckaustauscher: Die Anzahl der einzelnen Druckaustauscher des vorgestellten Modells liegt in der Größenordnung von 100000 Stück. Da dies High-Tech-Geräte sind, werden diese, inklusive Installation, Kosten von ungefähr 1 Milliarde Euro mit sich bringen.
3. Rohbau: Die dichtesten Wickelmodule kommen auf eine Packungsdichte von 1000 m^2 Membranfläche pro 1 m^3 Volumen. Vernachlässigt man, dass die anderen Komponenten auch ein gewisses Volumen einnehmen werden, so ergibt sich eine Kraftwerksgröße von 300000 m^3 . Bei einer angenommenen Deckenhöhe von 10 m folgt eine Grundfläche von 30000 m^2 , die präpariert und bebaut werden muss.

4. Halterungen: Die Wickelmodule müssen in Regalen installiert werden. Diese kosten zwar einzeln nicht viel, aber beim Füllen einer 30000 m^3 großen Halle mit Regalen fallen enorme Kosten an.
5. Pipelines: Je nach geographischer Beschaffenheit müssen leistungsstarke Pipeline-Systeme eingerichtet werden.
6. Turbine, Filter, Steuerungselektronik: Dies sind zwar teure Einzelteile, die bei Großkraftwerken aber in der Summe nicht in die Größenordnung der Membran- und Druckaustauscherkosten kommen.

Allerdings war es im Rahmen meiner Arbeit nicht möglich Hersteller- oder Vertreiberfirmen von Membranmodulen, Druckaustauschern oder Turbinen dazu zu motivieren, mir ihre Katalogpreise mitzuteilen. Eine genaue Vorhersage der Kosten ist daher unmöglich, aber anhand des Strompreises sind Abschätzungen möglich.

Als preiswertestes Membranmodul wurde im Internet das Modell **Filmtec RO-390-FF** der holländischen Firma Lenntech gefunden. Produktdaten:

- Permeat Flow Rate: $S_M = 40.9 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} = 4.73 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
- Stabilized Salt Rejection: 99.5 %
- Maximum Operating Pressure: 41 bar
- Membranfläche: 36 m^2
- Preis: 1248 US-Dollar = 870 Euro also etwa 24 Euro/m^2

Sofern sich nicht alle bisherigen Quellen geirrt haben (siehe aktuelle Osmosemembranforschung in Kapitel 4.3.5), scheint diese für die Umkehrosmose konstruierte Membran nicht für unsere Zwecke zu funktionieren. Anderenfalls wären mit dieser Membran die Membrankosten vernachlässigbar und folgende Analyse nicht nötig.

Betriebskosten

Unter solche fallen v.a. Personalkosten und Wartungskosten. Personal wird dabei nur für die technische Kontrolle des Kraftwerks und den Wachdienst benötigt. Diese variieren natürlich von Land zu Land stark, für den Standort Deutschland ergibt eine grobe Abschätzung etwa 20 Millionen Euro Personalkosten in 20 Jahren. Ob diese Kosten stimmen oder sich wegen mehr Personal sogar verdoppeln ist im Vergleich zu den Investitionskosten allerdings nicht relevant.

Eigentlich sollten kaum Wartungskosten auftreten, das Kraftwerk wurde ja gerade auf die Lebensdauer der empfindlichen Membranen ausgelegt. Trotzdem wird es in der Praxis zu solchen kommen. Wie groß diese sind, ist schwer abzuschätzen. Mehr als einige Millionen Euro pro Jahr sind es aber wahrscheinlich nicht.

Da keine Brennstoffkosten anfallen, können die Betriebskosten folglich im Vergleich zu den Investitionskosten vernachlässigt werden.

5.3 Kraftwerksgewinn

Für den Gewinn, den das Kraftwerk abwirft, gilt:

$$\text{Gewinn} = \text{Umsatz} - \text{Membrankosten} - \text{Fixkosten}$$

Es ist Umsatz = $E_S \cdot \tau \cdot P = E_S \cdot \tau \cdot \Pi_0 \cdot f \cdot S_T$ mit der Laufzeit τ und $\Pi = \Pi_0 \cdot f$.
 Ferner gilt $S_T = S_M - \rho_V \cdot S_B$. Durch die Optimierung in Kapitel 4.2 folgt $S_T \approx 0.91 \cdot S_M$.
 Unter die Membrankosten = $E_M \cdot A$ fallen die Investitionskosten, die die Membranmodule verursachen, unter die Fixkosten der Rest der Investitionskosten. E_S ist der Strompreis pro kWh, E_M der Membranpreis pro m^2 .

Angenommen es soll der gesamte Volumenstrom S_F eines Flusses durch das Kraftwerk geleitet werden, also $S_F = S_M = A \cdot K_M \cdot p_\infty \cdot (1 - f)$.

Daraus folgt $A = \frac{S_F}{K_M \cdot p_\infty \cdot (1 - f)}$ und schließlich:

$$\text{Gewinn} = 0.91 \cdot E_S \cdot \tau \cdot \Pi_0 \cdot f \cdot S_F - E_M \cdot \frac{S_F}{K_M \cdot p_\infty \cdot (1 - f)} - \text{Fixkosten}$$

Der maximale Gewinn wird erzielt für:

$$f_{max} = 1 - \sqrt{\frac{E_M}{0.91 \cdot E_S \cdot \tau \cdot \Pi_0 \cdot K_M \cdot p_\infty}}$$

Durch Einsetzen von f_{max} folgt für den maximalen Kraftwerksgewinn:

$$\text{Gewinn} = S_F \cdot \left(0.91 \cdot E_S \cdot \tau \cdot \Pi_0 - 2 \cdot \sqrt{\frac{0.91 \cdot E_S \cdot \tau \cdot \Pi_0 \cdot E_M}{K_M \cdot p_\infty}} \right) - \text{Fixkosten}$$

Die Membranen haben einer groben Abschätzung nach eine Lebensdauer von 20 Jahren. Diese soll auch als Laufzeit des Kraftwerks angesehen werden, also $\tau = 175200 \text{ h}$. Für den osmotischen Druck und die Energiedichte werden die Referenzwerte aus Kapitel 4.3.1 verwendet, also $p_\infty = 21.7 \text{ bar}$ und $\Pi_0 = 1.55 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$. Die reinen Herstellungskosten einer Membran mit dem angegebenen K_M belaufen sich zur Zeit auf etwa 10 Euro pro m^2 (grobe Abschätzung eines Mitarbeiters der GKSS), mit Modul-Montur und Modulkosten liegt E_M heutzutage wahrscheinlich zwischen 20 bis 30 Euro pro m^2 . Im Falle einer industriellen Produktion wird dieser Preis allerdings sinken.

In Abb.12 ist f in Abhängigkeit von Strompreis und Membranpreis dargestellt. Für die durchgezogenen Linien wurde $K_M = 2.55 \cdot 10^{-12} \frac{\text{m}}{\text{s} \cdot \text{Pa}}$, für die gestrichelten $K_M = 4.25 \cdot 10^{-12} \frac{\text{m}}{\text{s} \cdot \text{Pa}}$ verwendet (siehe Kapitel 4.3.5).

Ab etwa $E_S = 0.15$ ist f in erster Näherung konstant, und zwar bei den hier verwendeten Parametern mindestens $f = 0.7$. Mit sinkenden Membrankosten oder steigender Membranqualität (gestrichelte Linien) steigt dieser Wert an. Es ist ersichtlich, dass f bei

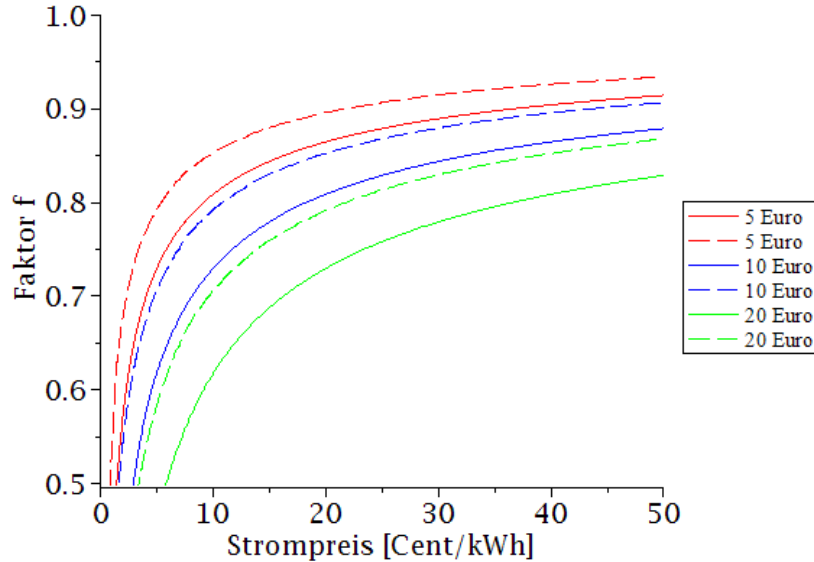


Abbildung 12: Faktor f in Abhängigkeit von den Stromgestehungskosten bei verschiedenen Membrankosten (in Euro pro m^2) und Membranqualitäten

den vermutlichen Preisentwicklungen zwischen 0.8 und 0.9 liegen wird. Das Kraftwerk hat damit einen (ökonomisch motivierten) Gesamtwirkungsgrad zwischen 0.42 und 0.47.

In Abb.13 ist der resultierende Gewinn für ein Kraftwerk mit den oben genannten Referenzwerten und einem Volumenstrom von $S_F = 400 \frac{m^3}{s}$ abgebildet. Für die Fixkosten wurden 2.5 Milliarden Euro angesetzt, jeweils 1 Milliarde für die Druckaustauscher bzw. die restlichen Investitionskosten, sowie 0.5 Milliarden für Zinsen und Betriebskosten. (Durch eine andere Wahl der Fixkosten verschiebt sich die Gewinnachse um die Differenz.) Die gestrichelten Linien stellen wieder den höheren Wert für K_M dar.

Wie die GKSS es angibt, liegt ein Kraftwerk, das Membranen mit $K_M = 4.25 \cdot 10^{-6} \frac{m}{s \cdot Pa}$ verwendet, bereits bei dem heutigen Strompreis und Membrankosten von 10 Euro (siehe Abb.13) im Bereich der ökonomischen Realisierbarkeit. Wird hingegen mit den bereits heute verwirklichten Membranen mit $K_M = 2.55 \cdot 10^{-6} \frac{m}{s \cdot Pa}$ geplant, so muss erst der Strompreis steigen, damit sich das Kraftwerk rentiert. Bei Membrankosten von 10 Euro reicht sogar bereits ein minimaler Anstieg auf 7 Cent/kWh. Ein Anstieg des Strompreises wird aber zwingend stattfinden. Folglich ist es nur eine Frage der Zeit bis sich die Osmosekraft auch bei stagnierender Membranforschung lohnen wird. Die Kraftwerksgewinne liegen dann im Milliardenbereich.

Aus Abb.13 ist außerdem zu entnehmen, dass die Stromgestehungskosten der Osmosekraft zwischen 4 und 13 Cent/kWh liegen, mit der Tendenz zu sinkenden Kosten. Damit ist die Osmosekraft aller Voraussicht nach günstiger als jegliche Sonnenenergie und vergleichbar günstig wie die Windenergie.

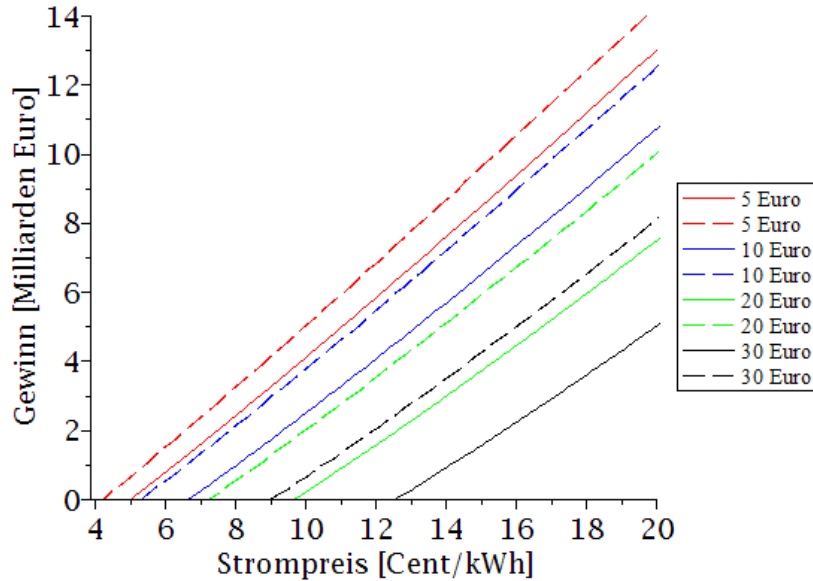


Abbildung 13: Gewinn des Referenz-Kraftwerks in Abhängigkeit von Strompreis und Membrankosten

Ferner wurde hier ein Referenz-Kraftwerk analysiert. An der Weser beginnt die Wirtschaftlichkeit wegen der geringeren Energiedichte und dem kleineren osmotischen Druck (siehe Kapitel 6.1.2) erst bei einem Strompreis von etwa 12.5 Cent/kWh (bei Membrankosten von 20 Euro und $K_M = 2.55 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s} \cdot \text{Pa}}$). An der Rhone (Kapitel 6.2) beginnt sie dagegen bei gleichen Parametern bereits bei etwa 8 Cent/kWh. Eine ökonomische Realisierung scheint dort in naher Zukunft möglich zu sein.

Führt man diese Rechnung naiv auch für einen Salzsee durch, so wirft dort ein Kraftwerk selbst bei heutigen Bedingungen und Membrankosten von 30 Euro mehr als 30 Milliarden Euro ab (naiv, da die Membranen möglicherweise nicht auf die Bedingungen eines Salzsees ausgelegt sind und deshalb teurer sein werden). Abgesehen von der naiven Herangehensweise befinden sich die meisten Salzseen in Regionen, in denen es zum einen kaum Abnehmer der Energie gibt und zum anderen der Strompreis dort sehr viel geringer als der deutsche ist.

Es muss angemerkt werden, dass diese Abschätzungen nur die optimale Grenze darstellen. Zum einen wurden Membraneffekte vernachlässigt, zum anderen die technischen Verluste des Kraftwerks ignoriert. Zusammengerechnet werden dadurch mindestens einige Prozent weniger Leistung, und damit Umsatz, erreicht. Bei geeigneten wirtschaftlichen Randbedingungen ist die Wirtschaftlichkeit eines Osmosekraftwerks dennoch deutlich erkennbar.

5.4 Schwankungen

Die Kraftwerksleistung hängt von drei natürlichen Parametern ab:

Wassertemperatur, Salzgehalt von Salz- und Süßwasser, Wassermenge des Süßwasserzuflusses

Tägliche Schwankungen Innerhalb eines Tages ändert sich zwar die Lufttemperatur spürbar, aber wegen seiner hohen Wärmekapazität bleibt die Wassertemperatur während des Wechsels zwischen Tag und Nacht nahezu konstant. Die Kraftwerksleistung bleibt folglich über so eine kurze Zeitspanne konstant.

Saisonelle Schwankungen Während des Wechsels zwischen Sommer und Winter ändert sich hingegen im Normalfall die Wassertemperatur. Auch die Salzkonzentration der Meere kann saisonelle Schwankungen aufweisen.

Wie im nächsten Kapitel abgebildet (siehe Abb.16) kommt es (zumindest in Europa) durch die Schneeschmelze und den Frühjahresregen in dieser Zeit zu erhöhten Pegelständen, während im Sommer wegen der Verdunstung ein deutlicher Einbruch der Abflussmenge beobachtet werden kann. Über das Jahr gesehen kann folglich nur die Sommer-Leistung gehalten werden.

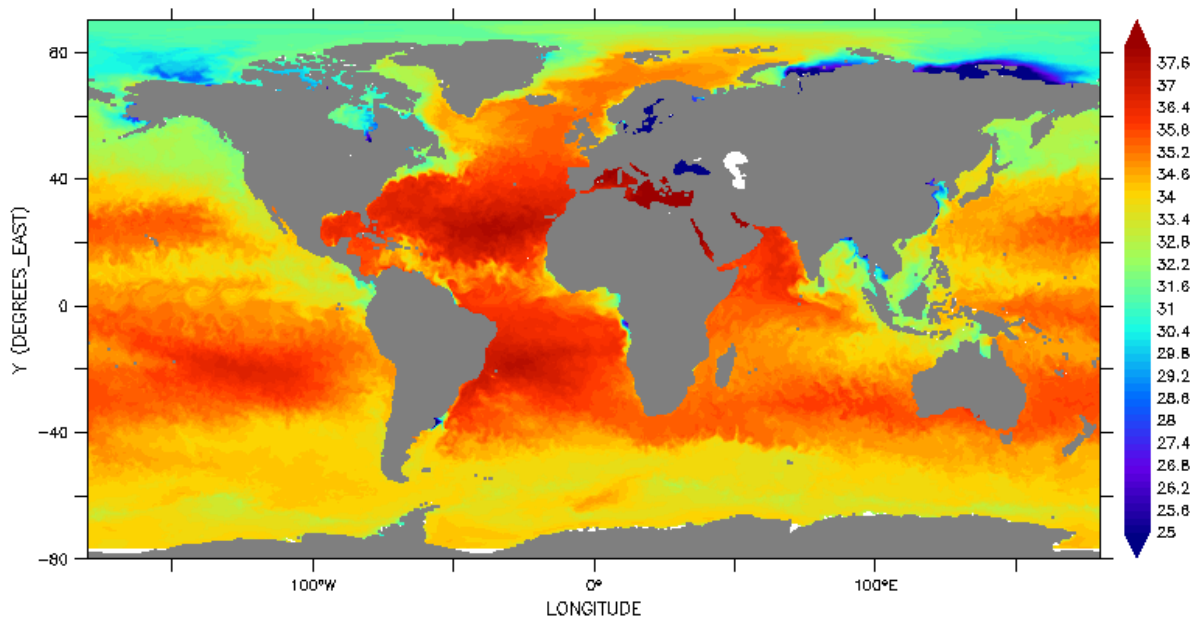
6 Potential

Die Osmoseenergie ist eine indirekte Form der solaren Einstrahlung. Durch die stärkere Verdunstung auf dem Ozean entsteht pro Jahr auf dem Land ein Wasserüberschuss von 20000 bis 50000 km³ (über Abschätzungen (Marcinek and Rosenkranz, 1996)), d.h. Niederschlag abzüglich Verdunstung. Im Jahresmittel ändert sich der Wassergehalt der Kontinente allerdings nicht, dieser Überschuss muss folglich wieder ins Meer gelangen. Dies geschieht vor allem durch Flüsse. Wird angenommen, dass 35000 km³ Süßwasser durch Flüsse ins Meer gelangen und wird eine durchschnittliche Leistungsdichte von 1.4 MJ/m³ verwendet, so lässt sich das globale jährliche Potential nach oben auf $E_{Jahr}^{global} = 52 \text{ EJ} = 14400 \text{ TWh}$ begrenzen. Statkraft prognostiziert, dass global 1600 TWh tatsächlich genutzt werden könnten ohne zu stark in die Umwelt einzugreifen.

Zum Vergleich: Der Weltenergieverbrauch 2008 lag bei 20260 TWh, der von Deutschland bei 637 TWh (International Energy Agency, 2008). Mit einem realisierbaren Potential von 8% des Weltenergieverbrauchs von 2008 ist die Osmosekraft also keine Nischenenergie, sondern kann an geeigneten Standorten eine wichtige Komponente der Energieversorgung werden.

Alle Salinitätskarten sind von (Mercator Ocean, 2011).

Alle Landkarten von <http://maps.google.de/>.



Sea Surface Salinity for 13-DEC-2010 (psu)

Abbildung 14: Salzgehalt an der Oberfläche der Weltmeere

In den folgenden Kapiteln wird nach theoretischen Potentialen gesucht. Die Standortwahl

wird v.a. von Salzgehalt des angrenzenden Meeres und dem Süßwasserzufluss bestimmt. In Abb.14 ist der Salzgehalt der Weltmeere abgebildet. Es fallen starke Schwankungen zwischen den verschiedenen Meeren Europas auf.

Allerdings ist eine nur auf diese beiden Kriterien beruhende Standortsuche zu oberflächlich. Mögliche Hindernisse sind zum Beispiel:

Brackwasserzone: Durch den Tidenhub wird bei Flut Meerwasser landeinwärts getrieben. Als Folge davon entsteht eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Brackwasserzone. Innerhalb dieser Zone gleichen sich die Süß- und Salzwasserkonzentration kontinuierlich an. Es existiert folglich kein Konzentrationsgefälle mehr. Als Lösung bieten sich zwei Maßnahmen an:

1. Ein Teil des Süßwassers wird mittels Pipelines vor der Brackwasserzone dem Fluss abgeführt und zu einem Osmosekraftwerk in Meeresnähe geführt. Limitiert durch die Rohrleitung kann durch dieses System allerdings nur relativ wenig Wasser entnommen werden.
2. Durch einen Damm an der Mündung wird der Fluss vollständig vom Meer getrennt. Es entsteht folglich keine Brackwasserzone und das Süßwasser kann außerdem direkt am Meer verwendet werden, es entstehen nur minimale Pumpverluste.
In den meisten Fällen wird diese Maßnahme allerdings eine theoretische bleiben müssen. Die Folgen wären für Schiffsverkehr und Ökosysteme katastrophal. Die Schiffe müssten via Schleuse auf das Meer gebracht werden; bei Wasserverkehrsstraßen wie z.B. dem Rhein eine absurde Vorstellung.

Flussdelta: Viele große Ströme münden nicht mit einer durch den Menschen kontrollierbaren Breite ins Meer. In einer gewissen Entfernung zum Meer teilen sie sich oft auf natürlichem Weg in zwei oder mehrere Flussarme, die von diesen Flussarmen aufgespannte Fläche wird als Flussdelta bezeichnet. Hinzu kommt, dass in diesem fruchtbaren Gebiet den Flussarmen Wasser für die Bewässerung entnommen wird. Als Folge verschwindet diese "hochkonzentrierte osmotische Energiequelle" und wird durch viele kleine ersetzt. Um das theoretische Potential des ganzen Flusses in einem Großkraftwerk auszunutzen, wäre ein gigantisches Pipeline-Netzwerk nötig. Auch diese Maßnahme wird wohl eher theoretisch bleiben.

6.1 Potential in Deutschland

Das Potential von Osmosekraft ist in Deutschland eher dürftig. Mit Elbe und Weser existieren nur zwei deutsche Meereszuflüsse mit einer mittleren Abflussmenge von mehr als $100 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$.

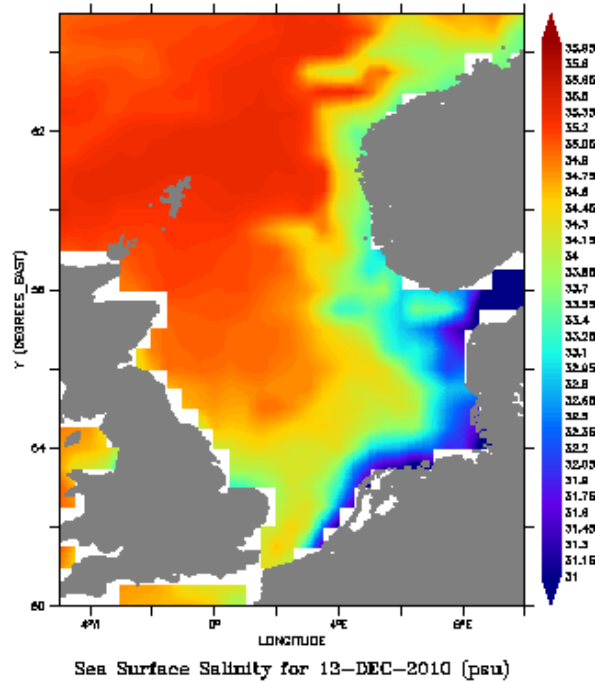


Abbildung 15: Salzgehalt an der Oberfläche der Nordsee

6.1.1 Elbe

In Abb.16 ist der Elbabfluss in Neu Darchau (etwa 80 km elbaufwärts von Hamburg) dargestellt. Da nach dieser Messstation nur noch einige kleine Elbzuflüsse existieren, sollten diese Messdaten dem endgültigen Elbabfluss nahe kommen.

Eine langjährige Messreihe seit 1926 ergab folgende Abflusswerte (Bergemann, 2008):

- Niedrigstwasser(NQ): $145 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
- Mittlerer Niedrigwasserabfluss(MNQ): $275 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
- Mittlerer Abfluss(MQ): $710 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
- Mittlerer Hochwasserabfluss(MHQ): $1980 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
- Höchstwasserabfluss(HQ): $3620 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

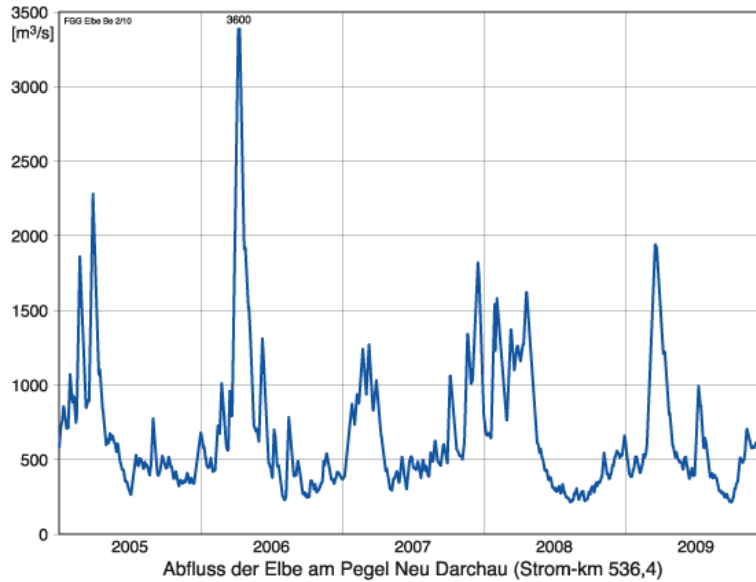


Abbildung 16: Mittlerer Elbabfluss (Bildquelle: <http://www.arge-elbe.de>)

Es ist allerdings aus Abb.16 ersichtlich, dass der mittlere Abfluss saisonalen Schwankungen ausgesetzt ist. Von Februar bis April wird der Jahresdurchschnitt jedes Jahr durch Schneeschmelze und Frühjahrsregen überschritten, während im Sommer jedes Jahr Einbrüche bis zu $250 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ beobachtet werden. Folglich macht es, mit Hinblick auf ein möglichst durchgehend vollausgelastetes Kraftwerk, keinen Sinn, die Kraftwerkskapazität auf den mittleren Abfluss anzupassen. Mit Ausnahme des besonders trockenen Sommers 2008 war der Elbabfluss zu den meisten Zeitpunkten über $400 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$, dieser Wert wird hier als die maximale ökonomisch sinnvolle Kapazität angenommen.

Wassertemperatur: $12 \pm 12^\circ\text{C}$

Salzwasserkonzentration: $31 \pm 1 \text{ g/L}$

Daraus ergibt sich eine Energiedichte (ohne Berücksichtigung von technischen Verlusten) von (vergleiche Kapitel 4.2):

$$\Pi_{Elbe} = 1.33 \frac{\text{MW}}{[\text{m}^3/\text{s}]}$$

Um eine vergleichbare Größe zu erhalten, werden alle Energiedichten mit $f=1$ berechnet.

Bei vollständiger Nutzung der angenommenen Kapazität folgt für die Leistung:

$$P_{Elbe} = 532 \text{ MW}$$

Allerdings beginnt ab Hamburg der Brackwasserbereich. Da die Pipeline-Lösung wegen des Hamburger Hafens quasi unmöglich ist, muss bei Belum ein etwa 6km langer Damm, inklusive Schleuse, gebaut werden.



Abbildung 17: Die Elbmündung: Der benötigte Damm ist in rot eingezeichnet.

Dessen einziger absehbarer Nutzen liegt in der Realisierung des Osmosekraftwerks (während wie erwähnt Schiffsverkehr und Natur schweren Schaden davon tragen könnten). Seine Kosten müssen folglich vollständig zu den Investitionskosten des Kraftwerks addiert werden. Mit diesen enormen Investitionskosten scheidet die Elbe auch auf ökonomischer Ebene aus der Standortwahl aus.

6.1.2 Weser

Quelle: (Umweltsenator von Bremen, 1999)

Salzigster Fluss Deutschlands mit einem Chloridgehalt von etwa 0.3 g/L (Vergleich: Rhein 0.13 g/L, Elbe 0.15 g/L).

Mittlerer Abfluss: $324 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

MHQ: $1210 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

MNQ: $117 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

Wassertemperatur: $15 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$

Salzwasserkonzentration: $31 \pm 1 \text{ g/L}$

Daraus ergibt sich eine Leistungsdichte von:

$$\Pi_{Weser} = 1.36 \frac{\text{MW}}{[\text{m}^3/\text{s}]}$$

Bei vollständiger Nutzung des Weser-Abflusses folgt für die Leistung:

$$P_{Weser} = 441 \text{ MW}$$

Auch hier macht sich der Tidenhub bemerkbar. Im Gegensatz zur Elbe ließe sich dessen vermischender Effekt aber durch ein 1 km langes Wehr bei Bremerhaven vermindern. Im Falle der Weser ist allerdings die Pipeline-Lösung leichter realisierbar als bei der Elbe. Bei niedrigem Oberwasser endet die Brackwasserzone etwa bei Brake, bei hohem Oberwasser spätestens 25 km flussaufwärts. Zumindest Brake ist aber nur 10 km vom Jadebusen entfernt. Sofern sich der Jadebusen als Salzwasserreservoir (Salzgehalte von 31 ± 2 g/L (Jestaedt+Partner, 2010)) eignet, könnten die Pipelinekosten folglich überschaubar bleiben. Ferner sollen Abwässer aus dem Salzbergbau über ein Pipeline-System in den Jadebusen gebracht werden, um Umweltbelastungen für Werra und Weser zu vermindern (Jestaedt+Partner, 2010). Möglicherweise ließe sich dieses Abwasser mit 39 g/L Salzgehalt vorher von einem Osmosekraftwerk nutzen.



Abbildung 18: Die Wesermündung: In rot sind sowohl das mögliche Wehr im Hafen von Bremerhaven eingezeichnet sowie das ungefähre Ende der Brackwasserzone bei Brake. In blau ist die etwa 10 km lange Pipeline eingezeichnet.

6.2 Potential in Europa

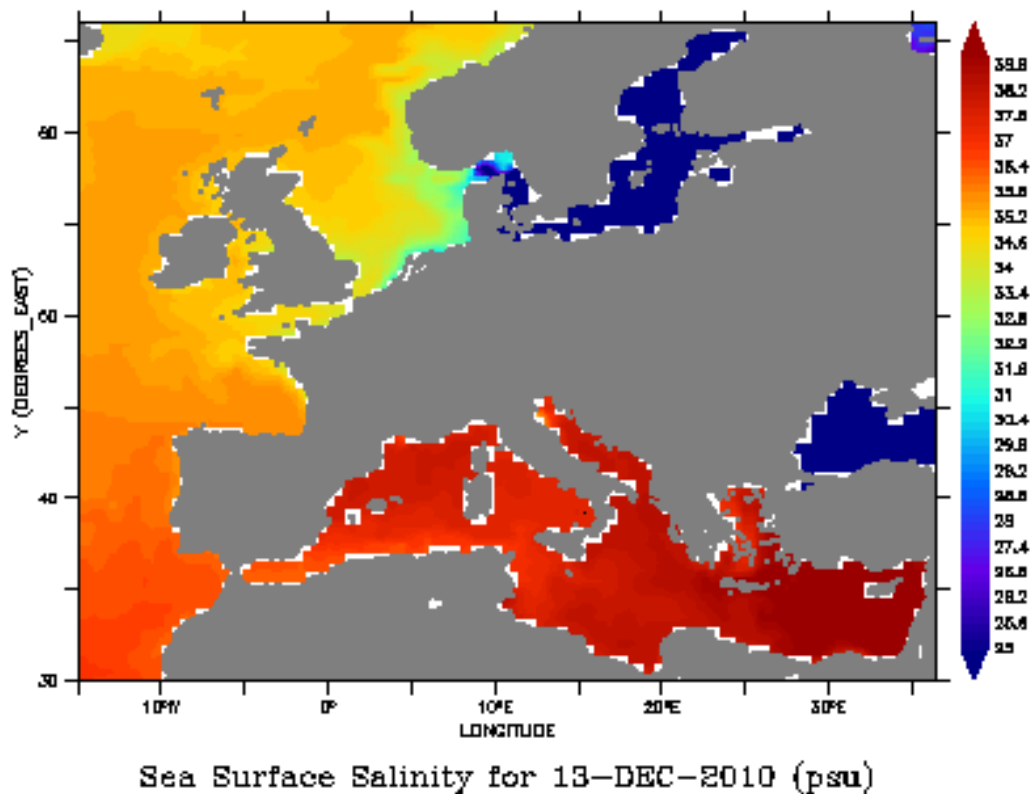


Abbildung 19: Salzgehalt der europäischen Meere

Da die Kraftwerksleistung linear von der Salzkonzentration abhängt, können das Schwarze Meer und die Ostsee für die Wahl des optimalen europäischen Standorts ausgeschlossen werden. Auf der anderen Seite ist das Mittelmeer eines der salzigsten Meere der Welt, folglich der optimale Standort.

In der nachfolgenden Tabelle sind die wasserreichsten Flüsse Europas aufgelistet (Marcinek and Rosenkranz, 1996). Um ihre Leistungsdichte zu berechnen wurde der Salzgehalt aus Abb.19 abgeschätzt. Der Salzgehalt von der Ostsee und dem Schwarzen Meer liegt unterhalb der angegebenen Skala, er wurde mit 0.3%(Neva) und 0.8%(Weichsel) bzw. 1.7% abgeschätzt. Für das Weiße Meer wurden 27%, für die Barentssee 31% Salzgehalt angenommen. Das ohnehin schon süße Kaspische Meer wird am Wolgadelta zusätzlich stark verdünnt (keine quantitative Quelle gefunden). Die Wolga wird a priori als ungeeigneter Standort angesehen.

Fluss	Mündung	Mittlerer Abfluss [in m ³ /s]	Energiedichte [in MJ/m ³]	Max. Leistung [in GW]
Wolga	Kaspisches Meer	8000		
Donau	Schwarzes Meer	6450	0.74	5.0
Petschora	Barentssee	4060	1.35	5.5
Nördl. Dwina	Weißes Meer	3560	1.13	4.0
Newa	Ostsee	2600	0.13	0.3
Rhein	Nordsee	2200	1.35	3.0
Rhone	Mittelmeer	1900	1.62	3.1
Dnepr	Schwarzes Meer	1660	0.74	1.2
Po	Mittelmeer	1460	1.56	2.3
Weichsel	Ostsee	1100	0.35	0.4
Nil	Mittelmeer	2660	1.74	4.6

Donau Zwar hat die Donau die zweitgrößte maximale Leistung, wirtschaftlich wirft ein Kraftwerk dort allerdings nur den halben Ertrag ab und zudem wird ersteres wegen des riesigen Donaudeltas entkräftet.

Petschora Ohne wissenschaftliche Quellen zu finden, kann aus dem Internet entnommen werden, dass auch die Petschora ein gigantisches Delta hat. Das größere Problem stellt allerdings der Winter dar: die Mündung ist 7 Monate im Jahr zugefroren. Ferner liegt dieser kaum bekannte Strom quasi außerhalb jeglicher Zivilisation, es existieren also kaum Abnehmer der Energie.

Nördliche Dwina Mit der Ausnahme, dass hier mit Archangelsk ein Abnehmer vorhanden ist, gilt hier das gleiche wie bei der Petschora.

Rhein Der Rhein kann bereits als geeigneter Kandidat gesehen werden. Die Probleme sind vergleichbar mit denen der Elbe, mit dem Hafen von Rotterdam als größtem in Europa. Dank seiner um einiges größeren maximalen Leistung würden allerdings die Investitionskosten für den Damm nicht so sehr ins Gewicht fallen wie bei der Elbe.

Geeignete Kandidaten Damit wird die Wahl auf Rhone und Po beschränkt. Beide haben ein relativ überschaubares Flussdelta und wegen ihrer Lage am Mittelmeer ist auch der Tidenhub minimal. Osmosekraftwerke an diesen Standorten haben also die maximale Energiedichte bei minimalen Eingriffen in die Umwelt.

6.3 Salzseen

Neben Flüssen stellen auch Salzseen eine osmotische Energiequelle dar. Die Energieausbeute ist hier sogar bis zu zehnmals höher als bei einem mit Meerwasser betriebenen Kraftwerk. Die geografischen Breiten, in denen die meisten Salzseen liegen, bringen es allerdings mit sich, dass dort kein Süßwasser existiert. Und falls solches doch existiert, so wird es als Trinkwasser benötigt. Da es bei der Osmosekraft aber nur auf den Konzentrationsunterschied der beiden Lösungen ankommt, kann aus dem Wasser der Salzseen und Meerwasser Energie gewonnen werden.

Die wichtigsten geografischen Standortkriterien sind dabei die Nähe zum Meer sowie eine möglichst niedrige Lage damit das Meerwasser nicht zu weit nach oben gepumpt werden muss. (Es ist ökologisch davon abzuraten, das Salzsee-Wasser umgekehrt in das Meer fließen zu lassen, da der ohnehin schon wasserarmen Region dadurch noch mehr Wasser entzogen wird.)

6.3.1 Totes Meer

Das Tote Meer ist der wohl bekannteste Salzsee der Welt. Sein Salzgehalt ist mit durchschnittlich 280 g/L (bis zu 330 g/L) fast zehnmals so groß wie der von Meerwasser. Außerdem liegt es 422 m unter dem Meeresspiegel und ist damit der tiefstgelegene Landpunkt der Welt. Es liegt östlich von Jerusalem, auf der Grenze zu Jordanien. Sein einziger Zufluss ist der Jordan. Da dieser durch die israelischen Bewässerungsanlagen kaum noch Wasser führt, entstand die Idee das Tote Meer mittels Kanälen mit Meerwasser zu speisen. 2005 einigten sich Israel, Palästina und Jordanien auf das Projekt "Zweimeereskanal". Darin soll überprüft werden, ob es sinnvoll ist, das Tote Meer mit dem Roten Meer zu verbinden. Durch den Höhenunterschied ließe sich durch konventionelle Wasserkraftwerke Energie gewinnen und zudem aus dem nicht ganz so salzigen Wasser mittels Entsalzungsanlagen Trinkwasser für diese Region gewinnen.

Ferner existiert im Wasser des Toten Meeres das enorme osmotische Potential von:

$$\Pi_{TM} = 12.8 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

Damit ist das osmotische Potential etwa dreimal so groß wie das mechanische Potential $E_{mech} = m \cdot g \cdot \Delta h$. Mit einem zusätzlichen Osmosekraftwerk ließe sich folglich der Energieertrag des Projekts vervierfachen.

JRV - Red Sea - Dead Sea Canal Plan and Profile Alignment



Abbildung 20: Lage des Toten Meeres und der geplanten Pipeline
(Bildquelle: <http://www.deadseaproject.com/>)

6.3.2 Kara-Bogas-Gol am Kaspischen Meer

Der global idealste Standort ist hingegen der turkmenische Kara-Bogas-Gol (auch Garabogazköl genannt). Dabei handelt es sich um eine 18000 km² große Lagune des Kaspischen Meeres (Dieses ist mit einem Salzgehalt von $c_{KM} \approx 1.2\%$ relativ süß.) mit einem Wasservolumen von $V = 1.3 \cdot 10^{11} \text{ m}^3$. Ihr Salzgehalt ist mit $c_{KBG} \approx 34\%$ sogar noch höher als beim Toten Meer. Sie ist durch zwei Landzungen vom Kaspischen Meer getrennt und steht mit diesem nur durch einen schmalen Kanal in Verbindung.

An dieser oder einer künstlichen Verbindung ließen sich enorme Mengen an osmotischer Energie gewinnen. Mit einer Wassertemperatur von $T \approx 20^\circ\text{C}$ ergibt sich eine Leistungsdichte von:

$$\Pi_{KBG} = 14.6 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

Zu dieser, auf natürlichem Weg maximal erreichbaren Energiedichte, addiert sich der Aspekt, dass mit dem Kaspischen Meer quasi unendlich viel Süßwasser zur Verfügung steht. Sofern nicht so viel Wasser in den Kara-Bogas-Gol geleitet wird, dass das gigantische Volumen zu stark verdünnt wird, steht also unbegrenzt Energie zur Verfügung.

Mit der etwa 70 km entfernten 70000 Einwohner-Stadt Türkmenbasy (ehemals Krasnowodsk) würde auch ein Abnehmer dieser elektrischen Energie zur Verfügung stehen, in 200 km Entfernung mit Balkanabat (108000 Einwohner) ein weiterer.

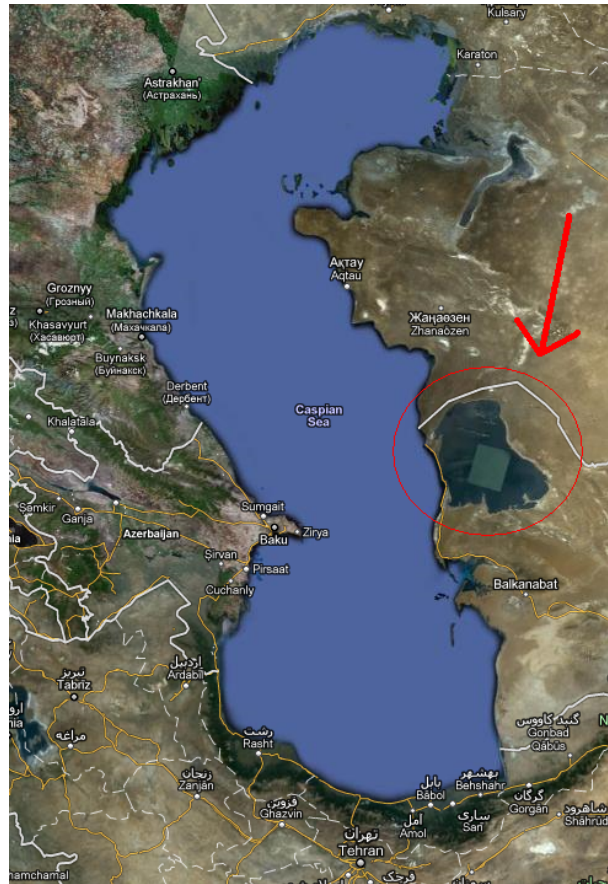


Abbildung 21: Lage des Kara-Bogaz-Gol am Kaspischen Meer

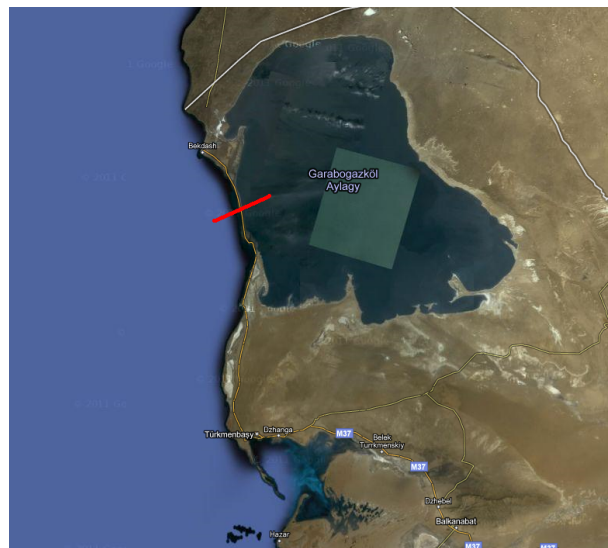


Abbildung 22: Kara-Bogaz-Gol und Türkmenbasy. In rot ist der natürliche Verbindungskanal eingezeichnet.

6.4 Variationen des Kraftwerksaufbaus

Unterirdische Kraftwerke Osmosekraftwerke müssen weder an der Oberfläche stehen um Energie zu gewinnen noch brauchen sie einen Kühlturm. Es spricht folglich nichts dagegen sie unterirdisch zu bauen, in Hinblick auf Erhaltung von Nutz- oder (städtischer) Bebauungsfläche ein wichtiger ökonomischer Punkt.

Gezeiten Vor oder hinter dem Druckaustauscher fallen Verluste ab, da je nach Höhenlage des Kraftwerks entweder Salzwasser aus dem Meer oder Brackwasser ins Meer gepumpt werden muss.

Um diese Verluste zu vermindern, wäre es möglich die Gezeiten diesen Höhenunterschied verkleinern zu lassen. Das Kraftwerk sei so positioniert, dass bei Flut das Salzwasser über dem Druckaustauscher steht und bei Ebbe unter diesem. Das Salzwasser würde folglich ohne Pumpleistung ins Kraftwerk gelangen, das Brackwasser ohne Pumpleistung ins Meer fließen. Natürlich lässt sich immer nur ein Effekt gleichzeitig ausnutzen. Um einen konstanten Kraftwerksbetrieb zu bewerkstelligen, müssen entweder nach wie vor die Pumpen arbeiten (aber nicht durchgehend!) oder aber es werden zwei zusätzliche Reservoir-Becken gebaut. Das Salzwasser-Reservoir wird bei Flut vollständig gefüllt und dient dem Kraftwerk als Salzwasserquelle. Ins Brackwasser-Reservoir wird der Druckaustauscher-Abfluss entsorgt, bei Ebbe wird dieses dann vollständig geleert. Allerdings ist es fraglich, ob die benötigten Beckengrößen ($S_B \approx 3 \cdot S_{Fluss}$!) wirtschaftlich sinnvolle Ergebnisse liefern und zudem optisch und ökologisch die Landschaft in einem akzeptablen Rahmen verändern.

Anwendungsgebiete: Kanada, Großbritannien, Tidenhub von bis zu 15m

Konzentriertes Salzwasser Die Leistungsdichte hängt proportional von der Salzkonzentration des Salzwassers ab.

Um diese zu erhöhen, könnte das Meerwasser zuerst in Verdunstungsbecken geleitet werden. Durch die Sonneneinstrahlung könnte es dort bis zur Sättigungsgrenze ($\approx 30\%$ Salzgehalt) angereichert werden und schließlich ins Kraftwerk gepumpt werden. Hier entstehen allerdings die selben Probleme wie bei den Reservoiren im vorherigen Abschnitt, mit der Zuspitzung, dass in diesem Fall besonders viel Fläche benötigt wird.

Osmose aus Salzwasser und konzentriertem Salzwasser Das globale Potential der Osmosekraft wird in erster Linie durch die Süßwasserzuflüsse limitiert.

Wie anhand der Salzseen gezeigt, ist dieses aber gar nicht nötig. In meeresnahen Wüsten (Sahara, Arabische Halbinsel) könnten wie im vorherigen Abschnitt riesige Verdunstungsbecken gebaut werden. Die optischen und ökologischen Folgen sollten in diesem unwirtlichen Gebieten minimal sein. In einem Osmosekraftwerk wird nun das Meerwasser dem osmotischen Druck folgend in das konzentriertere Salzwasser diffundieren. Das salzige Brackwasser wird in ausreichender Entfernung zur Salzwasserquelle des Kraftwerks wieder ins Meer geleitet.

Zusammenfassung

Statkraft hat bereits gezeigt, dass mit der Osmosekraft prinzipiell Energie gewonnen werden kann. Bei der Konstruktion können dabei bewährte Komponenten aus der Umkehrosmose übernommen werden. Die größte technische Herausforderung stellen die heutigen Membranen dar, die noch einen relativ geringen Volumenstrom ermöglichen. Die bisherigen rasanten Verbesserungen lassen jedoch darauf hoffen, dass sich die Membranqualität weiter erhöhen wird. Aus wissenschaftlicher Sicht steht der Erschließung dieser neuen Energiequelle nichts mehr im Weg.

Wie bei den meisten anderen regenerativen Energien hängt die Realisierung nur von den wirtschaftlichen Randbedingungen ab. Beim heutigen Stand der Technik entstehen bei der Osmosekraft Stromgestehungskosten von grob 14 Cent/kWh. Damit liegt sie zwischen Wind- und Solarenergie, ist also bereits heute konkurrenzfähig. Darüber hinaus wurden die Wirkungsgrade von Wind- und Solarenergie durch jahrzehntelange Forschung optimiert. Große Verbesserungen sind daher unrealistisch, ihre Stromgestehungskosten werden in Zukunft wohl nicht weiter sinken. Der Osmosekraft steht diese Optimierung noch bevor. Durch preiswerte Membranen sind Stromgestehungskosten von 5 Cent/kWh theoretisch möglich. Es ist abzusehen, dass die Osmosekraft zu den preiswerteren regenerativen Energie gehören wird.

Dennoch stellt sie nicht die Lösung des Energieproblems dar. Ihr theoretisches globales Potential entspricht zwar fast dem heutigen globalen Energieverbrauch, wirtschaftlich nutzbar ist Statkraft zufolge jedoch nur maximal ein Zehntel, d.h. 1600 TWh.

Möchte man diese Arbeit zu einem kurzen Fazit zusammenfassen, so lautet dies:

Die Osmosekraft wird kommen, aber nur an den relativ wenigen geeigneten Standorten.

Abbildungsverzeichnis

1	Energiemix der Zukunft	2
2	Prinzip der Osmose	4
3	Kraftwerksaufbau, Schritt1	7
4	Kraftwerksaufbau, Schritt2	8
5	Kraftwerksaufbau, Schritt3	9
6	Wickelmodul	10
7	Rotations-Druckaustauscher	12
8	Optimierung der Kraftwerksleistung nach S_B	17
9	Einfluss der Wirkungsgrade von Turbine und Pumpe	19
10	Einfluss der Parameter des Druckaustauschers	20
11	Stromgestehungskosten	23
12	Optimierung von f	27
13	Kraftwerksgewinn	28
14	Salzgehalt an der Oberfläche der Weltmeere	30
15	Salzgehalt an der Oberfläche der Nordsee	32
16	Mittlerer Elbabfluss	33
17	Elbmündung	34
18	Wesermündung	35
19	Salzgehalt der europäischen Meere	36
20	Lage des Toten Meeres und der geplanten Pipeline	39
21	Lage des Kara-Bogas-Gol am Kaspischen Meer	41
22	Kara-Bogas-Gol und Türkmenbasy	41

Literatur

- Bergemann, Michael. 2008. *Elbebericht 2008*, FGG Elbe.
- Borg, Frank. 2003. *What is Osmosis? Explanation and Understanding of a Physical Phenomenon*, <http://arxiv.org/ftp/physics/papers/0305/0305011.pdf>.
- Fliessbach, Torsten. 2010. *Statistische Physik*, Spektrum.
- Guell, David C. 1996. *Physical Mechanism of Membrane Osmotic Phenomena*, American Chemical Society.
- International Energy Agency. 2008. <http://www.iea.org/stats/prodresult.asp?PRODUCT=Electricity/Heat>.
- Jestaedt+Partner. 2010. *Ersteinschaetzung der Umwelterheblichkeit der Einleitung von Salzabwasser aus der Kaliproduktion der K+S KALI GmbH in die Innenjade*, Gewässerschutz Werra/Weser.
- Kost, Christoph and Dr. Thomas Schlegl. 2010. *Studie Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien*, Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme.
- Marcinek, Joachim and Erhard Rosenkranz. 1996. *Das Wasser der Erde*, Klett-Perthes.
- Melin, Thomas and Robert Rautenbach. 2007. *Membranverfahren*, Springer.
- Mercator Ocean. 2011. <http://www.mercator-ocean.fr/eng>.
- Post, Jan W., Joost Veerman, Hubertus V.N. Hamelers, Gerrit J.W. Euverink, Sybrand J. Metz, Kitty Nymeijer, and Cees J.N. Buisman. 2007. *Salinity-gradient power: Evaluation of pressure-retarded osmosis and reverse electrodialysis*.
- Stover, Richard L. 2004. *Development of a fourth generation energy recovery device.*, ERI.
- Umweltsenator von Bremen. 1999. *Die Unterweser 1999*.

Danksagungen

Herrn Prof. Dr. Ulrich Platt danke ich für die Möglichkeit meine Bachelorarbeit über dieses inspirierende Thema verfassen zu können sowie für seine Betreuung, die mich nie den roten Faden verlieren ließ.

Des Weiteren möchte ich Herrn Prof. Dr. Aeschbach-Hertig für die Übernahme der Zweitkorrektur danken.

Ein besonderes Dankeschön möchte ich meinem Betreuer Tobias Tröndle sagen. Er stand jederzeit für Fragen bereit, hatte selbst ein offenes Auge für relevante Quellen und übernahm immer gerne das Korrekturlesen.

Abschließend möchte ich meinen Eltern danken, die mich immer unterstützt haben und mir das Physikstudium ermöglicht haben.

Erklärung

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Heidelberg, den 6.Juli 2011

Unterschrift: