

MEERWASSERENTSALZUNG IM SOLAREN GEWÄCHSHAUS

ENTSALZUNG MITTELS STUFENWEISER BEHEIZUNG UND BEFEUCHTUNG



Bild 1: Pilotanlage im Rahmen des Projektes „SOLDES“ an der Nordküste Afrikas

Der Gedanke, Gewächshäuser auch zur Entsalzung von Meerwasser zu verwenden, ist bereits in mehreren Gewächshäusern realisiert worden. Eine nachhaltige Verbreitung hat jedoch nicht stattgefunden. In diesem Artikel stellen wir ein Verfahren zur solaren Meerwasserentsalzung vor, welches mit Luft als Trägergas arbeitet. Dabei wird deutlich, dass durch die stufenweise Akkumulation von Wasserdampf in der Luft eine substantielle Erhöhung der bei der Entsalzung von Meerwasser in Gewächshäusern gewonnenen Wassermenge erzielt werden kann.

Einleitung

Die Gewinnung von salzfreiem Wasser aus Meereswasser erfolgt in der Natur durch Verdunstung von Meerwasser bei Umgebungstemperatur. Bei den enormen Luftmengen, die in der Natur zur Verfügung stehen, reicht es aus, dass die Luft sich bei diesem Prozess nur mit sehr geringer Feuchtigkeit anreichert, um trotzdem die gesamte Erde mit Trinkwasser zu versorgen.

Dieses Prinzip dient als Vorbild bei den vorliegenden industriellen Verfahren zur Entsalzung von Meerwasser mit Hilfe von Sonnenenergie. Jedoch wird bei den aktuellen Verfahren eine zusätzliche Maßnahme getroffen, um höhere Luftfeuchtigkeit zu erzielen und somit mit Luftmengen im industriellen Maßstab

auszukommen.

Es ist bekannt, dass die Wasserdampfaufnahme der Luft, bei dem Stoffaustausch zwischen Luft und Wasser, durch das ursprüngliche Niveau der Luftfeuchtigkeit eingeschränkt ist. Daher wird die Befeuchtung der Luft bei den aktuellen Verfahren über mehrere Stufen ausgeführt, um die Anfangsfeuchtigkeit schrittweise zu erhöhen, und somit innerhalb eines zulässigen Temperaturbereichs höhere Wasserbeladungen zu erzielen, als bei einstufigen Verdunstungsprozessen. Mit dem erreichten hohen Befeuchtungsgrad reduziert sich die erforderliche Luftmenge, womit auch die Abmessungen der eingesetzten Apparate und Anlagenteile kleiner werden. Weiterhin reduziert sich der Energieaufwand für die Luftförderung.

Die stufenweise Aufheizung und Befeuchtung von Luft sowie die Anwendung dieses Prinzips zur solaren Meerwasserentsalzung wurden bereits in Veröffentlichungen, beschrieben. Dieses Verfahren wurde im Rahmen eines EU-Projektes mit der Bezeichnung „SOLDES“ und unter Beteiligung von mehreren Forschungsinstitutionen untersucht. Bei diesem Projekt wurden flache Luftkollektoren zur solaren Aufheizung der Luft verwendet. In zwei Pilotanlagen an der Universität Bochum und an der Küste Nordafrikas, wurden Konstruktion und Aufbau von Entsalzungsanlagen nach

dem neuen Verfahren, unter realen Bedingungen getestet. Die verwendeten Berechnungsmethoden wurden überprüft und verifiziert.

Die Durchführung dieses Verfahrens unter Verwendung von Gewächshäusern anstatt flacher Luftkollektoren zur Lufterwärmung bietet sich an. Das Gewächshaus wird in diesem Konzept auch als eine Einrichtung zur Lufterwärmung mit Hilfe von Sonnenenergie eingesetzt. Auf dieser Basis sind bereits mehrere Gewächshäuser erstellt und dazu genutzt worden, gleichzeitig Meerwasser zu entsalzen. Bei allen diesen Gewächshäusern wird die Luft einmalig in einem Gewächshaus beheizt und durch einen anschließenden, einmaligen Verdunstungsschritt befeuchtet. Im Unterschied dazu wird in dem vorliegenden Konzept das Prinzip der mehrstufigen, kaskadenartigen Beheizung und Befeuchtung von Luft in Gewächshäusern angewandt.

Physikalische Grundlagen

Der Verlauf eines Verfahrens zur solaren Gewinnung von Wasser aus Meerwasser durch Verdunstung in Gewächshäusern ist in Bild 2 gezeigt. Bei diesem Verfahren wird ein Luftstrom in einem Gewächshaus von der Sonne aufgeheizt und am Ende des Gewächshauses durch Kontakt mit Meerwasser befeuchtet. Abschließend erfolgt die Kühlung der Luft, bei der Destillat ausscheidet.

Beheizungs- und Befeuchtungsvorgänge von Luft lassen sich anhand des h,x -Diagramms nach Mollier, Bild 3, graphisch darstellen und erläutern. Diese Art der Darstellung ist in der Lüftungs- und Klimatechnik üblich. In diesem Diagramm wird das Aufheizen von Luft durch eine senkrechte Linie beschrieben und die Befeuchtung durch Stoffaustausch mit Wasser durch eine Linie parallel zu den Isenthalpen, $h = \text{konstant}$, dargestellt. Beide Vorgänge werden im Folgenden anhand eines Beispiels, im h,x -Diagramm von feuchter Luft (Bild 3), erörtert und erklärt. Dort wird beispielsweise ein Luftstrom, dessen Zustand durch Punkt 1 angegeben ist, von 20 auf 85°C aufgeheizt

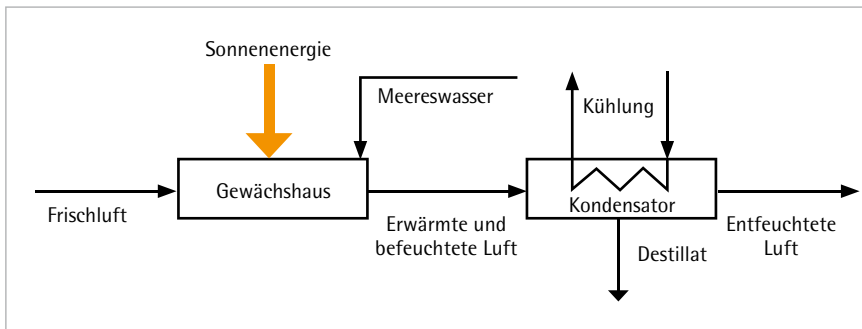


Bild 2: Grundschemata der solaren Meerwasserentsalzung durch Verdunstung und Kondensation

(Linie 1-2). Bei einem anschließenden, adiabaten Kontakt mit Meereswasser, nimmt die Luft entlang der Linie 2-3, Feuchtigkeit bis zur Sättigungslinie $\phi = 1$ auf. Die Feuchtigkeit steigt auf 32 g Wasserdampf je kg trockener Luft unter gleichzeitigem Sinken der Lufttemperatur auf 33°C. Zur Gewinnung des salzfreien Wassers kann die Luft entlang der Sättigungslinie $\phi = 1$ bis beispielsweise 21°C und auf 16 g Wasserdampf je kg trockener Luft entfeuchtet werden, wodurch 16 g Wasser je kg Luft als Kondensat ausscheiden.

Innerhalb von Gewächshäusern darf die Lufttemperatur jedoch eine obere Grenze von z.B. 40-45°C nicht überschreiten. Der zulässige Beheizungs-/Befeuchtungsvorgang nimmt dann den in Bild 2 gezeigten Verlauf 1 - 2a - 3a. Beim Abkühlen der mit 17 g Wasser beladenen Luft, Zustand 3a, von 22 auf 21°C, fällt nur ca. 1 g Wasser als Kondensat an. Das bedeutet, dass das 16-Fache der Luftmenge erforderlich ist, um die gleiche Kondensatmenge zu bekommen, wie bei einer Aufheizung der Luft auf 85°C. Diese hohe Luftmenge soll durch das hier entwickelte mehrstufige Verfahren merklich reduziert werden.

In einem mehrstufigen Beheizungs-/Befeuchtungsverfahren, das hier will-

kürlich aus vier Beheizungs-/ Befeuchtungsstufen entsprechend Bild 4 besteht, wird die Luft über eine Reihe von vier hintereinander angeordneten Gewächshäusern beheizt und befeuchtet. Die Lufttemperatur am Eintritt des ersten Gewächshauses wird mit 20°C angenommen und die anfängliche Feuchtigkeit mit 10 g Wasserdampf je kg trockener Luft (Punkt 1). Im ersten Gewächshaus steigt die Lufttemperatur durch Aufnahme von Sonnenenergie beispielsweise auf 35°C. Anschließend wird die Luft, durch Kontakt mit Meerwasser auf 16 g Wasser je kg trockener Luft befeuchtet. Dabei sinkt die Lufttemperatur von 35 auf 21°C. In der zweiten Stufe wird die Luft auf 37°C aufgeheizt und anschließend auf 22 g/kg befeuchtet. Nach der dritten Stufe hat die Luft 29°C und 27 g Wasser/ kg und nach der Vierten 33°C und 32 g Wasser je kg trockener Luft (Punkt 2). Im Anschluss daran wird die Luft auf beispielsweise 21°C abgekühlt, wodurch die Luftfeuchtigkeit von 32 auf 16 g je kg trockener Luft sinkt (Punkt 3). Demzufolge werden 16 g Wasser je kg trockener Luft im Kondensator gewonnen. Damit erreicht die hier beschriebene, kaskadenartige Prozessführung bei einer maximal auftretenden Temperatur von 42°C die

gleiche Leistung, wie bei einem einstufigen Verfahren mit einer Aufheizung der Luft bis auf 85°C.

Auslegung einer Demonstrationsanlage

Der soeben beschriebene Prozessverlauf wird im Folgenden als Grundlage für die Planung einer Demonstrationsanlage zur Meerwasserentsalzung durch Verdunstung in Gewächshäusern eingesetzt. Auch hier wird angenommen, dass die Anzahl der Stufen vier beträgt. Das Schema der Anlage ist in Bild 5 gezeigt.

Die Anlage besteht aus vier in einer Reihe angeordneten Gewächshäusern. Ein Ventilator sorgt dafür, dass ein kontinuierlicher Luftstrom durch die vier Gewächshäuser fließt. Am Eingang von Gewächshaus 1 und am Ausgang eines jeden weiteren Gewächshauses ist ein Luftbefeuchter installiert, welcher mit Meereswasser aus dem Meerwassertank beschickt wird. Abschließend strömt der mit Wasserdampf hoch beladene Luftstrom in einen mit frischem Meerwasser gekühlten Kondensator, welcher als Entfeuchter dient. Dort wird die feuchte Luft abgekühlt und gibt einen großen Teil ihrer Feuchtigkeit ab, welcher dann als Trinkwasser oder für die Bewässerung weiter verarbeitet wird.

Anstieg der Lufttemperatur durch Aufnahme von Sonnenenergie

Die Randbedingungen sowie die Grundlagen zur Bestimmung der Lufttemperatur innerhalb der Gewächshäuser werden im Folgenden zusammengestellt. Der Temperaturanstieg der durch ein Gewächshaus strömenden Luft ist abhängig von folgenden Parametern:

1. Grundfläche des Gewächshauses A in m²
2. Sonneneinstrahlung G in W/m²

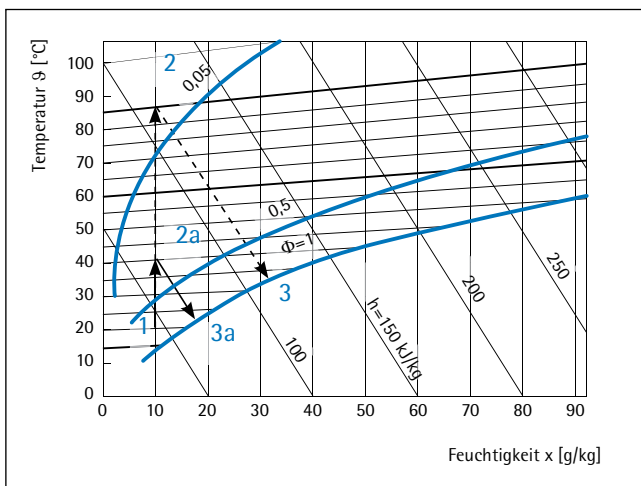


Bild 3: Einstufiger Beheizungs- und Befeuchtungs-Prozess im h,x-Diagramm

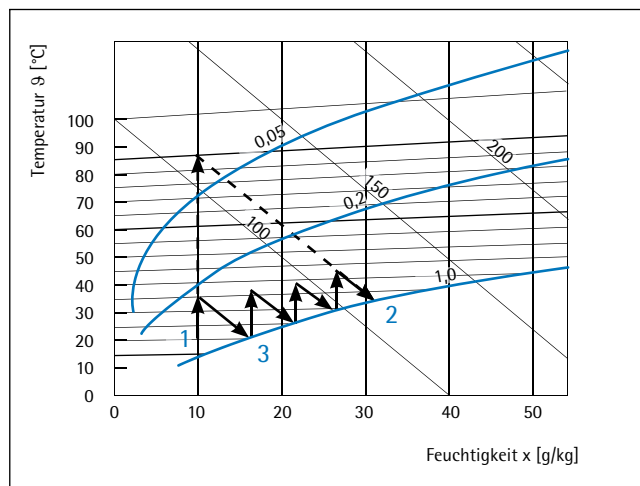


Bild 4: Ein 4-stufiger Beheizungs-Befeuchtungs-Prozess

- Wirkungsgrad η in % bei der Aufnahme von Sonnenenergie durch die strömende Luft
- Luftmasse \dot{m}_L in kg/s innerhalb des Gewächshauses.

Diese vier Parameter werden im Folgenden ermittelt bzw. festgelegt.

Grundfläche des Gewächshauses

Die Abmessungen eines Gewächshauses wurden wie folgt festgelegt: Breite: 25m, Länge: 40m, Höhe: 4,5m

Damit beträgt die Grundfläche der Gewächshauskaskade, bestehend aus vier in einer Reihe angeordneten Gewächshäusern, 4.000 m².

Sonneneinstrahlung

Die Wetterverhältnisse in Nordafrika während des Monats April werden in der aktuellen Untersuchung zugrunde gelegt. Die gemessene durchschnittliche Sonneneinstrahlung in Nordafrika im Monat April ca. 550 W/m².

Wirkungsgrad

Da gegenwärtig keine Literaturangaben über den Wirkungsgrad η von Gewächshäusern als solare Kollektoren vorliegen, wird hier ein ähnlicher Kollektor herangezogen. Es handelt sich um durchgeführte Untersuchungen zur Bestimmung des Wirkungsgrads bei der Aufnahme von Sonnenenergie in durchströmten „Luftmatratzenkollektoren“. Unter der Annahme eines Temperaturverlaufes wie in Bild 3 gezeigt, würde die durchschnittliche Lufttemperatur in der Anlage bei ca. 30°C liegen, womit sich ein Wirkungsgrad von ca. 50% ergibt.

Auswahl des Massendurchsatzes

Der Massendurchsatz der Luft durch das Gewächshaus \dot{m}_L wird so gewählt, dass der Anstieg der Lufttemperatur pro Stufe bei Sonneneinstrahlung $G = 550$ W/m² und einem Wirkungsgrad von $\eta \sim 50\%$, nicht über 12 bis 13°C steigt. Daraus errechnet sich ein Luftdurchsatz in der Demonstrationsanlage von 22 kg/s, entsprechend 17 m³/s. Damit sind alle Einflussfaktoren auf die Lufttemperatur in den Gewächshäusern genannt.

Zur Berechnung des Temperaturanstiegs eines Luftstromes durch Aufnahme von Sonnenenergie im Gewächshaus wurde eine Energiebilanz um ein kleines Segment des Gewächshauses in Strömungsrichtung aufgestellt. Damit konnte die Lufttemperatur an jeder Stelle entlang des Gewächshauses berechnet werden.

Das Befeuchten der erwärmten Luft

Im südlichen Europa sowie auch im

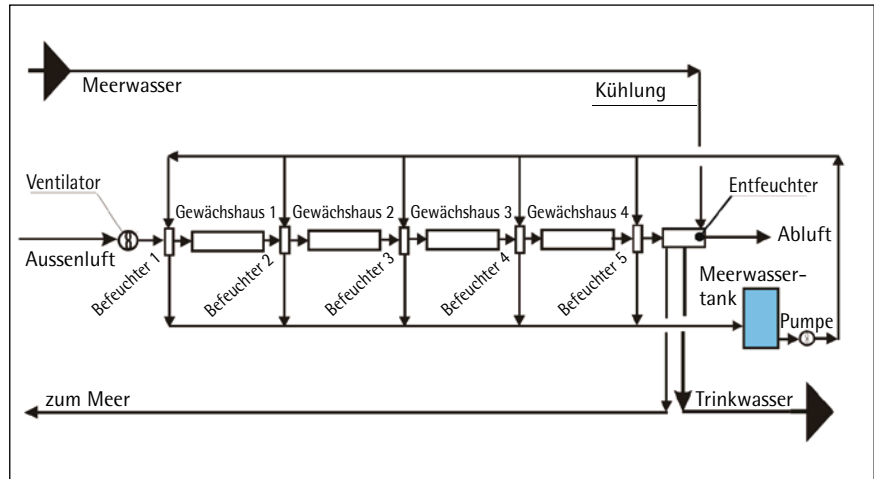


Bild 5: Grundfließbild der Vierstufen-Verfahren zur solaren Meerwasserentsalzung unter Einbeziehung von Gewächshäusern

Nahen Osten und Nordafrika werden Gewächshäuser in den Sommermonaten öfter wegen zu hoher Innentemperatur stillgelegt. Diese unwirtschaftliche Maßnahme wird in vielen Fällen dadurch vermieden, dass ein durch Befeuchtung abgekühlter Luftstrom durch die Gewächshäuser eingeleitet wird.

Zu diesem Zweck wird ein Fallfilm-Befeuchter mit strukturierter Packung verwendet. In diesen Fallfilm-Befeuchter strömt Wasser über eine strukturierte Packung, fließt als Dünnschicht an der Packungsstruktur nach unten und wird zum Teil verdunstet. Im Kreuzstrom dazu tritt Luft in die Packung ein, nimmt Wasserdampf auf und kühlt sich ab. Die gleiche Technologie wird hier übernommen, um erwärmte Luft auch am Ende jedes Gewächshauses mit Wasserdampf zu beladen. Der Wirkungsgrad dieser Befeuchter-Bauart wurde im Rahmen des EU-Projektes „SOLDES“ untersucht und veröffentlicht. Bei einer Packung von 20 cm Dicke beträgt der Wirkungsgrad des Befeuchters ca 95%.

Die Luft-Anströmgeschwindigkeit in den Befeuchter soll bei 0,7 m³/m² s liegen. Damit hat die Packung einer Befeuchtungsstufe folgende Abmessungen: Länge: 25m, Höhe: 1m, Tiefe: 0,2m. Zur Bestimmung von Luftfeuchtigkeit x_2 und Lufttemperatur $t_{L,2}$ am Befeuchteraustritt wurde eine Wassermassenbilanz und eine Energiebilanz um den Befeuchter aufgestellt. Die Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit am Befeuchteraustritt konnte damit berechnet werden.

Das Entfeuchten der Luft

Das Entfeuchten der mit Wasserdampf beladenen Luft soll in einem mit Meerwasser gekühlten Lamellen-Wärmeaustauscher erfolgen. Diese Geräte werden von zahlreichen Herstellern angeboten.

Berechnung der Wassererzeugung

Die oben erstellten Berechnungsgrundlagen werden im Folgenden zur Ermittlung der Wassererzeugungsrate in der Demonstrationsanlage benutzt.

Einflussgrößen auf die erzeugte Wassermenge

Für die Berechnung der Luftzustände und der Wassererzeugungsrate in der Anlage wurden die folgenden Parameter als konstant eingesetzt:

- Grundfläche eines Gewächshauses A : 1000 m²
- Anzahl der Gewächshäuser: 4
- Lufttemperatur am Eintritt der Anlage = Umgebungstemperatur ϑ_{L0} : 25°C
- Lufttemperatur am Austritt des Entfeuchters: 22°C
- Mittlere Sonneneinstrahlung G : 0,55 kW/m²
- Mittlerer Wirkungsgrad bei der Aufnahme von Sonnenenergie η : ~ 50%
- Massenstrom der trockenen Luft durch die Gewächshäuserreihe \dot{m}_L : 21,85 kg/s
- Mittleres spezifisches Gewicht der Luft ρ_L : 1,293 kg/m³
- Spezifische Wärme von Luft c_{pL}^0 : 1,005 kJ/kgK
- Querschnittsfläche des Gewächshauses f_{GH} : 112,5 m²
- Mittlere Luftgeschwindigkeit in den Gewächshäusern w_L : 0,15 m/s
- Durchschnittliche Luftgeschwindigkeit durch den Befeuchter w_{LB} : 0,7 m/s
- Befeuchter Anströmfläche f_B : 25 m²
- Dicke der Befeuchterpackung d_B : 20 cm
- Meerwasseraufgabe auf der Befeuchterpackung v_{MW} : 6 m³/h je Befeuchter

16. Befeuchterwirkungsgrad η_B : ~95%
17. Kühlwasser-Eintrittstemperatur in dem Kondensator t_{KW_e} : 18°C
18. Kühlwasser-Austrittstemperatur aus dem Kondensator t_{KW_a} : 28°C
19. Kondensator- Kühlwasserbedarf: 75 m³/h
20. Betriebsstunden pro Tag: 10 h

Ergebnisse

Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse aus den durchgeführten Berechnungen zur Ermittlung von Betriebsparametern und der Wassererzeugungsrate in der vierstufigen Demonstrationsanlage. Darin ist m der Massenstrom der feuchten Luft.

Vergleich zwischen mehrstufiger und einstufiger Ausführung

Eine Gegenüberstellung zwischen einem einstufigen Verfahren und der soeben berechneten Vierstufen-Kaskade wurde bei der gleichen Grundfläche, gleichen Wetterbedingungen und bei gleicher maximal auftretender Temperatur durchgeführt (s. Bild 6).

Demzufolge liefert die vierstufige Anlage ca. 11,8 m³ Wasser pro Tag. Dies entspricht der dreifachen Wassermenge, die in einer einstufigen Anlage, mit 3,7 m³ pro Tag, erzeugt wird.

Zusammenfassung

Ein Verfahren zur Nutzung von Gewächshäusern - auch für die solare Entsalzung von Meerwasser - wurde entwickelt. Das Entsalzungsverfahren basiert auf einer stufenweisen Beheizung und Befeuchtung von strömender Luft, welche durch eine Gewächshausreihe strömt.

In jedem Gewächshaus wird die Luft aufgeheizt und anschließend in einem mit Meerwasser berieselten Befeuchter mit Wasserdampf beladen, um weiter im nächsten Gewächshaus beheizt zu werden. Bei mehrfachem Wiederholen dieses Vorganges kann der Luftstrom auf höhere Feuchtigkeit gebracht werden. Danach wird die Luft durch Kühlung in einem mit Meerwasser gekühlten Wärmetauscher entfeuchtet, um die darin enthaltene Feuchtigkeit als Wasser zur Bewässerung der Pflanzen zu gewinnen.

Tabelle 1: Wassererzeugung in der vierstufigen Anlage			
Messstelle (s. Schema Bild 4)	t [°C]	x [g/kg]	m [kg/h]
Eintritt Befeuchter 1	25	10	79.450
Austritt Befeuchter 5	32	32	81.177
Austritt Entfeuchter	22	17	80.000
Kondensat			1.177
Tägl. Wasserproduktion je m ² kg Wasser / m ² d			2,94

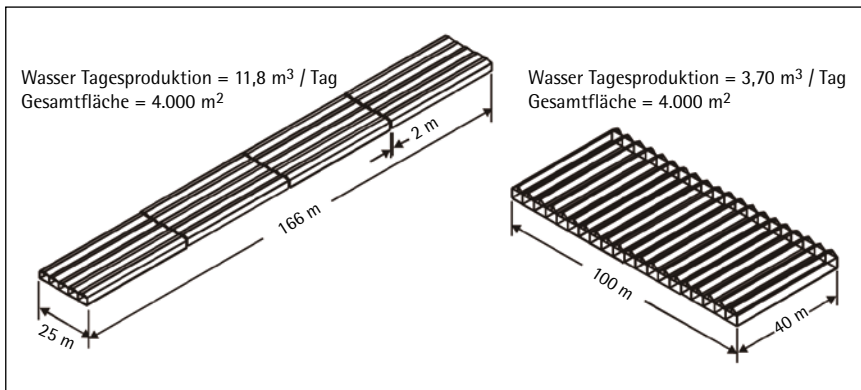


Bild 6: Vergleich zwischen vierstufigen und einstufigen Verfahren

Die Grundlagen für die Auslegung dieses neuen Verfahrens wurden aufgestellt und erläutert. Die einzelnen Anlagenkomponenten wurden untersucht, näherungsweise berechnet und dimensioniert. Eine Berechnungsmethode zur Ermittlung der Betriebsdaten und der zu erwartenden Wassererzeugungsraten durch das neue Entsalzungsverfahren wurde kurz beschrieben. In einem Zahlenbeispiel wurden Betriebsdaten und die Wassererzeugungsrate in einer mehrstufigen Demonstrationsanlage, bestehend aus vier Stufen, berechnet. Dabei lag die maximal auftretende Lufttemperatur in den Gewächshäusern bei ca. 40°C.

Die Wasserproduktion in der vierstufigen Anlage wurde verglichen mit jener in einer einstufigen Anlage. Es zeigte sich, dass in der vierstufigen Anlage ca. drei Mal soviel Wasser produziert werden kann, wie in der einstufigen Ausführung.

Damit ist dieses Konzept ein Schritt auf dem Wege zur Entwicklung von teilweise oder vollständig wasserautarken Gewächshäusern.

Solche Gewächshäuser können an der Küste Nordafrikas, des Roten Meeres oder des Persischen Golfes aufgestellt werden und tragen dazu bei, die Ernährungsfrage der Weltbevölkerung positiv zu beeinflussen.

Literatur

- E. Chafik, Ein Verfahren zur Entsalzung von Meerwasser mit Hilfe von Solarenergie, Patentschrift
- E. Chafik, A new seawater desalination process using solar energy
- EMWIS, Project data Bases, Euro Mediterranean Information System on know how in the water sector (EMWIS)
- E. Chafik, Design of plants for solar desalination using the multi-stage heating / humidifying technique
- I. Houcine, Pilot plant testing of a new solar desalination process by a multipleeffect-humidification techniqueTh. Brendel, Solare Meerwas-

serentsalzungsanlagen mit mehrstufiger Verdunstung.

- E. Chafik, A new type of seawater desalination plants using solar Energy
- S. Yanniotis, K. Xerodemas, Air humidification for seawater desalination
- Cho. Renee; Seawater Greenhouses Produce Tomatoes in the Desert, News from the Columbia Water Center
- P.A. Davies, The Seawater Greenhouse in the United Arab Emirates
- Technology for Arid Coastal Regions. Third LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology
- P. Davies, Potential of The Seawater Greenhouse in the Middle Eastern Climates, International Engineering Conference (IEC)
- F. BenJemaa, I. Houcine, M.H. Chabani, Desalination in Tunisia: Past experience and future prospects
- H. Schulz, Prüfung, Weiterentwicklung und praktischer Einsatz von Einfach-Luftkollektoren zur Nutzung von Sonnenenergie für landwirtschaftliche und gewerbliche Zwecke
- E. Chafik, Energy optimized flow sheet of pilot plant, EU-Projekt „SOLDES“

ZUM AUTOR:

▶ Dr.-Ing. Efat Chafik
 SOLADES-Technologie, Bonn
 efat-chafik@t-online.de