

PV-betriebene Umkehrosmoseanlage zur Meerwasserentsalzung – Modellierung und Analyse verschiedener Energieversorgungsvarianten

Anas Sanna^{1,*}, Martin Kaltschmitt¹ und Mathias Ernst²

DOI: 10.1002/cite.201900095



This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Die Umkehrosmose ist eine sehr energieeffiziente Option zur Meerwasserentsalzung. Da sie nur elektrische Energie nachfragt, bietet sich aus Klimaschutzgründen eine Kombination von Umkehrosmose- und Photovoltaik(PV)-Anlagen an. Deshalb wird hier eine PV-basierte Umkehrosmose-Anlage zur Meerwasserentsalzung für einen Standort in Saudi-Arabien ausgelegt und modelliert. Ausgehend davon werden verschiedene Varianten einer PV-versorgten Meerwasserentsalzungsanlage untersucht und daraus Schlussfolgerungen für den Bau derartiger Anlagen abgeleitet.

Schlagwörter: Meerwasserentsalzung, Photovoltaik, Umkehrosmose

Eingegangen: 29. Juni 2019; *revidiert:* 16. September 2019; *akzeptiert:* 24. September 2019

PV-Powered Reverse Osmosis Plant for Seawater Desalination – Modeling and Analysis of Different Energy Supply Options

Reverse osmosis is a very energy-efficient approach for seawater desalination. Since it requires only electrical energy, a combination of reverse osmosis and photovoltaic (PV) plants seems to be a promising solution. Therefore, a PV-based reverse osmosis plant for seawater desalination for a location in Saudi Arabia is designed and modeled. On this basis, different options of a PV-powered seawater desalination plant are investigated and conclusions for the construction of such plants are derived.

Keywords: Photovoltaics, Reverse osmosis, Seawater desalination

1 Einleitung

Sauberes Trinkwasser ist in vielen Teilen der Erde Mangelware; beispielsweise hatten 844 Millionen Menschen im Jahr 2015 keinen Zugang zu sicherem Trinkwasser [1,2]. Aufgrund zunehmender Umweltverschmutzung, starken Bevölkerungswachstums und des sich abzeichnenden Klimawandels dürfte sich die weltweite Trinkwasserknappheit potenziell weiter ausbreiten. Global dürften 2050 etwa 3 Milliarden Menschen unter Wasserknappheit leiden [3]. Ein möglicher und oft der einzige praktikable Lösungsansatz ist die Entsalzung von Meer- und Brackwasser; dies ist auch der global primär verfolgte Ansatz.

Aus verfahrenstechnischer Sicht können bei den Entsalzungsverfahren thermisch angetriebene Destillationsverfahren (d.h. Vielfacheffektdestillationsverfahren (MED), Vielfacheffektentspannungsverdampfung (MSF), Dampfkomppressionsverfahren (TVC)) und membranbasierte Druckfiltrationsverfahren (Umkehrosmose (*reverse osmosis* RO), Nanofiltration (NF) und Elektrodialyse) unterschieden

werden [4]. Aus Energieeffizienz- und damit letztlich aus Kostengründen werden heute primär nur noch membranbasierte Verfahren installiert; z.B. wurden im Zeitraum zwischen 2004 und 2014 weltweit neue Entsalzungsanlagen mit einer Gesamtkapazität von ca. 50 Mio. m³d⁻¹ gebaut, von denen knapp 75 % RO-Anlagen sind [5]. Derzeit liegt die gesamte Wasserproduktion der RO-Entsalzungsanlagen bei 65,5 Mio. m³d⁻¹. Dies entspricht etwa 69 % der weltweiten Entsalzungskapazität [6].

¹Anas Sanna, Prof. Dr.-Ing. Martin Kaltschmitt
a.sanna@tuhh.de

Technische Universität Hamburg (TUHH), Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IUE), Eissendorfer Straße 40, 21073 Hamburg, Deutschland.

²Prof. Dr.-Ing. Mathias Ernst

Technische Universität Hamburg (TUHH), Institut für Wasserressourcen und Wasserversorgung (WWV), Am Schwarzenberg-Campus 3 (E), 21073 Hamburg, Deutschland.

Eine derartige RO-Wasserentsalzung ist entsprechend energieaufwendig. Die jeweilige Energienachfrage wird bisher bei existierenden Anlagen aus dem nationalen Stromnetz und damit hauptsächlich aus fossilen Energieträgern gedeckt, deren Nutzung a) mit Klimagasfreisetzungen verbunden ist [7, 8], b) zu Emissionen weiterer luftgetragener und potenziell umweltschädlicher bzw. toxischer Stoffe (wie z. B. SO_2) führt [9], c) oft durch entsprechende Versorgungsunsicherheiten insbesondere in Krisensituationen gekennzeichnet ist, d) z. T. hohe und häufig stark schwankende Preise zeigt und e) die teilweise unterentwickelte Stromversorgungsinfrastruktur überproportional belastet.

Im Unterschied dazu bietet die Nutzung erneuerbarer Energiequellen die Möglichkeit einer nachhaltigen und emissionsarmen Wasserentsalzung [10–12]. Durch den Einsatz derartiger dezentraler Wasserentsalzungsanlagen auf Basis erneuerbarer Energien können zusätzlich neben dem Vorteil der Netzunabhängigkeit Kosten für den Wassertransport entfallen [13, 14]. Wasserentsalzungsanlagen können je nach Entsalzungsprozessart und -konfiguration sowie lokalem regenerativem Energieangebot mit Sonnen-, Wind-, Geothermie- und Gezeitenkraftwerken betrieben werden [15]. Dabei können Entsalzungstechnologien verschiedene Energieformen (wie z. B. Wärme oder Strom) aus erneuerbaren Energien direkt oder indirekt (in einer anderen Energieform) nutzen, um Süßwasser aus Meer- bzw. Brackwasser zu produzieren [16].

Die Nutzung regenerativer Energien zur Stromerzeugung – und hier insbesondere die photovoltaische Bereitstellung elektrischer Energie – hat sich in den letzten Jahren zu einer global verfügbaren Technologie mit klaren Trends zu sinkenden Preisen entwickelt [17, 18]. Hinzu kommt, dass die solare Einstrahlung in ariden Regionen (z. B. Mittlerer Osten, Nordafrika), die häufig von Trinkwasserknappheit – bei weiter stark steigender Süßwassernachfrage – betroffen sind, mit ca. 6 bis $8 \text{ kWh m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ sehr hoch ist [19, 20]. Damit sind hier entsprechend geringe Stromgestehungskosten von z. B. Photovoltaik(PV)-Systemen zu erwarten.

Da RO-Entsalzungsanlagen primär nur Strom als Energie benötigen, bietet es sich an, diese Systeme zur Brack- und Meerwasserentsalzung in Kombination mit PV-Systemen für den Einsatz in ariden und semiariden Gebieten zu konzipieren. Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel der folgenden Ausführungen, ein detailliertes Konzept für eine dezentrale RO-Meerwasserentsalzungsanlage exemplarisch für einen Standort in Saudi-Arabien (Duba, geographische

Länge $35,723^\circ$, geographische Breite $27,341^\circ$) auszulegen, zu simulieren und verschiedene technische umsetzbare Energieversorgungsmöglichkeiten für den Betrieb einer derartigen RO-Referenzanlage teilweise oder vollständig auf Basis von PV als Inselanlage (d. h. nicht netzgekoppeltes System) zu untersuchen und miteinander zu vergleichen. Dabei werden verschiedene RO-Anlagenkonfigurationen und Betriebsarten betrachtet, um im Jahresdurchschnitt 100 m^3 Permeat pro Tag bei jeder Energieversorgungsvariante zu produzieren. In allen untersuchten Varianten werden die minimal benötigte Nennleistung der PV-Anlage und deren Flächenbedarf ermittelt. Dazu werden ggf. die erforderliche Leistung der zusätzlichen Energiequelle oder des Energiespeichers und die Variation der Permeatproduktion in Abhängigkeit vom Sonnenstrahlungsangebot für jede untersuchte Variante bestimmt. Ausgehend davon können dann entsprechende Konzeptionsansätze bzw. Empfehlungen abgeleitet werden, die für den erfolgreichen Betrieb derartiger Anlagen sicher einzuhalten sind.

2 RO-Wasserentsalzungsanlagen

RO-Entsalzungsanlagen bestehen typischerweise aus den Hauptkomponenten Vorbehandlung, Entsalzung durch RO und Nachbehandlung (Abb. 1) [21]. Diese einzelnen Behandlungsschritte werden nachfolgend diskutiert.

2.1 Vorbehandlung

Um die RO-Systeme langfristig problemlos und effizient betreiben zu können, muss das salzhaltige Wasser effektiv vorbehandelt werden [22]. Die konventionelle Vorbehandlung basiert üblicherweise auf einer Tiefenfiltration (z. B. Sandfiltration) und die moderne Vorbehandlung auf der Membranfiltration (z. B. Mikrofiltration (MF) oder Ultrafiltration (UF)), wobei sich ein Trend zur Ultrafiltration als Vorstufe zur Umkehrosmose abzeichnet [23]. Beispiele für große realisierte RO-Anlagen, die das Wasser mittels UF-Modulen vorbehandeln, sind die Magtaa Entsalzungsanlage ($500\,000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$) in Algerien, die Tuaspring Entsalzungsanlage ($318\,500 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$) in Singapur [5] und die Fukuoka RO-Anlage ($96\,000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$) in Japan [22].

Die konkret zu realisierenden Vorbehandlungsschritte hängen vor allem von der Rohwasserqualität ab. Ober-



Abbildung 1. Typische Konfiguration einer RO-Anlage zur Trinkwasserproduktion aus Meerwasser.

flächenwasser ist meist durch saisonal unterschiedliche Wasserqualitäten sowie einem starken Foulingpotenzial gekennzeichnet; deswegen müssen potenzielle RO-Membranverblockungen sowie das mikrobielle Wachstum auf den Membranen minimiert werden. Gleichzeitig müssen aus Kostengründen die notwendigen Chemikalienmengen für die RO-Membranreinigung reduziert werden [22–24]. Dies kann mittels UF-Membranen durchgeführt werden [23].

Beispielsweise kann eine Vorbehandlung aus den drei hintereinander geschalteten Filtrationsstufen Vorfilter, Tiefenfilter und UF-Modul realisiert werden.

- Vorfilter (Mikrosieb): Durch ein Mikrosieb werden grobe und feine Teilchen (z. B. Plankton, Sand) zurückgehalten. Dies gilt mindestens für die ungelösten größeren Feststoffteilchen, deren Größe die Öffnungsweite des Mikrosiebes überschreitet. Damit ist eine regelmäßige Rückspülung des Mikrosiebes notwendig. Dies erfolgt automatisch, wenn der Druckverlust zwischen Roh- und Reinwasserseite des Siebs den zulässigen bzw. voreingestellten Wert erreicht hat [25].
- Tiefenfilter: Weitere Schwebstoffe und kolloidale Partikel können zusätzlich im Inneren einer körnigen Filterschicht zurückgehalten werden. Bei dieser Tiefenfiltration werden Trübstoffe abgeschieden, die deutlich kleiner als die Porenweite der Filterschicht sind, da die Abscheidewirkung innerhalb der Filterschicht hauptsächlich auf dem Transport der Wasserinhaltsstoffe zu den Filterkernen und der Haftung der Partikel an der Oberfläche des Filterkorns basiert. Die Dauer eines Filterlaufs ist von dem Aufbau des Tiefenfilters und der Rohwasserzusammensetzung abhängig [26]. Durch die während des Filterbetriebs am Filtermaterial abgelagerten Wasserinhaltsstoffe steigt der Druckverlust im Filterbett an. Deshalb muss der Tiefenfilter nach Beendigung eines Filtrationszyklus je nach Filtermaterial mit Luft- und/oder Wasser rückgespült werden [27, 28]. Der Zeitpunkt der Filterrückspülung wird durch eine vorgegebene Filterlaufzeit bzw. den Druckverlust im Filterbett so festgelegt, dass eine Verkeimung des Filtermaterials und ein Filterdurchbruch vermieden werden [26, 29].
- Ultrafiltrationsmodule: Zur Gewährleistung einer hohen Stabilität des Entsalzungsbetriebs wird das vorfiltrierte Wasser durch UF-Membranen geleitet [30]. Dadurch können suspendierte Partikel mit einem hohen Wirkungsgrad zurückgehalten werden. Membranverfahren basieren auf einer Druckdifferenz zwischen Innen- und Außenseite der Membran und können im Dead-End- oder im Cross-Flow-Betrieb ausgeführt werden. UF-Module werden in den modernen Vorbehandlungen zur Meerwasserentsalzung meistens im Dead-End-Betrieb eingesetzt. Dann strömt das aufzubereitende Wasser vollständig durch die Membran. Dabei setzen sich alle Teilchen, deren Durchmesser die Porenweite der Membran übersteigen, auf der Membranoberfläche ab, d. h. der entstehende Filterkuchen bildet einen stetig wachsenden

Strömungswiderstand bzw. Druckverlust [27, 31]. Durch mechanische Rückspülungen muss diese Deckschicht, die sich während des Filtrationsvorgangs bildet, regelmäßig entfernt werden. Dafür wird das durch die Filtrationsphase gewonnene Filtrat verwendet. Darüber hinaus ist in Abhängigkeit von der Rohwasserqualität eine chemische Reinigung in größeren Zeitintervallen notwendig [27, 31].

2.2 Umkehrosmose-Module

RO-Module bestehen aus semipermeablen Membranen, die Wassermoleküle relativ einfach passieren können, während sie für Wasserinhaltsstoffe und gelöste Salzionen einen deutlich höheren Diffusionswiderstand aufweisen [32]. Im Osmoseprozess diffundieren die Wassermoleküle aus einer Lösung mit niedriger gelöster Salzkonzentration durch eine Membran in eine Lösung mit hoher gelöster Salzkonzentration hinein, bis die Lösungskonzentrationen auf beiden Seiten der Membran ausgeglichen sind. Die sich einstellende Druckdifferenz zwischen den beiden Seiten der Membran entspricht dem osmotischen Druck. Wird auf der Seite der Lösung mit hoher Konzentration ein Druck aufgewendet, der den osmotischen Druck übersteigt, permeiert reines Wasser von der Seite hoher gelöster Salzkonzentration durch die Membran zur Seite niedriger gelöster Salzkonzentration [33, 34]. Beispielsweise beträgt bei RO-Anlagen zur Brackwasserentsalzung (relativ geringer Salzgehalt) der Transmembrandruck (TMD) ca. 5 bar, während RO-Anlagen zur Meerwasserentsalzung (relativ hoher Salzgehalt) mit einem Transmembrandruck (TMD) von ca. 60 bis über 85 bar betrieben werden [35].

RO-Module in Entsalzungsanlagen werden ausschließlich im Cross-Flow-Betrieb (Querstromfiltration) gefahren. Hier überströmt das aufbereitete Salzwasser die RO-Membranen. Dabei permeiert das aufzubereitende Wasser teilweise durch die Membranen (Permeat). Zurück bleibt das Konzentrat, das an den RO-Membranen vorbeiströmt [33] und typischerweise an die Salzwasserquelle zurückgegeben wird. Das Verhältnis von Permeat zu Feedstrom definiert die Ausbeute (*recovery*). Bei einer Ausbeute von über 35 % für ein marktgängiges RO-System zur Meerwasserentsalzung wird zur Vermeidung von Ablagerungen durch schwer lösliche Salze üblicherweise ein Antiscalingmittel zudosiert [36]. Die meisten dieser Mittel beruhen auf der Phosphonat- oder der Polymerchemie; sie stören die Bildung der Deckschicht bzw. die Kristallisation auf der Membranoberfläche [37]. Die RO-Module müssen auch regelmäßig chemisch gereinigt werden. Die Reinigungsfrequenz hängt vor allem von der Qualität des aufzubereitenden Wassers ab (nach 1 bis 2 Jahren bei einer gut ausgelegten und betriebenen RO-Meerwasserentsalzungsanlage mit effektiven Vorbehandlungsstufen) [38].

2.3 Nachbehandlung

Das RO-Permeat muss vor der Einspeisung in ein Trinkwassernetz nachbehandelt werden, um die Produktwasserqualität zu stabilisieren. Dazu wird das Permeat durch die Zugabe von Mineralien (z. B. Calcium, Magnesium) remineralisiert bzw. aufgehärtet. Durch diese Remineralisierung soll eine empfohlene Härte von $100 \text{ mg L}^{-1} \text{ CaCO}_3$ erreicht werden, um z. B. eine Korrosion in Trinkwasserspeichern und im Leitungsnetz zu vermeiden. Auch muss der pH-Wert eingestellt werden [39, 40]. Das Produktwasser wird anschließend mit Chlor u. ä. Desinfektionsmitteln versetzt, damit eine potenzielle Vermehrung von Krankheitserregern im Verteilungsnetz sicher verhindert wird [41].

3 Vorgehensweise

Nachfolgend wird dargelegt, wie eine RO-Referenzanlage, die aus einer modernen Vorbehandlung und einer RO-Entsalzungsstufe besteht, mit einer Entsatzungskapazität von $100 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ modelliert und die unter bestimmten Rahmenannahmen minimal erforderliche PV-Leistung ermittelt

werden kann (Abb. 2). Dazu wird zunächst ein Referenzstandort für das PV-RO System festgelegt. Dann werden die einzelnen Behandlungskomponenten identifiziert und ein detailliertes Anlagenkonzept erstellt. Danach werden die Vorbehandlungs- und Entsatzungskomponenten sowie das Energierückgewinnungssystem mittels verfahrenstechnischer Software (Advanced System for Process Engineering; Aspen Plus) modelliert und damit der Energieverbrauch der Permeatproduktion ermittelt [42]. Die Nachbehandlung (Abschn. 3.2.4), Speicherung und Verteilung des produzierten Permeats sowie der Energieverbrauch für die Rückspülphase und die chemische Reinigung der Anlage werden in dieser Simulation nicht berücksichtigt. In einem weiteren Schritt wird ein spezifisches PV-Modul mit einer Spitzenleistung von 1 kW definiert (Abschn. 3.3.1). Anschließend wird dieses PV-Modul mit dem Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS 5) auf Stundenbasis an dem definierten Referenzstandort simuliert [43]. Ausgehend davon wird die notwendige PV-Leistung für die Vorbehandlungs- und Entsatzungsprozesse berechnet. Dabei werden verschiedene Energieversorgungsvarianten berücksichtigt (Abb. 2).

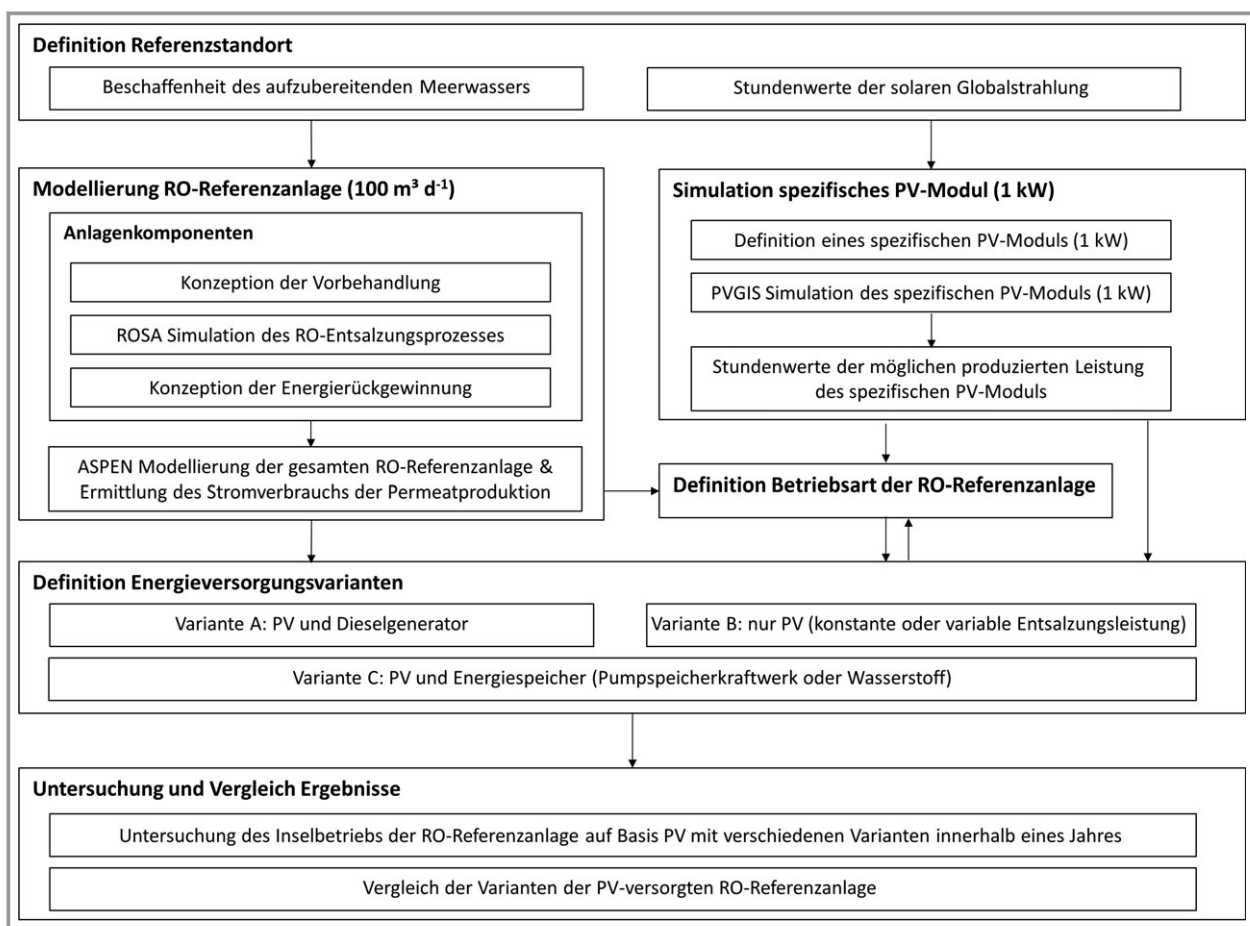


Abbildung 2. Vorgehensweise.

3.1 Definition Referenzstandort

Für einen zu definierenden Standort werden aus öffentlich zugänglichen Daten (z. B. Copernicus Marine Environment Monitoring Service [44], PVGIS-CMSAF [43]) die Rahmenbedingungen bezüglich der Beschaffenheit des aufzubereitenden Meerwassers sowie der solaren Globalstrahlung auf Stundenbasis zusammengestellt. Dadurch kann der untersuchte Standort sowohl bezüglich der Wassereigenschaften (Abschn. 4.1) als auch hinsichtlich des solaren Strahlungsangebots charakterisiert werden.

3.2 Konzeption und Simulation RO-Referenzanlage

3.2.1 Vorbehandlung

Bei der Vorbehandlung (Vorfiltration, Tiefenfiltration und Ultrafiltration) werden marktübliche Produkte eingesetzt. Die Auswahl der Komponenten orientiert sich an der Zusammensetzung des aufzubereitenden Meerwassers. Die benötigte Komponentenanzahl ergibt sich aus dem Volumenstrom des aufzubereitenden Wassers und den jeweiligen Grenzwerten der Betriebsparameter der eingesetzten Komponenten. Daraus können dann die Betriebsparameter der einzelnen Vorbehandlungskomponenten (z. B. Betriebsdurchfluss, Druckverlust, Filtrations- und Rückspülungszeit) abgeleitet werden.

3.2.2 RO-Entsalzungsprozess

Die Anzahl und der Typ der RO-Elemente sowie deren optimale Betriebsbedingungen werden mit der Software Reverse Osmosis System Analysis (ROSA) in Abhängigkeit von der Vorbehandlungsart, der Eigenschaften des aufzubereitenden Meerwassers (Konzentration der gelösten Salzionen, Temperatur und pH-Wert), der Gesamtausbeute des RO-Systems und der benötigten Menge an Permeat ermittelt [45]. Die Simulationsergebnisse basieren auf den nominalen herstellereigenen Leistungsspezifikationen der Komponenten, die diesem System zugrunde gelegt werden. Dabei wird hier eine stationäre Simulation für einen kontinuierlichen Betrieb der RO-Elemente realisiert [46]. Dazu werden die Ergebnisse auf Basis der Energienachfrage und der Permeatqualität optimiert [36]. Eine Energierückgewinnung aus dem unter Druck stehenden Wasser nach der RO-Anlage wird dabei zunächst (in der ROSA-Software) nicht berücksichtigt [45].

3.2.3 Energierückgewinnung

Zur Minimierung des Energiebedarfs wird ein Druckaustauscher zwischen dem Konzentratstrom und einem Teil des RO-Feedstroms eingesetzt, um mit der durch die Druckabgabe des Konzentratstroms zurückgewinnbaren Energie den Energieverbrauch der RO-Anlage insgesamt zu verringern. Die Auslegungsparameter dieser Energierück-

gewinnung folgen aus denen der RO-Anlage. Dabei können beim Druckaustausch zwischen dem Konzentrat- und dem RO-Feedstrom, der durch den Druckaustauscher geleitet wird, sehr niedrige Vermischungen auftreten [47,48]; dies wird hier aber nicht unterstellt.

3.2.4 Nachbehandlung

Die Energienachfrage der Nachbehandlungsprozesse ist niedrig und beträgt typischerweise weniger als 2 % der gesamten Energienachfrage einer Meerwasserentsalzungsanlage [49]. Die in Abschn. 2.3 erläuterten Schritte zur Nachbehandlung fallen damit energetisch nicht ins Gewicht und werden deshalb nicht modelliert.

3.2.5 Gesamte Entsalzungsanlage

Um den Betrieb der gesamten RO-Referenzanlage auf Komponentenebene zu modellieren und daraus den Stromverbrauch der Permeatproduktion während der Betriebsphase ermitteln zu können, wird ein Modell für den kompletten Vorbehandlungs- und Entsalzungsprozess sowie für den Druckaustauscher mit dem sequenziell modularen Flow-sheeting-Programm Aspen Plus erstellt [42]. Hierbei werden die einzelnen Komponenten der RO-Referenzanlage miteinander durch Stoff- bzw. Energieströme verknüpft. Dazu werden die benötigten Inputparameter (z. B. Temperatur, Druck, pH-Wert, Zusammensetzung des Feedstroms) als stationäre Größen für einen mittleren im Modell verwendeten Volumenstrom angegeben, d. h. es wird eine stationäre Simulation für den Betrieb der RO-Anlage durchgeführt [50–53].

3.3 Energieversorgungsvarianten

Zunächst wird die Leistung eines PV-Moduls mit einer Spitzenleistung von 1 kW auf Stundenbasis an dem definierten Referenzstandort simuliert (Abschn. 3.3.1). Ausgehend davon werden verschiedene PV-Energieversorgungsvarianten für einen Inselbetrieb der RO-Referenzanlage definiert. Diese Optionen werden dann untersucht und miteinander verglichen.

3.3.1 Simulation spezifisches PV-Modul

Die produzierbare PV-Leistung auf Stundenbasis am Referenzstandort wird mit PVGIS5 exemplarisch für das Jahr 2016 simuliert [43]. Dazu werden zunächst die geographische Länge und Breite des betrachteten Standorts festgelegt und dann wird ein PV-Modul (u. a. Modultechnologie, Montageart) definiert. Dabei wird die installierte Leistung des definierten PV-Moduls mit 1 kW festgelegt. Die Neigung und Azimutausrichtung dieses PV-Moduls werden unter Verwendung eines iterativen Newton-Raphson-Algorithmus optimiert, um den maximalen Jahresenergieertrag am betrachteten Standort zu erzielen. Zusätzlich wird der

Einfluss von Umgebungstemperatur (T_a) und Windgeschwindigkeit (W) berücksichtigt [54, 55]. Die folgenden Gleichungen beschreiben, wie das PV-Modul in PVGIS mathematisch simuliert wird.

$$P(G', T') = G' P_{\text{STC}} \left(\frac{1 + k_1 \ln(G') + k_2 \ln(G')^2 + k_3 T' + k_4 T' \ln(G')}{+ k_5 T' (\ln(G'))^2 + k_6 T'^2} \right) \quad (1)$$

$$G' = \frac{G}{1000} \quad (2)$$

$$T' = T_m - 25 \quad (3)$$

Die produzierbare Leistung (P) dieses PV-Moduls wird in Abhängigkeit von der Globalstrahlung (G) und der Modultemperatur (T_m) berechnet. Die PV-Spitzenleistung (P_{STC}) wird unter Standardtestbedingungen (Einstrahlung 1000 W m^{-2} , Luftmasse (*air mass*) 1,5 und Lufttemperatur 25°C) gemessen. Die Koeffizienten k_1 bis k_6 werden für jede PV-Technologie durch Anpassung an Messdaten ermittelt [54, 56, 57]. Die Modultemperatur wird durch Gl. (4) berechnet, wobei U_0 und U_1 Koeffizienten sind [58]. Die in PVGIS verwendeten Koeffizienten U_0 und U_1 werden aus [59] entnommen.

$$T_m = T_a + \frac{G}{U_0 + U_1 W_m} \quad (4)$$

3.3.2 Gesamtes Energieversorgungssystem

Insgesamt werden drei Hauptvarianten der Energieversorgung für die RO-Anlage mit einem Referenzfluss von $100 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ untersucht. Dabei wird die RO-Anlage teilweise oder vollständig PV-basiert betrieben. Wird bei einer Variante die RO-Anlage nur mit PV betrieben, werden Betriebsart und Größe der RO-Referenzanlage variiert, um im Jahresdurchschnitt den Referenzfluss von $100 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ bei nicht konstanter PV-Energieversorgung zu gewährleisten. Bei dieser Variante wird dazu die Permeatproduktion in Abhängigkeit vom Sonnenstrahlungsangebot für die meteorologischen Jahreszeiten¹ ermittelt.

Auf Basis des Energieverbrauchs und der Betriebsart der RO-Anlage, der Stundenwerte der produzierbaren Leistung des definierten spezifischen PV-Moduls mit 1 kW am Referenzstandort und der Art des gewählten Energieversorgungssystems wird die insgesamt zu installierende Leistung der benötigten PV-Anlage ermittelt, mit der die RO-Anlage innerhalb eines Jahres (exemplarisch 2016) im Inselbetrieb betrieben werden kann. Daraus kann dann – je nach gewähltem Energieversorgungssystem – die ggf. erforderliche

Leistung der zusätzlichen Energiequelle oder des Energiespeichers abgeleitet werden. Die verschiedenen Varianten der PV-versorgten Meerwasserentsalzungsanlage können dann abschließend miteinander verglichen werden.

4 Fallstudie

4.1 Definition Referenzstandort

In den MENA-Ländern wurden knapp 48 % der global installierten Entsalzungskapazität betrieben [6]. Beispielsweise werden allein in Saudi-Arabien ca. 68 % des gesamten Trinkwasserbedarfs durch Meerwasserentsalzungsanlagen, die von der staatlichen Versorgungsgesellschaft Saline Water Conversion Company (SWCC) betrieben werden, gedeckt [60]. Mit einer Entsalzungskapazität von $6,6 \text{ Mio. m}^3 \text{ d}^{-1}$ ist Saudi-Arabien weltweit der größte Markt für Brack- und Meerwasserentsalzung [61]. Die Energieversorgung dieser Entsalzungsanlagen basiert im Wesentlichen auf elektrischer Energie, die bisher primär aus Erdöl oder Erdgas erzeugt wird, obwohl Saudi-Arabien mit 2300 und 2600 kWh m^{-2} eine sehr hohe jährliche Globalstrahlung aufweist [43, 62, 63].

Um Trinkwasser klimaneutral zu erzeugen, wird exemplarisch für die Gegebenheiten in Saudi-Arabien eine solare Meerwasserentsalzungsanlage (RO-Systeme mit PV) untersucht. Dazu wird hier ein Standort an der Nordküste des Roten Meeres (Dubai, $35,723^\circ$ Länge und $27,341^\circ$ Breite) mit einer Wasserproduktion von $100 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ und teilweiser oder vollständiger PV-basierter Energieversorgung ausgewählt.

Aus den Standortdaten ergibt sich die Festlegung des Salzgehalts, des partikulären organischen Kohlenstoffs (POC) und der Temperatur des zu entsalzenden Meerwassers. Da das Verhältnis der wesentlichen Ionen des Meerwassers in allen Ozeanen und Meeren fast gleich ist [64], wird eine typische Meerwasserzusammensetzung in Abhängigkeit vom Salzgehalt angenommen (Tab. 1). Im Norden des Roten Meers tritt meist nur eine geringe Menge an Phytoplankton bzw. Algenblüten besonders im Vergleich zu den zentralen und südlichen Teilen des Roten Meers auf. Aus diesem Grund wurde diese nicht speziell betrachtet² [65, 66].

Die standortspezifischen Daten erlauben auch eine Bestimmung der stündlichen Werte der Globalstrahlung, mit denen die daraus mögliche PV-Stromerzeugung berechnet werden kann (Abschn. 4.3). Abb. 3 zeigt die Tageswerte der Globalstrahlung am betrachteten Standort.

¹ Frühling: März bis Mai, Sommer: Juni bis August, Herbst: September bis November, Winter: Dezember bis Februar.

² An Standorten mit hoher Menge an Algenblüten kann durch eine aufgelöste Luftflotation (DAF) die Wirksamkeit der Tiefenfiltration verbessert werden [22].

Tabelle 1. Typische Eigenschaften des Meerwassers an der Entnahmestelle in 10 m Wassertiefe am Referenzstandort.

| Parameter | Wert | Literatur |
|---|--------|----------------------------|
| Salzgehalt [g kg^{-1}] | 40 | [44] |
| K^+ [mg L^{-1}] | 441 | [67] |
| Na^+ [mg L^{-1}] | 12 278 | [67] |
| Mg^{2+} [mg L^{-1}] | 1473 | [67] |
| Ca^{2+} [mg L^{-1}] | 480 | [67] |
| HCO_3^- [mg L^{-1}] | 162 | [67] |
| Cl^- [mg L^{-1}] | 22 105 | [67] |
| SO_4^{2-} [mg L^{-1}] | 3086 | [67] |
| SiO_2 [mg L^{-1}] | 1,1 | [67] |
| Mittlere Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] | 27,5 | [44] |
| Insg. suspendierte Feststoffe (TSS) [mg L^{-1}] | 26 | Annahme |
| pH [-] | 8 | [68, 69] |
| POC [mg L^{-1}] | 0,1 | [70] |
| Gelöster organischer Kohlenstoff (DOC) [mg L^{-1}] | 0,8 | Annahme basierend auf [71] |

4.2 Konzeption und Simulation RO-Referenzanlage

In diesem Kapitel wird ein Konzept für die RO-Referenzanlage zur Meerwasserentsalzung mit einer Entsalzungskapazität von $100 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$ auf Komponentenebene erstellt und der Anlagenbetrieb simuliert. Abb.4 zeigt die Referenzanlage schematisch.

4.2.1 Anlagenkomponenten

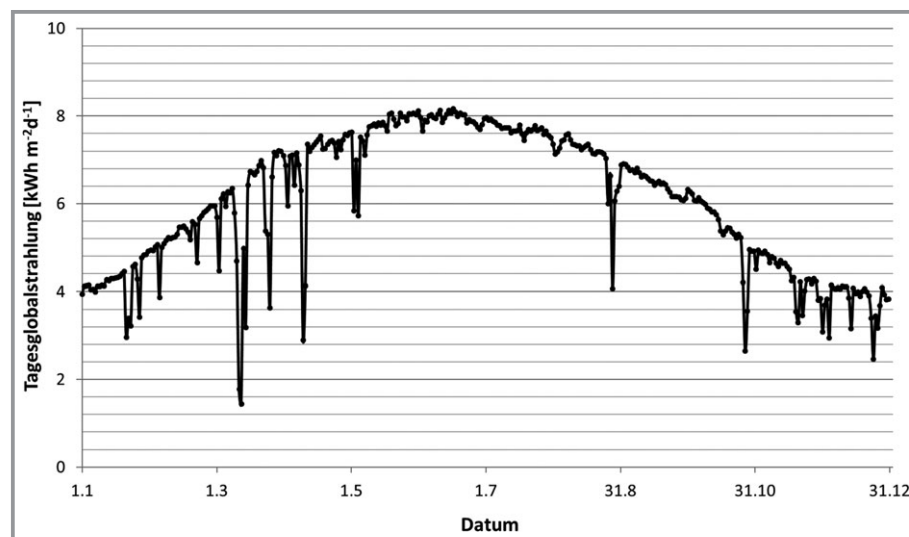
Vorbehandlung

Vor dem RO-Entsalzungsprozess wird eine Vorbehandlungsstufe ausgelegt (Abb. 4). Tab.2 zeigt die Art und An-

zahl der Vorbehandlungskomponenten sowie deren Betriebsparameter, die für die Simulation der Referenzanlage getroffen werden. Da der gesamte organische Kohlenstoff (TOC) unter 3 mg L^{-1} liegt, ist vom Einsatz eines Aktivkohlefilters zur Entfernung des TOC abzusehen [33, 36].

RO-Entsalzungsprozess

Für den Entsalzungsprozess der RO-Referenzanlage werden fünf RO-Elemente, die hintereinander in Reihe angeordnet werden, verwendet (Abschn. 3.2.2). Zusätzlich wird eine Hochdruckpumpe eingesetzt, die bei kleineren Zuflussströmen, wie in dieser RO-Referenzanlage, einen höheren Wirkungsgrad aufweist [76]. Die hier ausgewählte Hoch-

**Abbildung 3.** Tagesglobalstrahlung am Referenzstandort [43].

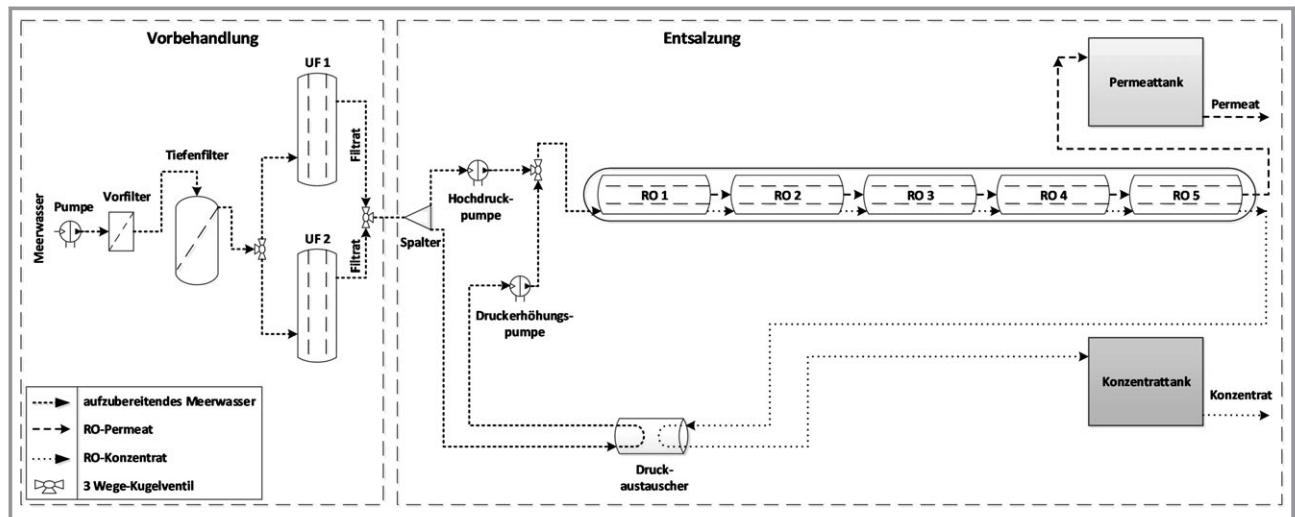


Abbildung 4. Referenzanlage zur Meerwasserentsalzung (Vorbehandlungs- und Entsalzungsstufe mit Druckaustauscher).

druckpumpe und die RO-Elemente zeigt Tab. 3. In Tab. 4 sind die ROSA-Simulationsergebnisse für die optimalen Betriebsbedingungen der fünf RO-Elemente aufgelistet (Abschn. 3.2.2).

Energierückgewinnung

Als Energierückgewinnungsgerät wird ein Druckaustauscher ausgewählt (Abschn. 3.2.3). Tab. 5 zeigt die entsprechenden Betriebsparameter des Druckaustauschers. Abb. 4

verdeutlicht, wie der Druckaustauscher in den Entsalzungsprozess integriert wird.

4.2.2 Gesamte RO-Referenzanlage

Zur Modellierung der gesamten RO-Referenzanlage werden die Eigenschaften des Rohwassers (Tab. 1), die Betriebsparameter der verschiedenen Komponenten der Entsalzungsanlage (Tabs. 2, 3 und 5) und die optimalen Betriebsbedingun-

Tabelle 2. Vorbehandlungskomponenten der RO-Referenzanlage.

| Komponente | Art der Komponente | Anzahl der Komponenten | Parameter | Referenzfall |
|----------------|--|------------------------|--|--------------|
| Rohwasserpumpe | vertikale, mehrstufige Kreiselpumpe (CRT(E) 16) mit einem Motor 50 Hz [72] | 1 | Pumpenleistung [m^3h^{-1}] | 14,84 |
| | | | Druckerhöhung [bar] | 2,5 |
| | | | Gesamtwirkungsgrad [%] | 63 |
| Vorfilter | automatischer Hydraulikfilter AF202 [25] | 1 | Betriebsdurchfluss [m^3h^{-1}] | 14,84 |
| | | | Druckverlust [bar] | 0,04 |
| | | | Abscheideleistung für TSS [%] | 10 |
| Tiefenfilter | Zeolithfilter: Filter-Ag Plus® [73] | 1 | Betriebsdurchfluss [m^3h^{-1}] | 14,84 |
| | | | Druckverlust [bar] | 0,07 |
| | | | Abscheideleistung für TSS [%] | 60 |
| | | | Rückspülungszeit [h d^{-1}] | 0,5 |
| UF-Module | dizzer® XL Ultrafiltrationsmodul mit Multibore® 0.9 Membrane [74, 75] | 2 | Betriebsdurchfluss [m^3h^{-1}] | 7,42 |
| | | | Druckverlust [bar] | 0,80 |
| | | | Abscheideleistung für TSS [%] | 99 |
| | | | gesamte Rückspülungszeiten (17x pro Tag) [h d^{-1}] | 0,35 |
| | | | gesamte Produktionszeit des Spülwassers (UF-Filtrat) [h d^{-1}] | 0,71 |

Tabelle 3. Hauptkomponenten des Entsalzungsprozesses der RO-Referenzanlage.

| Komponente | Art der Komponente | Anzahl der Komponenten | Parameter | Referenzfall |
|----------------|--|------------------------|--|--------------|
| Hochdruckpumpe | Axialkolbenpumpe Danfoss APP 16 / 1200 rpm [76] | 1 | Pumpenleistung [m ³ h ⁻¹] | 14,84 |
| | | | Druckerhöhung [bar] | 69,89 |
| | | | max. Gesamtwirkungsgrad [%] | 82,50 |
| RO-Elemente | Dow FILMTEC™ SW30HRLE-370/34i Element [46] | 5 | Salzrückhalt [%] | 99,80 |
| | | | aktive Membranfläche eines RO-Elementes [m ²] | 34,4 |
| | | | max. zulässige Betriebstemperatur [°C] | 45 |
| | | | max. zulässiger Betriebsdruck [bar] | 83 |
| | | | Gesamtausbeute der RO-Module [%] | 30 |

Tabelle 4. ROSA-Simulationsergebnisse für RO-Elemente.

| RO-Elemente | Ausbeute [%] | Permeatstrom [m^3h^{-1}] | Salzgehalt Permeat [mg L^{-1}] | Feedstrom [m^3h^{-1}] | Salzgehalt Feed [g L^{-1}] | Feed-Druck [bar] |
|-------------|-----------------|---|--|--|--|---------------------|
| 1 | 7 | 1,07 | 75,51 | 14,84 | 40,07 | 72,48 |
| 2 | 7 | 0,98 | 87,91 | 13,77 | 43,18 | 72,09 |
| 3 | 7 | 0,89 | 103,18 | 12,79 | 46,49 | 71,73 |
| 4 | 7 | 0,80 | 122,10 | 11,90 | 49,96 | 71,41 |
| 5 | 6 | 0,71 | 145,63 | 11,10 | 53,55 | 71,13 |

Tabelle 5. Betriebsparameter des ausgewählten Druckaus-tauschers PX-70 [48].

| Parameter | Referenzfall |
|--|--------------|
| Betriebsdurchfluss [m^3h^{-1}] | 10,44 |
| Wirkungsgrad [%] | 95 |
| Durchmischung [%] | 0 |

gen für die RO-Elemente (Tab. 4) mithilfe von Aspen Plus modelliert (Abschn. 3.2.5). Tab. 6 und Tab. 7 zeigen Simulationsergebnisse der Beschaffenheit des aufzubereitenden Meerwassers nach der Vorbehandlungs- und Entsalzungsstufe sowie des Energieverbrauchs der RO-Referenzanlage mit einer Wasserproduktion von ca. $100 \text{ m}^3\text{d}^{-1}$.

Nach Tab. 7 werden ca. 87 % vom gesamten Energieverbrauch der Referenzanlage für die RO-Entsalzungsprozesse und nur ca. 13 % für die Vorbehandlungsstufen aufgewendet. Der Druckaustauscher, der zwischen dem Konzentratstrom und einen Teilstrom vom UF-Filtrat eingesetzt wird, reduziert den Konzentratdruck von knapp 71 auf 1 bar und erhöht gleichzeitig den Druck von 70 % des gesamten UF-Filtratstroms um rund 66 bar. Dieser Teilstrom wird nach dem Druckaustauscher durch eine zusätzliche Pumpe (Salzwasser-Boosterpumpe) auf den geforderten RO-Systemdruck (72,5 bar) angehoben (Abb. 4). Somit beträgt die gesamte Tagesenergienachfrage für die Vorbehandlungs-

Tabelle 6. Qualität des aufzubereitenden Wassers nach der Vorbehandlung und Entsalzung.

| Parameter | UF-Filtrat | RO-Permeat |
|---|------------|------------|
| Salzgehalt [g kg^{-1}] | 40 | 0,103 |
| K^+ [mg L^{-1}] | 441 | 1 |
| Na^+ [mg L^{-1}] | 12 278 | 32 |
| Mg^{2+} [mg L^{-1}] | 1473 | 4 |
| Ca^{2+} [mg L^{-1}] | 480 | 1 |
| HCO_3^- [mg L^{-1}] | 162 | 0,4 |
| Cl^- [mg L^{-1}] | 22 105 | 57 |
| SO_4^{2-} [mg L^{-1}] | 3086 | 8 |
| SiO_2 [mg L^{-1}] | 1,1 | 0,003 |
| $T_{\text{Mittelwert}}$ [°C] | 27,5 | 28 |
| TSS [mg L^{-1}] | 0,09 | 0,0 |

und Entsalzungsstufen $301,4 \text{ kWh}$ und der spezifische Stromverbrauch der Referenzanlage $3,01 \text{ kWh m}^{-3}$ (Tab. 7).

Diese Simulationsergebnisse stimmen gut mit den Werten aus der Literatur überein. Für realisierte moderne RO-Meerwasserentsalzungsanlagen werden für Vorbehandlungs- und RO-Entsalzungsprozesse ca. $2,93 \text{ kWh m}^{-3}$ angegeben [77]. Beispielweise beträgt der spezifische Energie-

Tabelle 7. Täglicher Energieverbrauch der RO-Referenzanlage bei kontinuierlichem Betrieb.

| Behandlungsstufe | Parameter | Wert |
|--------------------|---|----------|
| Vorbehandlung | Leistungsverbrauch [W] | 1633,1 |
| | Filtrationszeit [h d^{-1}] | 23,2 |
| | Stromverbrauch [kWh] | 37,8 |
| Entsorgung | Leistungsverbrauch [W] | 11 734,7 |
| | Entsorgungszeit [h d^{-1}] | 22,5 |
| | Stromverbrauch [kWh] | 263,5 |
| RO-Referenz-anlage | Leistungsverbrauch [W] | 13 367,8 |
| | Stromverbrauch [kWh] | 301,4 |
| | spezifischer Energieverbrauch [kWh m^{-3}] | 3,0 |

verbrauch für die Carlsbad RO-Anlage (Carlsbad desalination plant) in San Diego, Kalifornien, als eine der weltweit modernsten Meerwasserentsalzungsanlage weniger als $3,3 \text{ kWh m}^{-3}$. Dabei wird ein Teil der insgesamt verbrauchten Energie jedoch auch für die Rückspülung der Vorbehandlungskomponenten, die chemische Reinigung der UF-Module und RO-Elemente, die Beseitigung der Reinigungslösungen und die Rückführung des überschüssigen Konzentrats ins Meer verwendet [78]. Diese Prozesse benötigen typischerweise ca. 8 % vom gesamten Energieverbrauch der RO-Meerwasserentsalzungsanlagen [77].

4.3 Energieversorgungsvarianten

Zur Untersuchung der Kombinationsmöglichkeiten zwischen einem RO-System mit einer PV-Anlage werden verschiedene Varianten für einen Inselbetrieb der RO-Referenzanlage auf PV-Basis definiert. Die Definition dieser

Varianten wird auf Basis des Energieverbrauchs der RO-Referenzanlage und der Stundenwerte der bereitstellbaren PV-Leistung eines spezifischen PV-Moduls mit 1 kW am betrachteten Standort festgelegt. Dann wird der Inselbetrieb der RO-Referenzanlage auf PV-Basis innerhalb eines Jahres untersucht. Dabei werden die Nennleistung und der Flächenbedarf der benötigten PV-Anlage für jede Variante ermittelt. Der gesamte Flächenbedarf der PV-Anlage wird hier basierend auf einem spezifischen Flächenbedarf von $22 \text{ m}^2 \text{ kW}^{-1}$ berechnet [79].

4.3.1 Simulation PV-Modul

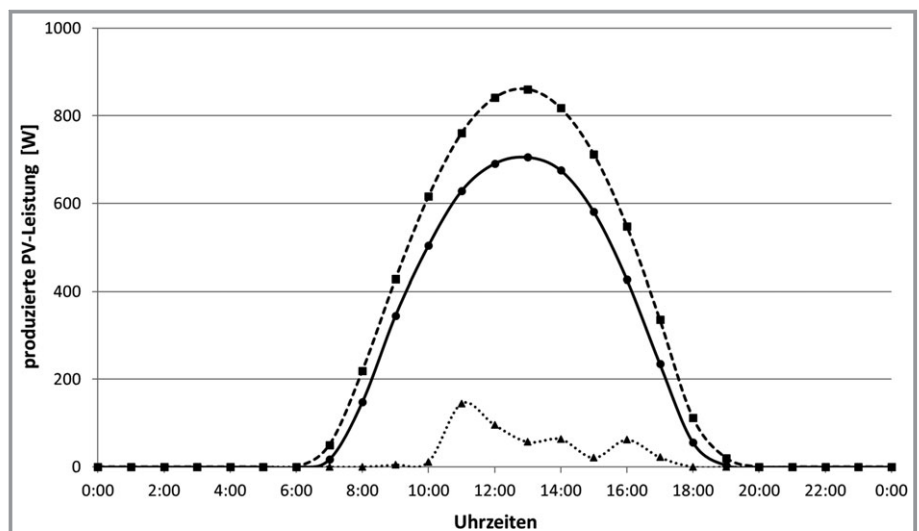
Für den definierten Standort wird ein spezifisches PV-Modul nach Tab. 8 exemplarisch für das Jahr 2016 simuliert (Abschn. 3.3.1). Dazu werden die Neigung dieses PV-Moduls auf 26° und der Azimutwinkel auf 0° festgelegt, mit dem Ziel, den Jahresenergieertrag am Referenzstandort zu maximieren. Abb. 5 zeigt die maximalen, minimalen und durchschnittlichen spezifischen Leistungsdaten der jeweiligen Stundenwerte basierend auf allen Stundenwerten des Jahres 2016 [43].

Tabelle 8. Eigenschaften des PV-Moduls.

| Eigenschaft/Parameter | Referenzfall |
|------------------------|----------------------------|
| Modultechnologie | kristallines Siliziummodul |
| Montageart | fest |
| sämtliche Verluste [%] | 14 |
| Spitzenleistung [kW] | 1 |

4.3.2 Varianten

Das RO-Standardmodell zur Meerwasserentsalzung wird mit drei Hauptvarianten der Energieversorgung und der Anlagenverschaltung untersucht. Die RO-Anlage wird aber immer als Inselanlage am betrachteten Standort entweder

Abbildung 5. Spezifische Leistung aus einer PV-Anlage (installierte Spitzenleistung von 1 kW) im Jahr 2016. ■ Maximale PV-Leistung, ● durchschnittliche PV-Leistung, ▲ minimale PV-Leistung.

lediglich auf PV-Basis oder auf Basis eines Hybridsystems aus PV und einer konventionellen Energiequelle (z. B. Dieselgenerator) oder einem Stromspeicher (Pumpspeicherkraftwerk oder Wasserstoff) betrieben. Diese verschiedenen Energieversorgungsvarianten werden untereinander vergleichbar ausgeführt. Batterien als Energiespeicher werden hier nicht untersucht, da sie in Gebieten mit heißen Wetterbedingungen eine geringe Lebensdauer und Leistung aufweisen [63, 80].

Variante A: PV und Dieselgenerator

Bei Variante A wird die RO-Anlage kontinuierlich mit einer konstanten Aufbereitungsleistung ($100 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$) auf Basis von PV- und Diesel-Strom betrieben (Abb. 6). Die benötigte PV-Anlage wird so ausgelegt, dass das Jahresmittel der PV-Tagesspitzenleistung der Leistungsaufnahme der RO-Referenzanlage entspricht. Der Dieselgenerator gleicht die Differenz aus der tages- und jahreszeitlich unterschiedlichen PV-Stromerzeugung und der kontinuierlichen Stromnachfrage der RO-Anlage aus.

Variante B: PV

Die RO-Anlage wird hier entweder mit einer konstanten stündlichen Aufbereitungsleistung oder mit einer variablen Entsalzungsleistung jeweils lediglich auf der Basis von PV-Strom betrieben.

Variante B1: PV und konstante Entsalzungsleistung

Hier wird die RO-Anlage mit einer konstanten stündlichen Aufbereitungsleistung ausschließlich auf PV-Basis betrieben. Abb. 5 zeigt, dass für diese Variante eine Betriebszeit für die RO-Anlage von ca. 8 h d^{-1} sinnvoll ist. Für den hier betrachteten Fall wird eine Betriebszeit von durchschnittlich ca. $7,83 \text{ h d}^{-1}$ angenommen, d. h. die Betriebszeit der RO-Anlage (ohne die Rückspülungszeit des Tiefenfilters) wird im Vergleich zur Variante A rund um den Faktor 3 reduziert. Die RO-Anlage muss dabei entweder mit konstanter Aufbe-

reitleistung laufen – dies ist dann der Fall, wenn die PV-Anlage mindestens die benötigte Energienachfrage decken kann – oder überhaupt nicht. Deshalb wird die RO-Anlage je nach PV-Stromangebot länger oder kürzer als die durchschnittliche Betriebszeit (ca. $7,83 \text{ h d}^{-1}$) betrieben. Vor jeder Betriebsphase wird eine Rückspülphase (ca. 30 min, Tab. 2) für die Vorbehandlungskomponenten durchgeführt. Um die Vorgabe einer Permeatproduktion von im Durchschnitt $100 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ zu erfüllen, muss die Entsalzungsleistung der Anlage im Vergleich zur Variante A ca. dreifach größer ausgelegt werden. Vereinfachend wird dazu angenommen, dass die RO-Anlage aus drei parallelen RO-Reihen (RO-Standardmodelle) besteht. Dadurch steigt der elektrische Leistungsverbrauch der gesamten RO-Referenzanlage um den Faktor 3.

Variante B2: PV und variable Entsalzungsleistung

Hier besteht die RO-Anlage aus mehreren RO-Reihen, die unabhängig voneinander oder auch kombiniert mit jeweils unterschiedlicher Leistung betrieben werden können. Jede RO-Reihe bzw. Kombination benötigt eine konstante Aufbereitungsleistung, die dann von der PV-Anlage bereitgestellt werden muss. Dadurch kann die RO-Anlage in Abhängigkeit von der Solarstrahlung mit einer quasi variablen Aufbereitungsleistung gefahren werden, da je nach verfügbarer PV-Leistung eine unterschiedliche Anzahl der RO-Reihen in Betrieb genommen wird. Zur Ermittlung der für einen derartigen Ansatz benötigten Anzahl an RO-Standardmodellen werden jahresdurchschnittliche Kapazitätsfaktoren auf stündlicher Basis für die standortoptimierte PV-Anlage mit 1 kW (Abschn. 4.3.1) berechnet (Abb. 7). Es wird auch unterstellt, dass die RO-Anlage im Durchschnitt 3 h d^{-1} mit maximaler Entsalzungsleistung betrieben wird. Ausgehend davon wird die Anzahl der RO-Reihen auf vier festgelegt. Vor jeder Betriebsphase der RO-Anlage wird eine Rückspülphase (ca. 30 min, Tab. 2) für die Vorbehandlungskomponenten durchgeführt.

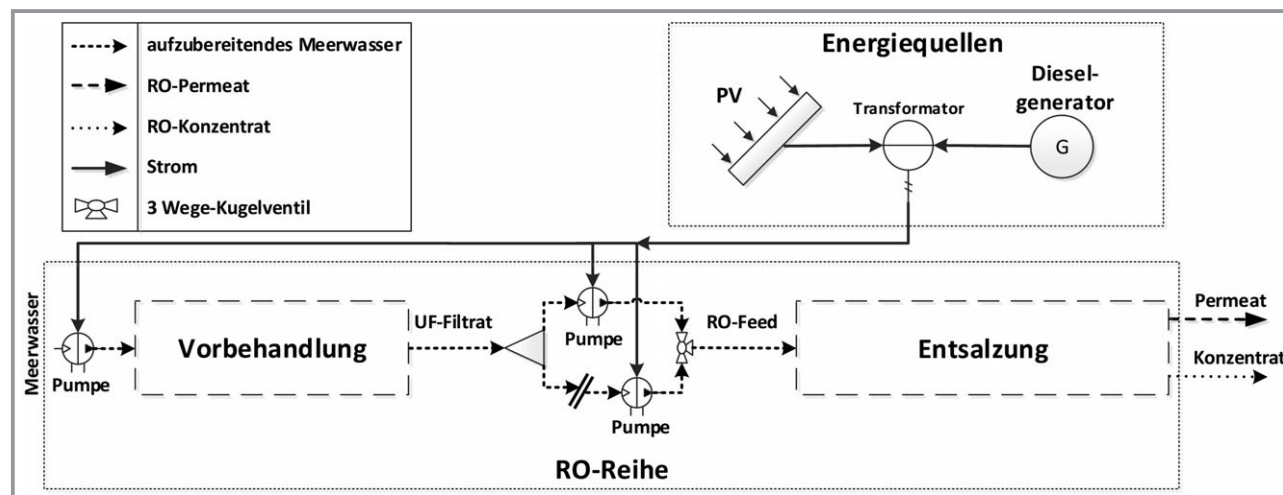


Abbildung 6. RO-Reihe mit Energiequellen (PV und Dieselgenerator).

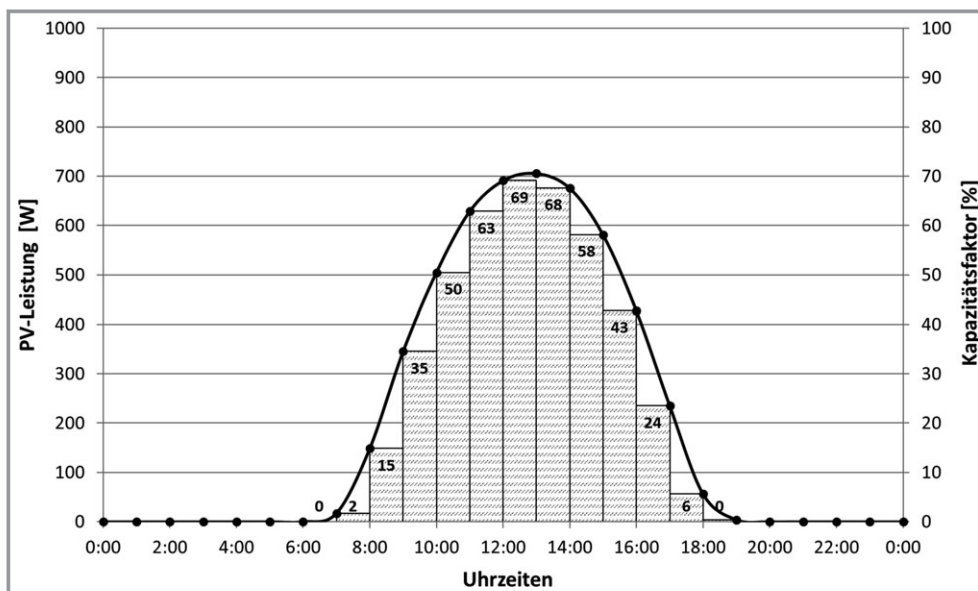


Abbildung 7. Durchschnittliche Leistung (●) und mittlerer Kapazitätsfaktor (Balken) der PV-Anlage mit 1 kW.

Variante C: PV und Energiespeicher

Die RO-Anlage wird hier auf der Basis von PV-Strom und einem Stromspeicher (Pumpspeicherkraftwerk oder Wasserstoff) betrieben.

Variante C1: PV und Pumpspeicherkraftwerk

Die RO-Referenzanlage wird in dieser Variante kontinuierlich mit einer konstanten Aufbereitungsleistung ($100 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$) auf Basis eines Hybridsystems aus PV und einem Pumpspeicherkraftwerk betrieben. Dazu sind in der Nähe des betrachteten Standorts geeignete geologische Randbedingungen vorhanden [81]. Das Pumpspeicherkraftwerk dient hier als Pufferspeicher für Zeiten, wenn die nötige elektrische Leistung durch Solarstrahlung nicht bereitgestellt werden kann. Die PV-Anlage soll den gesamten Stromverbrauch der RO-Anlage und die Energieverluste infolge des Betriebs des Pumpspeicherkraftwerks decken. Dadurch können die Schwankungen zwischen Stromangebot aus PV und Stromnachfrage der RO-Anlage ausgeglichen und eine konstante Energieversorgung gewährleistet werden. Der Gesamtwirkungsgrad moderner Pumpspeicherkraftwerke liegt, je nach Anlagengröße, bei 75 bis 80 % [82, 83]. Da das hier benötigte Pumpspeicherkraftwerk im kleinen Leistungsmaßstab ist, wird ein Gesamtwirkungsgrad für das Pumpspeicherkraftwerk von 75 % angenommen.

Variante C2: PV und Wasserstoff

In dieser Variante wird untersucht, wie die RO-Referenzanlage mit konstanter Aufbereitungsleistung ($100 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$) kontinuierlich auf Basis von PV-Strom und einem angeschlossenen Wasserstoffsysteem als Inselanlage betrieben werden kann. Die Energie, die tagsüber aus PV produziert und nicht direkt für die RO-Referenzanlage ausgenutzt wird, wird dazu genutzt, um Wasser in einem Elektrolyseur chemisch zu spalten und damit Wasserstoff zu produzieren.

Dieser Wasserstoff wird dann in einem Hochdruckbehälter gespeichert. Bei Bedarf wird der gespeicherte Wasserstoff durch eine Brennstoffzelle in elektrische Energie gewandelt, mit der dann die RO-Anlage betrieben werden kann. Der Gesamtwirkungsgrad der Wasserstoffherstellung, -speicherung und anschließenden Rückverstromung beträgt etwa 34 bis 44 % [84, 85]. Hier wird ein gesamter Speicherwirkungsgrad für das Wasserstoffsysteem von 39 % angenommen.

4.4 Auswertung

4.4.1 Variante A: PV und Dieselgenerator

Auslegung

Für Variante A werden eine PV-Anlage mit einem Flächenbedarf von 418 m^2 und einer Nennleistung von 19 kW sowie ein Dieselgenerator mit einer maximalen elektrischen Leistung von etwa 14 kW benötigt. Durch den Einsatz des Hybridsystems aus PV und Dieselgenerator kann die RO-Referenzanlage kontinuierlich (24 h d^{-1}) mit einer Entsalzungskapazität von ca. $4,17 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (entspricht $100 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$) im Inselssystem betrieben werden. Die elektrische Leistung der RO-Anlage beträgt 13,4 kW.

Betriebsanalyse

Abb. 8 zeigt die produzierte Leistung der PV-Anlage, des Dieselgenerators sowie den Leistungsbedarf der RO-Anlage. Dort sind die maximalen, minimalen und durchschnittlichen Leistungen der jeweiligen Stundenwerte basierend auf allen Stundenwerten des Jahres 2016 dargestellt. Die Grafik stellt somit keinen zeitlichen Verlauf über 24 Stunden dar, sondern präsentiert die jeweiligen Minima, Maxima und Durchschnittswerte zur jeweiligen Uhrzeit.

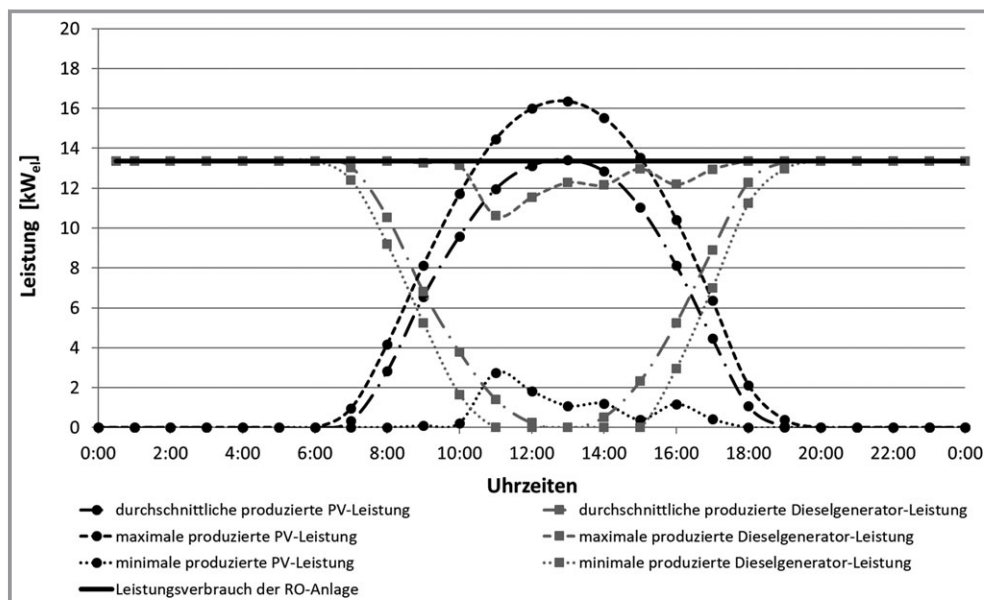


Abbildung 8. Betrieb der RO-Referenzanlage auf Basis einer PV-Anlage (19 kW) und eines Dieselgenerators (14 kW).

Der gesamte Stromverbrauch der RO-Anlage beträgt $110,3 \text{ MWh a}^{-1}$. Er wird im Durchschnitt zu ca. 30 % durch die PV-Anlage und zu ca. 70 % durch den Dieselgenerator gedeckt. In den Sommermonaten wird durch die PV-Anlage mehr Energie erzeugt, damit wird im Sommer für die RO-Anlage 12 % PV-Strom mehr als im Winter verwendet. Abb. 9 zeigt die monatlichen Strommengen aus der PV-Anlage (19 kW) und dem Dieselgenerator (14 kW), die für die RO-Wasserentsalzung genutzt werden. Dazu werden nur ca. 5 % der gesamten aus PV erzeugten Energie für die Entsalzungsprozesse nicht verbraucht.

4.4.2 Variante B1: PV und konstante Entsalzungsleistung

Auslegung

Auf Basis einer PV-Anlage (3036 m^2 Flächenbedarf) mit 138 kW wird in dieser Variante durchschnittlich etwa $100 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ Meerwasser durch eine RO-Anlage, die dreimal größer als die Referenzanlage der Variante A ist, entsalzt. Die RO-Anlage wird hier im Durchschnitt $7,83 \text{ h d}^{-1}$ mit einer konstanten Entsalzungskapazität von ca. $12,77 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ und einer elektrischen Leistung von 40,1 kW betrieben (Abb. 10).

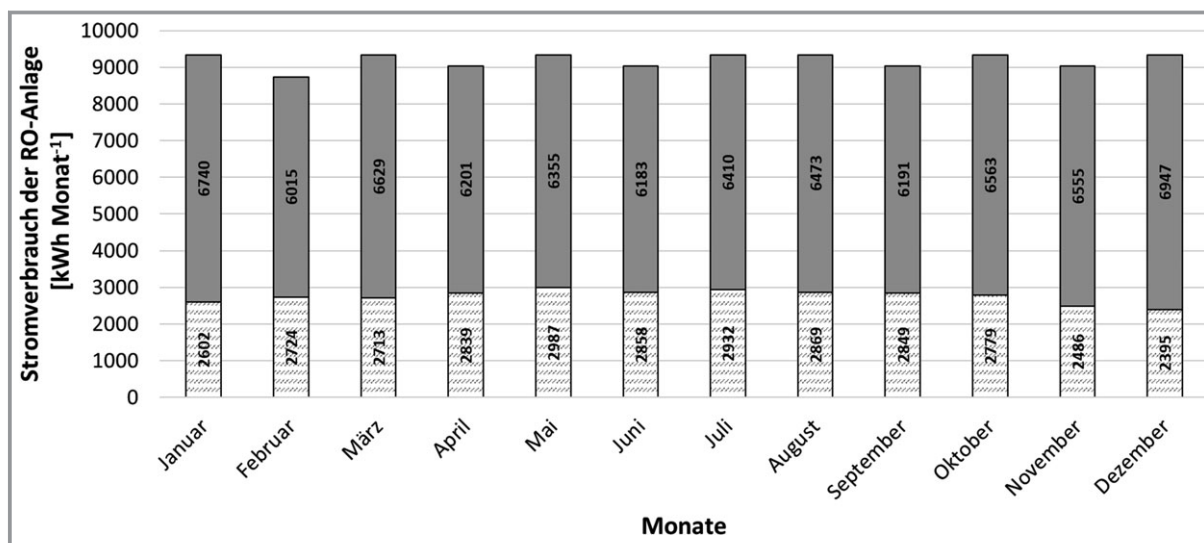


Abbildung 9. Monatliche Strommengen aus PV (Schraffur) und Dieselgenerator (grau) für den Betrieb der RO-Referenzanlage.

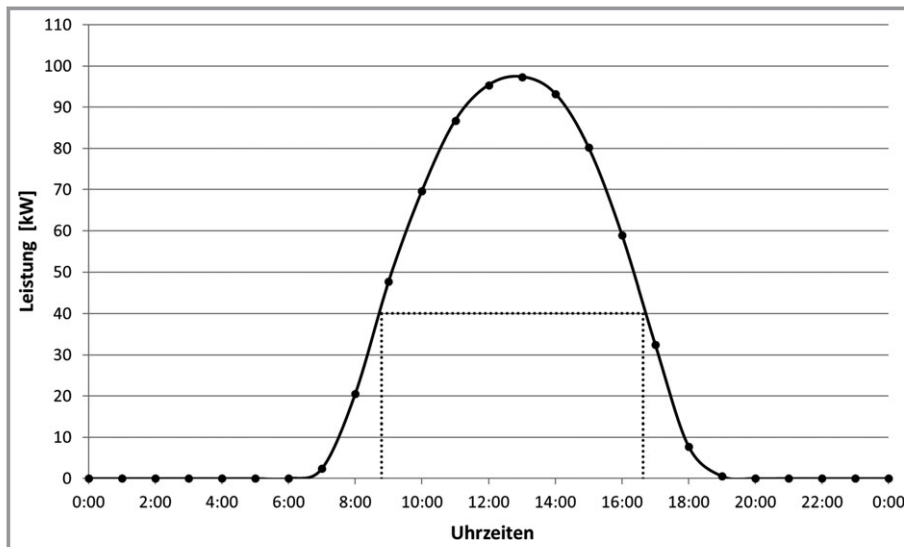


Abbildung 10. Betrieb der RO-Anlage mit einer konstanten Leistung nur auf Basis von PV (138 kW).
● Durchschnittlich produzierte PV-Leistung, ... Leistungsverbrauch der RO-Anlage.

Betriebsanalyse

Im Jahresdurchschnitt werden nur ca. 54 % des gesamten PV-Stroms für den Betrieb der RO-Anlage verbraucht. Darüber hinaus werden im Sommer durch eine längere Betriebsdauer infolge der größeren Tageslänge täglich ca. 5 % Permeat mehr als im Winter produziert (s. Abb. 12). Die Betriebszeit der RO-Anlage beträgt durchschnittlich im Sommer ca. $8,14 \text{ h d}^{-1}$ und im Winter $7,75 \text{ h d}^{-1}$. Dies kann vorteilhaft sein, da die Trinkwassernachfrage in den Sommermonaten höher als im Winter ist.

4.4.3 Variante B2: PV und variable Entsalzungsleistung

Auslegung

Um die gleiche Menge an Permeat mit einer höheren PV-Energieausnutzung zu produzieren, wird in Variante B2

eine RO-Anlage, die viermal größer als die Referenzanlage der Variante A ist, mit einer variablen Entsalzungsleistung (25 %, 50 %, 75 % oder 100 % der maximalen Entsalzungsleistung) lediglich auf PV-Basis betrieben. Dadurch wird hier eine PV-Anlage mit 90 kW Leistung und einem Flächenbedarf von 1980 m^2 benötigt. Die maximale Entsalzungskapazität der RO-Anlage beträgt $17,0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Dies erfordert eine maximale elektrische Leistung von 53,5 kW.

Betriebsanalyse

Abb. 11 zeigt den durchschnittlichen Betrieb der RO-Anlage der Variante B2 auf Basis einer PV-Anlage mit 90 kW. Aufgrund einer hohen Flexibilität beim RO-Anlagenbetrieb in Abhängigkeit von Strahlungsangebot beträgt der jährliche Ausnutzungsgrad der PV-Energieproduktion zur direkten Nutzung der RO-Meerwasserentsalzung 68,5 %. Die tägliche Permeatproduktion im Sommer ist etwa 15 % höher als im

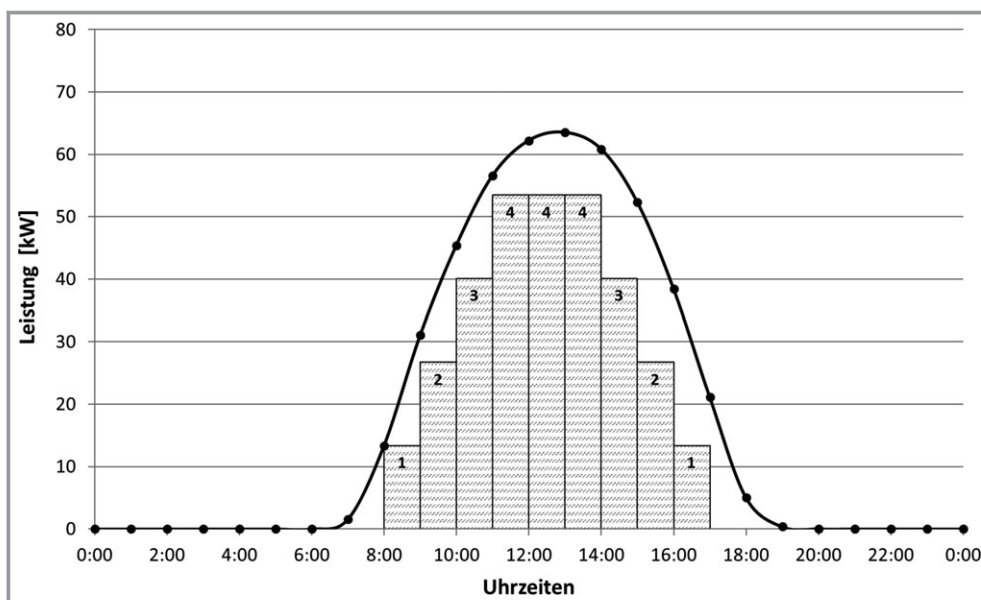


Abbildung 11. Betriebsphasen der RO-Anlage auf Basis von PV mit 90 kW.
● Durchschnittlich produzierte PV-Leistung, Balken: Anzahl der RO-Reihen in Betrieb.

Winter (Abb. 12). Tab. 9 zeigt die Betriebsstunden der verschiedenen Reihen der RO-Anlage je nach Jahreszeit.

4.4.4 Variante C1: PV und Pumpspeicherkraftwerk

Auslegung

Für Variante C1 beträgt die minimale installierte Leistung für die PV-Anlage 72 kW und deren Flächenbedarf etwa 1584 m². Dazu wird ein Pumpspeicherkraftwerk mit einer maximalen elektrischen Turbinenleistung von 14 kW und einer maximalen elektrischen Pumpenleistung von 49 kW benötigt. Die erforderliche elektrische Speicherkapazität für das Pumpspeicherkraftwerk beträgt etwa 3,3 MWh. Durch den Einsatz dieses Hybridsystems aus PV und Pumpspeicherkraftwerk kann die RO-Referenzanlage kontinuierlich (24 h d⁻¹) mit einer Entsalzungskapazität von ca. 4,17 m³h⁻¹ im Inssystem betrieben werden. Die elektrische Leistung der RO-Anlage beträgt 13,4 kW.

Betriebsanalyse

Abb. 13 zeigt den durchschnittlichen Betrieb der RO-Referenzanlage auf Basis von PV und Pumpspeicherung. Im Jahresdurchschnitt werden 36 % der PV-Stromerzeugung direkt zur RO-Meerwasserentsalzung verwendet. Die verbleibenden 64 % der PV-Energie werden in dem Pumpspeicherkraftwerk zwischengespeichert.

Die gespeicherte Energie wird bei Bedarf wieder in elektrische Energie gewandelt, um einen kontinuierlichen Betrieb der RO-Referenzanlage zu ermöglichen. Damit liegt

Tabelle 9. Betriebsstunden der Reihen der RO-Anlage im Jahr 2016.

| Anzahl RO-Reihen | min. Betriebsstunden [h] | | | | |
|------------------|--------------------------|----------|--------|--------|------|
| | Winter | Frühling | Sommer | Herbst | Jahr |
| 1 | 102 | 155 | 184 | 147 | 588 |
| 2 | 142 | 128 | 98 | 168 | 536 |
| 3 | 173 | 179 | 226 | 170 | 748 |
| 4 | 270 | 314 | 314 | 275 | 1173 |

die tägliche Stromproduktion aus dem Pumpspeicher im Jahresverlauf zwischen 162 und 241 kWh d⁻¹ (Abb. 14). Im Frühling und Sommer werden 2380 kWh_{el} überschüssige Energie im Pumpspeicherkraftwerk zwischen gespeichert. Diese überschüssige Energie beträgt 2,16 % vom gesamten jährlichen Stromverbrauch der RO-Anlage und wird im Herbst und Winter zur Meerwasserentsalzung wiedergenutzt (Abb. 14). Im Jahresdurchschnitt gehen 15,9 % der gesamten jährlichen PV-Stromproduktion durch die Energiespeicherung im Pumpspeicherkraftwerk verloren.

4.4.5 Variante C2: PV und Wasserstoff

Auslegung

In Variante C2 werden eine PV-Anlage (2486 m²) mit einer Leistung von 113 kW und ein Wasserstoffsystem mit einer Brennstoffzelle mit einer maximalen elektrischen Leistung von 14 kW, einem Elektrolyseur mit einer maximalen elektrischen Eingangsleistung von 84 kW sowie einem Wasserstoff-Hochdruckbehälter mit einer maximalen elektrischen

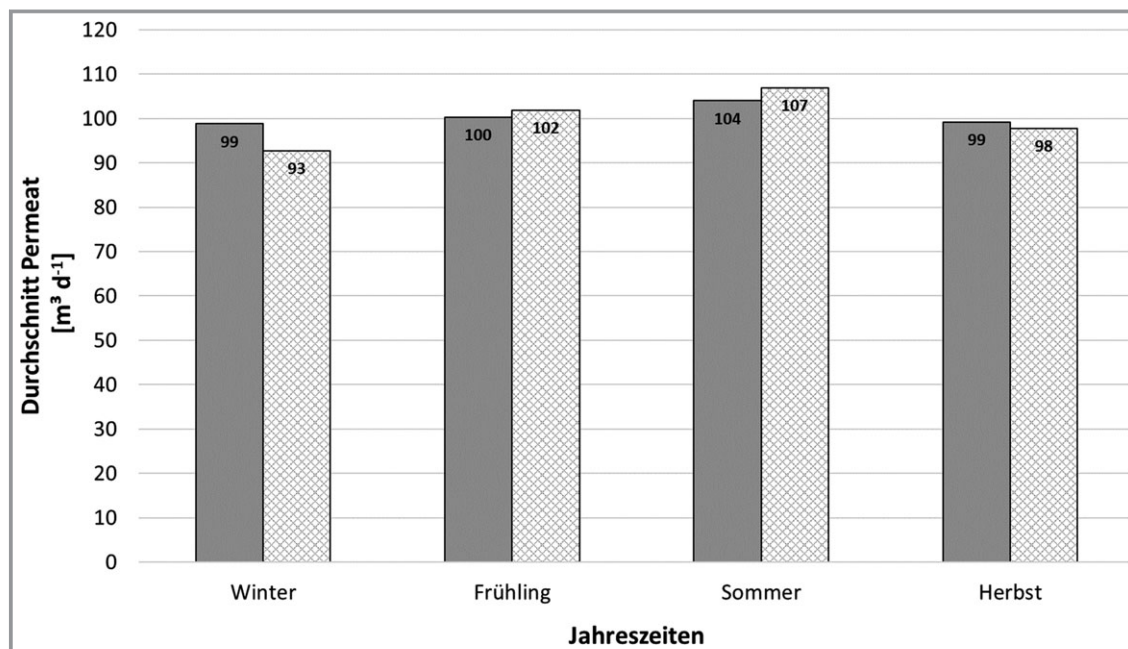


Abbildung 12. Durchschnittliche jahreszeitliche Permeatproduktion für Variante B1 (3 RO-Reihen auf Basis von PV mit 138 kW, grau) und Variante B2 (4 RO-Reihen auf Basis von PV mit 90 kW, Schraffur).

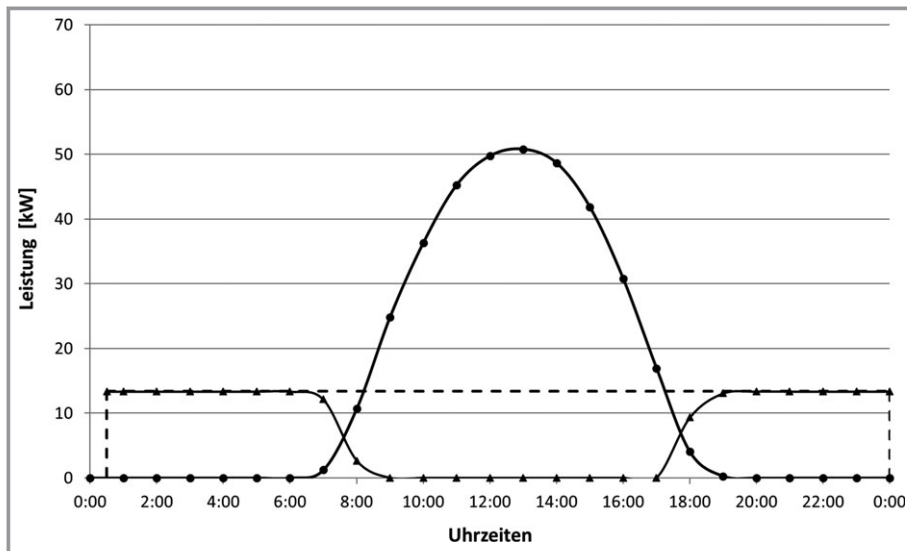


Abbildung 13. RO-Anlage ($100 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$) auf Basis von PV mit 72 kW und Pumpspeicherkraftwerk mit 14 kW. ● Durchschnittlich produzierte PV-Leistung, ▲ durchschnittlich produzierte Pumpspeicherkraftwerk-Leistung, -- Leistungsverbrauch der RO-Anlage.

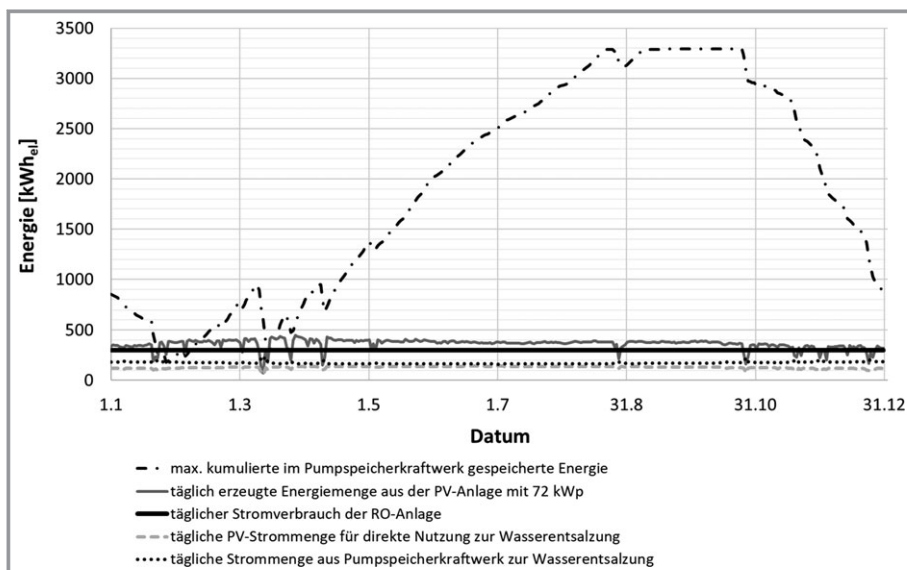


Abbildung 14. Jahresverlauf der PV-Stromproduktion und der Energiespeicherung im Pumpspeicher zur Deckung der Stromnachfrage der RO-Anlage.

Speicherkapazität von 3,2 MWh benötigt, um die RO-Referenzanlage kontinuierlich (24 h d^{-1}) mit einer Aufbereitungsleistung von ca. $4,17 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ zu betreiben. Die elektrische Leistung der RO-Anlage beträgt 13,4 kW.

Betriebsanalyse

Abb. 15 zeigt den durchschnittlichen Betrieb der RO-Referenzanlage auf Basis von PV und Wasserstoffsystem. Etwa 24 % der gesamten jährlichen Stromproduktion aus der PV-Anlage werden direkt für den Meerwasserentsalzungsprozess genutzt. Die restliche erzeugte PV-Energie, die im Jahresverlauf zwischen von 36 bis 562 kWh d^{-1} variiert, wird zur Wasserstoffproduktion verwendet (Abb. 16).

Die im Wasserstoff gespeicherte Energie wird nachts oder bei Bedarf wieder zur Stromversorgung der RO-Anlage

genutzt. Die tägliche Rückverstromung des gespeicherten Wasserstoffs zur Deckung der Stromnachfrage der RO-Anlage variiert damit zwischen 155 und 226 kWh. Somit gehen im Durchschnitt $264 \text{ kWh}_{\text{el}} \text{ d}^{-1}$ durch die Wasserstoffherstellung, -speicherung und anschließenden Rückverstromung verloren (Abb. 15 und Abb. 16). Diese Energieverluste betragen im Jahresdurchschnitt 46,2 % der gesamten jährlichen PV-Stromproduktion. Im Frühling und Sommer werden ca. $2469 \text{ kWh}_{\text{el}}$ überschüssige Energie als Wasserstoff zwischen gespeichert. Diese überschüssige Energie beträgt 2,24 % des gesamten jährlichen Stromverbrauchs der RO-Anlage und wird im Herbst und Winter zur Meerwasserentsalzung wiedergenutzt (Abb. 16).

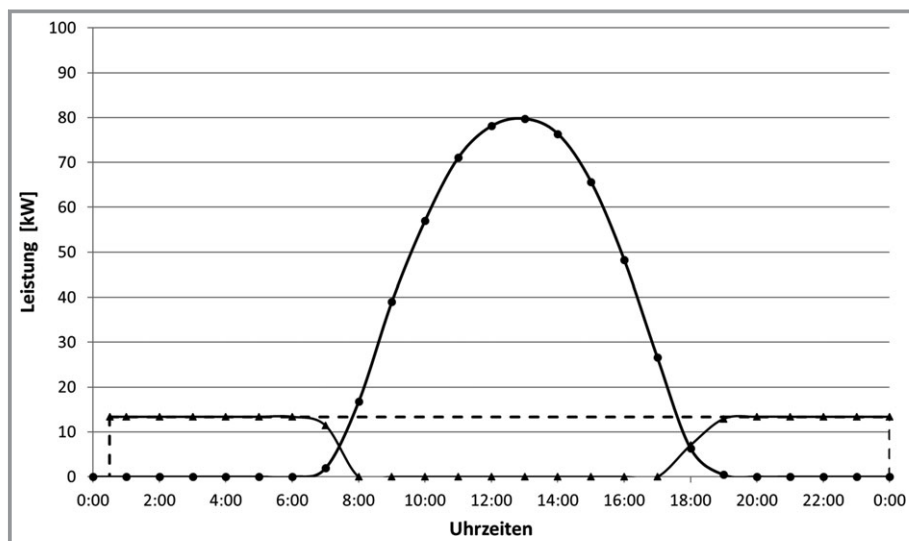


Abbildung 15. Betrieb der RO-Anlage mit einer konstanten Leistung auf Basis von PV (113 kW) und Wasserstoffsystem mit einer Brennstoffzelle (14 kW). ● Durchschnittlich produzierte PV-Leistung, ▲ durchschnittlich produzierte Leistung aus Wasserstoff, -- Leistungsverbrauch der RO-Anlage.

4.5 Vergleich der Varianten

In Abb. 17 werden die maximale elektrische Leistung der Energiequellen bzw. -speicher (PV und Dieselgenerator, lediglich PV, PV und Pumpspeicherkraftwerk oder PV und Wasserstoffsystem) sowie die Anzahl der RO-Reihen der untersuchten Varianten zusammengefasst.

Obwohl die PV-Anlage der Variante A so ausgelegt wird, dass das Jahresmittel und nicht das Jahresmaximum der PV-Tagesspitzenleistung der Leistungsaufnahme der RO-Referenzanlage entspricht, wird für Variante A eine PV-Anlage mit 19 kW benötigt. Sie ist kleiner als die PV-Anlage der Variante B1 mit 626 %, die PV-Anlage der Variante B2 mit 374 %, die PV-Anlage der Variante C1 mit 279 % und die PV-Anlage der Variante C2 mit 495 %. Dazu wird aber nur für Variante A eine konventionelle Energie-

quelle (Dieselgenerator) eingesetzt. Die Permeatproduktionsrate bleibt 24 h d^{-1} in Variante A wie auch in Variante C1 und C2 konstant auf ca. $4,17 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (entspricht $100 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$).

In Variante B1 wird im Vergleich zu allen anderen Varianten die größte PV-Anlage mit 138 kW eingesetzt. Die benötigte RO-Anlage wird im Durchschnitt mit einer Betriebszeit von $7,83 \text{ h d}^{-1}$ und einer konstanten Entsalzungskapazität von ca. $12,77 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ betrieben. Diese ist damit dreimal größer als die Referenzanlage der Varianten A, C1 und C2 (Abb. 17). In Variante B2 wird eine RO-Anlage ($17,0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$), die ca. 33 % größer als die RO-Anlage der Variante B1 ist, durchschnittlich mit einer Betriebszeit von $8,32 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ und mit einer variablen Entsalzungsleistung betrieben (Abschn. 4.3.2). Dadurch wird im Vergleich zu Variante B1 die Nennleistung der PV-Anlage um 34,8 %

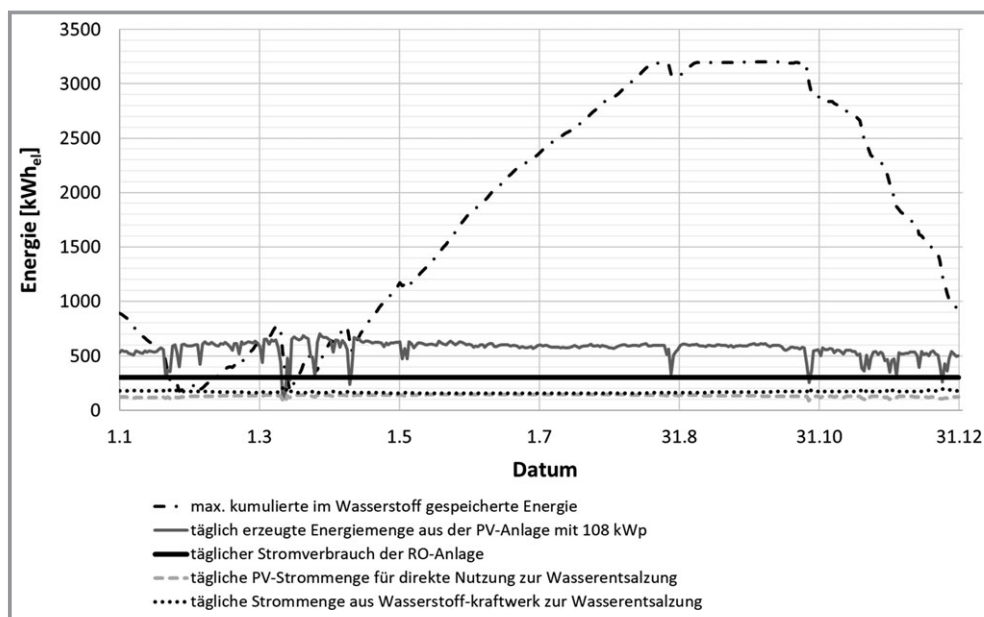


Abbildung 16. Jahresverlauf der PV-Stromproduktion und der Energiespeicherung im Wasserstoffsystem zur Deckung der Stromnachfrage der RO-Anlage.

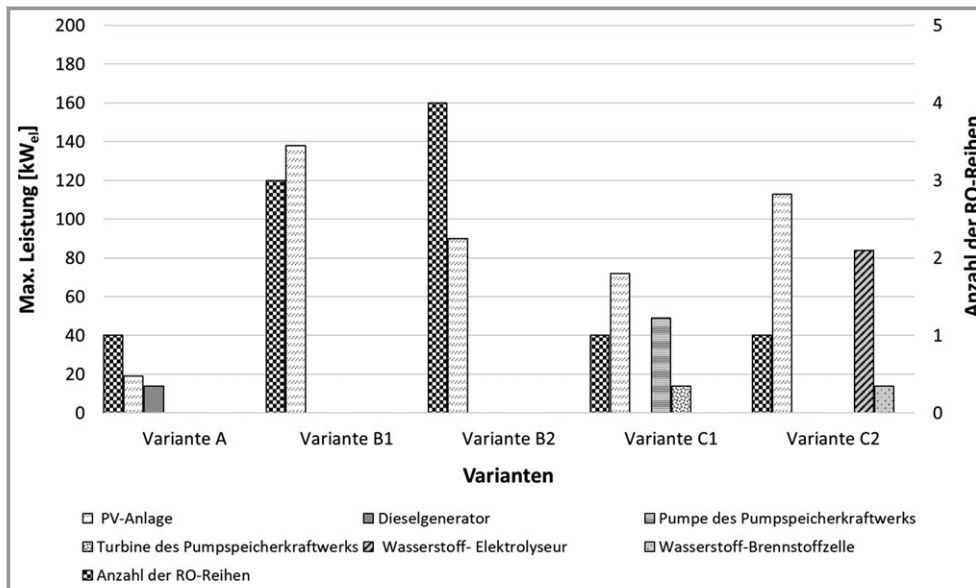


Abbildung 17. Vergleich der untersuchten Varianten.

reduziert und der jährliche Ausnutzungsgrad der PV-Energieproduktion zur direkten Nutzung der RO-Meerwasserentsalzung um 27 % erhöht (Abb. 10 und Abb. 11). Durch diese Erhöhung des Ausnutzungsgrades der PV-Energieproduktion wird in den Sommermonaten in Variante B2 durchschnittlich $2,9 \text{ m}^3$ Permeat pro Tag mehr als in Variante B1 produziert (Abb. 12), obwohl die Nennleistung der PV-Anlage in Variante B2 kleiner als in Variante B1 ist. Im Dezember wird in beiden Varianten (B1 und B2) am wenigsten Permeat produziert; $92 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ in Variante B1 und $82 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ in Variante B2.

Durch den Einsatz eines Pumpspeicherkraftwerks (max. Turbinenleistung: $14 \text{ kW}_{\text{el}}$, max. Pumpenleistung: $49 \text{ kW}_{\text{el}}$ und max. Speicherkapazität: $3,3 \text{ MWh}_{\text{el}}$) wird in Variante C1 die installierte PV-Leistung um 47,8 % im Vergleich zu Variante B1 und um 20 % im Vergleich zu Variante B2 reduziert. Dazu wird die Größe der RO-Anlage der Variante C1 dreimal im Vergleich zu Variante B1 und viermal im Vergleich zu Variante B2 verkleinert (Abb. 17).

Darüber hinaus wird in Variante C2 durch den Einsatz eines Wasserstoffsystems zur Energiespeicherung (max. Elektrolyseurleistung: $84 \text{ kW}_{\text{el}}$, max. Speicherkapazität: $3,2 \text{ MWh}_{\text{el}}$, max. Leistung der Wasserstoff-Brennstoffzelle: $14 \text{ kW}_{\text{el}}$) die Nennleistung der PV-Anlage um 18,1 % im Vergleich zu Variante B1 reduziert. Im Vergleich zu Variante B2 wird auf der einen Seite die erforderliche PV-Leistung für Variante C2 um 25,6 % erhöht, aber auf der anderen Seite wird die Entsalzungskapazität der RO-Anlage der Variante C2 um das Vierfache reduziert. Wie aus Abb. 17 ersichtlich, wird in Variante C2, C1 sowie A nur eine RO-Reihe eingesetzt. Dazu wird aber die benötigte PV-Leistung für Variante C2 um 56,9 % im Vergleich zu Variante C1 erhöht, um die höheren Energieverluste durch die Wasserstoffherstellung, -speicherung und anschließenden Rückverstromung zu decken. Durch diese Erhöhung der installierten Leistung der PV-Anlage wird in Variante C2 die

RO-Anlage nur auf Basis von PV-Strom durchschnittlich ca. 1 h d^{-1} länger als in Variante C1 betrieben (Abb. 13 und 15).

5 Schlussbetrachtung

Eine Kombination zwischen RO- und PV-Anlagen bietet einen attraktiven Lösungsansatz zur energieautarken Brack- und Meerwasserentsalzung, da RO-Anlagen nur elektrische Energie benötigen und das solare Strahlungsangebot in ariden und semiariden Gebieten, die meist stark von Trinkwasserknappheit betroffen sind, sehr hoch ist. Deshalb war es das Ziel dieser Ausarbeitung, eine RO-Meerwasserentsalzungsanlage exemplarisch unter den geographischen Bedingungen für einen Standort in Saudi-Arabien auszulegen, zu modellieren und drei Betriebsvarianten zu simulieren, mit denen diese RO-Anlage als netzunabhängiges System auf Basis von Photovoltaik betrieben werden könnte. Durch die Auswertung der Simulationsergebnisse für den Referenzstandort wurden die folgenden Erkenntnisse gewonnen.

- Wird die Entsalzung kontinuierlich (24 h d^{-1}) auf Basis eines Hybridsystems aus PV und einer anderen konventionellen Energiequelle (z. B. Dieselgenerator) betrieben, wird im Vergleich zu anderen Betriebsvarianten, die ausschließlich auf der Basis von PV-Strom (ohne oder einschließlich eines zusätzlichen Energiespeichers) realisiert werden, eine deutlich kleinere PV-Anlage benötigt; sie kann aber im Jahresdurchschnitt nur ca. 30 % der gesamten Stromnachfrage der RO-Anlage decken. Hinzu kommt, dass an dem untersuchten Standort die PV-Energieversorgung der RO-Anlage in den Sommermonaten etwa 12 % mehr Strom als in den Wintermonaten liefert.
- Auf Basis eines PV-Pumpspeicher-Hybridsystems kann eine RO-Meerwasserentsalzung kontinuierlich (24 h d^{-1})

- ohne Nutzung fossiler Energieträger betrieben werden. Im Jahresdurchschnitt werden dabei bis zu 36 % von der PV-Stromerzeugung direkt zur RO-Meerwasserentsalzung verwendet. Die restliche erzeugte PV-Energie wird in dem Pumpspeicherkraftwerk zwischengespeichert. Etwa 16 % von der gesamten jährlichen PV-Stromproduktion gehen dabei durch die Verluste der Energiespeicherung im Pumpspeicherkraftwerk verloren. Bei gleicher produzierter Permeatmenge kann dann die benötigte PV-Anlage 20 bzw. 48 % kleiner im Vergleich zu einer ausschließlich PV-betriebenen Anlage mit einer variablen bzw. einer konstanten stündlichen Entsalzungsleistung dimensioniert werden. Die ausschließlich PV-betriebenen RO-Anlagen müssen ca. drei- bis viermal größer ausgelegt werden im Vergleich zu einer RO-Anlage, die auf Basis von PV und Pumpspeicher betrieben wird.
- Eine RO-Anlage zur Meerwasserentsalzung kann alternativ durch eine PV-Anlage plus ein Wasserstoffsystem zur Energiezwischenspeicherung – d. h. ohne Nutzung fossiler Energieträger – kontinuierlich 24 h am Tag mit einer konstanten Aufbereitungsleistung betrieben werden. Da der Gesamtwirkungsgrad bei der Wasserstoffherstellung, -speicherung und anschließender Rückverstromung niedrig ist, muss die PV-Anlage ca. 57 % größer dimensioniert werden im Vergleich zu der Pumpspeichervariante. Dadurch werden nur 24 % der gesamten jährlichen PV-Stromproduktion direkt zur RO-Meerwasserentsalzung genutzt. Die verbleibenden 76 % der PV-Energie werden im Wasserstoffsystem zwischengespeichert. Insgesamt gehen 46 % der jährlichen PV-Stromproduktion durch Verluste bei der Energiespeicherung und Rückverstromung im Wasserstoffsystem verloren.
 - Wird eine RO-Inselanlage mit einer konstanten Aufbereitungsleistung kontinuierlich auf Basis von PV und einem Energiespeicher (Pumpspeicher oder Wasserstoff) betrieben, muss an dem untersuchten Standort im Frühling und Sommer ca. 2 % des gesamten jährlichen Stromverbrauchs der RO-Anlage zwischengespeichert werden. Diese gespeicherte Energie wird im Herbst und Winter zur Meerwasserentsalzung wiedergenutzt.
 - Im Inselbetrieb einer Entsalzungsanlage mit einer konstanten stündlichen Aufbereitungsleistung ($4,17 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$) und einer vollständigen Strombereitstellung aus PV ohne Energiespeicherung kann unter den getroffenen Rahmenannahmen nur etwas mehr als die Hälfte (ca. 54 %) der gesamten PV-Energie für die Entsalzungsprozesse genutzt werden. Entsprechend würden weitere externe Stromabnehmer benötigt, damit diese große Menge an PV-Überschussstrom sinnvoll verwendet werden kann. Im Vergleich zu anderen Betriebsvarianten, die auf der Basis eines Hybridsystems aus PV und einer konventionellen Energiequelle oder einem Stromspeicher (Pumpspeicherkraftwerk oder Wasserstoff) realisiert werden, wird in dieser Betriebsvariante die größte PV-Anlage benötigt. Um $100 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ Meerwasser zu entsalzen, muss eine

PV-Anlage mit 138 kW Leistung und 3036 m^2 Flächenbedarf installiert werden. Dazu muss die RO-Anlage ca. dreimal größer dimensioniert sein als bei einem ganz-täglichen, kontinuierlichen Betrieb. Aus diesen Gründen sind solche PV-RO-Systeme nur im kleinen Leistungsmaßstab realisierbar.

- Besteht eine RO-Anlage auf Basis von 100 % PV aus vier RO-Reihen, die unabhängig voneinander mit konstanter Leistung betrieben werden können, kann dieses PV-RO-System in Abhängigkeit der Solarstrahlung bzw. der verfügbaren PV-Leistung mit variablen Entsalzungsleistungen (25 %, 50 %, 75 % oder 100 % der maximalen Entsalzungsleistung) betrieben werden. Somit kann die benötigte Nennleistung der PV-Anlage um 35 % reduziert und der jährliche Ausnutzungsgrad der PV-Energieproduktion zur direkten Nutzung der RO-Meerwasserentsalzung auf rund zwei Drittel (ca. 69 %) verbessert werden. Dazu muss die gesamte Entsalzungsleistung dieser RO-Anlage aber um ca. ein Drittel größer ausgelegt werden als beim Inselbetrieb mit einer konstanten Aufbereitungsleistung, um die gleiche Menge an Permeat produzieren zu können.

Literatur

- [1] *The United Nations World Water Development Report 2019: Leaving No One Behind*, UNESCO World Water Assessment Programme, Paris **2019**.
- [2] *Progress on drinking water, sanitation and hygiene: 2017 update and SDG baselines*, WHO, UNICEF, Genf **2017**.
- [3] *Gemeinsame Erklärung der Wissenschaftsakademien der G8+ zu Wasser und Gesundheit*, Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina, Nationale Akademie der Wissenschaften, Berlin **2011**.
- [4] S. Lattemann, *Development of an Environmental Impact Assessment and Decision Support System for Seawater Desalination Plants*, CRC Press, Boca Raton, FL **2010**.
- [5] *Desalination Markets 2016* (Eds: F. Alvarado-Revilla, H. Brown, M. Charamidi, I. Elkins), Media Analytics Ltd., Oxford **2015**.
- [6] E. Jones, M. Qadir, M. T. H. van Vliet, V. Smakhtin, S.-M. Kang, *Sci. Total Environ.* **2019**, 657, 1343–1356. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.076>
- [7] A. M. Delgado-Torres, L. García-Rodríguez, B. Peñate, J. A. de La Fuente, G. Melián, in *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes*, Elsevier, Amsterdam **2019**, 45–84. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813545-7.00003-9>
- [8] *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Genf **2013**.
- [9] A. Giwa, N. Akther, A. A. Housani, S. Haris, S. W. Hasan, *Renewable Sustainable Energy Rev.* **2016**, 57, 929–944. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.108>
- [10] A. Ali, R. A. Tufa, F. Macedonio, E. Curcio, E. Drioli, *Renewable Sustainable Energy Rev.* **2018**, 81, 1–21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.047>
- [11] P. Malek, H. M. A. Schulte-Herbrüggen, J. M. Ortiz, *Clean Water from Clean Energy: Decentralised Drinking Water Production Using Wind Energy Powered Electrodialysis*, in *Sustainable Energy – Technological Issues, Applications and Case Studies* (Eds: A. F.

- Zobaa, S. N. Afifi, I. Pisica), IntechOpen, **2016**. DOI: <https://doi.org/10.5772/65015>
- [12] A. Albloushi, A. Giwa, D. Mukherjee, V. Calabro, A. Cassano, S. Chakraborty, S. W. Hasan, in *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes*, Elsevier, Amsterdam **2019**, 153–177. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813545-7.00007-6>
 - [13] A. Alkai, R. Mossad, A. Sharifian-Barforoush, *Energy Proc.* **2017**, 110, 268–274. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.138>
 - [14] C.-S. Karavas, K. G. Arvanitis, G. Papadakis, *Desalination* **2019**, 466, 97–106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.05.007>
 - [15] V. G. Gude, *Therm. Sci. Eng. Prog.* **2018**, 8, 154–170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.08.012>
 - [16] M. A. Abdelkareem, M. El Haj Assad, E. T. Sayed, B. Soudan, *Desalination* **2018**, 435, 97–113. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.018>
 - [17] *Renewables 2017: Global Status Report*, REN21, Montréal, QC, CA **2017**.
 - [18] C. Kost, S. Shammugam, V. Jülch, H.-T. Nguyen, T. Schlegel, *Stromgestehungskosten erneuerbare Energien*, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg **2018**.
 - [19] *Weather data and software for solar power investments*, Solargis, **2019**. <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/world>
 - [20] www.fao.org/sustainable-development-goals/indicators/642/en/
 - [21] J. S. Kim, J. Chen, H. E. Garcia, *Energy* **2016**, 112, 52–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.050>
 - [22] M. Badruzzaman, N. Voutchkov, L. Weinrich, J. G. Jacangelo, *Desalination* **2019**, 449, 78–91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.10.006>
 - [23] W. J. Lau, P. S. Goh, A. F. Ismail, S. O. Lai, *Membr. Water Treat.* **2014**, 5 (1), 15–29. DOI: <https://doi.org/10.12989/mwt.2014.5.1.015>
 - [24] F. Macedonio, E. Drioli, A. A. Gusev, A. Bardow, R. Semiat, M. Kurihara, *Chem. Eng. Process.* **2012**, 51, 2–17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2011.09.011>
 - [25] *Filtration and Water Treatment: Automatische Hydraulikfilter AF -200 Series*, yamit, HaHermon/Masada, Tnuvot **2017**. www.yamit-f.com/wp-content/uploads/2018/08/AF200-YAMIT-English-DS.pdf (Zugriff 10.10.2019)
 - [26] C. Bäcker, *Spülbedingungen für Tiefenfilter und deren Auswirkungen auf die Erstfiltratqualität*, Dissertation, Universität Duisburg-Essen **2010**.
 - [27] S. Wilhelm, *Wasseraufbereitung: Chemie und chemische Verfahrenstechnik*, 7. Aufl., Springer-Verlag, Berlin **2008**.
 - [28] A. Cipollina, G. Micale, L. Rizzuti, *Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes: Green Energy and Technology*, Springer-Verlag, Berlin **2009**.
 - [29] W 213-2 Arbeitsblatt 09/2015, *Filtrationsverfahren zur Partikel-entfernung, Teil 2: Beurteilung und Anwendung von gekörnten Filtermaterialien*, WVGW, Bonn **2005**.
 - [30] www.inge.basf.com/ev/internet/inge/de/content/inge/Anwendungen/meerwasser
 - [31] P. Lipp, G. Baldauf, *Energ. Wasser Prax.* **2008**, 4, 60–64.
 - [32] J. Koschikowski, *Entwicklung von energieautark arbeitenden Wasserentsalzungsanlagen auf Basis der Membrandestillation*, Fraunhofer-Verlag, Stuttgart **2011**.
 - [33] J. Kucera, *Reverse osmosis: Design, processes, and applications for engineers*, Scrivener Publishing LLC, Hoboken, NJ **2010**.
 - [34] *Membrane and desalination technologies*, Handbook of environmental engineering, Vol. 13 (Eds: L. K. Wang), Humana Press, New York **2011**.
 - [35] *Process plant equipment: Operation, control, and reliability* (Eds: M. D. Holloway, C. Nwaoha, O. A. Onyewuenyi), Wiley, Hoboken, NJ **2013**.
 - [36] *FILMTEC™ Reverse Osmosis Membranes – Technical Manual*, The Dow Chemical Company, Midland, MI **2017**.
 - [37] T. Melin, R. Rautenbach, *Membranverfahren: Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung*, 3. Aufl., Springer-Verlag, Berlin **2007**.
 - [38] J. Kucera, *Desalination: Water from Water*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ **2014**.
 - [39] L. Birnhack, N. Voutchkov, O. Lahav, *Desalination* **2011**, 273 (1), 6–22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.11.011>
 - [40] *Guidelines for Drinking-water Quality*, World Health Organization, Genf **2011**.
 - [41] W. Gujer, *Siedlungswasserwirtschaft*, 3. Aufl., Springer, Berlin **2007**.
 - [42] *Aspen Plus*, Aspen Technology, Inc., Bedford, MA **2016**.
 - [43] *Photovoltaic Geographical Information System – Interactive Maps*, **2018**. <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis.html>
 - [44] *Copernicus Marine Environment Monitoring Service*, EU Copernicus, **2018**. <http://marine.copernicus.eu>
 - [45] *Reverse Osmosis System Analysis (ROSA)*, Version 9.1, The Dow Chemical Company, USA **2013**.
 - [46] *Produktdatenblatt: DOW FILMTEC™ SW30HRLE–370/34i Element*, The Dow Chemical Company, Midland, MI **2016**. www.lenntech.com/Data-sheets/Dow-Filmtec-SW30HRLE-370-34i.pdf (Zugriff 10.10.2019)
 - [47] Z. Cao, J. Deng, W. Yuan, Z. Chen, *Desalin. Water Treat.* **2015**, 57 (33), 15265–15275. DOI: <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1072739>
 - [48] *Produktkatalog: Desalination, Energy Recovery*, San Leandro, CA **2018**. www.energyrecovery.com/resource/water-products-catalog
 - [49] *Seawater Desalination Power Consumption*, White paper, WaterReuse Association Desalination Committee, November **2011**. https://watereuse.org/wp-content/uploads/2015/10/Power_consumption_white_paper.pdf (Zugriff 10.10.2019)
 - [50] W. Klöden, *Simulation des stationären Verhaltens verfahrenstechnischer Systeme – Unter Nutzung des Simulationsprogramms Aspen Plus 11.1*, Technische Universität Dresden **2006**.
 - [51] N. M. Gurmen, M. Quigley, *Aspen Plus™ Workshop for Reaction Engineering Design*, University of Michigan **2010**.
 - [52] F. Trippé, *Techno-ökonomische Bewertung alternativer Verfahrenskonfigurationen zur Herstellung von Biomass-to-Liquid (BtL) Kraftstoffen und Chemikalien*, Produktion und Energie, Vol. 3, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe **2013**.
 - [53] P. Kerdoncuff, *Modellierung und Bewertung von Prozessketten zur Modellierung und Bewertung von Prozessketten zur Herstellung von Biokraftstoffen der zweiten Generation*, Dissertation, Universität Karlsruhe (TH) **2008**.
 - [54] T. Huld, I. Pinedo Pascua, A. Gracia Amillo, *PVGIS 5: New algorithms and features*, JRC technical reports, **2017**.
 - [55] T. Huld, *Software tools for the estimation of solar radiation and photovoltaic module performance over large geographical areas*, **2016**. <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvmaps/pvmaps.pdf>
 - [56] T. Huld, A. Gracia Amillo, *Energies* **2015**. DOI: <https://doi.org/10.3390/en8065159>
 - [57] T. Huld, G. Friesen, A. Skoczek, R. P. Kenny, T. Sample, M. Field, E. D. Dunlop, *Solar Energy Mater. Solar Cells* **2011**, 95 (12), 3359–3369. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.07.026>
 - [58] D. Faiman, *Prog. Photovoltaics* **2008**, 16 (4), 307–315. DOI: <https://doi.org/10.1002/pip.813>
 - [59] M. Koehl, M. Heck, S. Wiesmeier, J. Wirth, *Solar Energy Mater. Solar Cells* **2011**, 95 (7), 1638–1646. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.01.020>
 - [60] *Annual Report 2015*, Saline Water Conversion Corporation (SWCC), Riad **2015**.

- [61] www.swcc.gov.sa/english/Pages/Home.aspx
- [62] S. Weiler, P. Tedros, *Saudi-Arabien Meerwasserentsalzung und Offgrid-Lösungen für die Industrie – Wind, CSP UND PV*, Delegation der Deutschen Wirtschaft für Saudi-Arabien, Bahrain und Jemen, Riad **2014**.
- [63] M. A. M. Khan, S. Rehman, F. A. Al-Sulaiman, *Renewable Sustainable Energy Rev.* **2018**, 97, 456–477. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.049>
- [64] *Seawater: Its composition, properties and behaviour*, 2nd ed., Oceanography series, Vol. 2 (Eds: J. Brown, G. Bearman, J. Wright), Butterworth-Heinemann, Oxford **2007**.
- [65] J. A. Gittings, D. E. Raitos, G. Krokos, I. Hoteit, *Sci. Rep.* **2018**, 8 (1), 2240. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20560-5>
- [66] Z. A. Mohamed, *Mar. Environ. Res.* **2018**, 140, 234–242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2018.06.019>
- [67] *Emerging technologies for sustainable desalination handbook* (Eds: V. G. Gude), Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford **2018**.
- [68] W. Kölle, *Wasseranalysen – richtig beurteilt: Grundlagen, Parameter, Wassertypen, Inhaltsstoffe, Grenzwerte nach Trinkwasserverordnung und EU-Trinkwasserrichtlinie*, 3. Aufl., Wiley-VCH Verlag, Weinheim **2010**.
- [69] F. Wisotzky, *Angewandte Grundwasserchemie, Hydrogeologie und hydrogeochemische Modellierung*, Springer, Berlin **2011**.
- [70] *Ocean Color*, NASA, Washington D.C. **2019**. <https://oceanscolor.gsfc.nasa.gov/cgi/l3>
- [71] A. H. A. Dehwah, S. Li, S. Al-Mashharawi, F. L. Mallon, Z. Batang, T. M. Missimer, in *Intakes and Outfalls for Seawater Reverse-Osmosis Desalination Facilities*, Environmental Science and Engineering (Eds: T. M. Missimer, B. Jones, R. G. Maliva), Springer International Publishing, Cham **2015**.
- [72] *Datenheft (CRT, CRTE): vertikale, mehrstufige Kreiselpumpen aus Titan*, Grundfos, Bjerringbro **2018**. www.aga-tech.at/assets/uploads/2016/09/Datenheft-CRT-vertikale-Kreiselpumpe-aus-TITAN.pdf
- [73] *Produktkatalog: Filter-Ag Plus®*, Birmfilter, San Jose, CA **2018**. www.birmfilter.com/products/other-products1/filter-ag-plus/
- [74] *Datenblatt: dizzer® XL Ultrafiltrationsmodule (Technische Spezifikation)*, Inge GmbH, Greifenberg **2018**. www.inge.basf.com/ev/internet/inge/de/function/conversions/publish/content/inge/Support_Downloads/downloads/Technical_Specifications_dizzer_XL_MB_D_inge.pdf
- [75] *Bedienungsanleitung: Ultrafiltrationsmodule*, Inge GmbH, Greifenberg **2016**.
- [76] *Produktkatalog: Making fresh water possible: High-pressure pumps for seawater reverse osmosis applications*, Danfoss, Nordborg **2015**.
- [77] N. Voutchkov, *Desalination* **2018**, 431, 2–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.033>
- [78] *IDA Desalination Yearbook: 2016–2017: Water Desalination Report*, Global Water Intelligence, Oxford, UK **2017**.
- [79] *Land Use by System Technology*, National Renewable Energy Laboratory, Washington D.C. **2019**. www.nrel.gov/analysis/tech-size.html
- [80] *Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi **2017**. www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf
- [81] www.weltkarte.com/mosten/saudi-arabien/topographie-saudi-arabien.htm
- [82] J. Giesecke, S. Heimerl, *Wasserkraftanlagen*, Springer, Berlin **2014**.
- [83] F. Joos, G. Brunner, M. Brzoska, C. Growitsch, C. Jakobeit, M. Kaltschmitt, W. Kaminsky, E. J. Kreuzer, M. Paschke, D. Schulz, E. Stübinger, *Energiewende - Quo vadis?*, Springer Fachmedien, Wiesbaden **2016**.
- [84] M. Sterner, M. Jentsch, U. Holzhammer, *Energiewirtschaftliche und ökologische Bewertung eines Windgas-Angebotes*, Gutachten, Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, Kassel **2011**.
- [85] V. Quaschnig, *Regenerative Energiesysteme: Technologie – Berechnung – Simulation*, 9. Aufl., Hanser, München **2015**.