



Gemeinsamer Abschlussbericht des Verbundprojektes:

## **Autarke, photovoltaisch betriebene Meerwasserentsalzung nach dem Prinzip der Umkehrosmose (PV-RO)**

Projektlaufzeit: 01.03.2008 – 30.11.2011

### **Projektpartner**

FuE-Einrichtungen:

- Hochschule Kempten, Fachbereich Maschinenbau, 87435 Kempten
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), 79110 Freiburg

Förderkennz.:

16IN0539  
16IN0538

KMUs:

- |                                       |                            |
|---------------------------------------|----------------------------|
| ▪ Katadyn Produkte AG                 | CH - 8304 Wallisellen      |
| ▪ IBC Solar AG                        | D - 96321 Bad Staffelstein |
| ▪ TBB - Technische Büro Gernot Becker | D - 80636 München          |
| ▪ Gather Industrie GmbH               | D - 40822 Mettmann         |
| ▪ Pairan Elektrotechnik GmbH          | D - 37079 Göttingen        |
| ▪ MAT Plasmatech GmbH                 | D - 01257 Dresden          |

Projektleiter

Dr. Matthias Vetter

Fraunhofer ISE



## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart	
3a. Titel des Berichts Gemeinsamer Abschlussbericht des Verbundprojektes: Autarke, photovoltaisch betriebene Meerwasserentsalzung nach dem Prinzip der Umkehrosmose (PV-RO)		
3b. Titel der Publikation		
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Vetter, Matthias; Went, Joachim; Anhalt, Julian; Klemm, Marcel	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.11.2011	
	6. Veröffentlichungsdatum 30.05.2012	
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))	7. Form der Publikation	
	9. Ber.Nr. Durchführende Institution	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Hochschule Kempten, Bahnhofstraße 61, D-87435 Kempten Fraunhofer ISE, Heidenhofstraße 2, D-79110 Freiburg Katadyn Produkte AG, Birkenweg 4, CH-8304 Wallisellen IBC Solar AG, Am Hochgericht 10, D-96231 Bad Staffelstein TBB - Technischer Büro Gernot Becker, Schachenmeierstraße 32, D-80636 München Gather Industrie GmbH, Auf der Hüls 14-18, D-40822 Mettmann Pairan Elektrotechnik GmbH, Florenz-Sartorius-Straße 5, D-37078 Göttingen MAT Plasmatech GmbH, Reistraße 3, D-01257 Dresden	10. Förderkennzeichen 16IN0539 – 16IN0538	
	11a. Seitenzahl Bericht 59	
	11b. Seitenzahl Publikation	
	12. Literaturangaben 20	
13. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 53107 Bonn	14. Tabellen 1	
	15. Abbildungen 28	
	16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
18. Kurzfassung Im Verbundprojekt PV-RO wurden neuartige Ansätze der dezentralen Wasseraufbereitung von Meer- und Brackwasser mittels der Umkehrosmose erarbeitet. Ziel war es, zwei kleine Entsalzungsanlagen mit Kapazitäten von 200 - 500 bzw. 5.000 - 10.000 Litern an entsalztem Wasser pro Tag zu entwickeln und zu bauen. Die besondere Neuheit des Anlagenbaus ergab sich aus der photovoltaischen Energieversorgung, welche vollständig ohne die Zwischenspeicherung von Energie konzipiert wurde. Lediglich die aktuell durch die Photovoltaik bereitgestellte Leistung wird in der Anlage verbraucht. Eine derartige verfahrenstechnische Anlage muss ihren Leistungsbedarf entsprechend der aktuell verfügbaren Leistung aus der Photovoltaik angleichen können. Die hierzu benötigte komplexe Regelungstechnik wurde in einem automatisierten Anlagenbetrieb umgesetzt. Zwei vollautomatisierte und energieautarke Umkehrosmoseanlagen sind das Ergebnis des Projektes. Zwei große Herausforderungen ergaben sich bei der Entwicklung geeigneter Leistungselektronik zur Energieversorgung, welche keinen Batteriespeicher als Spannungsreferenz benötigt, und Systemen zur Energierückgewinnung im Entsalzungsprozess. Da die benötigte Leistungselektronik nicht entwickelt werden konnte, wurden alternative Lösungen in Kombination aus Standardkomponenten gewählt, welche zwar einen Batteriespeicher als Referenz benötigen, diesen jedoch dank der Automatisierung de facto nicht entladen. Systeme zur Energierückgewinnung existierten bereits, waren jedoch nicht in den benötigten Baugrößen oder den technischen Eigenschaften verfügbar. Hier konnten zwei bestehende Konzepte für die photovoltaische Energieversorgung umgerüstet bzw. kleiner skaliert werden.		
19. Schlagwörter Netzunabhängige Stromversorgung, dezentrale Wasseraufbereitung, photovoltaischer Direktbetrieb, Energieeffizienz, Meerwasserentsalzung, photovoltaisch betriebene Umkehrosmose, Energierückgewinnung		
20. Verlag	21. Preis	



## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of Report
3a. Report Title Common final report of the joint PV-RO project: Energy-self-sufficient, photovoltaic power supplied seawater desalination by reverse osmosis	
3b. Title of Publication	
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Vetter, Matthias; Went, Joachim; Anhalt, Julian; Klemm, Marcel	5. End of Project 30th of November 2011
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s))	6. Publication Date 30th of May 2012
8. Performing Organization(s) (Name, Address) Hochschule Kempten, Bahnhofstraße 61, D-87435 Kempten Fraunhofer ISE, Heidenhofstraße 2, D-79110 Freiburg Katadyn Produkte AG, Birkenweg 4, CH-8304 Wallisellen IBC Solar AG, Am Hochgericht 10, D-96231 Bad Staffelstein TBB - Technischer Büro Gernot Becker, Schachenmeierstraße 32, D-80636 München Gather Industrie GmbH, Auf der Hüls 14-18, D-40822 Mettmann Pairan Elektrotechnik GmbH, Florenz-Sartorius-Straße 5, D-37078 Göttingen MAT Plasmatech GmbH, Reistraße 3, D-01257 Dresden	7. Form of Publication
13. Sponsoring Agency (Name, Address)  Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 53107 Bonn	9. Originator's Report No.
	10. Reference No. 16IN0539 – 16IN0538
	11a. No. of Pages Report 59
	11b. No. of Pages Publication
	12. No. of References 20
	14. No. of Tables 1
	15. No. of Figures 28
16. Supplementary Notes	
17. Presented at (Title, Place, Date)	
18. Abstract <p>The aim of the joint project was to elaborate new approaches towards decentralized treatment of seawater and brackish water by the use of reverse osmosis. Two small reverse osmosis plants with daily capacities of 200 – 500 and 5,000 - 10,000 liters of desalinated water were to be developed and built. The characteristic innovation was a direct power supply by photovoltaics which was designed without a so far needed storage of energy. Just the power available at the moment is consumed by the plant. Such a process has to be capable of adapting its power demand according to the current power supplied by photovoltaics. In order to do so, a complex design of automated control was implemented. Two fully automated desalination plants are the outcome of the project.</p> <p>Two major challenges were to design adequate power electronics which could be operated without batteries as a source of voltage reference and suitable energy recovery devices for the desalination process. Although power electronics could not be developed an alternative power supply by the combination of existing components, which do need batteries, was elaborated. Due to a sophisticated automated control strategy, those batteries are not discharged while operating the plant. Energy recovery systems existed before but were not available in demanded sizes or with technical characteristics. Thus, existing concepts were retrofitted and downsized.</p>	
19. Keywords Off-grid power supply, decentralized water treatment, direct photovoltaic power supply, energy efficiency, seawater desalination, photovoltaic powered reverse osmosis, energy recovery	
20. Publisher	21. Price



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Kurzbeschreibung des Verbundprojektes.....</b>	<b>11</b>
1.1	Projektvorhaben.....	11
1.2	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn .....	11
1.3	Voraussetzungen und Umfeld des Projektes .....	12
1.3.1	Katadyn Produkte AG .....	12
1.3.2	IBC Solar AG.....	12
1.3.3	TBB – Technisches Büro Gernot Becker.....	12
1.3.4	Gather Industrie GmbH.....	13
1.3.5	Pairan Elektrotechnik GmbH .....	13
1.3.6	MAT Plasmatech GmbH.....	13
1.3.7	Hochschule Kempten .....	13
1.3.8	Fraunhofer ISE .....	14
1.4	Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden.....	14
1.5	Planung und Ablauf.....	14
1.6	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	17
<b>2</b>	<b>Eingehende Darstellung des Verbundprojektes.....</b>	<b>18</b>
2.1	Betriebsführung der RO-Anlagen .....	18
2.1.1	Betriebsbedingungen der Umkehrosmoseanlage .....	18
2.1.1.1	Scaling.....	18
2.1.1.2	Fouling .....	19
2.1.1.3	Anfahren der Umkehrosmoseanlage .....	22
2.1.1.4	Herunterfahren der Umkehrosmoseanlage .....	24
2.1.1.5	Zu- und Abschalten von Umkehrosmosemembranen.....	24
2.1.1.6	Abschalten einer Membran .....	25
2.1.1.7	Zuschalten einer Membran.....	25
2.1.2	Ziele der Betriebsführung.....	25
2.1.3	Grundstrategien.....	26
2.1.3.1	Regelung auf konstanten Druck .....	26
2.1.3.2	Regelung auf konstante Ausbeute .....	27
2.1.3.3	Regelung auf konstanten Feedstrom .....	28
2.1.3.4	Regelung auf konstanten Permeatstrom.....	29
2.1.3.5	Regelung auf höchste Energieeffizienz .....	29
2.1.4	Zusammenfassung der Ergebnisse der Analyse der Grundstrategien .	30
2.1.5	Idee der Betriebsführung.....	30
2.1.6	Optimierung .....	32
2.1.6.1	Entwicklung des Algorithmus.....	33
2.1.7	Umsetzung der Betriebsführung maritime in Labview.....	36
2.1.7.1	UF-Control.....	36
2.1.7.2	RO-Control .....	39
2.2	Erzielte Ergebnisse .....	43

2.2.1	Energierückgewinnung für beide RO-Anlagen.....	43
2.2.1.1	System seaside.....	43
2.2.1.2	System maritime .....	46
2.2.2	Leistungselektronische Komponenten .....	49
2.2.2.1	Energieversorgung seaside .....	49
2.2.2.2	Energieversorgung maritime .....	51
2.2.3	Feldtest auf Zypern .....	52
2.2.4	Automatisierter Anlagenbetrieb .....	53
2.2.4.1	Exemplarische Betrachtung eines Betriebstages der Anlage seaside ..	54
2.1	Nicht erreichte Ziele .....	55
2.2	Bekannt gewordener Fortschritt Anderer.....	56
2.3	Veröffentlichung der Ergebnisse.....	57
2.3.1	Bisherige Veröffentlichungen .....	57
2.3.2	Geplante Veröffentlichungen .....	57
2.1	Verwertungsplan der Ergebnisse .....	58
<b>3</b>	<b>Quellen und Verweise .....</b>	<b>59</b>

## Abkürzungsverzeichnis

AC	<b>a</b> lternating <b>c</b> urrent (Wechselspannung)
API	<b>a</b> ctive <b>p</b> ressure <b>i</b> ntensifier (aktiver Druckintensivierer)
DC	<b>d</b> irect <b>c</b> urrent (Gleichspannung)
CAD	<b>c</b> omputer <b>a</b> ided <b>d</b> esign (Rechner gestütztes Konstruieren)
DME	<b>D</b> eutsche <b>M</b> eerwasser <b>E</b> ntsalzung e.V.
EDS	International <b>E</b> xhibition of <b>D</b> esalination and <b>S</b> ervices
FU	<b>F</b> requenz <b>u</b> mrichter
HPP	<b>h</b> igh <b>p</b> ressure <b>p</b> ump (Hochdruckpumpe)
MPP	<b>m</b> aximum <b>p</b> ower <b>p</b> oint (Punkt größter Leistung auf PV-Kennlinie)
MPPT	<b>m</b> aximum <b>p</b> ower <b>p</b> oint <b>t</b> racking (Suche des Punktes größter Leistung auf PV-Kennlinie)
PV	<b>P</b> hotovoltai <b>k</b> / <b>p</b> hotovoltai <b>s</b> ch
RO	<b>r</b> everse <b>o</b> smosis (Umkehrosmose)
SEC	<b>s</b> pecific <b>e</b> nergy <b>c</b> onsumption (spezifischer Energiebedarf)
UF	<b>U</b> ltra <b>f</b> iltration



# 1 Kurzbeschreibung des Verbundprojektes

## 1.1 Projektvorhaben

Ziel des Projektes waren die Entwicklung, der Bau und die Erprobung zweier automatisiert und energieautark betriebener Wasserentsalzungsanlagen nach dem Prinzip der Umkehrosmose (RO), wobei deren Energieversorgung mittels Photovoltaik (PV) realisiert werden sollte. Die Absicht bestand darin, produktnahe Demonstratoren zu schaffen, welche die Machbarkeit der energieeffizienten dezentralen Meerwasserentsalzung auch in kleinerem Maßstab an netzfernen Standorten unter Beweis stellen könnten.

Bisherige Anlagen wurden meist aus dem öffentlichen Stromnetz oder, im Falle dezentraler Anwendungen, mit Dieselgeneratoren betrieben. Photovoltaisch oder hybrid versorgte kommerzielle Systeme waren nur vereinzelt bekannt, wobei diese jedoch grundsätzlich nur mit Hilfe eines Batteriespeichers in festen Betriebspunkten betrieben werden konnten. Systeme, welche auf ein variables Energieangebot – wie es bei der Nutzung erneuerbarer Energien unausweichlich ist – mit variablem Energiebedarf reagieren können, waren nicht bekannt.

Um den Energiebedarf der Trinkwassergewinnung und somit die Wassergestehungskosten allgemein zu senken, wurden bei Anlagen größerer Kapazität Systeme zur Energierückgewinnung eingesetzt. Für kleinere Anlagen jedoch waren derartige Komponenten erst zur Jahrtausendwende am Markt verfügbar. Allerdings waren diese wiederum nur für den Anlagenbetrieb in einem festen Betriebspunkt bzw. bei konstanter Ausbeute rate konzipiert und somit weniger zur Anpassung der Leistungsaufnahme geeignet. Ein Kernpunkt des Vorhabens war deshalb die Entwicklung und Erprobung neuartiger Energierückgewinnungssysteme, welche einen variablen Anlagenbetrieb ermöglichen sollten.

Durch den Verzicht auf einen klassischen Batteriespeicher sowie diverse Komponenten, wie etwa Laderegler oder Wechselrichter, sollte auch die Effizienz in der Energieversorgung gesteigert werden. Die für eine zuverlässige Energieversorgung ohne Batteriespeicher benötigten leistungselektronischen Komponenten waren nicht erhältlich.

Die angestrebten Innovationen sollten eine offensichtliche technische Lücke im florierenden Markt der Entsalzungsanlagen für Meer- oder Brackwasser mit einer Tagesproduktion von unter 10.000 Liter geschlossen werden. Als lukrative Zielgrößen der beiden Demonstratoren wurden Kapazitäten von 200 – 500 (System maritime) bzw. 5.000 – 10.000 Liter/Tag (System seaside) festgelegt.

## 1.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn

Zu Projektbeginn zeichnete sich weltweit ein stark wachsendes Interesse an der photovoltaischen Energieversorgung von Pumpsystemen ab. Auch gab es Bestrebungen, auf einen oft als technisch nachteilig betrachteten Batteriespeicher zu verzichten. Vereinzelt konnten PV-direktbetriebene Pumpsysteme [1] kommerziell umgesetzt werden.

Systeme zur isobaren Energierückgewinnung in RO-Anlagen waren bekannt und, beispielsweise durch Systeme von Calder [2] und Energy Recovery Inc. [3], auch kommerziell verfügbar. Jedoch

sind und waren diese Systeme nur in Anlagen mit großen Volumenströmen einsetzbar. Für Kleinanlagen waren solche Systeme nicht verfügbar.

Studien belegten die Machbarkeit der photovoltaischen Direktversorgung kleinerer Entsalzungsanlagen [4]. Diese schaffte es jedoch nicht zu einem vermarktbareren Konzept in Serienreife. Zwei wichtige Gründe hierfür waren:

- Das Fehlen eines Spannungswandlers oder Wechselrichters, welcher es ermöglicht, eine variable AC- oder DC-Last über einen MPP-Tracker direkt an einen PV-Generator anzuschließen, ohne dass hierzu ein Batteriespeicher benötigt würde oder eine instabile Spannungsversorgung die Folge wäre.
- Das Fehlen eines Systems zur Energierückgewinnung für RO-Anlagen mit variabler Ausbeuterate mit einer Tagesproduktion an Trinkwasser von unter 10 m<sup>3</sup>.

### **1.3 Voraussetzungen und Umfeld des Projektes**

Es konnten sechs KMUs sowie zwei FuE-Einrichtungen in einem Konsortium vereint werden. Somit waren das benötigte Know-How verschiedenster Fachrichtungen sowie die umfangreiche Kenntnis des Marktes sichergestellt. Ein großes Potential war nicht nur für die beiden zu entwickelnden Entsalzungsanlagen als solche absehbar, auch die angestrebten Weiterentwicklungen aus den Bereichen Pumpentechnologie und Leistungselektronik erschienen für sich betrachtet lukrativ. Im Folgenden werden die beteiligten Partner sowie deren Motivation zur Teilnahme am Projekt kurz vorgestellt.

#### **1.3.1 Katadyn Produkte AG**

Das Schweizer Unternehmen Katadyn entwickelt und vertreibt seit über 50 Jahren individuelle Wasseraufbereitungssysteme, etwa für Extremsportler, und Kleinstentsalzungsanlagen, welche bspw. auf Yachten installiert werden können. Das Unternehmen ist Marktführer in diesen Bereichen. Um die Produktpalette zu erweitern und aufkommender Konkurrenz entgegenzutreten, bestand großes Interesse an der Entwicklung einer effizienten Umkehrosmoseanlage, welche energieautark arbeitet, sich einfach bedienen lässt und modular skalierbar auf die Anforderungen von Kunden eingehen kann.

#### **1.3.2 IBC Solar AG**

IBC Solar bietet Beratung, Planung und Vertrieb einzelner photovoltaischer Komponenten bis hin zu schlüsselfertigen Komplettsystemen aus einer Hand. Seit der Gründung im Jahre 1982 ist das Unternehmen stetig gewachsen. Nachdem bereits positive Erfahrung mit solaren Pumpsystemen gemacht wurde, erwuchs das Bestreben, ebenfalls Systeme zur PV-betriebenen Wasseraufbereitung anbieten zu können.

#### **1.3.3 TBB – Technisches Büro Gernot Becker**

Zusammen bieten die beiden Niederlassungen TBB und ATB in Deutschland und Österreich ihre Dienste bei Projektierung und Installation in den Geschäftsfeldern erneuerbare Energien und Energieeffizienz an. Besonders für Projekte der internationalen Entwicklungszusammenarbeit

wurde die wichtige Rolle der nachhaltigen Wasserversorgung und -Aufbereitung erkannt. Mit der Teilnahme an dem Projekt sollte thematisch der Zugang zur Meer- und Brackwasserentsalzung ermöglicht werden.

#### **1.3.4 Gather Industrie GmbH**

Das Unternehmen Gather bietet magnetgekuppelte Zahnradpumpen an, welche dank kundenspezifischer Lösungen heute in unterschiedlichsten Bereichen zur Anwendungen kommen. Eine pulsationsfreie, exakt dosierbare Förderung sowie der wartungsarme Betrieb, auch in aggressiven oder nicht schmierenden Medien, sind ein Markenzeichen. Während des Projektes sollte eine neuartige Hochdruck-Trochoidenpumpe entwickelt werden, welche (im Gegensatz zu handelsüblichen Kolbenpumpen) ein Medium quasi ohne Oszillationen fördern könnte. Durch diese Entwicklung sollte die Basis zur Förderung und Energierückgewinnung in beiden RO-Anlagen geschaffen werden.

#### **1.3.5 Pairan Elektrotechnik GmbH**

Mit etwa 60 Mitarbeitern entwickelt, produziert und vertreibt die Firma Pairan Produkte aus den Bereichen Elektrotechnik, Elektronik und Elektromechanik. Die Entwicklung eines DC-DC-Wandlers mit integriertem MPP-Tracking, welcher auch ohne einen Batteriespeicher ein spannungsstabiles Inselnetz aufbauen kann, war die Motivation zur Projektteilnahme. Ebenso sollte die Automatisierung beider Anlagen übernommen werden.

#### **1.3.6 MAT Plasmatech GmbH**

Die MAT Plasmatech verfügt über anwendungsbezogene Plasma-, Oberflächen- und Vakuum-Beschichtungstechnologien. Im modernen Maschinenbau sind dies wichtige Verfahren, um einzelne Komponenten resistenter gegen Verschleiß, Verschmutzung oder Korrosion zu machen und deren tribologischen Eigenschaften zu verbessern. Die zu entwickelnde Pumpe der Firma Gather sollte mit derartigen Beschichtungen versehen werden. Durch die Insolvenz des Unternehmens MAT Plasmatech während der Projektlaufzeit fiel dessen Beitrag bedauerlicherweise gering aus, da lediglich einige Bauteile des Prototypen der Trochoidenpumpe beschichtet werden konnten.

#### **1.3.7 Hochschule Kempten**

Als eine der beiden beteiligten FuE-Einrichtungen brachte der Fachbereich Maschinenbau der Hochschule Kempten als kompetenter Partner seine Kenntnisse aus der chemischen Verfahrenstechnik und Systemauslegung in das Projekt ein. Insbesondere in den Bereichen windgetriebene Meerwasserentsalzung durch leistungsvariable mechanische Brüdenverdichtung, der Aufbereitung von Meerwasser für die Entsalzung mittels Membrantechnik sowie der Materialtechnik in diesen hoch korrosionsbelasteten Systemen (Einsatz meerwasserfester Stähle, Kunststoffe und Keramiken) liegen umfangreiche Erfahrungen vor. Die Hochschule wurde u.a. auch in das Testen der zu entwickelnden Hochdruck-Trochoidenpumpen unter Realbedingungen (mit Meerwasser) eingebunden.

### **1.3.8 Fraunhofer ISE**

Als größtes Solarforschungsinstitut Europas bündelt das Fraunhofer ISE unterschiedlichste Kompetenzen. Das Projektteam, welches zudem die technische Dokumentation sowie die Projektkoordination übernahm, konnte besonders seine Erfahrungen aus der Energieversorgung in dezentralen Netzen mit PV- oder Hybridsystemen sowie der Anlagen- und Regelungstechnik einbringen. Die Endmontage sowie die umfangreichen Testläufe der zu entwickelnden Demonstratoren sollten hier erfolgen.

## **1.4 Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden**

Die umgesetzte Idee des isobaren Druckaustausches zur Energierückgewinnung im größeren System seaside lehnt sich inhaltlich an verfügbare, patentgeschützte Produkte an. Zu nennen sind hierbei die Anbieter Calder [2] und Energy Recovery Inc. [3]. In diesem Projekt wurde die technische Umsetzung jedoch ohne den Einsatz patentrechtlich geschützter Bauteile erreicht, ferner wurde lediglich das physikalische Prinzip, welches nicht geschützt ist, umgesetzt.

Der PowerSurvivor der am Projekt beteiligten Fa. Katadyn wurde als Hochdruckpumpe mit integrierter Energierückgewinnung in der kleineren Anlage maritime verbaut. Die Nutzung erfolgte selbstverständlich im Einverständnis mit Katadyn.

Die für die photovoltaische Energieversorgung verwendete Leistungselektronik wurde letztendlich von den Anbietern SMA [5] und Phocos [6] bezogen, es wurden keine Schutzrechte berührt.

## **1.5 Planung und Ablauf**

Vor Einreichung der Projektskizze wurden die Kompetenzen eines jedes Partners abgegrenzt und daraus resultierend Arbeitspakete mit den jeweils involvierten Projektpartnern sowie ein Zeitplan erstellt. Letzterer ist in Tabelle 1 dargestellt (siehe Seite 16). Über die Projektlaufzeit wurden drei Meilensteine vorgesehen. Auf Grund notwendig gewordenen Änderungen (siehe Kapitel 2.2.1) kam es bedauerlicher Weise von Oktober 2008 bis Juni 2009 zu einer vorübergehenden Mittelsperre durch den Projektträger, welcher das Erreichen des ersten Meilensteines als zunächst nicht gegeben sah. Der entsprechende Zeitraum ist in Tabelle 1 schraffiert dargestellt.

Meilenstein A: Auslegung für beide Systeme (maritime und seaside)

Im ersten Arbeitspaket wurden umfangreiche Recherchen durchgeführt, um einen detaillierten Marktüberblick zu erhalten und eventuell bereits verfügbare Komponenten aufzuzeigen. Um spätere Komplikationen zu vermeiden und einen möglichst umfangreichen Wissenstand zu erlangen, waren hierbei alle Partner beteiligt. Ebenso wurden die Anforderungen an beide RO-Systeme für die Entsalzung von Meer- und Brackwasser definiert, eine dementsprechende Vorauslegung durchgeführt sowie Methoden zur Betriebsführung (AP 2.1) und Simulation des Anlagenbetriebes entwickelt. Parallel wurde mit der Entwicklung der Hochdruck-Trochoidenpumpe (AP 3.1) sowie deren Einsatz zur Förderung und Energierückgewinnung in System maritime begonnen (AP3.3). Ebenso wurde die Arbeit an der batterielosen Leistungselektronik aufgenommen (AP 2.3).

Meilenstein B: Prototypen der Komponenten abgeschlossen (Trochoidenpumpe und Leistungselektronik)

Mit Erreichen des zweiten Meilensteines sollten die Prototypen der Trochoidenpumpe und der batterielosen Leistungselektronik präsentiert werden. Auf Grund der in Kapitel 2 erörterten und bis dato andauernden Komplikationen wurde dieser zweite Meilenstein auf die Zeit nach Beginn des abschließenden Feldtestes terminiert. Der Feldtest beider Systeme musste folglich ohne die erwarteten Komponenten begonnen werden (AP 7). Dies war dank der gefundenen Behelfslösungen jedoch möglich.

Meilenstein C: Prototypen Gesamtsysteme abgeschlossen (beide Anlagen funktionsfähig)

Trotz der Komplikationen wurde der dritte Meilenstein erreicht und die beiden voll funktionsfähigen Demonstratoren der Systeme seaside und maritime im Juli 2011 nach Zypern verschifft, wo derzeit noch der abschließende Feldtest durchgeführt wird.

Eine detaillierte Schilderung der Vorgänge, der erreichten und nicht erreichten Ziele ist den Kapiteln 2.2 und 2.1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Zeitplan und Arbeitspakete (Stand: 09/2011)

Arbeitspaket	Zeitplan												Ressourcenplan																					
	1. Jahr			2. Jahr			3. Jahr			4. Jahr			Fraunhofer ISE	Hochschule Kempten	Parran	IBC-Solar	Gather	MAT-Plasmatec	Katadyn	TBB	Summe Personenmonate	Anteil												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12											1	2	3	4	5	6	7	8	9			
<b>1 Recherchen / Spezifikation</b>																							0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	16,8	12,3%
1.1 Systemanforderungen																																	1,6	1,2%
1.2 Analyse verfügbarer Komponenten / Methoden zum Vergleich von ER-Konzepten																							2,0	1,5	0,5	0,2					1,0		5,2	3,8%
1.3 Machbarkeit zur Umsetzung innovativer Konzepte (Druckspeicher, Diskmodul, energieeffiziente Frequenzrichter, intermittierende Betriebsweise, Mikroprozessorregelung)																							1,0	1,0	0,5				0,7	0,5	0,2		3,9	2,9%
1.4 Methoden zur simulationsbasierten Auslegung																							1,0			0,3						0,3	1,6	1,2%
1.5 Systemauslegung																							1,0	1,0		0,5	1,0			0,5	0,5	0,5	4,5	3,3%
<b>2 Systemregelung / Prozessüberwachung / PV-System</b>																																	27,8	20,3%
2.1 Betriebsführungsalgorithmus - PV-RO-Management																							0,5		0,5	0,2				0,2			1,4	1,0%
2.2 Entwicklung energieeffizienter Hardware																							0,5		1,0								1,5	1,1%
2.3 Leistungselektronik - MPPT ohne Batterie																							0,5		8,0								8,5	6,2%
2.4 Steuerung / Regelung des PV- Systems																							2,0		1,5	1,0					0,5	0,5	5,0	3,7%
2.5 Steuerung / Regelung dynamischer RO-Prozess und Vorbehandlung																							1,5		2,0				0,8	0,8		0,8	5,1	3,7%
2.6 Fernüberwachung																							1,3		1,0	0,3				1,0	0,5	0,5	4,1	3,0%
2.7 Integration zu Systemregelung - Funktionsmuster																							1,0		0,2	0,8					0,2	0,2	2,2	1,6%
<b>3 Entwicklung Trochoidenpumpe / Energierückgewinnung</b>																																	37,1	27,1%
3.1 Entwicklung der Gather Trochoidenpumpe als Hochdruckpumpe im Meerwasserentsalzungssystem																								3,5			8,0	1,5	0,2				13,2	9,7%
3.2 Test von CVD beschichteten Bauteilen zur Verbesserung der Korrosions- und Verschleißigenschaften																							2,0	3,0			2,3	2,1	0,2				9,6	7,0%
3.3 Entwicklung / Aufbau einer angepassten ER-Einheit PV-RO maritime																							3,0	3,8				1,2	1,6				9,6	7,0%
3.4 Entwicklung / Aufbau ER-Einheit für PV-RO seaside																							1,0	0,5			3,0	0,2					4,7	3,4%
<b>4 Entwicklung Gesamtsysteme</b>																																	12,4	9,1%
4.1 Untersuchung hydraulischer Teil																							2,0	2,5			1,0			0,5			6,0	4,4%
4.2 Integration der Komponenten zu zwei Funktionsmustern - Gesamtsysteme (maritime + seaside)																							3,0		0,2	1,2				1,0	1,0		6,4	4,7%
<b>5 Labortest - Gesamtsysteme (maritime + seaside)</b>																																	4,6	3,4%
6 Aufbau - Funktionsmuster (maritime + seaside)																							2,0			1,0				1,0	0,5		4,5	3,3%
7 Feldtest - Funktionsmuster (maritime + seaside)																							2,0	4,0		0,5				0,5	1,0		8,0	5,9%
<b>8 Systemoptimierung, -erweiterung</b>																																	19,8	14,5%
8.1 Verbesserung der Langzeitigkeit, Energieeffizienz und																							1,5	2,0	0,5	1,0		0,8	1,0	1,0	1,0	1,0	7,8	5,7%
8.2 Binnenland - Auslegung (Brackwasser)																							1,0			0,5						1,0	2,5	1,8%
8.3 Kostenreduktion																							1,0	1,5		0,8	1,0	1,3	1,0	0,5	0,5	0,5	7,1	5,2%
8.4 Konzepte zur hybriden Energieversorgung (Wind, Diesel,																							1,0		0,2	0,2				0,5	0,5	0,5	2,4	1,8%
<b>9 Technische Dokumentation für Schulungszwecke</b>																							1,5			1,0				0,5	0,7		3,7	2,7%
<b>10 Projektmanagement</b>																							2,0										2,0	1,5%
<b>Summe Partner</b>																							37,5	26,5	16,3	9,9	16,5	8,0	12,4	9,6			136,7	100,0%

## 1.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Der Bau der beiden RO-Anlagen inklusive der Rohwasser-Vorbehandlung wurde gemäß den Vorgaben aus dem Projektkonsortium durch zwei Anlagenbauer durchgeführt. Das System seaside wurde durch die Fa. Osmo Anlagenbau [7], das System maritime durch die Fa. SolarSpring gebaut [8].

Im Rahmen des Verbundprojektes wurde ein Kooperationsvertrag zwischen der Fraunhofer-Gesellschaft (FhG) und dem Cyprus Institute (Fachbereich: Energy, Environment and Water EEWRC [9]) abgeschlossen. Als Feldteststandort konnte in diesem Zusammenhang das Versuchsgelände Pentakomo Lab nahe Governors Beach auf Zypern gewählt werden. Die entstandene Kooperation birgt großes Potential, um die Zusammenarbeit beider Einrichtungen auch nach Projektende langfristig zu gewährleisten.

Die am Feldteststandort notwendigen Infrastrukturmaßnahmen (Verlegen von Rohrleitungen, Gießen der Fundamente der Container und der PV-Generatoren etc.) wurden durch TBB-Becker Cyprus durchgeführt. TBB-Becker Cyprus ist der zypriotische Partner des Technischen Büros Gernot Becker.

Das Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM wurde kontaktiert, um die Möglichkeit des Einsatzes hoch resistenter DLC-Beschichtungen an Bauteilen der Pumpen der Fa. Katadyn zu beurteilen, um so Korrosion vorzubeugen und die tribologischen Eigenschaften zu verbessern.

## 2 Eingehende Darstellung des Verbundprojektes

### 2.1 Betriebsführung der RO-Anlagen

#### 2.1.1 Betriebsbedingungen der Umkehrosmoseanlage

##### 2.1.1.1 Scaling

Vorhersage von Scaling

Im Meerwasser sind viele verschiedene Salze gelöst, die Konzentration der einzelnen gelösten Salze ist stark ortsabhängig. Eine genaue Wasseranalyse des vorgesehenen Standortes für die zu installierende Anlage ist daher nötig um das Scalingpotential der einzelnen Salze abzuschätzen. Am häufigsten fallen Kalziumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ), Magnesium Hydroxide ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) und unterschiedliche Typen von Calciumsulfat-Salzen wie Anhydride ( $\text{CaSO}_4$ ), Hemihydrate ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ ), und Dihydrate (Gips,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) sowie  $\text{BaSO}_4$  aus. Um eine Abschätzung über das Scalingpotential zu erhalten, kann das Löslichkeitsprodukt herangezogen werden. Dies ist jedoch ungenau. Es existieren aber einige empirische Verfahren, z.B. der Langlier Saturation Index (LSI) und der Stiff & Davis Stability Index (S&DSI), die das Scaling besser vorhersagen [20].

Maßnahmen gegen Scaling:

- *Zugabe von Säure:* Durch Zugabe von Säure kann  $\text{CaCO}_3$ -Scaling vermieden werden. Das Gleichgewicht verschiebt sich nach der Gleichung:  
$$\text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{CaCO}_3$$
unter Zugabe von Säure ( $\text{H}^+$  Ionen) auf die linke Seite hin zum gelösten Calcium. Als Säure wird meist Schwefelsäure hinzugegeben, was jedoch das Risiko von Schwefel Scaling erhöht, auch kann Salzsäure hinzugegeben werden. Die Säure sollte in Lebensmittelqualität hinzugefügt werden.
- *Zugabe von Anti-Scalent-Mitteln:* Sie werden verwendet um Carbonat-Scaling, Sulfat-Scaling und Calciumfluorid-Scaling zu verhindern. Die Anti-Scalent-Mittel lagern sich an den Kristallkeimen an und verhindern deren Wachstum.
- *Ionenaustacher:* In das Wasser wird ein Ionenaustauscharz hinzugegeben, um Härtebildner zu entfernen und damit am Ausfallen zu hindern. Dies verhindert  $\text{Ca}^{2+}$ -,  $\text{Ba}^{2+}$ - und  $\text{Sr}^{2+}$ -Scaling.
- *Gelöschter Kalk und Natriumcarbonat (Soda):* Gelöschter Kalk wird zur Entfernung von Karbonathärte verwendet, und Soda zur Entfernung von Calciumhärte.
- *Regelmäßige präventive Reinigung:* Scaling kann auch durch Membranreinigung verhindert werden. Normalerweise werden diese Anlagen mit einer niedrigen Ausbeute (ca. 25%) betrieben. Der einfachste Weg zur Reinigung ist eine Spülung mit Feedwasser bei niedrigem Druck in normaler Fließrichtung. Dadurch werden entstandene Salzkeime oder Kristalle ausgewaschen.
- *Einstellung von Betriebsparametern:* Wenn ohne chemische Anti-Scalent Maßnahmen operiert werden soll, müssen die Betriebsparameter der Anlage in der

Art eingestellt werden, dass Scaling nicht auftritt. Eine hohe Fließgeschwindigkeit wäscht im laufenden Betrieb entstehende Salzkeime aus. Niedrige Fließgeschwindigkeiten hingegen lassen "tote" Bereiche in der Membran entstehen. In diesen Bereichen entsteht durch Konzentrationspolarisation Scaling. Niedrige Ausbeuten lassen die Salze nicht stark aufkonzentrieren und verhindern daher Scaling. Spülungen mit Permeat können Salze lösen. Bei Betriebspausen kann eine Rückdiffusion von Wasser die Membran freispülen.

Bei der hier beschriebenen Anlagenkonfiguration soll, wenn nicht unbedingt nötig, auf sämtlichen Chemikalieneinsatz verzichtet werden. Daher bleibt der einzige Eingriff, um Scaling zu vermeiden, ein gezielter Betrieb der Anlage innerhalb gewisser Grenzbereiche. Um Scaling so gut wie möglich zu unterbinden, ist ein Betrieb bei geringen Ausbeuten nötig. Nach Angabe der Firma Dow Chemicals ist bei Meerwasser mit einem Salzgehalt von bis zu 36 g/l ab einer Ausbeute von  $\phi=35\%$  ein Chemikalieneinsatz nötig. Bei der hier beschriebenen Anlage ist bei einer Ausbeute von 31% die optimale Energieeffizienz gegeben und somit ein Betrieb ohne Chemikalieneinsatz möglich. Da Scaling ohne Chemikalieneinsatz jedoch nicht vollständig unterbunden werden kann, müssen in der Betriebsführung Spülungsphasen bei geringem Druck vorgesehen werden. Nach Angaben der Firma Dow Chemicals sind häufige Spülungsintervalle mit kurzen Spülungszeiten besser als lange seltene Spülungen. Aus Erfahrungswerten wird für kleine Anlagen zu 30sekündiger Spülung alle 30 Minuten geraten. Eine hohe Überfließgeschwindigkeit über die Membran spült Salzkristalle schon in der Entstehungsphase aus der Membran und wirkt daher förderlich.

Zusammenfassung der zu beachtenden Parameter für die Betriebsführung in Bezug auf Scaling:

- Niedrige Ausbeuten, mit  $\phi$  kleiner 35% verwenden
- Spülungen mit niedrigem Druck, alle 30 min und ca. 30 s lang
- Hohe Überfließgeschwindigkeiten vermeiden
- Zu geringe Überfließgeschwindigkeiten bei hohem Druck vermeiden

### **2.1.1.2 Fouling**

Vorhersage von Fouling

Um die Rahmenbedingungen für Maßnahmen gegen Fouling abzuschätzen, muss eine Wasseranalyse durchgeführt werden und die Bedingungen der Wasseraufnahme (direkt aus dem Meer oder aus einem Brunnen) geklärt sein. Es ist für den sicheren Betrieb unbedingt notwendig, Versuche mit dem realen Wasser durchzuführen und das Verhalten in Bezug auf Fouling zu studieren. Mit der Bestimmung des SDI (Silt-density-Index) lassen sich grobe Vorhersagen treffen [20].

Maßnahmen gegen Fouling

Organic Fouling: Organische Substanzen treten in Konzentrationen zwischen 0,5 und 20 mg/l auf. Ab einer Konzentration von 3 mg/l sollte eine Pretreatment Einheit verwendet werden. Maßnahmen zur Vermeidung von Fouling sind die Reinigung von Wasser durch:

- Koagulation: Koagulation ist das Zusammenballen der organischen Teile zu großen Flocken mithilfe von Hydroxidflocken.
- Ultrafiltration
- Nanofiltration
- Absorption mit Aktivkohle

#### Particulate/colloidal fouling:

- Filterung mithilfe eines Filterbetts: Die Güte der Filterung hängt dabei von der Korngröße des Filtermediums ab, meist Sand (Korngröße: 0,35-0,5 mm) oder Anthrazit (Kohle, Korngröße: 0,7-0,8 mm).
- Oxidations-Filterung: Sie wird bei altem Wasser, oder sauerstoffarmen Wasser durchgeführt.
- In-Line-Filtration: Hier wird zuerst Koagulation angewendet und dann diese Ausflockungen wieder mit Hilfe eines Filterbetts herausgefiltert. Dieses Verfahren erzielt bessere Ergebnisse als eine reine Filterung mittels Filterbett.
- Koagulation-Ausflockung: Hier werden die Flocken nicht wie bei der In-line- Filterung durch ein Filterbett herausgefiltert, sondern in speziellen Reaktoren abgeschieden und anschließend das Wasser nochmals durch ein Filterbett geführt.
- Mikrofiltration.
- Ultrafiltration.
- Microfiltrations Filterkerzen(Cartridge Microfiltration).
- Chemische Anti-Fouling-Mittel

#### Maßnahmen gegen Biofouling:

- Chlorzugabe.
- Natrium Bisulfit: Natrium Bisulfit kann bei laufendem Betrieb zugegeben werden und wird zeitlich begrenzt je nach Dosierung angewandt. Eine Anwendung findet alle 24 Stunden oder nur bei Verdacht auf Befall statt.
- Anti-Fouling Mittel: Spezielle Anti-Fouling-Mittel können von Herstellern geliefert werden.
- Biofiltration: Biofilter sind komplexe Biokatalysatoren bzw. Bioreaktoren. In ihnen werden mit Hilfe der Stoffwechselaktivität von Mikroorganismen Schadstoffe bzw. Verschmutzungen abgebaut.
- Filterbetten mit biologisch aktiviertem Granulat und Aktivkohle.
- Mikrofiltration.
- Ultrafiltration.

- UV-Bestrahlung: Auch mit UV-Bestrahlung können Bakterien abgetötet werden. Dies geht nur bei klarem Wasser, da Schwebeteilchen die Durchdringung des Wassers mit UV-Strahlung verhindern.

Allgemein erhöhen sich mit der Fließgeschwindigkeit die Scherkräfte. Damit werden Verschmutzungen ausgespült und das Risiko der Bildung von Totzonen vermieden. Dies verhindert das Festsetzen von Stoffen auf der Membran. Bei Befall mit Mikroorganismen empfiehlt sich eine chemische Reinigung. Alternativ kann eine Spülung mit hoher Geschwindigkeit bei niedrigem Druck die Bakterien und deren Biofilm aus der Membran spülen. Natürliche Osmose bei niedrigem Druck auf der Feedseite lässt die Fließrichtung durch die Membran umkehren und kann so ebenfalls Partikel aus der Membran spülen.

Der Einsatz von Chemie soll bei der hier beschriebenen Anlage möglichst vermieden werden. Daher müssen mechanische Verfahren zur Foulingverhinderung eingesetzt werden. Das Pretreatment der Umkehrosmose-Anlage beinhaltet neben Grobfiltern auch eine Ultrafiltration, da Ultrafiltration wie oben beschrieben sämtliches Fouling verhindert ist die Membran relativ sicher. Nachteile der Ultrafiltration sind das regelmäßige Rückspülen und die zusätzlichen Komponenten. Das Rückspülen benötigt energiereiches Wasser aus dem Feedtank und erhöht den SEC. Biologisches Fouling ist jedoch nach gewisser Zeit nicht zu verhindern, daher muss durch die Betriebsführung alles getan werden, um es Bakterien und Biofilmen so schwer wie möglich zu machen, sich festzusetzen. Um dies zu erreichen soll die Fließgeschwindigkeit, wenn es das solare Strahlungsangebot zulässt, so hoch wie möglich eingestellt werden. Die Mindestüberströmung über die Membran soll sicherstellen, dass Totzonen in der Membran verhindert werden. Regelmäßige Spülungen bei niedrigem Druck und hoher Fließgeschwindigkeit spülen Partikel aus der Membran. Ein Rückfluss von der Permeat zur Feedseite durch die Membran löst ebenfalls sich festsetzende Stoffe. Falls es nicht anders möglich ist oder Bakterien auf der Permeatseite entstanden sind, soll die Möglichkeit bestehen, eine Desinfektion mit chemischen Mitteln vor Ort durchzuführen.

Zusammenfassung der zu beachtenden Parameter für die Betriebsführung in Bezug auf Fouling:

- Mikrofiltration.
- Ultrafiltration.
- Hohe Überfließgeschwindigkeit über die Membran.
- Mindestüberfließgeschwindigkeit zur Vermeidung von Totzonen.
- Regelmäßige Spülungen bei niedrigem Druck mit Feedwasser.
- Rückwaschen der Membran bei niedrigem Druck von Permeatseite zur Feedseite.
- Möglichkeit einzelner Chemikalieneinsätze, falls Bakterienbefall auftritt.

Die Firma DOW sieht in Fouling den Faktor mit dem größten Einfluß auf das gesamte Membransystem. Der SDI-Wert des vorbehandelten Wassers steigt fast proportional mit der Gesamtmasse an Foulingmaterial an. Die Konzentration von Fouling an der Membranoberfläche steigt mit steigenden Permeatflux (Permeatfluss pro m<sup>2</sup> Membranfläche) und mit steigender Ausbeute (Quotient aus Permeatfluss und Feedfluss). Ein System mit eingestelltem hohem Permeatflux wird demnach bestimmt durch erhöhten Foulingerscheinungen und folgend mehr

chemischen Reinigungsintervallen. Ein Membransystem sollte in einem Betriebsmodus arbeiten, dass jede einzelne Membran unter optimalen Bedingungen arbeitet, um Fouling zu minimieren und mechanische Schäden abzuwenden. Die Fahrweise jeder einzelnen Membran ist begrenzt durch folgende Parameter:

1. Maximale Ausbeute
2. Maximaler Permeatfluss
3. Minimaler Konzentratstrom
4. Maximaler Feedstrom

Je höher die Foulingkonzentration des Feedwassers ist, desto kleiner wird der Rahmen, indem sich die genannten 4 Parameter bewegen. Im Anhang sind die Empfehlungen von DOW für diese Parameter aufgeführt.

### **2.1.1.3 Anfahren der Umkehrosmoseanlage**

Das richtige An- und Abfahren der RO Anlage ist für eine lange Lebensdauer wichtig. Dies ist in Abbildung 1 (siehe S. 23) dargestellt. Nach dem Erst-Start sollte die Umkehrosmose so konstant wie möglich betrieben werden. Durch die Einstrahlungsschwankungen und den Tag-Nacht-Zyklus ist dies jedoch nicht möglich. Ein sanfter Start-Mechanismus ist daher wichtig, um die mechanische Belastung so gering wie möglich zu halten. Das Anfahren ist dem Erststart sehr ähnlich. Das Wichtigste ist die langsame Druckerhöhung.

- a) Vor dem Start muss die Pretreatment-Einheit in Betrieb genommen werden. Zuerst wird die Einheit rückgespült (Abbildung 1 oben, gepunktete Linie), um Ablagerungen und Verschmutzungen auszuwaschen. Danach kehrt sich die Fließrichtung um, Frischwasser wird in den Feedtank durch die Ultrafiltrationsanlage gepumpt.
- b) Öffnen der Feed- und Konzentratventile (V1, V2). Bei einem eingestellten Druck von 0,2 bis 0,4 bar wird bei einer niedrigen Durchflussrate gespült, da sonst beim Anfahren der hohe Druck und das über die Membran zurück permeierte Süßwasser zu schnell durch die Membran zurückfließt und diese dabei schädigt (Abbildung 1 Mitte, gepunktete Linie).
- c) Langsames Erhöhen des Feedstroms, dabei darf der Feeddruck nicht größer als 0,4 bar steigen (Abbildung 1 Mitte).
- d) Einschalten der Hochdruckpumpe (Abbildung 1 unten).
- e) Langsames Anfahren der Hochdruckpumpe mit maximal 0,07 bar pro Sekunde, bis die gewünschten Betriebsparameter erreicht sind (Abbildung 1 unten, gepunktete Linie).

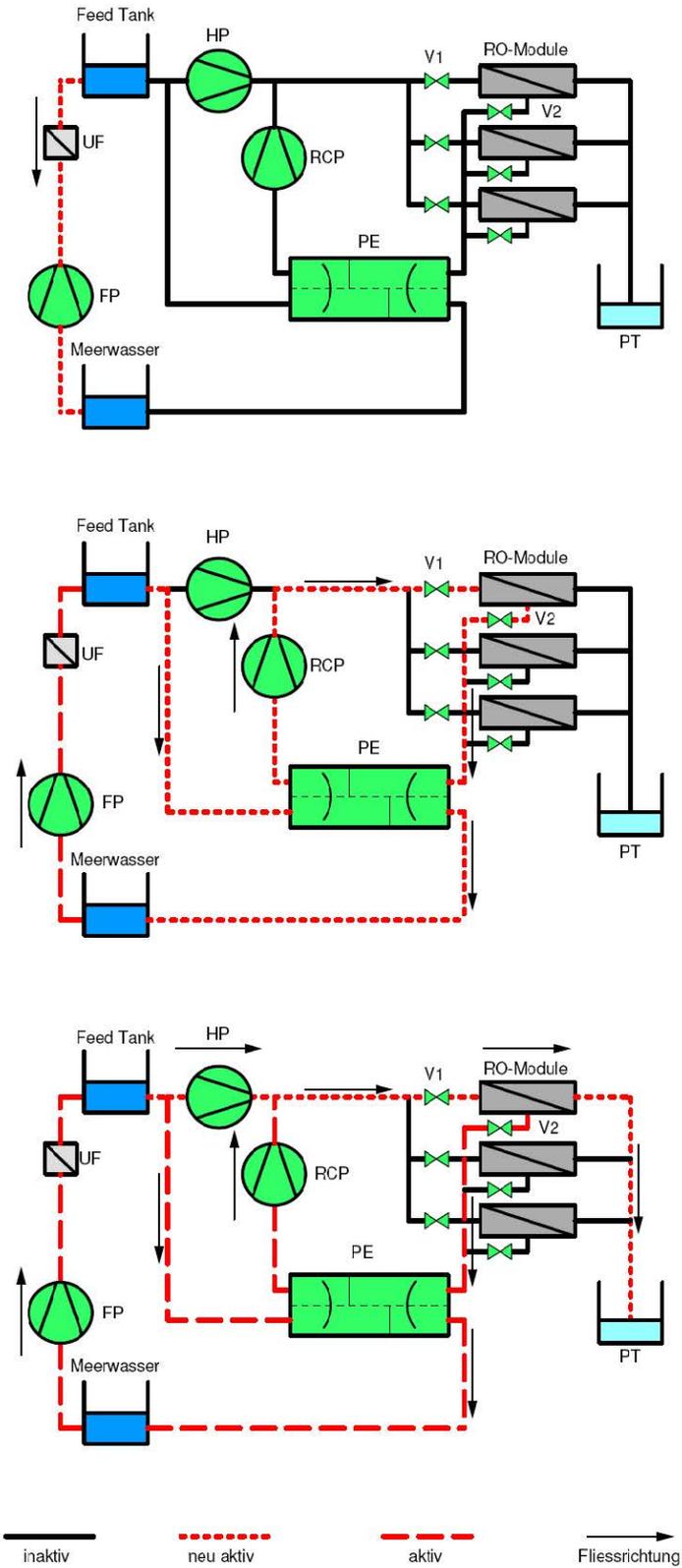


Abbildung 1: Anfahrprozess der RO-Anlage

### 2.1.1.4 Herunterfahren der Umkehrosmoseanlage

- Spülung mit Permeat oder sauberem Feedwasser, um die hohe Salzkonzentration des Konzentrat zu entfernen. Die Spülung erfolgt bei niedrigem Druck von ca. 3 bar und einer hohen Fließgeschwindigkeit. Der maximale Druckabfall pro Membran darf nicht überschritten werden.
- Nach dem Abschalten der Hochdruckpumpe und einer Spülung ohne Permeatproduktion findet ein Rückwärtsfluss des Permeats ins Feedwasser statt, wie bei natürlicher Osmose. Dies hat reinigende Wirkung und ist wünschenswert.
- Schließen der Ventile.

### 2.1.1.5 Zu- und Abschalten von Umkehrosmosemembranen

Um bei schwankendem Energieangebot möglichst stabile Betriebsverhältnisse zu erlangen, werden bei hohem Leistungsangebot Umkehrosmose-Module parallel zugeschaltet (Abbildung 1, Abbildung 2). Damit werden der erhöhte Durchfluss und der erhöhte Druck aufgrund des erhöhten Leistungsangebots auf die zugeschalteten Membrane verteilt und ändert sich für ein einzelnes Modul nur in einem gewissen Rahmen. Bei sinkendem Leistungsangebot werden die Membrane wieder abgeschaltet. Die Reihenfolge der einzelnen Aktionen des Öffnen und Schließens der Ventile sowie das Spülen mit Permeat- und Feedstrom muss genau beachtet werden, um Schäden an der Membran zu vermeiden. In Abbildung 1 ist der Aufbau wie er in Modelica umgesetzt wurde zu sehen. Da die mechanischen Stabilitätseigenschaften der Membran nicht simuliert werden, ist diese Vereinfachung im Modell möglich.

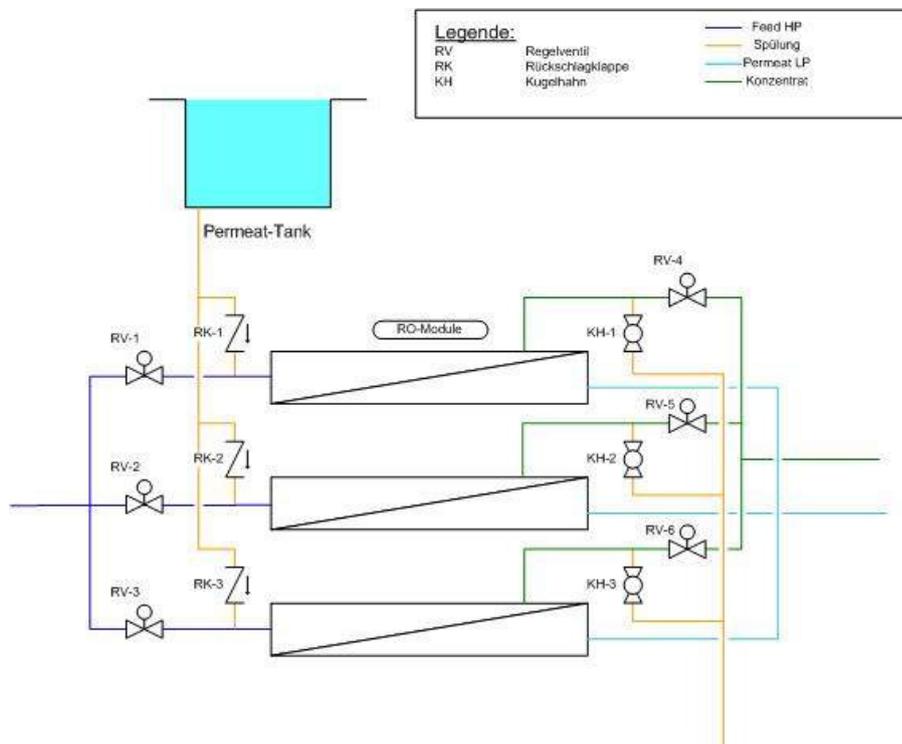


Abbildung 2: Zu- und Abschalten von Umkehrosmosemoduln

### 2.1.1.6 Abschalten einer Membran

Beispielhaft wird Membran 3 (Abbildung 2) bei laufendem Betrieb abgeschaltet, Punkt 3 die Permeatspülung ist optional:

- Zuerst wird gleichzeitig Ventil RV3 und RV6 langsam geschlossen. Der Druck in der Membran sinkt auf den osmotischen Druck ab..
- KH3 wird sanft geöffnet,  $p_{RO2}$  sinkt auf den Umgebungsdruck ab.
- RK öffnet sich passiv. Permeat flutet passiv, durch Hydrostatischen Druck eines höher gelegenen Behälters oder aktiv durch das zuschalten einer Pumpe, die Membran.
- KH3 wird geschlossen. Das RO Modul ist dadurch drucklos „konserviert“.

### 2.1.1.7 Zuschalten einer Membran

Beispielhaft wird Membran 3 bei laufendem Betrieb zugeschaltet:

- Für die Spülung mit Feedwasser wird zuerst KH3 geöffnet, anschließend wird RV3 ganz leicht geöffnet, es folgt eine Spülung der Membran mit Feedwasser bei niedrigem Druck. Dies ist wichtig da bei einem schnellen Druckanstieg ohne vorherigem Spülen mit Feedwasser das vor der Membran liegende salzarme Wasser bzw. Permeat zu schnell durch die Membran permeiert und diese zerstört, da kein osmotischer Gegendruck herrscht („Süßwasser“/Membran/„Süßwasser“). Falls beim Abschalten nicht mit Permeat gespült wurde, muss trotzdem mit Feed gespült werden, da durch die natürliche Osmose reines Wasser durch die Membran zurückpermeiert. Aufgrund des Fehlens einer Strömung entsteht durch Konzentrationspolarisation ein Grenzschicht auf der Feedseite, die eine sehr niedrige Salzkonzentration hat.
- Anschließend wird RV3 und RV6 geöffnet. Damit ist die Zuschaltung abgeschlossen.

## 2.1.2 Ziele der Betriebsführung

Anhand der kundenseitigen Anforderungen an die Anlage und der Analyse der grundlegenden Steuer- und Regelstrategien werden die Ziele der Betriebsführung festgelegt. Zu den möglichst umzusetzenden Zielen gehören:

- a) Sollmenge an Trinkwasser pro Zeiteinheit
- b) Mindestqualität des Produktwassers
- c) Materialschonung der Anlagenkomponenten und damit eine lange Lebensdauer
- d) Möglichst wartungsfreier Betrieb
- e) Verzicht auf chemische Substanzen bei der Erzeugung von Trinkwasser
- f) Optimale Ausnutzung der zu Verfügung stehenden Energie

In den weiteren Punkten wird definiert, wie diese Ziele mit Hilfe der Steuerung und Regelung optimal erreicht werden. Dabei können durchaus mehrere dieser Ziele umgesetzt werden oder je nach Priorität und Energieangebot unterschiedliche Ziele verfolgt werden. Beispielsweise kann

bei niedrigem Leistungsangebot das Ziel der Trinkwassermenge pro Zeiteinheit an erster Stelle stehen und bei genügend großem Leistungsangebot die Materialschonung hinzukommen.

### 2.1.3 Grundstrategien

Es werden in den folgenden Abschnitten die möglichen Grundstrategien untersucht, um Aufschlüsse über das stationäre und dynamische Verhalten zu erlangen. Einflussgrößen der RO Anlage sind einmal die zwei Pumpen HP mit  $V_{HP}(\Delta p, P)$  und RCP mit  $V_{RCP}(\Delta p, P)$  sowie die Möglichkeit, drei RO Module parallel zu schalten und damit die Membranfläche AM zu variieren. Im Blockschaltbild wurde AM als konstant angenommen und daher als P-Glied aufgenommen (Abbildung 3). Wird AM erhöht, also eine Membran zugeschaltet, so wird die Verstärkung des P-Gliedes kleiner und in der Folge der nötige Druck ebenfalls.

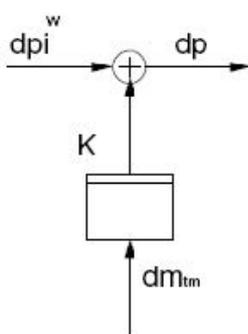


Abbildung 3: Blockschaltbild nach  $\Delta p$

#### 2.1.3.1 Regelung auf konstanten Druck

Der Druck auf die Membran wird durch die Hochdruckpumpe geregelt. Den maximalen Druck bestimmen die mechanischen Eigenschaften der Membran. Bei einer Regelung auf den maximalen Druck wird das Material der PV-RO Anlage am meisten beansprucht und liefert für die eingestellte Ausbeute immer den maximalen Permeatstrom. Der minimal einzustellende Druck ist der osmotische Gegendruck. Die Ausbeute stellt sich durch die Förderleistung der Rezirkulationspumpe ein. Die RCP regelt den Konzentratstrom. Nach Abbildung 4 ist zu erkennen, dass ein Anstieg der Ausbeute einen Anstieg  $X_A^S$  zur Folge hat und damit einen erhöhten osmotischen Gegendruck, was bei angenommen gleichem gewünschten Permeatstrom eine Erhöhung der Pumpenleistung der HP erfordert. Dabei wird die Ausbeute nach oben vom Scalingpotential begrenzt. Bei konstanten Permeatstrom folgt einer erhöhten Ausbeute eine erhöhte Pumpenleistung der HP, wohingegen eine tiefere Ausbeute einen höheren Feedstrom und damit einer höheren RCP Leistung folgt. Der dabei optimale Punkt liegt etwa bei einer Ausbeute von 30 %. Die Rezirkulationspumpe kann auf zwei Arten eingestellt werden. Sie kann einen konstanten Förderstrom liefern, oder regelt auf eine konstante Ausbeute.



konstante Ausbeute einstellt. Andererseits lässt sich die HP auf einen bestimmten Druck oder Volumenstrom regeln und die Rezirkulationspumpe regelt auf einen bestimmten Volumenstrom, der die gewünschte Ausbeute einstellt. Dies ist die bevorzugte Regelung [vgl. Abbildung 5] wie im vorherigen Abschnitt bei der Regelung auf konstanten Druck ausgeführt wurde. Als Primärstrategie ist die Regelung auf eine konstante Ausbeute wenig sinnvoll, da sie nicht regelt wie viel Produktwasser erzeugt werden soll, sondern nur eine der Randbedingungen. Als Sekundärregelung ist sie jedoch unausweichlich um die Grenzwerte der Membran und des RO-Prozesses einzuhalten, und optimale Effizienz zu erreichen.

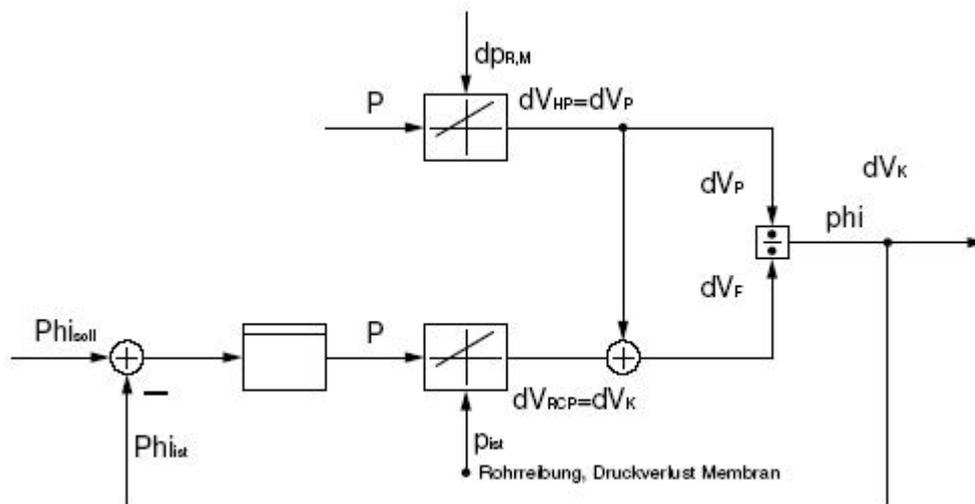
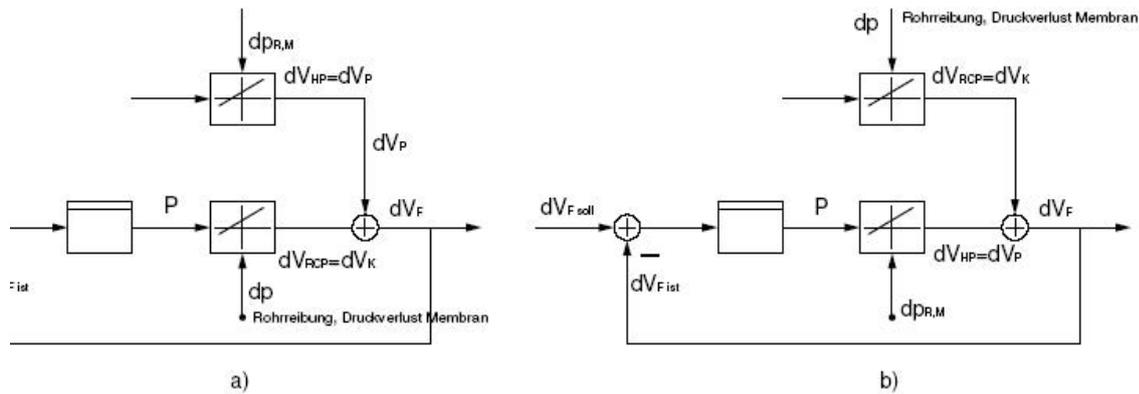


Abbildung 5: Blockschaltbild bei der Regelung auf konstante Ausbeute mit Annahme eines konst. Permeatstroms  $dV_P$

### 2.1.3.3 Regelung auf konstanten Feedstrom

Der Feedstrom setzt sich aus dem Förderstrom der Hochdruckpumpe sowie dem Förderstrom der Rezirkulationspumpe zusammen und lässt sich durch die beiden Pumpen regeln. Die Grenzen des Feedstroms sind durch die minimale Überströmung der Membran und die minimale Ausbeute bei maximalem Druck bestimmt. Zwischen diesen Grenzen kann der Feedstrom beliebig eingestellt werden.

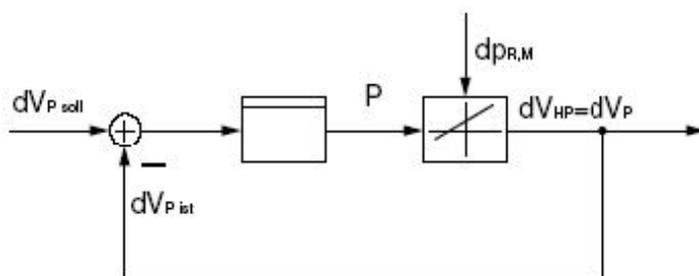
Da der Feedstrom durch beide Pumpen geliefert wird, lässt sich alleine durch die Regelung auf den Feedstrom keine Aussage treffen, wie viel Permeat erzeugt wird, da immer nur so viel Permeat geliefert wird wie die HP erzeugt. Wird nun der gesamte Feedstrom durch die RCP geliefert so entsteht kein Permeat. Daher ist eine alleinige Regelung auf den Feedstrom nicht sinnvoll. Alternativ kann man einen konstanten Konzentratstrom einstellen und dann mit der HP auf einen konstanten Feedstrom regeln. Dieser Ansatz ist ähnlich dem auf eine Druckregelung mit konstantem Förderstrom der RCP, allerdings mit den genannten Nachteilen. Weiter ist es möglich die RCP auf die optimale Ausbeute zu regeln und mit der HP auf einen konstanten Feedstrom. Vorteilhaft wären dabei konstante und damit wartungsarme Betriebsbedingungen, die je nach gewünschtem Feedstrom bzw. Permeatstrom jedoch nicht immer die gesamte zur Verfügung stehende Energie nutzen.



**Abbildung 6: Blockschaltbild der Regelung auf konstanten Feedstrom**

### 2.1.3.4 Regelung auf konstanten Permeatstrom

Der Permeatstrom lässt sich alleine durch den Förderstrom der Hochdruckpumpe regeln. Zu beachten ist die maximale Ausbeute, welche durch die Rezykulationspumpe eingestellt werden muss. Als Obergrenze des Permeatstroms gilt es, den maximal erlaubten Druck nicht zu überschreiten. So kann der Permeatstrom von Null bis zu seinem Maximum geregelt werden. Diese Regelung ist ähnlich wie die oben genannte Feedregelung, nur einfacher zu realisieren, da der Permeatstrom direkt von der HP erzeugt wird. Es kann an guten Einstrahlungstagen vorhergesagt werden, wie lange die Sonne mit welcher Intensität scheint und damit der Permeatstrom berechnet werden, um eine gewisse Menge an Trinkwasser pro Tag zu erhalten. So arbeitet die RO-Anlage den ganzen Tag über bei konstanten Durchflussbedingungen, was eine sehr materialschonende Betriebsweise darstellt. Diese Betriebsweise entspricht den der konventionell betriebenen RO-Anlagen, mit den Nachteilen der Überdimensionierung des Solargenerators und damit erhöhten Kosten.



**Abbildung 7: Blockschaltbild der Regelung auf konstanten Permeatstrom**

### 2.1.3.5 Regelung auf höchste Energieeffizienz

Die höchste Effizienz erhält man in den optimalen Betriebspunkten der einzelnen Pumpen. Da die Einstrahlung jedoch variiert, ist ein Betrieb in diesen Punkten meistens nicht möglich. Um bei einer gegebenen Einstrahlung das meiste Permeat aus dem Meerwasser zu erhalten, muss der Betriebspunkt der gesamten Anlage im Punkt der höchsten Effizienz liegen. Dafür muss der SEC minimiert werden. Dies erfordert Algorithmen, die den Betrieb der Anlage je nach Einstrahlung im besten SEC betreiben.

### **2.1.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der Analyse der Grundstrategien**

Als Produkt der Umkehrosmose möchte man Permeat erhalten. Anhand der Analyse kann dies bei einer Regelung der HP auf einen gewissen Permeatstrom oder einer Regelung auf einen Druck erreicht werden. Als Primärstrategie ist die Regelung auf eine konstante Ausbeute nicht sinnvoll, da sie durch die RCP nur den Konzentratstrom regelt und den Permeatstrom nicht beeinflusst. Eine Regelung auf eine konstante Ausbeute ist zum Einhalten der Randbedingungen der Betriebsführung wichtig. Ähnlich verhält es sich mit der Regelung auf einen konstanten Feedstrom, hier wird wiederum kein direkter Einfluss auf den Permeatstrom genommen sondern nur je nach eingestellter Ausbeute ein Permeatstrom erhalten. Die Regelung auf einen konstanten Feedstrom ist ebenfalls nur zum Einhalten von Randbedingungen wie dem Mindestüberfluss über die Membran sinnvoll. Bleiben zum Regeln nur der Druck oder der Permeatstrom. Im Prinzip sind dies zum Erlangen des Produkts Permeat fast identische Einflussparameter. Bei einer Regelung auf einen gewünschten Permeatstrom muss jedoch als Randbedingung der von der Membran maximal erlaubte Druck eingehalten werden. Es bietet sich an, statt die Randbedingung extra einzuhalten, gleich auf diesen maximalen Druck zu regeln. Unter nicht Berücksichtigung des Förderprozesses wird dabei mit einer Regelung auf den maximal erlaubten Druck und einer fest eingestellten Ausbeute bei einer spezifischen Einstrahlung das meiste Permeat erzeugt.

Als Ergebnis erhält man eine Regelung der HP auf den maximalen Druck und eine Regelung der RCP auf die optimale Ausbeute. Als Randbedingung muss beim Anfahren noch der Mindestüberfluss über die Membran eingehalten werden.

### **2.1.5 Idee der Betriebsführung**

Die im letzten genannten Ziele der Betriebsführung sind nicht immer alle erreichbar, sei es wegen des begrenzten Leistungsangebotes oder begrenzter technischer Möglichkeiten. Sie sollen jedoch so gut es geht erfüllt werden. Um das Ziel der möglichst maximalen Menge an Permeat pro Tag zu erreichen, wird die Grundstrategie der Regelung der HP auf den maximalen Druck und der RCP auf die optimale Ausbeute angewendet. Idee der Betriebsführung ist es, eine Regelung auf einen Soll-Druck, bei begrenztem Leistungsangebot durchzuführen. Der Soll-Druck ist dabei der von den mechanischen Eigenschaften der Membran maximal erlaubte Druck. Es lässt sich aus dem Druck  $p_F$  der transmembrane Massenstrom und damit der Permeatvolumenstrom einstellen.

Über das Pumpenkennfeld wird diesem Betriebspunkt eine Leistung zugeordnet, die Bedarfsleistung »P Bedarf«. Je nach solarem Strahlungsangebot kann diese Leistung vom Solargenerator zur Verfügung gestellt werden oder nicht. Da kein elektrischer Energiespeicher vorhanden ist, wird folgende Strategie umgesetzt (Abbildung 8):

Die Entsalzungseinheit bestehend aus der Hochdruckpumpe und der Rezirkulationspumpe wird auf ihren Betriebspunkt geregelt. Dabei wird die vom Solargenerator zur Verfügung gestellte Leistung zuerst auf die RCP und anschließend auf die HP verteilt. Es ist wichtig zuerst die RCP zu bedienen, um die Randbedingungen des Umkehrosmose-Prozesses einzuhalten. Wird der Leistungsbedarf durch den Solargenerator erfüllt, geht die restliche Leistung »P Verfügbar« an den Förderprozess. Ist nicht genug Leistung aus dem Solargenerator vorhanden, so wird eine

Regelabweichung toleriert. Ist durch »P Verfügbar« auch der Leistungsbedarf der Feedpumpe gedeckt, so wird das ungenutzte Leistungsangebot akzeptiert. Ist der Leistungsbedarf der Förderpumpe nicht gedeckt, so wird hier eine Regeldifferenz hingenommen. Der Anlagenaufbau erlaubt es, bis zu zwei zusätzliche RO-Membrane zuzuschalten. Damit vergrößert sich die aktive Membranfläche und wird dadurch bei konstantem Druck der transmembrane Massenstrom erhöht. Dies erfordert wiederum eine höhere Pumpenleistung. Der Leistungsbedarf der HP und der RCP steigen. Mit dem Zuschalten von zusätzlichen Membranen kann somit eine Anpassung des Betriebspunktes, bei erhöhtem Einstrahlungsangebot, in gewissen Grenzen vorgenommen werden. Zusätzlich zu dieser Betriebsführungsstrategie müssen die Randbedingungen beachtet und die Füllstandsregelungen des Feedtanks und des Permeattanks ausgeführt werden.

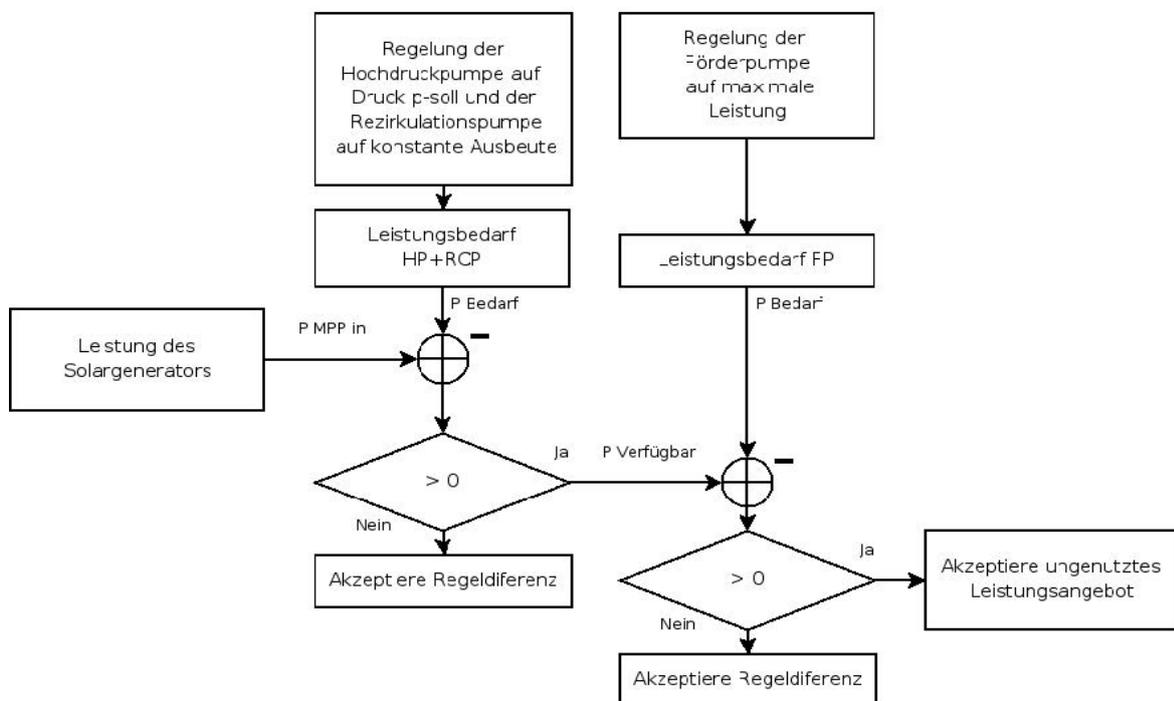
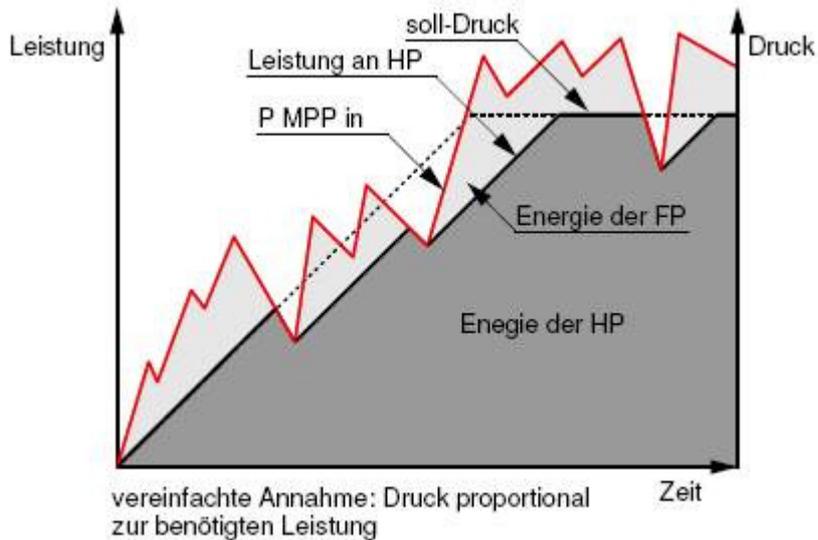


Abbildung 8: Strategie der Betriebsführung



**Abbildung 9: Regelstrategie**

In Abbildung 9 ist die Regelstrategie graphisch dargestellt. Ist das Leistungsangebot  $P_{MPP\_in}$  größer als der Leistungsbedarf der für die Regelung auf den Soll-Druck nötig ist (zur besseren Übersicht wurde Proportionalität der Bedarfsleistung mit dem Soll-Druck angenommen. Dies bedeutet im Schaubild, dass die Bedarfsleistung der selben Kurve folgt wie die Soll-Druck Kurve), so wird auf den Druck geregelt der am Anfang durch eine Rampe vorgegeben wird. Fällt die verfügbare Leistung unter die für den Soll-Druck benötigte, wird, sobald das Leistungsangebot wieder steigt, erneut rampenförmig der Soll-Druck mit der Zugabe von Leistung an die HP nachgeregelt. Die übrigbleibende Leistung wird an die FP abgegeben. Die Flächen stellen die verbrauchten Energien der HP und FP dar.

### 2.1.6 Optimierung

Die Idee hinter der optimierten Betriebsführung besteht darin, die RO-Anlage bei jeder Einstrahlungssituation im effizientesten Betriebspunkt zu fahren, und damit den spezifischen Energiebedarf (SEC) zu minimieren. Auch soll eine möglichst kontinuierlichere Betriebsweise mit einer möglichst idealen Aufteilung der Leistung erreicht werden. Die drei Pumpen, die Förderpumpe (FP), die Hochdruckpumpe (HP) und die Rezirkulationspumpe (RCP) stellen die Hauptverbraucher dar. Es muss für jede Einstrahlungssituation untersucht werden, wo der optimale Betriebspunkt der drei Pumpen liegt. Die RCP ist, da sie auf die Ausbeute geregelt wird, abhängig von dem Arbeitspunkt der Hochdruckpumpe. Aufgrund des Feedtanks, können hingegen die FP und die HP unabhängig voneinander betrieben werden. Daher wird zuerst der Entsalzungsprozess mit HP und RCP untersucht und anschließend der gemeinsame Förder- und Entsalzungsprozess. Hierbei muss untersucht werden, in welchem Verhältnis die von der Sonne zur Verfügung stehende Leistung auf die beiden Prozesse verteilt wird.

### 2.1.6.1 Entwicklung des Algorithmus

Das Ziel der Optimierung ist es, einen möglichst niedrigen spezifischen Energiebedarf zu erreichen. Dabei berechnet sich der spezifische Energiebedarf (SEC) der RO-Anlage aus den drei Leistungen der RCP, HP und FP und dem über eine gewisse Zeit  $t$  erzeugten Permeatvolumen  $V_p$ :

$$SEC = \frac{P_{RCP} + P_{HP} + P_{FP}}{V_p} \cdot t \quad (1)$$

Der SEC lässt sich dabei aufteilen in den Förderprozess und den Entsalzungsprozess. Dabei ist über lange Sicht das geförderte Permeatwasser gleich dem durch den Förderprozess geförderte Feed mal der Ausbeute. Allerdings kann zu unterschiedlichen Zeitpunkten gefördert und entsalzt werden. Daher ist der SEC des Förderprozesses nicht direkt vom aktuellen Permeatstrom abhängig, sondern vom aktuellen Förderstrom der Feedpumpe. Der Gesamt SEC der Anlage in Abhängigkeit der Förderströme berechnen sich zu:

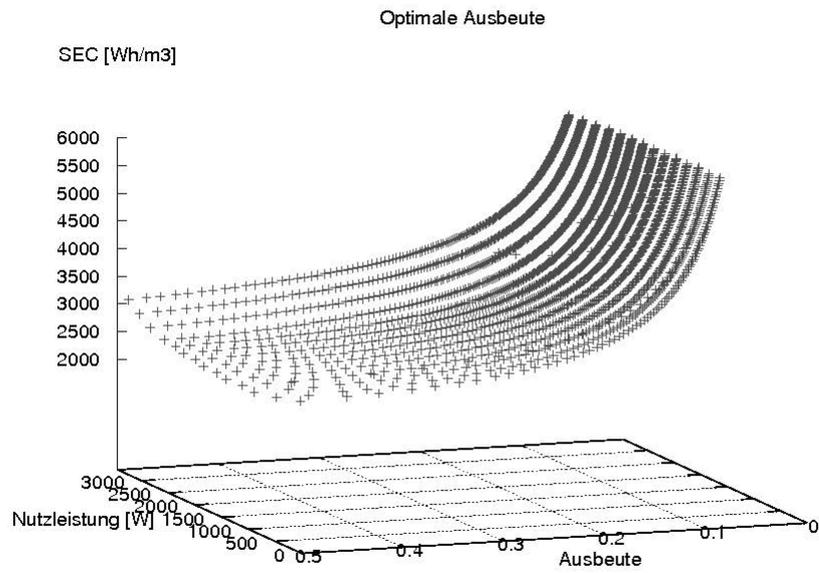
$$SEC_{\text{gesamt}} = SEC_{\text{Förderprozess}} + SEC_{\text{Entsalzung}} = \frac{P_{FP}}{V_{FP} \cdot \phi} + \frac{P_{RCP} + P_{HP}}{V_p} \quad (2)$$

Dabei ist im speziellen der SEC des Förderprozesses:

$$SEC_{\text{Förderprozess}} = \frac{P_{FP}}{V_p} \cdot t = \frac{P_{FP}}{V_{FP} \cdot \phi} = \frac{3P_{FP}}{\phi Q} \quad (3)$$

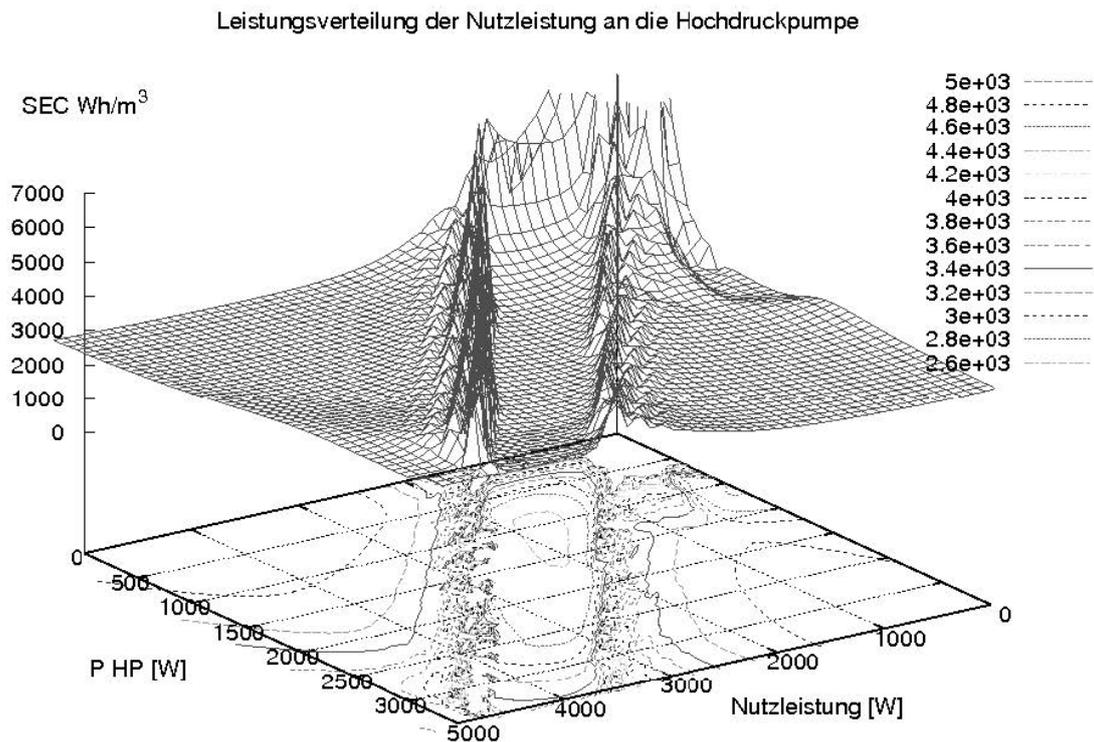
Zuerst wird der Entsalzungsprozess optimiert, dafür wird die FP im optimalen Betriebspunkt betrieben, dabei benötigt sie ungefähr 200 Wh/m<sup>3</sup>, der in den Feedtank gepumpt wird. Dieser Wert wird für die Optimierung des Entsalzungsprozesses als konstant angenommen. Die ankommende Leistung, im folgenden Nutzleistung oder nutzbare Leistung genannt, ist von der Sonne vorgegeben und verteilt sich auf  $P_{RCP}$  und  $P_{HP}$ . Da der Betriebspunkt der RCP aufgrund der Ausbeute, von dem der HP abhängig ist, wird die Optimierung über die Ausbeute bestimmt. In einem Testprogramm wurden dazu alle Möglichkeiten der Verteilung einer bestimmten ankommenden Leistung simuliert und die Ausbeute in Abhängigkeit des SEC dargestellt.

Abbildung 10 zeigt die Ergebnisse der Simulation. Es wird deutlich, dass der SEC bei Ausbeuten > 35% am kleinsten wird. Bei Betriebspunkten der FP außerhalb ihres Optimums wird dies noch verstärkt (z.B. 300Wh/m<sup>3</sup>). Man kann daher sagen, dass ein optimaler SEC für den Entsalzungsteil bei der vorliegenden Parametrisierung der RO-Anlage, bei Ausbeuten von 35% erreicht wird. Größere Ausbeuten sind aufgrund von Scaling nicht erlaubt. Um nun die optimale Leistungsverteilung für den gesamten RO-Prozess zu finden, werden die beiden Teilprozesse der Entsalzung und der Förderung gemeinsam betrachtet. Dabei gilt es Gl 3 zu minimieren. Bei der Minimierung der Gleichung wird hier die Ausbeute als konstant 35% angenommen. Bei variablen Werten von  $\phi$  muss die folgende Optimierung für jedes  $\phi$  durchgeführt werden.



**Abbildung 10: SEC in Abh. von der zur Verfügung stehenden Leistung und der Ausbeute**

Abbildung 11 zeigt den Zusammenhang zwischen dem besten SEC der Gesamtanlage, der zur Verfügung stehenden Nutzleistung die durch die solare Strahlung gewonnen wird und der Leistung der P HP. Das von hinten nach vorne verlaufende Tal besitzt im tiefsten Punkt den kleinsten SEC. Über die Höhenlinien in der xy-Ebene des Diagramms lassen sich je nach vorhandener Nutzleistung die der HP zugeordnete Teilleistung bestimmen. Die Bereiche neben dem Haupttal haben erkennbar auch sehr geringe SECs, in den Betriebspunkten links des Haupttals wird allerdings nicht die gesamte von der Sonne gelieferte Energie ausgenutzt, es würde weniger gefördert als möglich. Die Punkte rechts des Haupttals sind unzulässig für die HP, und die SEC Werte ergeben sich alleine durch die FP.



**Abbildung 11: Darstellung der der HP zugeordneten Leistung bei gegebener nutzbarer Leistung in Abh. des SEC**

## 2.1.7 Umsetzung der Betriebsführung maritime in Labview

### 2.1.7.1 UF-Control

Die Abbildung 12 zeigt die wichtigste Kontrolloberfläche für die Überwachung des Ultrafiltrationsprozesses der maritimen Anlage. Die Benutzeroberfläche ist Teil eines Steuerungsprogramms, welches in Labview realisiert wurde. Ersichtlich ist, dass die Förderpumpe und die Rückspülpumpe (BW-Pump) in Betrieb sind. Gleichzeitig sind die Ventile Filtrate\_valve und UF\_control\_valve\_set geschlossen. Es baut sich ein Druck im von 3,3 bar im Druckbehälter auf, der zur Rückspülung der MF-Module genutzt wird.

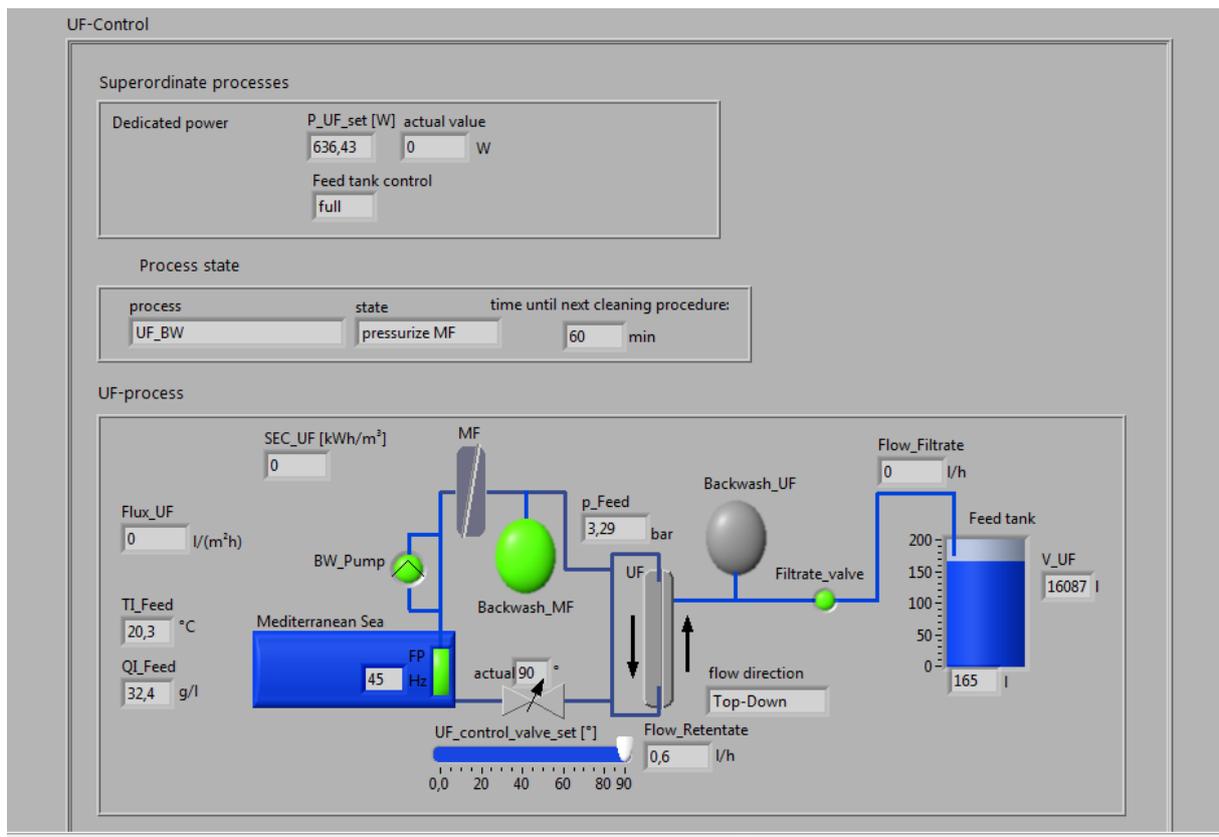


Abbildung 12: Oberfläche der Automatisierungssoftware Labview zur Kontrolle des Ultrafiltrations-prozesses der Anlage maritime: Rückspülung

In Abbildung 13 ist die Spülung der UF ersichtlich. Das Ventil UF\_Control wird geöffnet, die Rückspülpumpe abgeschaltet und die Membranen der MF und der UF gespült. Das Filtratventil bleibt weiterhin geschlossen, das Retentat wird zurückgeführt. Erkennbar ist, dass die Förderpumpe ihre Leistungsaufnahme reduziert hat.

Diese beiden Prozesse wiederholen sich alle 60 Minuten, der Rückspül- und Spülvorgang dauert 2 Minuten.

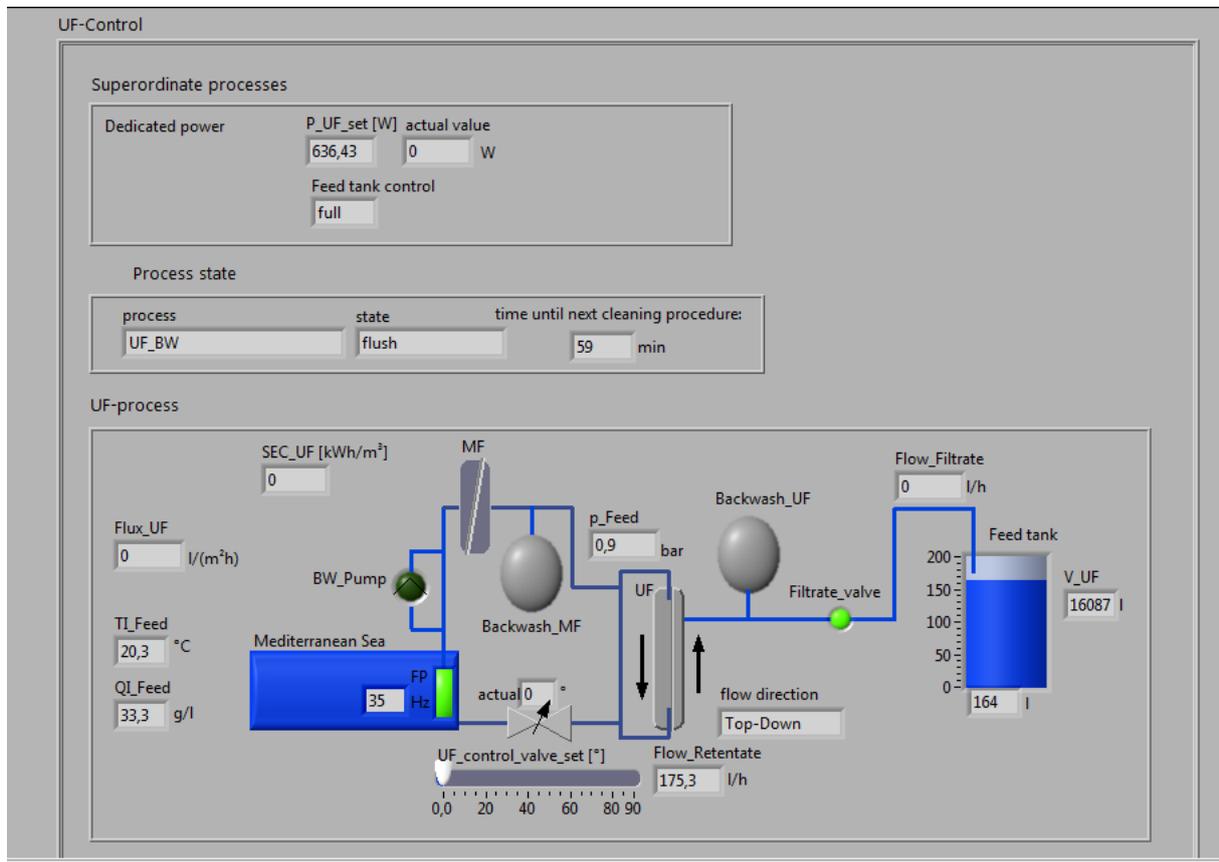


Abbildung 13: Spülung der UF

Der normale Betrieb der UF-Anlage ist in der Abbildung 14 zu sehen. Das Filtratventil wurde geöffnet, es fließt ein Volumenstrom von mehr als 100 l/h. Zu erkennen ist auch, dass sich die Fließrichtung im UF-Modul nach der Spülung von Top-Down nach Bottom-Up geändert hat. Diese Ventile verfahren sich nach jedem Spülvorgang.

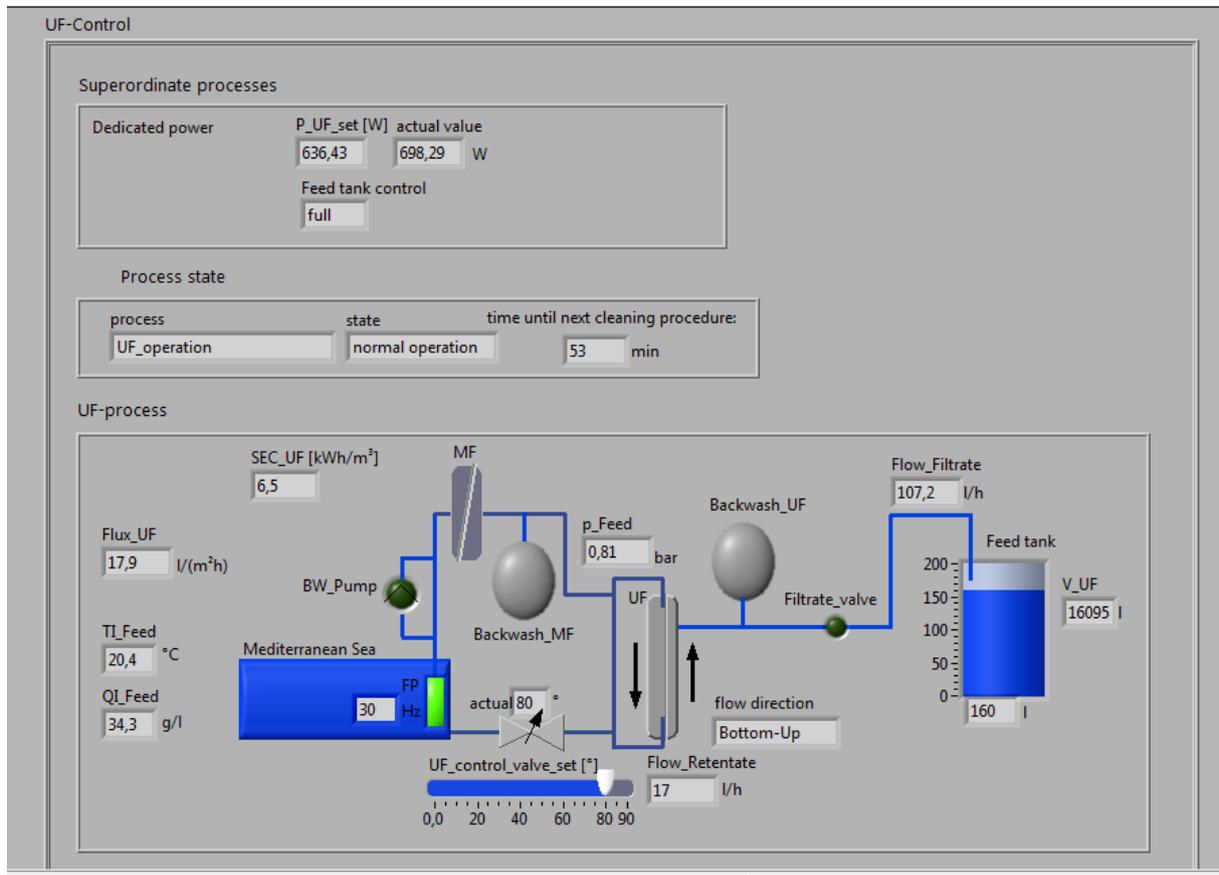
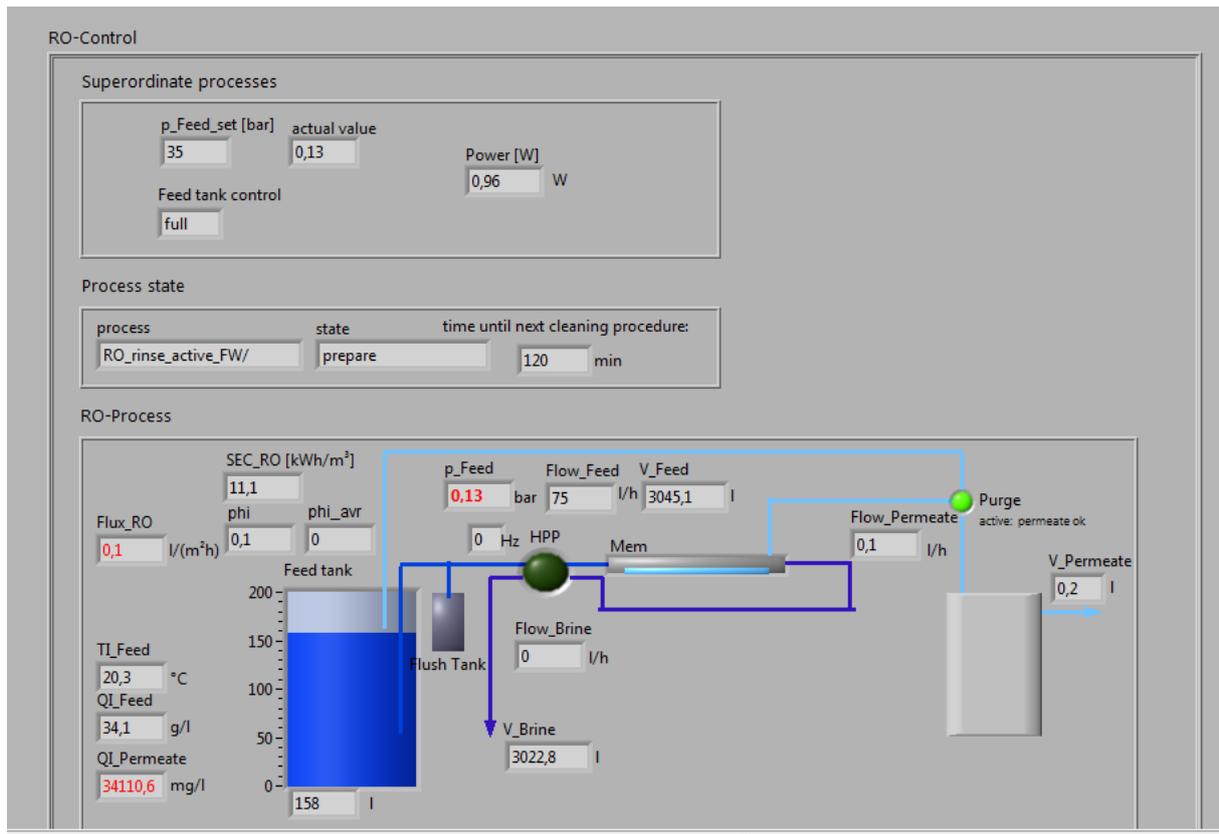


Abbildung 14: Normalbetrieb

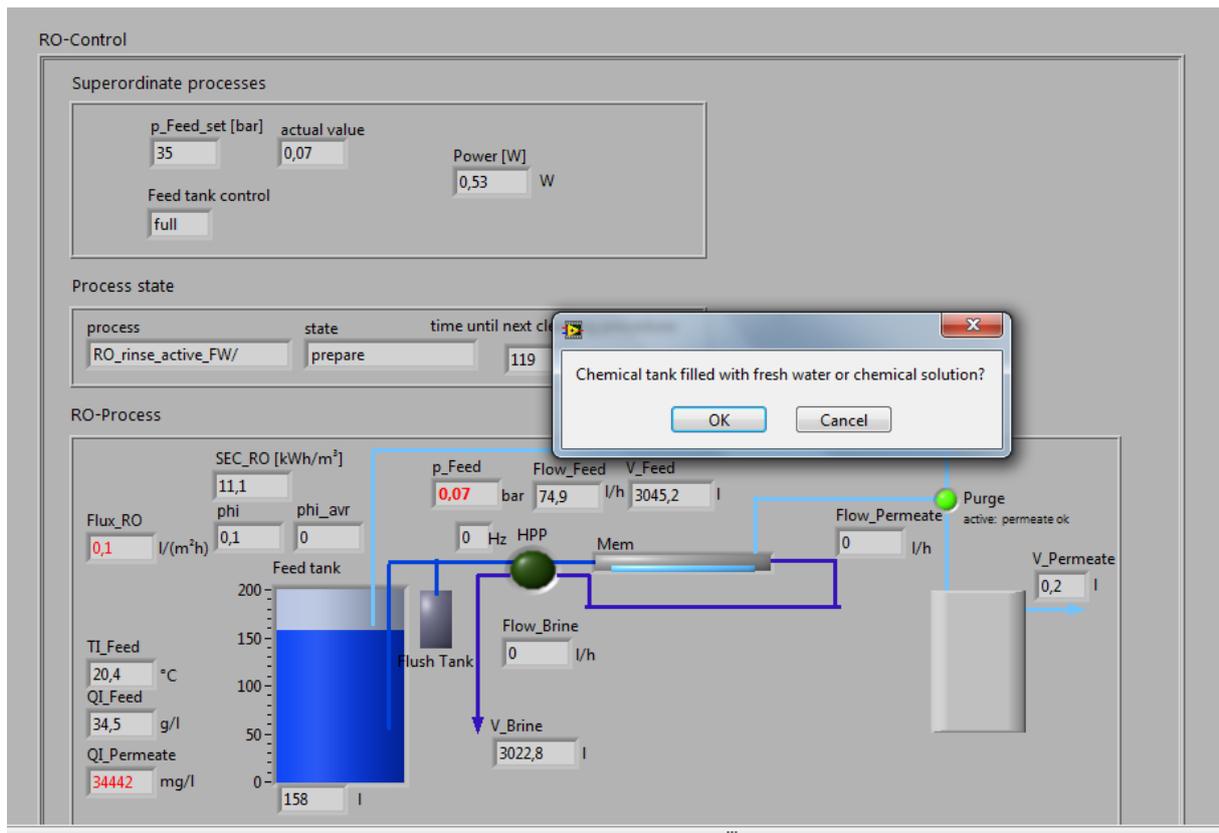
### 2.1.7.2 RO-Control

Die Kontrolloberfläche für die Überwachung des RO-Prozesses ist in Abbildung 15 dargestellt. Oben (im Bereich Superordinate processes) sind die übergeordneten Daten ersichtlich und wie der Status der Kontrollfunktion des Feedtanks ist. Mittig im Bereich process state wird der jeweilige aktuelle Teilprozess angezeigt, sowie die verbleibende Zeit bis zur nächsten Spülung. Im unteren Bereich sind alle wichtigen Daten des RO-Prozesses in übersichtlicher graphischer Form zur Kontrolle angeordnet.



**Abbildung 15:** Oberfläche der Automatisierungssoftware Labview zur Kontrolle des Umkehrosmoseprozesses der Anlage maritime

Die Visualisierung des Prozesses kann natürlich für ein Produkt noch kunden- und benutzerfreundlich angepasst werden und je nach Wunsch und technischer Fähigkeit beliebig vereinfacht werden.



**Abbildung 16: Abfrage der Reinigung**

In Abbildung 16 ist ein Teil der Reinigung dargestellt, wobei manuell bestätigt werden soll, ob die Reinigungstanks mit Wasser oder einer chemischen Reinigungslösung gefüllt sind. Erst nach der Bestätigung fährt der Reinigungsprozess automatisch fort.

Der Prozess der anschließenden Spülung der Membran ist in Abbildung 17 ersichtlich. Die HPP fährt hoch und spült die Membran mit Wasser aus dem Feedtank für eine vorgegebene Zeit. Das Purgeventil ist dabei so ausgerichtet, dass das entstehende Permeat wieder in den Feedtank zurückgeführt wird.

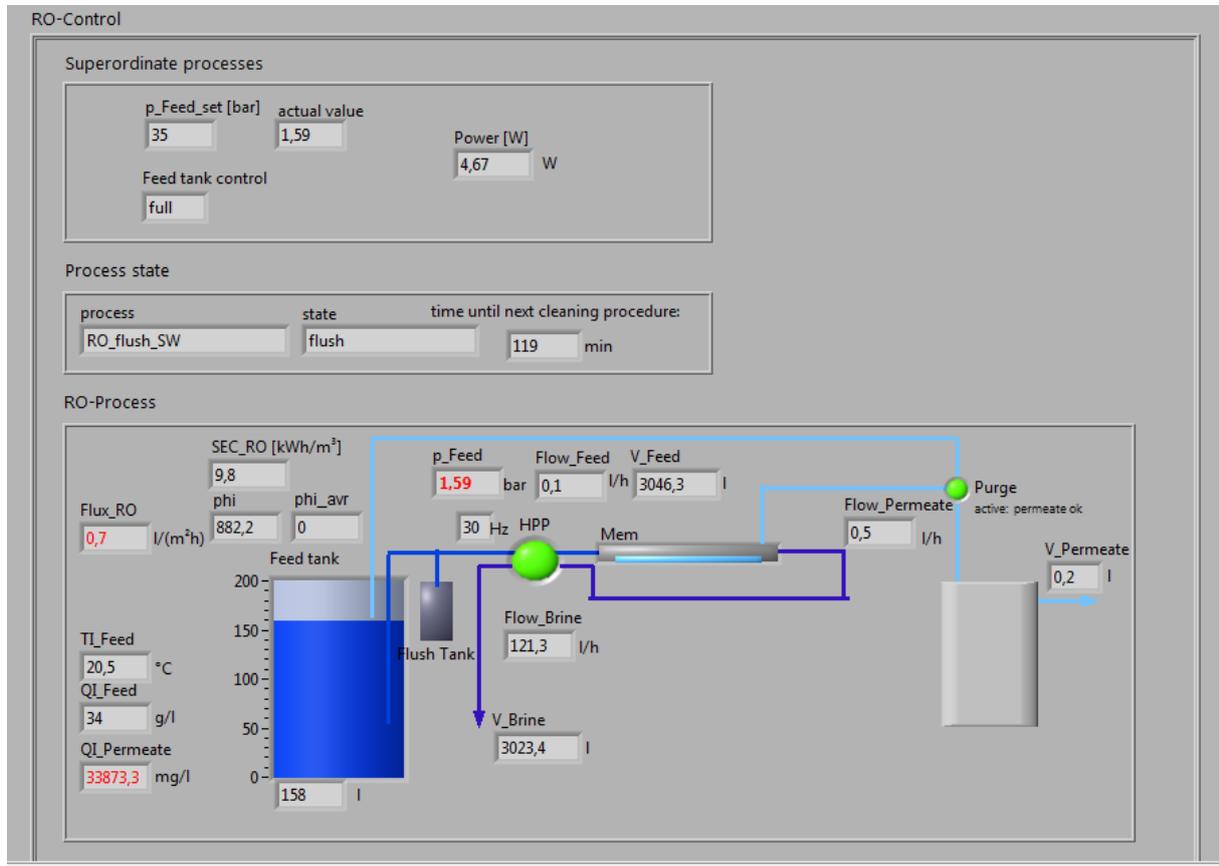
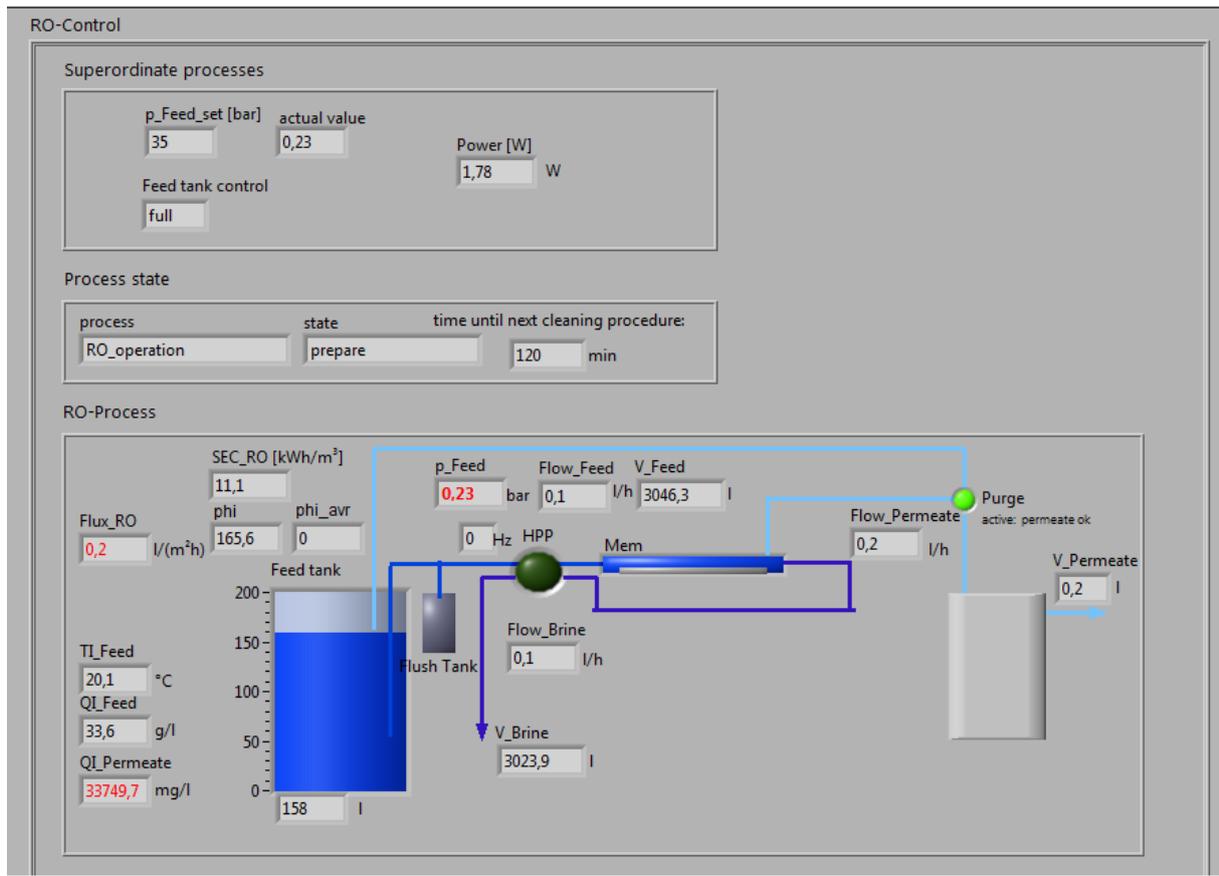


Abbildung 17: Spülung



**Abbildung 18: Vorbereiten des Normalbetriebes**

Nach der Spülung wird der Normalbetrieb vorbereitet (Abbildung 18). Ein Ventil an der HPP wird geschaltet, so dass sich ein hoher Druck aufbauen kann und die Druckrückgewinnung arbeitet. Dies ist auf der Kontrolloberfläche durch die Farbänderung der Membran in blau ersichtlich.

## 2.2 Erzielte Ergebnisse

### 2.2.1 Energierückgewinnung für beide RO-Anlagen

Während den Untersuchungen im AP 3.1 stellte sich im Hause Gather und an der Hochschule Kempten heraus, dass von dem ursprünglich geplanten System zur Energierückgewinnung in beiden Anlagen mittels mechanischer Kopplung eines hydraulischen Motors am Prozessausgang und einer Trochoidenpumpe am Prozesseingang Abstand genommen werden müsse, da die gewünschte mechanische Kopplung nicht zufriedenstellend realisiert werden könne. Parallel wurde mit der Weiterentwicklung der vorhandenen Mitteldruck-Trochoidenpumpe der Firma Gather für Drücke über 25bar fortgeföhren. Der Betrieb in nicht schmierenden Medien bei hohen Drücken sollte mit Hilfe von oberflächenbeschichteten Bauteilen vereinfacht werden. Allerdings traten Probleme bezüglich Verschleiß und Druckoszillation auf. Diese Probleme konnten bis heute nicht behoben werden. Es musste eine Alternative für eine Hochdruckpumpe in beiden Systemen gewählt werden.

Da auch die zu entwickelnden Systeme zur Energierückgewinnung ursprünglich auf der Trochoidenpumpe basierten, musste innerhalb der Arbeitspaketen 3.3 und 3.4 ebenfalls nach Alternativen gesucht werden. Am Markt waren nach wie vor keine geeigneten Geräte erhältlich. Erst Ende 2009 bzw. Anfang 2010 wurden zwei neue kompakte Systeme der Firmen Ocean Pacific und Spectra Watermakers (beide aus den USA) vorgestellt, welche jedoch grundsätzlich nur durch Umkonstruktionen zumindest für den Einsatz im größeren System seaside denkbar gewesen wären. Da eine wichtiger Voraussetzung, eine variable Ausbeuterate im Entsalzungsprozess, mit den bekannt gewordenen neuen Systemen noch immer nicht möglich gewesen wäre, wurde mit der Entwicklung einer eigenen Einheit zur Energierückgewinnung fortgeföhren.

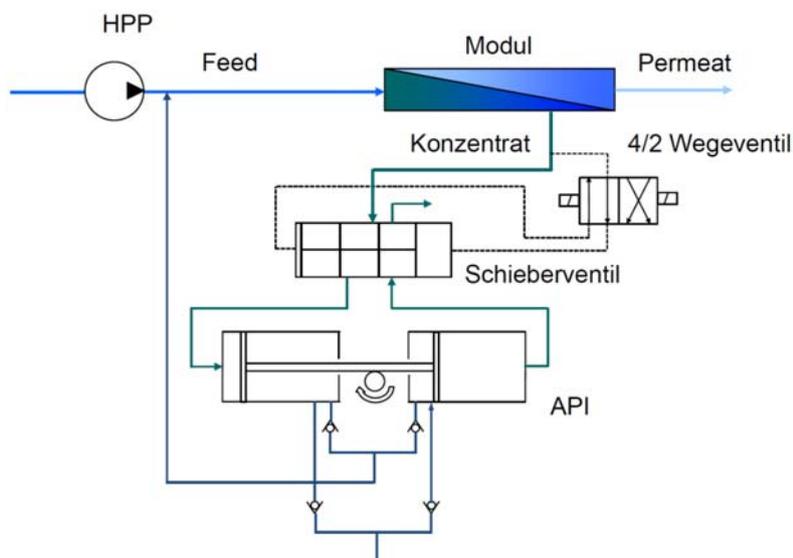
Die Konzepte zur Energierückgewinnung mussten in der Folge grundlegend überarbeitet werden. Für die Anlage seaside führte dies zur Wahl eines ventilgesteuerten isobaren Druckaustauschers mit Rezirkulationspumpe. In der Anlage maritime sollte mit dem vorhandenen System der Firma Katadyn ausgerüstet werden. Unabhängig davon wurde mit der Entwicklung innovativer Energierückgewinnungssysteme für beide Anlagen fortgeföhren, woraus die im Folgenden dargestellten Konzepte entstanden.

#### 2.2.1.1 System seaside

Es entstand der im dritten Zwischenbericht vorgestellte Ansatz eines isobaren Druckaustauschers mit integriertem elektromagnetischem Linearantrieb. Wie im vierten Zwischenbericht vorgestellt, konnte das Problem der geringen erzielbaren Antriebskraft nicht mit verhältnismäßigen technischen Mitteln gelöst werden, was zu einem neuen Ansatz des „aktiven Druckintensivierers“ (API) führte. Der Antrieb sollte nun mechanisch durch eine Zahnstange realisiert werden, welche über ein Getriebe durch einen Elektromotor angetrieben wird. Die Anlage sollte fortan aus Hochdruckpumpe (HPP), Entsalzungsmoduln, einem pilotgesteuerten Ventil und dem API bestehen. Rohre für den isobaren Druckaustausch und eine Rezirkulationspumpe hätten eingespart werden können.

Das entsprechende Anlagenschema ist in Abbildung 19 dargestellt. Die Antriebskraft konnte mittels einer hydraulischen Übersetzung über den Kolben gering gehalten werden. Die Kernidee war, das Konzentrat über ein pilotgesteuertes Schieberventil auf die Kolbenfläche eines von zwei

gegenläufig angeordneten, mechanisch untereinander verbundenen Differentialzylindern zu leiten. In der Abbildung wird die linke Kolbenkammer mit Konzentrat gefüllt, während in der angrenzenden Kolbenringkammer vorgelagerter Feed in Richtung Entsalzungsmodul verdrängt wird. Alleine die hydraulische Übersetzung kann Anlagendruckverluste ausgleichen, wodurch der Motor entlastet oder (idealer Weise) überflüssig wird. Durch dieselbe Bewegung wird währenddessen aus den gegenüberliegenden Kammern des rechten Zylinders das nun drucklose Konzentrat ausgeworfen und neuer Feed eingesogen.



**Abbildung 19: Anlagenschema mit API**

Die gewünschten Halbzeuge jedoch waren in den benötigten Abmessungen unverhältnismäßig kostenintensiv und überhaupt nur mit langen Vorlaufzeiten von etwa sechs Monaten verfügbar. Auch die Fertigungskosten waren enorm. Die Gesamtkosten für einen Prototyp im System seaside hätten sich auf über €15.000 belaufen.

Der Bau eines Prototypens wurde als unwirtschaftlich eingeschätzt und für das System seaside die Energierückgewinnung mittels ventilgesteuertem isobaren Druckaustauscher festgelegt. Eine nun doch benötigte Rezykulationspumpe wurde von der Firma Gather in Form einer Peripheralaradpumpe zur Verfügung gestellt. Für die Ansteuerung beider Rohre für den Druckaustausch wurde ein magnetgesteuertes 4/2-Wegeventil des britischen Anbieters Waterhydraulics gewählt. Dies war das einzige verfügbare Ventil, welches die Anforderungen hinsichtlich Material und Schaltzeit zu erfüllen schien. Jedoch stellte sich im Betrieb heraus, dass es während des Umschaltens durch interne Leckagen zum Druckabfall im Entsalzungsprozess kam, was sich äußert unvorteilhaft auf den Anlagenbetrieb auswirkte. Durch die Anschaffung eines weiteren Sperrventils der Firma Co-Ax, welches am niederdruckseitigen Ausgang des Wegeventils installiert wurde und diesen somit während des Schaltens blockiert, wurde das Problem gelöst.

Wie erwähnt hatte die durch Gather vorangetriebene Entwicklung der Hochdruck-Trochoidenpumpe zu Ende der Projektlaufzeit noch immer nicht den erwarteten technischen Stand erlangt, weshalb eine Dreikolben-Plungerpumpe der Firma Cat Pumps verwendet wurde. Das finale Anlagenschema der Anlage seaside ist in

Abbildung 20 (siehe S. 45) dargestellt.



### 2.2.1.2 System maritime

Wie oben beschrieben traten Komplikationen bei der Entwicklung der Trochoidenpumpe auf, welche sowohl als Hochdruckpumpe als auch als Gerät zur Energierückgewinnung bei flexibler Ausbeuterate vorgesehen war. Aus diesem Grunde wurde an der Weiterentwicklung des bestehenden Einkolben-Pumpenkonzeptes der Firma Katadyn gearbeitet.

Der Ansatz der variablen Ausbeuterate, musste zu Gunsten eines verhältnismäßig einfachen Systemaufbaus verworfen werden. Ein erstes Anliegen war die Umstellung des bisher ölgeschmierten Exzentertriebes zwischen Elektromotor und Kolbenstange auf einen Trockenlauf, da durch beschädigte Dichtungen des Öfteren Ölleckagen bei Kunden aufgetreten waren. Durch den Einsatz eines dauergeschmierten Nadellagers zwischen Pleuel und Exzenter und einer PTFE-beschichteten Gleitlagerbuchse an der stark beanspruchten Verstiftung zwischen Pleuel und Kolbenstange konnte mit geringem Aufwand ein sehr zufriedenstellendes Ergebnis erzielt werden.

Mittelfristig ist die Firma Katadyn ebenso bestrebt, die serienmäßig in ihren Kleinentsalzern verwendeten Einkolbenpumpen mit festgelegter Ausbeuterate und integrierter Energierückgewinnung durch eine neue Zweikolbenpumpe abzulösen. Nach dem Schema in Abbildung 21 wurde ein Prototyp gefertigt und getestet. Die Ein- und Auslässe der Volumenströme in die Kolbenkammern lassen sich über zwei passive Schieberventile regeln, welche durch die angetriebenen Kolben verfahren werden. Wie bei dem vorhandenen Einkolbensystem wirkt die potentielle Energie, welche im Konzentrat des Entsalzungsprozesses gespeichert ist, unterstützend beim Verfahren der Kolben, welche reziprok Feed auswerfen bzw. Konzentrat aufnehmen.

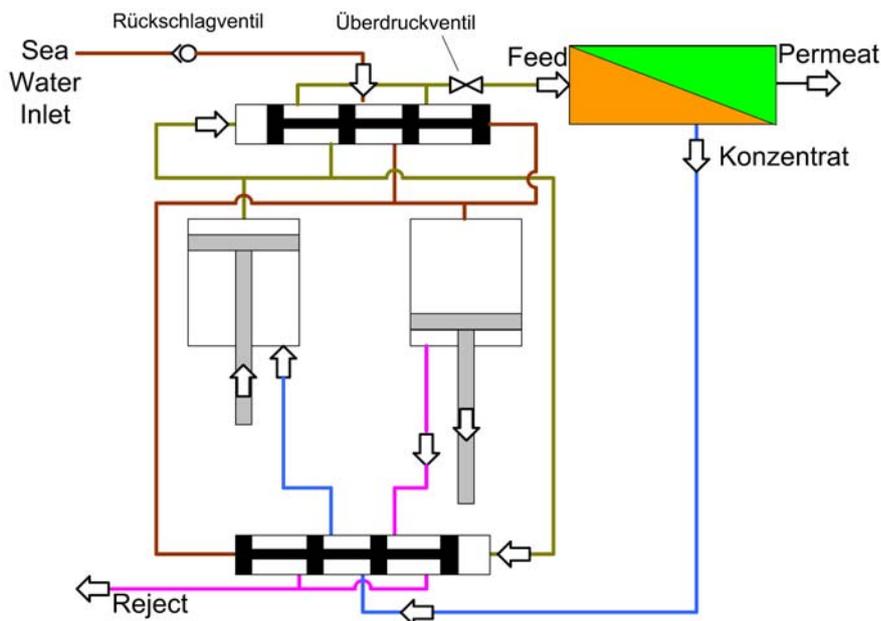
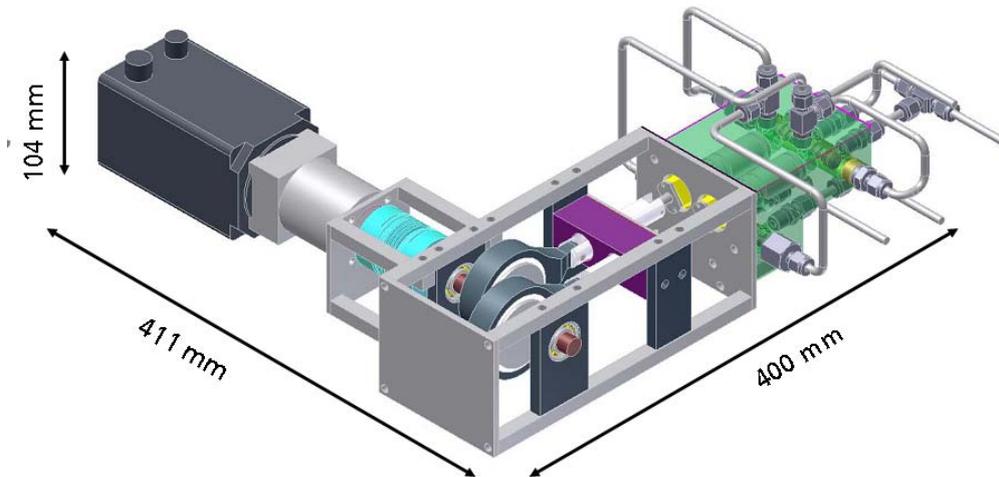


Abbildung 21: Anlagenschema mit Zweikolbenpumpe

Das in Abbildung 21 dargestellte Schema wurde in einem Prototypen umgesetzt und im Hause Katadyn getestet. Ein CAD-Modell des Prototypen ist in Abbildung 22 sichtbar.



**Abbildung 22: Entwickelte Zweikolbenpumpe mit integrierter Energierückgewinnung**

Nach zunächst positiv verlaufenden Tests kam es zum Bersten des Pumpenkörpers, wodurch weiterer Entwicklungsaufwand offensichtlich wurde, welcher nicht innerhalb der Projektlaufzeit erbracht werden konnte. Die Anlage maritime wurde deshalb bis auf weiteres mit der bereits vorhandenen Einkolbenpumpe im Trockenlauf gemäß Abbildung 23 (siehe S. 48) realisiert.

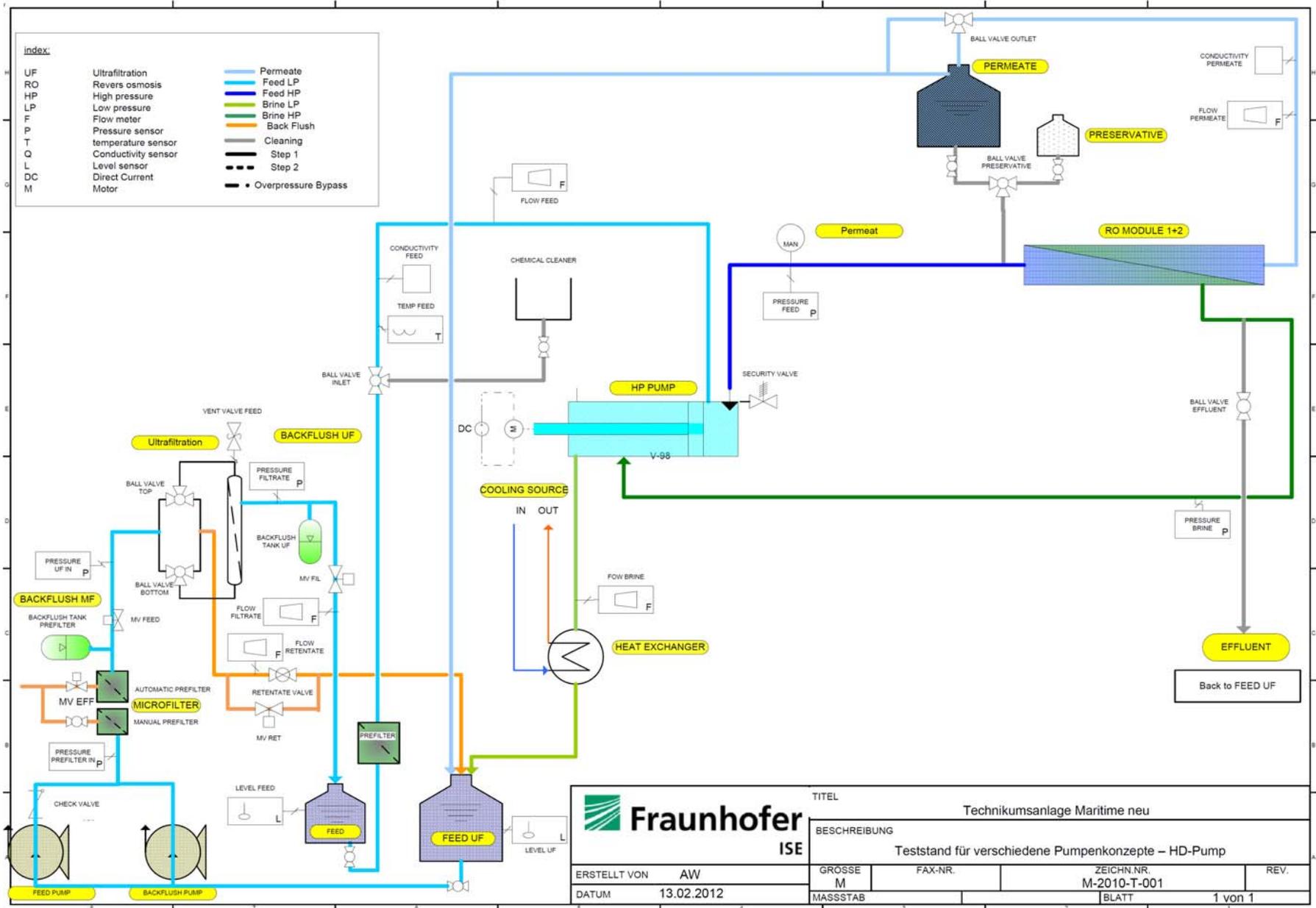


Abbildung 23: Finales RO-Anlagenschema maritime



Wie oben im Bild zu erkennen, sollte es ursprünglich durch die neuen Komponenten von Pairan möglich werden, den PV-Generator direkt zum Betrieb der RO-Anlage zu nutzen. Alle Lasten wären so entweder über zwischengeschaltete Frequenzumrichter (FU) angesteuert oder über nachgeschaltete DC-DC-Wandler versorgt worden.

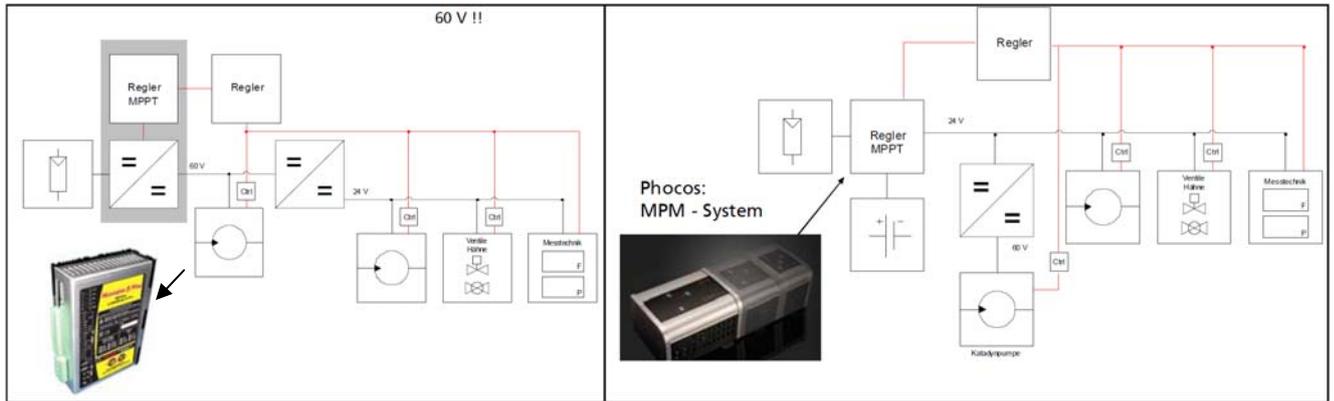
Das Ziel einer batterielosen Energieversorgung konnte bedauerlicher Weise insofern nicht umgesetzt werden, als dass für den im Bild unten dargestellte Aufbau ein Batteriespeicher von 150 Ah benötigt wird. Dies liegt daran, dass der Wechselrichter „Sunny Boy“ zur Einspeisung von PV-Anlagen in das öffentliche Netz konzipiert wurde, wodurch immer eine AC-Referenzspannung vorhanden ist, ohne welche das Gerät nicht arbeiten kann. Diese Referenzspannung muss bei der vorliegenden Anwendung deshalb durch einen „Sunny Island“ erzeugt werden, auf welche sich nun der „Sunny Boy“ synchronisieren und die Leistung des PV-Generators in die RO-Anlage einspeisen kann. Für den Anlagenbetrieb steht maximal die Nennleistung von  $7,6 \text{ kW}_{\text{PV}}$  zur Verfügung.

Hierbei muss betont werden, dass der Batteriespeicher dabei lediglich als Spannungsquelle, kapazitiver Puffer des „Sunny Island“ sowie zur Versorgung beider Wechselrichter im Standby-Betrieb dient. Die Energieversorgung der gesamten Anlage wird vollständig über den „Sunny Boy“ durch die eingespeiste Energie aus der PV-Anlage gewährleistet. Der Batteriespeicher wird hierfür nicht verwendet. Im Falle einer Abnahme des Leistungsangebotes aus der PV – etwa durch eine vorbeiziehende Wolke – wird der RO-Prozess sofort herunter geregelt, so dass es nicht zu einer Entladung des Batteriespeichers kommt.

Durch den „Sunny Boy“ wird innerhalb der Anlage eine einphasige AC-Spannungsversorgung bei 230V ermöglicht. An diese sind drei FUs angeschlossen, welche intern ein frequenzvariables dreiphasiges Netz für die Ansteuerung jeweils einer Pumpe generieren. So lassen sich die Brunnenpumpe zur Förderung des Meerwassers durch die Ultrafiltration (UF) in einen Vorlagentank, die Hochdruckpumpe zum Betrieb des Hochdruckkreislaufes des RO-Prozesses sowie die Rezirkulationspumpe zur Regelung der Ausbeuterate des Entsalzungsprozesses getrennt ansteuern. Ein AC-DC-Wandler, ebenfalls durch den „Sunny Boy“ gespeist, baut ein 24V-DC-Netz auf und ermöglicht die Spannungsversorgung der kompletten Messtechnik, der Wegeventile im Hoch- und Niederdruckteil sowie der Befüllpumpe zum Auswurf des drucklosen Konzentrates aus jeweils einem der beiden Druckaustauscherrohre.

### 2.2.2.2 Energieversorgung maritime

Ebenso wie für das System seaside musste auf Grund der nicht verfügbaren neuartigen Leistungselektronik eine Alternative für die Energieversorgung gefunden werden. Auch hier ergab sich das Problem, dass auf einen Batteriespeicher zur Spannungsreferenz zurückgegriffen werden musste, wie aus Abbildung 25 hervorgeht.



**Abbildung 25: Soll-Ist-Vergleich der leistungselektronischen Komponenten der Anlage maritime mit Ursprünglich geplantem Schema (links) und letztendliche Umsetzung (rechts)**

Auf Grund der verhältnismäßig geringeren Leistungsaufnahmen der Komponenten der Anlage maritime war deren Versorgung rein auf DC-Basis bei 60V geplant. Neben der erwarteten neuen Leistungselektronik wären nur ein Regler für einen EC-Motor zum Betrieb der Einkolbenpumpe sowie ein DC-DC-Wandler für die 24V-Spannungsversorgung der Messtechnik und der Ventile benötigt worden.

Eine kompakte Alternative ergab sich durch das „MPM-System“ des Anbieters Phocos. Das System besteht aus einem MPP-Tracker, an welchen die PV-Anlage mit  $0,9 \text{ kW}_{\text{PV}}$  angeschlossen ist. Nachgeschaltet sind ein kleiner Batteriespeicher mit 20 Ah und ein Entladeregler, an welchen die Anlagenelektronik angeschlossen ist. Der Batteriespeicher wurde notwendig, da es sonst bei Schwankungen des Leistungsangebotes auf der PV-Seite oder schneller Regelung der Lasten zur Abschaltung durch den Entladeregler kam. Die Ursache hierfür ist der MPP-Tracker, welcher permanent das Spannungsniveau nachregelt, wodurch es ohne Batteriespeicher im Zeitraum von Millisekunden zur Unterbrechung der Spannungsversorgung des Entladereglers kommen kann. Der Entladeregler erkennt dann den vermeidlich kritischen Ladezustand der Batterie und regelt ab. Um diese Umschaltzeiten des MPP-Trackers zu puffern, wurde zunächst versucht, den Batteriespeicher durch Dünnschichtkondensatoren mit flüssigem Elektrolyt (sog. Supercaps) zu ersetzen, welche die Lasten sowie den Entladeregler in dieser Zeit versorgen sollten. Die benötigte Kapazität von über 6 F jedoch führte zu größeren Kosten als zwei handelsübliche, robusten 12V-Batterien, wie sie etwa in Motorrädern eingesetzt werden. Diese sind für die Sicherstellung der Versorgung während des Umschaltens des MPP-Trackers bestens geeignet und zudem recht kostengünstig.

### 2.2.3 Feldtest auf Zypern

Nachdem die Endmontage beider Anlagen am Fraunhofer ISE erfolgt war und die Systeme über mehrere Monate hinweg getestet werden konnten, wurden diese Ende Juli 2011 nach Limassol verschifft. Die größere Anlage seaside wurde in einem Seecontainer installiert, so dass sie quasi schlüsselfertig versandt werden konnte. Für den Transport der Anlage maritime wurde ein weiterer Seecontainer erworben, in welchem zusätzlich Materialien und Komponenten, wie beispielsweise der PV-Generator und dessen Aufständerung, untergebracht werden konnten. Als Standort konnte dank freundlicher Unterstützung durch das Cyprus Institute dessen neu eröffnetes Testgelände „Pentakomo Lab“ nahe Governors Beach im Süden Zyperns gewählt werden. Die notwendigen Infrastrukturmaßnahmen im Vorfeld der Installation wurden gemeinsam von dem hiesigen Projektkonsortium und dem Cyprus Institute getragen. Die Arbeiten wurden von zyprischen Unternehmen durchgeführt, wobei diese von einem lokalen Partner von TBB vor Ort überwacht wurden.

Wie in Abbildung 26 erkennbar, liegt das Testgelände über dem Meeresspiegel in einiger Entfernung zur Küste, wodurch zwei Leitungen zur Förderung des zulaufenden Feed sowie des ablaufenden Konzentrates erforderlich wurden. Zur Meerwasserentnahme wurde ein Brunnen in Küstennähe angelegt (Beach Well). Das zulaufende Wasser wird zunächst durch den grobkörnigen Kies und Sand der Küste gefiltert, bevor es in den Brunnen eintritt. Eine im Brunnen installierte Tauchpumpe fördert das Meerwasser durch eine 120m lange Rohrleitung auf das ca. 20m höher gelegene Testgelände. Um die Leitungen zu schützen, wurden diese in Kanälen durch das Erdreich verlegt. Auf dem Testgelände selbst mussten diverse Baggerarbeiten zur Begradigung und Verlegung der Fundamente der beiden Seecontainer und der PV-Generatoren durchgeführt werden.



**Abbildung 26: Beach Well zur Meerwasserentnahme (A) und PV-RO-Systeme auf dem Testgelände (B), Blickrichtung: Norden**



**Abbildung 27: PV-Generatoren beider Systeme (A), Rohranschlüsse zum Meer (B) sowie RO-Anlagen seaside (C) und maritime (D), Blickrichtung: Westen**

Abbildung 27 zeigt das Testgelände mit den PV-Generatoren und den in den beiden Seecontainern untergebrachten RO-Anlagen. Dort angekommen wird das Meerwasser zunächst in den rechten der beiden Seecontainer geleitet. Mittels einer Ultrafiltration wird ein Großteil dieses Volumenstromes gereinigt und anschließend in einem Vorlagetank für den Entsalzungsprozess der Anlage seaside gespeichert. Der übrige Volumenstrom fließt aus der Ultrafiltration unbehandelt in einen Tank im linken Container, aus welchem wiederum die Ultrafiltration der kleineren Anlage maritime gespeist wird. Das produzierte Trinkwasser beider Anlagen wird in einem Sammeltank im linken Container aufgefangen und kann von dort jederzeit entnommen werden. Das Konzentrat beider Anlagen fließt zusammen in Richtung Küste, wo es ca. 50m vom Brunnen entfernt zurück ins Meer geleitet wird.

Bis auf weiteres musste der maximal produzierbare Permeatvolumenstrom der Anlage seaside auf etwa 45% des geplanten Wertes von 1.100 Litern pro Stunde reduziert werden, wodurch die angestrebten 5 m<sup>3</sup> an Tagesproduktion derzeit nicht erreicht werden können. Die beschaffte Befüllpumpe zum Auswerfen des drucklosen Konzentrates aus den isobaren Druckaustauscherröhren brachte am Feldteststandort nicht den benötigten Volumenstrom. Die gesamte Anlage musste deshalb in Ihrer Leistung gedrosselt werden. Die Suche nach einer leistungsfähigeren, günstigen und meerwasserbeständigen DC-Pumpe war bisweilen nicht erfolgreich.

#### **2.2.4 Automatisierter Anlagenbetrieb**

Die aus technischer Sicht bemerkenswerteste Eigenschaft des Anlagenbetriebes ergibt sich durch die photovoltaische Direktversorgung beider RO-Anlagen, wobei kein Batteriespeicher verwendet wird: bei steigendem Leistungsangebot kann die Prozessleistung entsprechend erhöht werden, bei sinkendem Leistungsangebot muss die Prozessleistung in Echtzeit verringert werden, um keinen Zusammenbruch der Spannungsversorgung zu provozieren. Durch eine manuelle Steuerung kann dies nicht erreicht werden, sodass es komplexer Regelungstechnik bedarf, welche alle Lasten überwacht und deren Verbrauch entsprechend eines vorgegebenen Betriebsbereiches sowie diverser Rahmenbedingungen dem Energieangebot angleicht.

Bei ausreichendem Leistungsangebot soll möglichst viel Meerwasser in den Anlagen in der Ultrafiltration vorbehandelt und in Vorlagetanks für den Entsalzungsprozess geleitet werden. Die Umkehrosmose kann währenddessen bei Volllast betrieben werden. Sinkt das Leistungsangebot

aus der PV, so müssen entsprechende Prioritäten gesetzt werden. Ist der Vorlagetank bspw. ausreichend gefüllt um die Umkehrosmose ausreichend lange zu betreiben, so kann die gesamte verfügbare Leistung für die Entsalzung genutzt werden. Ist der Vorlagetank hingegen beinahe leer, so wird die Ultrafiltration bevorzugt betrieben, um einen anschließenden Stillstand des Entsalzungsprozesses zu verhindern. Damit es hierzu möglichst nicht kommt, wird bereits bei mittlerem Füllstand des Vorlagetanks die Lastverteilung zwischen Ultrafiltration und Umkehrosmose so geregelt, dass die Ultrafiltration den aktuellen Volumenstrom der Umkehrosmose ausgleichen kann. Ist der Betrieb lediglich einer Last möglich, so wird der Vorlagetank priorisiert gefüllt und anschließend die Umkehrosmose betrieben.

Mit Hilfe eingesetzter Strahlungssensoren kann der Betrieb der beiden Anlagen sinnvoll an die Tageszeit sowie aktuelle Wetterbedingungen angepasst werden. Bei sehr geringer solarer Einstrahlung von wenigen  $W/m^2$  befinden sich die Anlagen im „Nachbetrieb“. Steigt morgens die solare Einstrahlung, so wird mit dem Start der Anlagen gewartet, bis die notwendige PV-Leistung für einen minimalen Betrieb vorhanden ist. Die beiden Ultrafiltrationen werden gespült und ebenfalls die RO-einheiten für den Betrieb vorbereitet. Danach beginnt der automatisierte Anlagenbetrieb mit, je nach Füllstand des Vorlagetanks der RO, Priorisierung der Lasten im „Tagbetrieb“. Sinkt die solare Einstrahlung unterhalb eines Wertes, bei dem selbst der Betrieb einer Last nicht möglich ist, so wird die Anlage gestoppt und mit Frischwasser gespült und anschließend in den „Abendbetrieb“ gesetzt. Sollte es sich nur um eine kurzzeitige Bewölkung handeln, so kann die Anlage danach wieder in Betrieb genommen werden. Neigt sich der Tag hingegen dem Ende zu (solare Einstrahlung nur wenige  $W/m^2$ ), so wird die Anlage in den „Nachtbetrieb“ versetzt.

#### **2.2.4.1 Exemplarische Betrachtung eines Betriebstages der Anlage seaside**

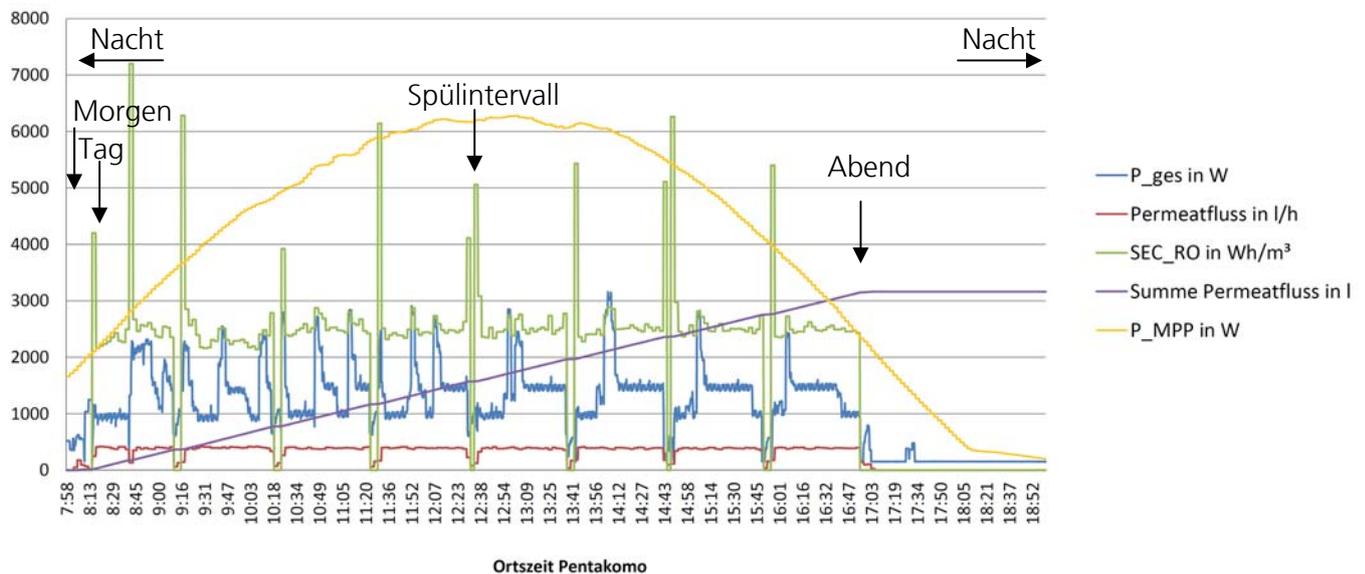
Es wird exemplarisch der Tagesverlauf des Betriebes der Anlage seaside am 23.05.2012 betrachtet. In

Abbildung 28 (siehe S.55) ist dieser dargestellt. Über der Ortszeit sind die gesamte Leistungsaufnahme der Anlage (UF und RO), der aktuelle Permeatfluss der spezifische Energiebedarf (SEC) der Entsalzung, der Permeatfluss an diesem Tag sowie die aktuell aus der PV bereitgestellte Leistung (P\_MPP) aufgetragen.

Um 7:49 Uhr wird erstmals an diesem Tag ein für den Anlagenstart theoretisch ausreichendes Leistungsangebot aus der PV festgestellt und die Anlage in den „Morgenbetrieb“ versetzt. Die UF sowie die RO werden mit Meerwasser gespült und in Betriebsbereitschaft versetzt. Die Anlage wird im „Tagbetrieb“ gestartet. UF und RO werden in Abhängigkeit des Leistungsangebotes und des Füllstandes des RO-Vorlagetanks geregelt. Wie in der Abbildung zu erkennen ist, konnte ein beachtlich geringer SEC des Entsalzungsprozesses von weitestgehend unter 2,5 kWh pro entsalztem Kubikmeter Meerwasser erreicht werden. In regelmäßigen Abständen werden UF und RO gereinigt, um eventuelle Verunreinigungen aus dem Betrieb zu entfernen.

Gegen 17:20 Uhr unterschritt das Leistungsangebot (P\_MPP) erstmals an diesem Tag den für einen zuverlässigen Betrieb eines einzelnen Prozesses minimalen Wert, weswegen die Anlage in den „Abendbetrieb“ versetzt wurde. Es erfolgte das Spülen der RO mit Frischwasser. Sollte es sich lediglich um eine kurze Periode bedecktem Himmels gehandelt haben, so hätte sich die Anlage nach wenigen Minuten wieder im Betriebsbereitschaft versetzen lassen und in den

„Tagbetrieb“ gewechselt. Gegen 19:00 Uhr wurde eine so geringe Einstrahlung verzeichnet, dass von fortgeschrittener Abenddämmerung ausgegangen werden konnte, weshalb sich die Anlage in den „Nachtbetrieb“ schaltete. Die Messwerterfassung für diesen Tag wurde beendet.



**Abbildung 28: Anlage seaside - Tagesverlauf 23.05.2012**

Der spezifische Energiebedarf des Entsalzungsprozesses (grüner Graph) konnte bei ca. 2,5 kWh/m<sup>3</sup> realisiert werden. Der gesamte Energiebedarf der Entsalzung, welcher die Förderung und Ultrafiltration mit einschließt, lag im Tagesmittel bei 4,8 kWh/m<sup>3</sup>. Die Tagesproduktion an Permeat ist auf Grund der im Kapitel 2.2.3 beschriebenen Problematik mit der Befüllpumpe auch bei ausreichendem Leistungsangebot derzeit auf etwa 3.200 Liter pro Tag begrenzt. Ohne dieses Hindernis wären über 7.000 Liter pro Tag möglich.

## 2.1 Nicht erreichte Ziele

Die fundamentale Zielsetzung des Projektes konnte insofern zufriedenstellend erfüllt werden, als dass zwei PV-RO-Systeme unterschiedlicher Tageskapazitäten mit der Möglichkeit eines intermittierenden Anlagenbetriebes, Anpassung der Leistungsaufnahme an das momentane Angebot sowie der Energieversorgung ohne Zwischenspeicherung realisiert wurden. Beide Anlagen haben die Machbarkeit und Zuverlässigkeit dieses Konzeptes im Feldtest unter Beweis stellen können.

Hinsichtlich der Energieversorgung, der Energierückgewinnung und der eingesetzten Pumpentechnologie mussten im Vergleich zum ursprünglichen Anlagenkonzept unvorhersehbare Kompromisse eingegangen werden. Wie bereits erörtert wurde, konnte die durch die Firma Pairan angestrebte Entwicklung eines DC-DC-Stellers mit integriertem MPP-Tracking zur batterielosen, jedoch spannungsstabilen Energieversorgung während der Projektlaufzeit nicht in dem Maße erbracht werden, als dass eine Erprobung im Feldtest denkbar gewesen wäre. Trotz dieser Problematik konnte mittels der eingesetzten Ausweichlösungen, bestehend aus Standardkomponenten der Anbieter SMA (seaside) bzw. Phocos (maritime), gezeigt werden, dass eine batterielose Energieversorgung möglich und sinnvoll ist. Die Anforderungen an die Regelungstechnik steigen zwar enorm, jedoch kann dank des innovativen Anlagenbetriebes auch auf den

Einsatz eines Batteriespeichers verzichtet werden, welche erfahrungsgemäß die größte Schwachstelle eines PV-Systems darstellt.

An der Hochschule Kempten wurde ein Prüfstand für die Erprobung von Trochoiden-Hochdruckpumpen zur Förderung von Meerwasser aufgebaut und mehrere dieser Pumpen der Fa. Gather vermessen. Bei der Erprobung zeigte sich, dass diese Pumpen trotz Einsatz höchst korrosions- und verschleißbeständiger Stähle (vor allem 1.4565 S) für die Förder Elemente sowie angepasster Betriebsweise nur einen maximalen Druck von ca. 20 bar, nicht jedoch von 60 bar wie gefordert erreichen konnten. Insbesondere Schwingungsprobleme sowie Verklemmen der Pumpenräder in bestimmten Betriebsbereichen, verursacht durch die schlechte Schmierwirkung des Meerwassers, konnten trotz mehrfacher Umkonstruktion (u.a. den Einbau von Lagern und Gleitflächen aus SiC) nicht gelöst werden. Vergleichbare ungünstige Ergebnisse zeigten sich beim Einsatz dieses Pumpentyps für die Energierückgewinnung aus Hochdruckwasser. Dieser Pumpentyp erwies sich somit für den vorgesehenen Einsatzzweck als nicht geeignet.

Zusammen mit der Firma Katadyn konnte das Fraunhofer ISE den Prototypen eine Zweikolbenpumpe entwickeln. Nach anfangs aussichtsreichen Testläufen, kam es bei höheren Drücken jedoch zum Bersten des Pumpenkörpers. Seitdem wird an einer Weiterentwicklung gearbeitet.

## **2.2 Bekannt gewordener Fortschritt Anderer**

Mittlerweile haben auch andere Unternehmen weltweit versucht, sich auf diesem allmählich entstehenden Markt zu positionieren. Besonders ist hier Spectra Watermakers aus den USA zu nennen [10]. Nachdem bereits zu Ende des alten Jahrtausends eine Serie von kompakten RO-Anlagen mit einer sogenannten Clark Pump vorgestellt wurde, folgte während der Projektlaufzeit 2009 eine Dreikolbenpumpe mit festgelegter Ausbeuterate und integrierter Energierückgewinnung, die sogenannte Pearson Pump. Seit etwa zwei Jahren werden konventionell, photovoltaisch oder hybridversorgte RO-Kompaktsysteme angeboten. Es entstanden ebenso Kooperationen, wie etwa die zwischen Spectra Watermakers und dem Schweizer Unternehmen Trunz [11] oder Worldwater & Solar Technologies [12] (ebenfalls aus den USA). Aus der Zusammenarbeit entstanden mehr oder weniger mobile Entsalzungsanlagen mit Kapazitäten von 6 – 30m<sup>3</sup> an entsalztem Wasser pro Tag. Hierbei muss jedoch betont werden, dass all diese Systeme noch immer einen Batteriespeicher haben, der für deren Betrieb in stationären Prozesspunkten bei festgelegter Ausbeuterate notwendig ist. Eine Anpassung der Ausbeuterate in Abhängigkeit an die Wassertemperatur oder an den Salzgehalt zur Steigerung der Energieeffizienz ist mit diesen Systemen nicht möglich. Die Angaben der Hersteller erscheinen bei genauer Betrachtung teilweise recht unglaubwürdig, was die angeblich entsalzbare Mengen an Wasser pro Tag bei unrealistisch kleiner Dimensionierung der Energieversorgung anbelangt. Rechnerisch ergibt sich oftmals ein spezifischer Energiebedarf von unter 2 kWh/m<sup>3</sup> entsalztem Meerwasser, was bei den verwendeten Anlagenschemata unrealistisch erscheint.

Die Fa. Danfoss hat mit den iSave ebenfalls den Markt der Umkehrosmose betreten und bietet mit einem einzigen Bauteil isobaren Druckaustausch und Druckerhöhung mittels einer Flügelzellenpumpe an [13]. Jedoch ist auch dieses System für Kleinalagen stark überdimensioniert. Eine Kompletanlage wird mittlerweile von Tochterunternehmen vertrieben.

Eine weitere Hochdruckpumpe mit integrierter Energierückgewinnung bei festgelegter Ausbeute-rate wurde Anfang 2010 durch das ebenfalls US-amerikanische Unternehmen Ocean Pacific vorgestellt [14], wobei das aus Sicht der Kinetik besonders interessante Konzept einer Axialkolbenpumpe umgesetzt wurde. Seit Bekanntgabe ist jedoch noch immer keine Einführung auf dem Markt erfolgt, die Pumpe befindet sich noch immer im Prototypenstadium und wäre ohnehin für eine Anwendung in der angestrebten Leistungsklasse überdimensioniert.

Eine Komplettanlage, welche durch die Installation in einem 40-Fuß-Seecontainer einen einfachen Transport und eine schnelle Inbetriebnahme verspricht, wurde Anfang 2012 durch die Fa. SwissINSO vorgestellt [15]. Tageskapazitäten von 50 m<sup>3</sup> und mehr werden angegeben. Über die technischen Details ist wenig bekannt. Die Energieversorgung hingegen wird mit Sicherheit durch einen Batteriespeicher realisiert.

Auch wenn eine starke Dynamik am Markt erkennbar ist, so ist noch immer keine Anlage bekannt, welche die durch das Projektkonsortium definierten Anforderungen erfüllen könnte.

Lediglich bei photovoltaisch direktversorgten Anlagen mit nur einer, zudem regelbaren, Last sind in den vergangenen Jahren mehrere Komponenten auf den Markt gekommen, welche einzeln [16] oder als Komplettsystem angeboten werden. Zu nennen sind hier beispielsweise schlüsselfertige PV-Pumpsysteme aber auch automatisiert arbeitende Pumpen-Frequenzumrichter mit integriertem MPP-Tracker zum Betrieb von Kolben- oder Kreiselpumpen unterschiedlicher Leistungsklassen [1]. Aus diesen positiven Entwicklungen gingen jedoch bisher keine leistungselektronischen Komponenten hervor, welche ein stabiles Netz mit mehreren unabhängig voneinander regelbaren Lasten aufrechterhalten könnten.

## **2.3 Veröffentlichung der Ergebnisse**

### **2.3.1 Bisherige Veröffentlichungen**

Im Jahre 2010 wurden zwei Paper im Fachmagazin Desalination and Water Treatment veröffentlicht, in denen das Projekt sowie der technisch neuartige Lösungsansatz der PV-direktbetriebenen Meerwasserentsalzung präsentiert wurden [17, 18]. Des Weiteren wurde im Jahre 2011 auf der Konferenz TUM Desal in München ein Vortrag gehalten und detailliert auf den Anlagenbau sowie die automatisierte Betriebsführung eingegangen [19].

### **2.3.2 Geplante Veröffentlichungen**

Weitere Veröffentlichungen sind geplant. Sobald langfristige Messdaten des automatisierten Anlagenbetriebes gesammelt wurden, sollen diese abschließend auf einem Seminar der Deutschen Meerwasser Entsalzung e.V. (DME) präsentiert werden. Ebenfalls ist geplant, die Ergebnisse auf einer in Frage kommenden International Exhibition of Desalination and Services (EDS) vorzustellen. Sollte sich Interesse an einer Tagung auf Zypern zeigen, so kann diese ebenfalls arrangiert werden. Als kompetenter Partner ließe sich hierfür das Cyprus Institute einspannen.

## 2.1 Verwertungsplan der Ergebnisse

Wie ausführlich dargestellt wurde, konnte das innovative Anlagenkonzept ohne die bis dato notwendige Zwischenspeicherung der elektrischen Energie in Batterien erfolgreich umgesetzt werden. Die hierbei gesammelten Erfahrungen können nach Beendigung der Erprobungsphase im Feldtest zeitnahe zu einem marktreifen Produkt führen. Den Projektpartnern stehen alle hierzu gewünschten Informationen in vollem Umfang zu.

Der weltweite Markt der Meerwasserentsalzung hat in den vergangenen Jahren enorme Dynamik aufgewiesen, wobei besonders kompakte und energieeffiziente Systeme für Aufsehen gesorgt haben. Das hier entwickelte Konzept der Anlage seaside ist bisherigen Entwicklungen insofern überlegen, als dass ein bisher nicht in Kleinanlagen erreichter spezifischer Energiebedarf realisiert werden konnte. In Kombination mit der praktischen Installation in einem Seecontainer wird diesem Konzept großes Potential beigemessen. Das Konzept der Kleinstanlage maritime hat bewiesen, dass der photovoltaische Direktbetrieb ungeachtet der Leistungsklasse möglich und sinnvoll ist.

Um den Anlagen zur Marktreife zu verhelfen müssen selbstverständlich einige Verbesserungen hinsichtlich der Kostenreduktion umgesetzt werden. Der für den Feldtest leicht überdimensionierte PV-Generator könnte beispielsweise auf Wunsch um ca. 25% verkleinert werden. Die in beiden Anlagen verbaute umfangreiche Messtechnik ist für den Feldtest sinnvoll, könnte bei einer Anlage in Serie jedoch merklich reduziert werden, sodass auch hier von einem erheblichen Einsparpotential ausgegangen wird. Der Verwertung der Ergebnisse in einer marktreifen Anlage steht formal nichts im Wege, sodass diese durch die Projektpartner in zukünftigen Produkten umgesetzt werden können.

### 3 Quellen und Verweise

- [1] Bernt Lozentz GmbH & Co. KG; <http://www.lorentz.de>
- [2] Calder AG; <http://www.flowserve.com/>
- [3] Energy Recovery Inc.; <http://www.energyrecovery.com/>
- [4] Thomson, Murray: Reverse-Osmosis Desalination of Seawater Powered by Photovoltaics without Batteries; Doktorarbeit; Loughborough University, Großbritannien; 2003
- [5] SMA Solar Technologie AG; <http://www.sma.de/>
- [6] Phocos AG; <http://www.phocos.com/>
- [7] Osmo Anlagenbau GmbH & Co. KG; <http://www.osmo-anlagenbau.com/>
- [8] SolarSpring GmbH; <http://www.solarspring.de/>
- [9] The Cyprus Institute The Energy, Environment and Water Research Center; <http://www.cyi.ac.cy/index.php/ewrc.html>
- [10] Spectra Watermakers Inc.; <http://www.spectrawatermakers.com/>
- [11] Trunz Water Systems AG; <http://www.trunzwatersystems.com/>
- [12] WorldWater & Solar Technologies Inc.; <http://www.worldwatersolar.com/>
- [13] Danfoss A/S ;<http://www.isave.danfoss.com/>
- [14] Ocean Pacific Technologies; <http://ocean-pacific-tec.com/>
- [15] SwissINSO; <http://www.swissinso.com/products/krystall.html>
- [16] Industrielle Leistungselektronik GmbH & Co. KG; <http://www.powertronic.de/>
- [17] A. Schies, J. Went, C. Heidtmann, M. Eisele, F. Kroemke, H. Schmoch, M. Vetter; Operating control strategies and dimensioning of photovoltaic-powered reverse osmosis desalination plants without batteries; Desalination and Water Treatment; 21 (2010) 131-137
- [18] J. Went, F. Kroemke, H. Schmoch, M. Vetter; The energy demand for desalination with solar powered reverse osmosis units; Desalination and Water Treatment; 21 (2010) 138-147
- [19] A. Schies, J. Went, J. Anhalt; Development of an operating control strategy for a photovoltaic driven reverse osmosis system in transient operation; TUM Desal Conference; 29.07.2011; München
- [20] A.Schies, DA: Betriebsführung einer photovoltaisch versorgten Umkehrosmoseanlage zur Meerwasserentsalzung, Nov.2008