

Meerwasserentsalzung in Inselnetzen mit hohem Anteil Erneuerbarer Energien

PHILIPP BLECHINGER, KRISTINA BOGNAR

Wie weit kann eine integrierte Planung eines Energieversorgungssystems und einer Entsalzungsanlage zur Trinkwasserbereitstellung die spezifischen Kosten für Strom und Trinkwasser senken? In diesem Artikel werden verschiedene Simulationsergebnisse vorgestellt, die diese Frage für die Karibikinsel Petite Martinique, Grenada, beantworten. Die Meerwasserentsalzungsanlage mit veränderbarem Lastverhalten dient dabei als flexible Last für das fluktuierende Stromangebot aus Windkraftanlagen. Anstelle einer aufwändigen Energiespeicherung kann in Zeiten von Überschussenergie Trinkwasser erzeugt und gespeichert werden. Dies führt zu einer wirtschaftlicheren Ausnutzung der Stromerzeugungskapazitäten.

Weltweit sind Inseln stark von fossilen Rohstoff- und Trinkwasserimporten abhängig, zusätzlich dient Rohöl in der Regel als Kraftstoff zur Energieerzeugung, dies führt zu sehr hohen Stromgestehungskosten. Da in tropischen und trockenen Regionen hauptsächlich elektrische Energie und kaum Heiz- oder Prozesswärme benötigt wird, bieten sich Erneuerbare Energien wie Solar- und Windenergie als Alternativen zur fossilen Energieerzeugung an.

In trockenen Regionen ohne ausreichende eigene Süßwasserquellen ist die bezahlbare Deckung des Trinkwasserbedarfs neben der Energieerzeugung die zweite große Herausforderung. Viele Inseln sind stark von teuren Trinkwasserimporten abhängig. Die Minimierung von Dieselöl- wie auch von Wasserimporten ist von vielen Inselstaaten klar als

Ziel formuliert und wird im Rahmen der Nachhaltigkeitsbestrebungen von der UN unterstützt. Eine integrierte Planung des Energie- und Wasserversorgungskonzeptes auf Basis Erneuerbarer Energien kann diese Bestrebungen voran bringen.

Dieser Beitrag beschreibt am Fallbeispiel einer karibischen Insel die technischen, ökonomischen und ökologischen Vorteile eines integrierten Energie- und Wasserversorgungskonzeptes basierend auf Erneuerbaren Energien und einer Meerwasserentsalzungsanlage als verschiebbare Energiesenke.

Betrachtungsgegenstand – Petite Martinique

Als Modellregion für die Untersuchung wurde die im Durchmesser zwei Kilometer kleine Karibikinsel Petite Martinique (PM), Grenada, ausgewählt. Um die 1.000 Einwohner leben auf der größtenteils ländlich geprägten Insel. Die Wirtschaft basiert auf Fischerei, Landwirtschaft, Bootsbau und ein wenig Tourismus. Die klimatischen Bedingungen auf PM sind subtropisch mit durchschnittlichen Temperaturen von 25° C, wobei die Trockenzeit sich von Januar bis Mai erstreckt und die Regenzeit von Juni bis Dezember.

Die derzeitige Trinkwasserversorgung basiert auf Regenwassernutzung und Importen von der Hauptinsel Grenada durch Tankschiffe. Die nachhaltig nutzbaren Grundwasserreserven sind auf PM stark begrenzt und es existiert kein öffentliches Wasserverteilnetz. Im Jahr 2000 wurde eine Umkehros-

mose-Entsalzungsanlage auf PM installiert, die vor wenigen Jahren jedoch von einer Sturmflut zerstört wurde. Um für die häusliche und landwirtschaftliche Nutzung dauerhaft Trinkwasser zur Verfügung zu stellen ohne auf Importe angewiesen zu sein, müssten in der Trockenzeit 150 m³/Tag und in der Regenzeit 50 m³/Tag zusätzlich bereitgestellt werden. Dies könnte mit einer neuen Entsalzungsanlage geschehen.

Basierend auf dem Energiebedarf im Jahr 2010, der durch den lokalen Energieversorger Grenlec gedeckt wurde, ergibt die in stündliche Werte aufgeschlüsselte Lastkurve eine Spitzenlast von 152 kW und eine tägliche Nachfrage von durchschnittlich 2,2 MWh. Abb. 1 zeigt das saisonale Lastprofil. Diese Last wird durch zwei Diesel-Generatoren (210 und 240 kW) gedeckt, wobei nur ein Generator betrieben wird, während der andere gewartet werden kann.

Die Wind- und Sonneneinstrahlungsbedingungen auf PM sind vielversprechend. Auf der nur 3 km entfernten Nachbarinsel wurden exakte Windmessungen durchgeführt, die eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 7,7 m/s ergaben. Diese Werte werden für PM übernommen. Die durchschnittliche Solareinstrahlung beträgt 6,6 kWh/m²d.

Erneuerbare Energien im Inselnetz

Bevor die Wasserproduktion in das Energieversorgungssystem integriert wird, soll in einem ersten Schritt das bestehende Versorgungssystem hin-

sichtlich des Einsatzes Erneuerbarer Energien und Speichertechnologien optimiert werden.

Hierfür wird das Simulations- und Optimierungsprogramm HOMER Energy verwendet (www.homerenergy.com).

HOMER optimiert die verschiedenen möglichen Systemkonfigurationen nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien. Das optimale System ist demnach das mit den geringsten spezifischen Stromgestehungskosten, das gleichzeitig die technischen Vorgaben erfüllt. Hierfür wird eine Auswahl der zu berücksichtigenden Energieversorgungstechnologien, deren Größe und deren Anzahl durch den angewandten Logarithmus getroffen. Zur Auslegung des optimalen Energieversorgungssystems wird innerhalb der Simulation in stündlichen Schritten gerechnet.

Für die gesamte Simulation werden US-Dollar (1,00 Euro = 1,38 USD; 31.10.2011) als Währung benutzt. Für alle Szenarien ist die Projektlaufzeit auf 20 Jahre festgelegt und der Kapitalzins auf 7,5 %. Der Dieselpreis wird entsprechend des Durchschnittswertes von 2010 als 1,13 USD/Liter angenommen. Als Stromerzeugungstechnologien werden Dieselgeneratoren, Windturbinen und Photovoltaik-Anlagen berücksichtigt, die mit einem Energiespeichersystem ergänzt werden.

Dieselgeneratoren: Für die Simulation werden die beiden schon installierten Dieselgeneratoren verwendet und die Investitionskosten werden deshalb gleich Null gesetzt. Wartungs- und Betriebskosten sind mit 5 USD/Betriebsstunde angesetzt.

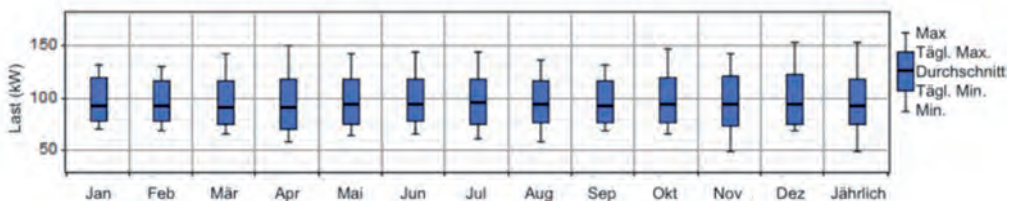


Abb. 1: Saisonales Lastprofil von PM, 2010

■ IRES 2011

Wind: Eine Marktrecherche hat ergeben, dass die NW29 (225 kW) von Norwin Power am besten für die Gegebenheiten auf PM geeignet ist. Sie ist stall geregelt, hat drei Rotorblätter, die Nabenhöhe beträgt 30 m und sie läuft bei Windgeschwindigkeiten zwischen 4 und 25 m/s. Die Norwin-Turbine kann im Falle von Hurrikanen Windgeschwindigkeiten von bis zu 67 m/s überleben. Die gezielt für PM angefragten Kosten betragen 2.660 USD pro installiertes Kilowatt Leistung, die Wartungs-, Betriebs- und Versicherungskosten pro Jahr liegen bei 5 % der Investitionssumme.

PV: Ein lokales Unternehmen für Solarmodule, GrenSol, wurde als Zulieferer ausgewählt, um die Verfügbarkeit der Module und realistische Kosten garantieren zu können. Laut Vertreter ist ein Mia-Sole Dünnschicht-Modul das wirtschaftlichste Modul für PM. Leistungsverluste aufgrund von Staub, Alterung, Verschattung etc. wurden pauschal mit einer Wirkungsgradeinbuße von 20 % angenommen, zusätzlich berücksichtigt HOMER einen Wirkungsgradverlust bei einer Betriebstemperatur über der nominalen Standardbetriebstemperatur der Zelle von 49° C. Die gesamten Investitionskosten inklusive Wechselrichter, Leitungen und Installation sind mit 4.400 USD pro installiertem Kilowattpeak kalkuliert, Wartungs- und Betriebskosten betragen pro Jahr 2 % der Investitionskosten.

Energiespeichersysteme: Für ein hybrides Energieversorgungssystem stehen zahlreiche Speichersysteme zur Verfügung. In diesem Fall wird nur die langfristige Speicherung (ab einer Stunde) betrachtet und die Frequenzstabilisierung vernachlässigt. Dafür wurden verschiedene Batterietypen wie Lithium-Ionen, Nickel-Kadmium, Blei und Redox-Flow untersucht und verglichen. Redox-Flow und Bleibatterien eignen sich aus technischen Gesichtspunkten (Lebenszyklen, Entladungstiefe, Energiedichte, Wirkungsgrad etc.) am besten. Ausgehend von der Verfügbarkeit auf karibischen Inseln und den Kosten werden Bleibatterien verwendet: Die Hoppecke 24 OPzS 3000 Bleibatterie mit einer Kapazität von 2 V * 3000 Ah = 6 kWh ist für

PM zu Kosten von 1.700 USD pro Batterie erhältlich.

Szenario 1: Optimiertes Energieversorgungssystem mit Erneuerbaren Energien

Unter den erwähnten Rahmenbedingungen und Einflussgrößen erhält man ein Wind-Diesel-System als optimales Energieversorgungskonzept für PM, Szenario 1 genannt. Photovoltaik kommt in dem errechneten Versorgungssystem nicht zum Einsatz, was sicherlich auch auf die vom Vertreter genannten hohen Investitionskosten der Anlage zurückzuführen ist. Relevante Parameter im Vergleich zum aktuellen Versorgungssystem sind in Tabelle 1 dargestellt.

Verglichen mit dem existierenden System können die Stromgestehungskosten von 0,52 USD/kWh auf 0,31 USD/kWh für die Projektdauer von 20 Jahren gesenkt werden bei Investitionen in Höhe von 1.4 Millionen USD. Zusätzlich ergibt sich ein klarer ökologischer Vorteil durch die Investition in Erneuerbare Energien: Es können pro Jahr 267.700 Liter Diesel und damit 705.000 kg CO₂-Emissionen eingespart werden.

In Szenario 1 entsteht durch die Windkraftanlage ca.40 % Überschussenergie. Nachdem die gesamte Stromnachfrage gedeckt und die Batterien voll aufgeladen sind, kann diese für andere Zwecke benutzt werden. Auf einer ariden Insel wie PM könnte Überschussenergie zur Trinkwassererzeugung verwendet werden.

Meerwasserentsalzung als Energiesenke

Für PM wurden zwei thermisch getriebene und zwei elektrisch getriebene Prozesse miteinander verglichen. Da außer den Dieselgeneratoren keine Abwärmequelle auf PM zur Verfügung steht, würde eine thermisch angetriebene Entsalzungsanlage wie die Humidification/Dehumidification oder die Multi Effekt Destillation ca. 4.000 m² solar-

thermische Kollektoren benötigen und sind damit für PM unattraktiv.

Die beiden betrachteten elektrisch angetriebenen Entsalzungsprozesse sind zum einen die Umkehrosmose (engl. reverse osmosis oder RO genannt) und die mechanische Brüdenkompression (engl. mechanical vapour compression oder MVC genannt).

Heutzutage sind hauptsächlich konstant betriebene RO Anlagen in Betrieb. Eine flexible Fahrweise ist jedoch notwendig, wenn fluktuierende Energieströme direkt genutzt werden sollen. Basierend auf einer technischen und wirtschaftlichen Vergleichsanalyse wird für die Simulation für PM der MVC-Prozess verwendet. Die MVC Anlage wird nach Angaben eines sächsischen Herstellers, der Medesa Technology GmbH, ausgelegt. Dieser Entsalzungsprozess benötigt 11 kWh/m³ und hat einen flexiblen Lastbereich von 50 bis 110 %. Der Prozess kann ein bis zwei Mal am Tag unterbrochen werden, ohne dass sich die Lebenszeit der Anlage von 30 Jahren verringert. Die Investitionskosten für diese Anlage betragen 3.000 USD pro m³

installierte Tagesleistung, was sich auf 450.000 USD für eine Entsalzungsanlage mit einer täglichen Kapazität von 150 m³ summiert. Die Wartungs- und Betriebskosten betragen in etwa 0,30 USD pro produziertem m³ Frischwasser.

Wasserspeicher: Ein großer Vorteil der Trinkwasserproduktion in Zeiten von verfügbarer Überschussenergie ist die Option Wasser anstatt Energie zu speichern. Um die Qualitätsstandards der Trinkwasserspeicherung einzuhalten, wird eine Wasserspeicherung von maximal zwei Tagen (300 m³) vorgesehen. Investitions-, Wartungs- und Betriebskosten der Tanks werden in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung vernachlässigt.

Szenarien integrierter Energie- und Wasserversorgung

Szenario 1, das Energieversorgungssystem ohne Berücksichtigung der Wasserversorgung, wurde bereits vorgestellt. In Szenario 2 wird Entsalzung aus Überschussenergie, in Szenario 3 die Entsalzung als flexible Last und in Szenario 4 die Entsalzung als konstante Last präsentiert.

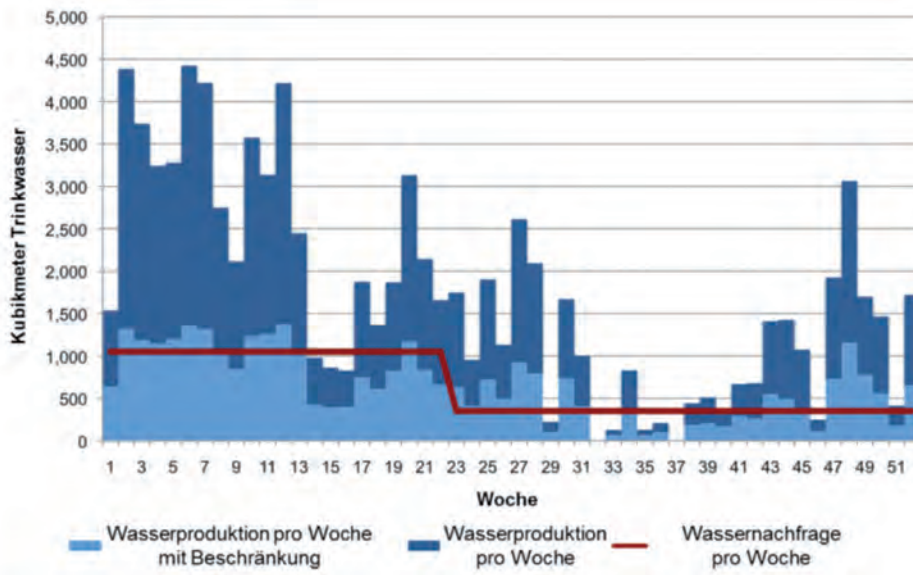


Abb.2: Potentielle Wasserproduktion aus Überschussenergie verglichen mit der Nachfrage

■ IRES 2011

Szenario 2: Wasserproduktion nur aus Überschussenergie

In Szenario 2 wird ausschließlich die Energie der Windkraftanlagen zur Meerwasserentsalzung genutzt, die in Szenario 1 als Überschuss ermittelt wurde und von Stunde zu Stunde unterschiedlich zur Verfügung steht. Abb. 2 zeigt die potentielle Wasserproduktion auf der Insel kombiniert mit dem Energieversorgungssystem aus Szenario 1.

Abbildung 2 verdeutlicht, dass mit Überschussenergie aus Erneuerbaren Energien teilweise drei Mal mehr Trinkwasser produziert werden kann, als benötigt wird (rote Nachfragelinie). Die hellblauen Säulen symbolisieren die Menge an Trinkwasser, die unter Berücksichtigung der Kapazitätsgrenzen der Entsalzungsanlage erzeugt werden kann. Die dunkelblauen Säulen zeigen die theoretisch mögliche Produktionsmenge an Trinkwasser, wenn alle Überschussenergie direkt zur Entsalzung genutzt wird.

Besonders kommt der Nutzung von Windenergie zur Entsalzung entgegen, dass in der Trockenzeit von Januar bis Mai auf dieser Insel sehr gute Windbedingungen herrschen und dadurch ein großer Teil des Trinkwasserbedarfs unmittelbar gedeckt werden kann. Sie zeigt allerdings auch, dass Wind-

energie alleine keinen kontinuierlichen und zuverlässigen Betrieb der Entsalzungsanlage über das ganze Jahr sicherstellen kann.

Szenario 3: Wasserproduktion als flexible Last

HOMER bietet die Möglichkeit eine flexible Last in das zu optimierende Energieversorgungssystem zu integrieren. Es wird eine zusätzliche Last definiert, die verschiebbar ist und nicht die stündliche, sondern lediglich die tägliche Nachfrage decken muss, vorzugsweise aus günstiger Windenergie. Dabei werden die Dieselgeneratoren erst eingesetzt, wenn sowohl der Energie- als auch der Wasserspeicher erschöpft ist.

Für die flexible Last wird eine tägliche Nachfrage von 1.650 kWh/Tag (entspricht 150 m³ Trinkwasser) in der Trockenzeit angenommen und für die übrigen Regenmonate eine Nachfrage von 550 kWh/Tag. Das Volumen des Wasserspeichers von 300 m³ wurde als eine Speicherkapazität von umgerechnet 3.300 kWh angenommen. Die Entsalzungsanlage kann in einer Stunde maximal 8,25 m³ Wasser produzieren.

Tabelle 1 zeigt, dass der enorme Anstieg der Stromnachfrage keine besonderen Änderungen in

	Wind	Batterie	Diesel Verbrauch	Investitionskosten (Strom)	Investitionskosten (Wasser)	Stromgestehungskosten (LCOE)	Wasserproduktionskosten (LCOW)
Einheit	kW	kWh	Liter	USD	USD	USD/kWh	USD/m ³
Existierendes System	0	0	335.700	0	0	0,52	k.A.
Szenario 1	450	432	68.200	1.422.400	0	0,31	k.A.
Szenario 2	450	432	68.200	1.422.400	550.000	0,31	2,32
Szenario 3	450	432	97.700	1.422.400	550.000	0,36	1,91
Szenario 4	450	576	127.400	1.508.200	550.000	0,43	1,91

Tabelle 1: Optimale Energie- und Wasserversorgungssysteme für die verschiedenen Szenarien

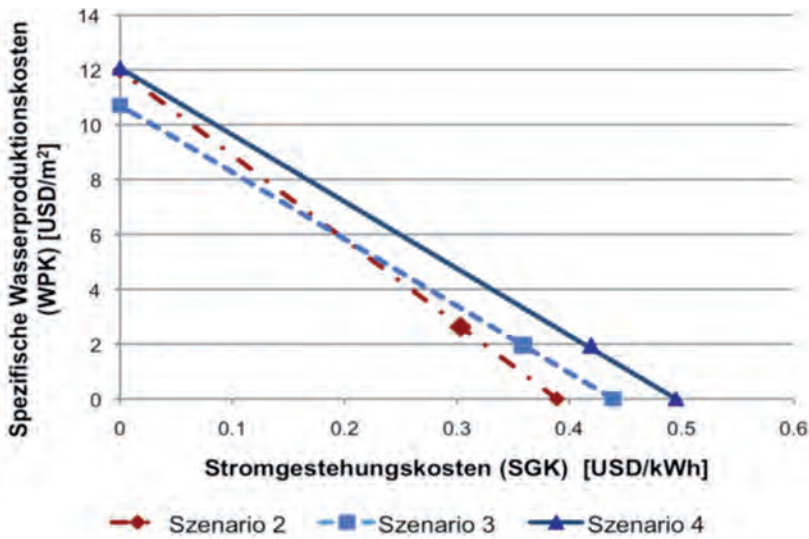


Abbildung 3: Spezifische Wasserproduktionskosten und Stromgestehungskosten der Szenarien 2 bis 4

dem Energieversorgungssystem erzeugt. In Zeiten von Windstromknappheit laufen jedoch die Dieseleratoren und es wird dementsprechend mehr Diesel verbraucht: 97.700 Liter anstatt 68.200 Liter pro Jahr.

Szenario 4: Wasserproduktion als zusätzliche starre Last (Sekundärlast)

In den Szenarien 2 und 3 wurde angenommen, dass die Entsalzungsanlage jederzeit in der Lage ist, als flexible Last entsprechend der verfügbaren Überschussenergie diskontinuierlich zu laufen. Falls eine herkömmliche, konstant betriebene Entsalzungsanlage eingesetzt wird, muss das Energieversorgungssystem wieder neu ausgelegt werden. Dieser Fall wird in Szenario 4 untersucht und die Ergebnisse sind in Tab. 1 zu finden. Die benötigte Energiespeicherkapazität steigt an und auch die Investitionskosten erhöhen sich damit leicht. Der wesentliche Kostentreiber ist jedoch der um etwa ein Drittel steigende Diesel-Verbrauch für den Einsatz der Generatoren. Die ökonomischen und ökologischen Vorteile eines integrativen Versorgungskonzepts mit einer verschiebbaren Last sind daher eindeutig.

Vergleich spezifische Stromgestehungskosten und Wasserproduktionskosten

Abb. 3 verdeutlicht die Kostenaufteilung der drei Szenarien, die die Strom- und Wasserproduktion kombinieren. An jedem Punkt auf den jeweiligen Graphen werden alle Kosten des jeweiligen Gesamtsystems gedeckt. Die markierten Punkte in Abb. 3 stehen für die in Tab. 2 genannten Stromgestehungskosten SGK und Wasserproduktionskosten WPK.

An den Schnittpunkten mit der Abszisse sind die WPK gleich Null, was bedeutet, dass die Kosten des Gesamtsystems komplett über die Strompreise refinanziert werden. Die Schnittpunkte mit der Ordinate zeigen wiederum die WPK, wenn das jeweilige Gesamtsystem über den Wasserpreis refinanziert wird und der Strom gratis ist. Alle übrigen Punkte auf den Graphen zeigen mögliche Mischkostenstrukturen.

Die Graphen von Szenario 2 und 3 schneiden sich bei WPK von 6,00 USD/m³ und SGK von 0,19 USD/kWh. An diesem Punkt arbeiten beide Szenarien zu den gleichen spezifischen Kosten, allerdings produziert Szenario 3 im Gegensatz zu

■ IRES 2011

Szenario 2 mehr Trinkwasser und deckt den gesamten Trinkwasserbedarf von PM. Falls die komplette Deckung des Wasserbedarfs keine Priorität hat, kann Szenario 2 für Strompreise über 0,19 USD/kWh wirtschaftlich optimal und durchaus sinnvoll sein, vgl. Abb. 3.

In dem anderen extremen Fall, in dem die Stromkosten komplett von den Wasserkunden mitgetragen werden sollen, wird Szenario 3 bevorzugt. Da in diesem Szenario mehr Wasser verkauft werden kann, können die gesamten Strom- und Wasserkosten auf mehr Kubikmeter verteilt werden und damit sinken die spezifischen Kosten.

Szenario 3 und 4 (durchgehende Linie) bedienen die gleiche Strom- und Wassernachfrage, deshalb verlaufen ihre Graphen parallel. Aufgrund der starken Last der Entsalzungsanlage ist das nicht integrierte geplante Szenario 4 immer unwirtschaftlicher als Szenario 3. Da die Entsalzungsanlage in Szenario 4 nicht auf das fluktuierende Windangebot reagieren kann, muss mehr Diesel zur Deckung der Last eingesetzt werden, was die Gesamtkosten erhöht.

Schlussfolgerung

Fasst man die Simulationsergebnisse für PM zusammen, zeigt Szenario 1, dass die Erweiterung des derzeitigen Energieversorgungssystems (nur Dieselgeneratoren) mit Erneuerbaren Energien und Speichersystemen zu einer erheblichen Reduzierung der Stromgestehungskosten führt. Szenario 2 verdeutlicht, dass das für Szenario 1 optimierte Energieversorgungssystem in der Lage ist, einen großen Teil der Stromnachfrage der Entsalzungsanlage allein aus der frei verfügbaren Überschussenergie der Windkraftanlagen zu decken. In Szenario 3 wird die gesamte Trinkwassernachfrage durch eine Entsalzungsanlage gedeckt, die diskontinuierlich als flexible Last eingesetzt werden kann. Ein weiterer Ausbau des optimierten Energieversorgungssystems ist für dieses Szenario nicht notwendig.

Bedenkt man, dass eine konventionelle Entsalzungsanlage meist eine kontinuierliche Energieversorgung benötigt, wie es in Szenario 4 simuliert wurde, dann ergibt sich daraus zusätzlicher Energiespeicherbedarf und ein Mehrverbrauch von Dieselmotorkraftstoff. Deshalb kann Szenario 4 nicht mit Szenario 2 und 3 konkurrieren, was den Mehrwert der integrierten Planung und der fortgeschrittenen Entsalzungstechnologie hervorhebt. Eine Analyse der SGK und WPK hat verschiedene optionale Kostenverteilungen ergeben, aus denen Refinanzierungsstrategien entwickelt werden können. Szenario 2 ist die beste Lösung, wenn das Gesamtsystem durch höhere Strompreise finanziert werden soll und nicht die gesamte Wassernachfrage gedeckt werden muss. Soll jedoch die gesamte Wassernachfrage auf der Insel gedeckt werden, ist Szenario 3, also ein Energieversorgungssystem mit einer flexibel einsetzbaren Meerwasserentsalzungsanlage, für alle angenommenen Strompreise die wirtschaftlich optimale Lösung.

Es ist abschließend festzustellen, dass mit entsprechender Technologie und durch integrierte Planung der Strom- und Wasserbedarf mehrheitlich aus Erneuerbaren Energien gedeckt werden kann und damit gleichzeitig Kosten gesenkt und CO₂-Emissionen vermieden werden können.

Der Artikel beruht auf einer gemeinsamen Forschungsarbeit von Philipp Blechinger und Kristina Bognar.

Philipp Blechinger ist Doktorand am Reiner Lemoine Institut, Berlin, mit dem Forschungsschwerpunkt „Ausbauhemmnisse für Erneuerbare Energien auf karibischen Inseln“. Kontakt: philipp.blechinger@rl-institut.de

Kristina Bognar ist wissenschaftliche Mitarbeiterin und Doktorandin am Institut für Energietechnik der Technischen Universität Berlin mit dem Forschungsschwerpunkt „Energie- und Wasserversorgung auf Inseln“.

Kontakt: kristina.bognar@tu-berlin.de