



19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 357 578**

51 Int. Cl.:

**C02F 1/44** (2006.01)

**C02F 1/46** (2006.01)

**B01D 61/36** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **04729355 .0**

96 Fecha de presentación : **24.04.2004**

97 Número de publicación de la solicitud: **1622837**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **08.02.2006**

54

Título: **Procedimiento y dispositivo para el tratamiento de agua, particularmente para la desalinización de agua mediante destilación por membrana.**

30

Prioridad: **12.05.2003 DE 103 21 146**

45

Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**27.04.2011**

45

Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**27.04.2011**

73

Titular/es: **Clean Water Gesellschaft für  
Wasseraufbereitungstechnik mbH  
Vorderer Alter Berg 13  
76327 Pfinztal, DE**

72

Inventor/es: **Hambitzer, Günther;  
Biollaz, Heide;  
Borck, Markus y  
Ripp, Christiane**

74

Agente: **Carpintero López, Mario**

ES 2 357 578 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

- 5 La invención se refiere a un procedimiento para el tratamiento de agua y a un dispositivo correspondiente. El área de aplicación más importante es la obtención de agua dulce ("agua no salobre") a partir de agua salada (particularmente agua marina o agua salobre). A continuación se hace referencia de modo ilustrativo a esta área de aplicación. Sin embargo, la invención es adecuada también para otros fines de aplicación, en los que se plantea el objetivo de obtener agua depurada a partir de agua contaminada mediante destilación. Esto incluye particularmente también la depuración de agua contaminada con bacterias o virus (por ejemplo, agua residual o agua de río).
- 10 La desalinización del agua marina y otros procedimientos de tratamiento del agua son de máxima importancia para el abastecimiento a la población mundial de agua potable. Del total de las aguas superficiales de la tierra sólo aproximadamente un 2,5% es agua no salobre. De esto, aproximadamente el 80% está congelada en los casquetes polares o está unida como humedad del suelo, por lo que sólo aproximadamente un 0,5% del total de las aguas superficiales está disponible como agua potable. A esto hay que añadir que las existencias de agua potable están distribuidas de manera muy desigual. Por este motivo, una gran parte de la población de la tierra sufre escasez de agua.
- 15 Para la superación de este problema ya se han propuesto numerosos procedimientos para la desalinización del agua marina. A este respecto es necesario satisfacer requisitos complicados, entre otros porque el agua marina tiene una salinidad de aproximadamente 30 g/l, mientras que el agua potable según la Organización Mundial de la Salud (OMS) no debe superar una salinidad de 0,5 g/l. En los procedimientos de destilación convencionales el agua salada se evapora mediante la aportación de energía térmica y se condensa de nuevo en una superficie de refrigeración. Para reducir los costes del gran consumo de energía relacionado con ello, se intenta a menudo emplear energía solar como fuente de energía. En la publicación Bouchekima y col.: "The performance of the capillary film solar installed in South Algeria" de Desalination 137 (2001) 31-38 se describe una instalación ("solar still") de este tipo especial, en la que, mediante la utilización de una estructura capilar en el lado superior de la superficie de condensación se debe conseguir una condensación mejorada del agua evaporada.
- 20 Además se debate ya desde hace tiempo sobre diferentes procedimientos de membrana. A estos pertenece la ósmosis inversa, en la que el agua salada se presiona con presión a través de una membrana, cuyos poros están dimensionados de tal manera que la sal queda retenida. Otro procedimiento es la electrodiálisis, en la que dos electrodos se sumergen en una solución de electrolitos. En el campo eléctrico de una tensión continua se provoca en el agua salada una migración de iones. Mediante una conexión en serie alternante de las membranas de intercambio de cationes y aniones entre los electrodos de una celda de electrolisis se puede conducir el flujo de iones de tal manera, que en las cámaras exteriores tiene lugar un aumento de la concentración, mientras que en la cámara central se puede comprobar una reducción de la concentración de los electrolitos, es decir, una desalinización.
- 25 A los procedimientos de membrana pertenece también la destilación por membrana, en la que el agua a tratar, que en adelante se denomina también por motivos de simplificación agua salada, se mantiene en una cámara de aportación, cuya pared está formada al menos parcialmente por una membrana porosa hidrófoba. A este respecto, el tamaño de los poros de la membrana, teniendo en cuenta sus propiedades hidrófobas (es decir, su tensión superficial con respecto al agua), debe estar dimensionado de tal manera, que el agua salada no llene los poros de la membrana, o sea, que los poros de la membrana hidrófoba contengan aire. En otras palabras, la presión hidrostática máxima denominada presión de burbuja (bubble-pressure), a la que todavía no tiene lugar un paso del agua a través de la membrana hidrófoba, tiene que ser inferior a la presión que se presenta en el funcionamiento del procedimiento dentro de la cámara de aportación.
- 30 Durante la destilación por membrana, el agua salada se evapora a través de la membrana hidrófoba. En el lado del destilado (lado del agua dulce) se condensa el vapor. El procedimiento de destilación se basa (como en los procedimientos de destilación convencionales) en la diferencia de temperatura entre el agua marina, que se calienta, y el agua dulce en condensación, que se refrigera. Los diferentes procedimientos de destilación por membrana se describen, por ejemplo, en:
- 35
- 45 - Patente de Estados Unidos 3.340.186 (P. K. Weyl)
  - Patente de Estados Unidos 4.545.862 (Gore y col.)
  - Patentes de Estados Unidos 4.265.713, 4.476.024, 4.419.187 y 4.473.473 (todas de Cheng y col.).
  - YING KONG y col.: "Plasma Polymerization of Octafluorocyclobutane and Hydrophobic Microporous Composite Membranes for Membrane Distillation" JOURNAL OF APPLIED POLYMER SCIENCE, páginas 191-199.
- 50 La invención se basa, con este fundamento, en el problema técnico de especificar un procedimiento para el tratamiento de agua, particularmente para la desalinización de agua, y un dispositivo correspondiente que se distinguen por costes de funcionamiento y de inversión disminuidos.
- 55 Este problema técnico se soluciona mediante un procedimiento para el tratamiento de agua, en el que el agua salada se mantiene en una cámara de aportación, cuya pared está formada al menos parcialmente por una membrana hidrófoba permeable al vapor de agua, cuyo tamaño de poros está dimensionado de tal manera, que el agua salada no llena los poros, paralela a la membrana hidrófoba se extiende una membrana hidrófila, que tiene un espesor superior y una

conducción térmica por unidad de superficie inferior en comparación con la membrana hidrófoba, y mediante efecto de bombeo se genera una diferencia de presión de vapor entre el agua salada y el agua dulce, de tal manera que la destilación por membrana se acciona por la diferencia de la presión de vapor resultante del efecto de bombeo, condensándose el agua en los poros de la membrana hidrófila.

5 También es objeto de la invención un dispositivo para el tratamiento de agua, particularmente para la obtención de agua dulce a partir de agua salada, mediante destilación por membrana, que comprende una cámara de aportación, cuya pared está formada al menos parcialmente por una membrana hidrófoba permeable al vapor de agua, cuyo tamaño de poros está dimensionado de tal manera, que el agua salada no llena los poros, una membrana hidrófila que se extiende paralela a la membrana hidrófoba, que, en comparación con la membrana hidrófoba, tiene un espesor superior y una  
10 conducción térmica por unidad de superficie inferior, de manera que el agua se condensa en los poros de la membrana hidrófila cerca de la superficie límite con la membrana hidrófoba, y un equipo de bombeo, mediante el que se genera una diferencia de presión de vapor entre el agua salada y el agua dulce, de manera que la destilación por membrana se acciona por la diferencia de presión de vapor resultante del efecto de bombeo, condensándose el agua en los poros de la membrana hidrófila.

15 Los términos "hidrófilo" e "hidrófobo" han de entenderse en el sentido de uso habitual: una superficie es "hidrófila" cuando la atracción relativa entre las moléculas de agua es inferior a la atracción entre las moléculas de agua y la superficie fija. Una superficie "hidrófoba" se rige por la enunciación opuesta. El ángulo de contacto entre el líquido y una sustancia hidrófila (humectable) asciende (en ausencia de otras fuerzas) a menos de 90°, mientras que en una superficie hidrófoba asciende a más de 90°.

20 La membrana hidrófoba debe ser lo más delgada posible. Preferentemente, su espesor es inferior a 100 µm, prefiriéndose particularmente valores de como máximo 10 µm o incluso de como máximo 1 µm. La permeabilidad a vapor de agua se produce normalmente debido a que la membrana hidrófoba es porosa con un tamaño de poros de al menos algunos nanómetros. Sin embargo, en el caso de una membrana hidrófoba extremadamente delgada, la permeabilidad a vapor de agua se puede basar también en una permeabilidad de la membrana que no puede  
25 considerarse porosidad en este sentido. El límite superior del tamaño de poros se produce por la condición mencionada anteriormente con respecto a la presión de burbuja. Teniendo en cuenta esta limitación, debe ser lo más grande posible. Como material para la membrana hidrófoba son particularmente adecuados los siguientes plásticos: politetrafluoroetileno, policloruro de vinilo.

30 La membrana hidrófila no tiene que ser homogénea. Particularmente puede estar configurada también con varias capas. Son adecuados diferentes materiales de capa porosos, particularmente plásticos. Siempre que el material de capa sin tratar sea hidrófobo, la hidrofiliidad necesaria se puede conseguir mediante un tratamiento adecuado de la superficie interna (es decir, la superficie que en el interior del material delimita los poros). Tales procedimientos son conocidos, por ejemplo, se hidrofilita el policarbonato hidrófobo mediante un revestimiento delgado de la superficie con polivinilpirrolidona.

35 Como material para la membrana hidrófila son adecuados particularmente los siguientes plásticos: celulosa, acetato de celulosa, nitrato de celulosa, polisulfona y polietersulfona.

Debido a que la membrana hidrófila es más gruesa que la membrana hidrófoba (la relación de espesor preferentemente es al menos 10, de forma particularmente preferente al menos 100) y su conducción térmica por unidad de superficie es sustancialmente inferior a la de la membrana hidrófoba, las temperaturas que se producen durante el funcionamiento del  
40 procedimiento a ambos lados de la membrana hidrófoba se diferencian sólo ligeramente, siendo la temperatura del lado del agua dulce mínimamente superior que en el lado del agua salada. Por consiguiente, el aumento de la presión de vapor resultante en el lado del agua dulce sólo es ligero. Mediante un efecto de bombeo en el lado del agua salada o el agua dulce se sobrecompensa este ligero incremento de la presión de vapor y se realiza un transporte de masa a través de la membrana hidrófoba en dirección a la membrana hidrófila, condensándose el agua en los poros de la membrana hidrófila. En contraposición a los procedimientos de destilación por membrana conocidos, en los que el transporte de masa se consigue al poseer mediante refrigeración el agua dulce una temperatura inferior al agua salada y de esta manera tener una presión de vapor inferior, en el procedimiento según la invención proviene la diferencia de presión de vapor del efecto de bombeo.

45 Las medidas constructivas y las condiciones del procedimiento explicadas desembocan en que los poros de la membrana hidrófila al comienzo de la destilación se llenan con agua dulce y posteriormente tiene lugar la condensación posterior en proximidad directa con la superficie limitante de la membrana hidrófila que está orientada hacia la membrana hidrófoba. Teniendo en cuenta las condiciones térmicas explicadas, esto desemboca en que la destilación se realiza preferentemente de manera prácticamente isotérmica, ascendiendo la diferencia entre la temperatura del agua dulce en condensación y la temperatura del agua salada en evaporación a menos de 30°C, preferentemente menos de  
50 10°C, de forma particularmente preferente menos de 1°C ("destilación por membrana casi isotérmica").

Las relaciones térmicas explicadas tienen además como consecuencia que el calor de condensación que se libera durante la condensación en el lado del agua dulce fluye prácticamente en su totalidad (en todo caso en más del 60%) directamente a través de la membrana hidrófoba al agua marina en evaporación, porque la resistencia térmica opuesta a esta corriente térmica es mucho menor que la resistencia térmica que se forma con la membrana termoaislante

hidrófila. En consecuencia, una gran parte del calor de evaporación necesario para la evaporación del agua marina proviene de la retroalimentación directa del calor de condensación a través de la membrana hidrófoba. De este modo se reduce considerablemente el consumo de energía del procedimiento.

5 En lo que respecta a estos puntos de vista se diferencia la invención de forma fundamental de algunas de las patentes de Estados Unidos de Cheng mencionadas anteriormente, por ejemplo de la patente de Estados Unidos 4.419.242. En ella se recomienda la utilización de una capa delgada hidrófila que se puede extender en el lado del agua marina y/o en el lado del agua dulce de la membrana hidrófoba y que puede ser porosa o no porosa, en otro contexto. Cheng describe que en una destilación por membrana convencional a través de una membrana hidrófoba, la concentración salina aumenta en el transcurso del tiempo y se modifican de este modo las propiedades de humectación de la membrana.  
10 Esto puede conducir a que el agua salada llene los poros de la membrana hidrófoba y de este modo destruya la barrera de vapor necesaria ("saturación hídrica" ("water-logging")). Esto debe evitarse mediante la utilización de la membrana hidrófila mencionada. Por lo demás, Cheng describe sin embargo una destilación por membrana convencional que se provoca mediante una diferencia de temperatura lo suficientemente grande entre el agua salada en evaporación y el agua dulce en condensación.

15 En el marco de la invención se puede conseguir la diferencia de presión de vapor necesaria mediante diferentes procedimientos de bombeo. Básicamente existe la posibilidad de someter al agua salada a una presión lo suficientemente elevada por medio de una bomba convencional. Sin embargo, esto requiere que la cámara de aportación y las membranas sean lo suficientemente resistentes a la presión.

20 En vez de esto o adicionalmente se usa de forma particularmente preferente en el marco de la invención un procedimiento con microbomba, en el que el efecto de bombeo se basa en el efecto de una fuerza sobre las moléculas de agua que se encuentran en los poros de la membrana hidrófila ("mecanismo de bombeo intraporoso"). Para ello es adecuado particularmente un procedimiento de bombeo electro-osmótico, que se explica más en profundidad a continuación.

25 La invención se explica más detalladamente a continuación mediante los ejemplos de realización representados en las figuras. Las particularidades representadas en las mismas se pueden utilizar por separado o en diferentes combinaciones para conseguir la configuración preferida de la invención. Se muestra:

En la Fig. 1, una vista esquemática en sección de las partes esenciales de una primera realización de un dispositivo adecuado para la realización de la invención.

30 En la Fig. 2, una vista esquemática en sección de las partes esenciales de una segunda realización de un dispositivo adecuado para la realización de la invención.

35 El dispositivo de desalinización de agua 1 representado en la figura 1 se compone de una cámara de aportación 2, una membrana hidrófoba 3, un primer electrodo 4, una membrana hidrófila 5, un segundo electrodo 6 y una cámara de agua dulce 7. La representación está muy esquematizada. Particularmente el espesor de las membranas 3, 5 y de los electrodos 4, 6 está representado de manera muy exagerada. En la realidad, estos componentes forman una sucesión de capas relativamente delgadas en relación a sus dimensiones exteriores (iguales) que se extienden paralelas, que están sujetas de tal modo, que se encuentran en contacto directo entre las mismas.

40 Para la sujeción de estas capas dentro de la pila de capas representada designada en conjunto con 9 se pueden emplear distintos procedimientos que garantizan el contacto necesario y que igualmente no impiden el paso necesario de vapor o líquido. Particularmente se puede mantener unida toda la pila de capas 9 mediante los medios mecánicos adecuados. De forma alternativa entran en consideración técnicas de unión de capas de poros suficientemente abiertos. Particularmente los electrodos 4 y 6 así como la membrana hidrófoba pueden estar aplicados sobre la membrana hidrófila relativamente espesa que actúa a modo de soporte mediante laminado u otro procedimiento de revestimiento (por ejemplo, deposición de la fase de vapor).

45 La pila de capas 9 está unida con la cámara de aportación 2 de tal manera que cierra completamente una abertura de esta cámara no representada en la figura. Así pues forma una parte de las paredes que delimitan la cámara de aportación. Evidentemente es posible cualquier realización conocida en la técnica, tal como por ejemplo prismática, enrollada, tubular, etc.

50 Tal como se ha explicado (y como es habitual en los procedimientos de destilación por membrana), la membrana hidrófoba 3 se compone de un material no humectado con agua, de modo que puede atravesar vapor de agua, pero no el agua líquida, sus poros 3a representados de manera simbólica en la figura. El vapor de agua atraviesa el primer electrodo 4 igualmente poroso, de modo que alcanza los poros 5a (de nuevo representados de manera simbólica) de la membrana hidrófila 5. La condensación en agua líquida tiene lugar según la invención en los poros 5a de la membrana hidrófila 5. Esto incluye casos en los que el primer electrodo 4 es un componente de la membrana hidrófila 5 y está diseñado de tal manera, que la condensación en los poros del electrodo 4 tiene lugar en el límite de fase con respecto a la membrana hidrófoba. Desde la membrana hidrófila, el agua alcanza mediante efecto de bombeo a través del segundo electrodo 6 (igualmente poroso) la cámara de agua dulce 7, desde la que se conduce preferentemente de manera  
55 continua o se bombea mediante presión negativa a un recipiente colector no representado.

Un primer requisito importante de la función según la invención consiste en que la conducción térmica por unidad de superficie de la membrana hidrófila 5 es inferior (preferentemente muy inferior) a la conducción térmica por unidad de superficie de la membrana hidrófoba 3. La conducción térmica de una formación plana, tal como las membranas empleadas en el presente documento, es proporcional a la conductividad térmica del material empleado e inversamente proporcional a su espesor. Para realizar la condición explicada, la conductividad térmica de la membrana hidrófoba 3 debe ser lo más elevada posible y la conductividad térmica de la membrana hidrófila 5, lo más baja posible. Sin embargo, la selección de estos materiales está sujeta a otras muchas restricciones, por ejemplo, en lo que respecta a las propiedades de humectación, al tamaño de poros, a la porosidad y a la resistencia mecánica. Por este motivo es completamente posible que en un caso concreto la conductividad térmica de la membrana hidrófoba 3 sólo sea un poco superior o incluso inferior al valor correspondiente de la membrana hidrófila 5.

El espesor de los materiales empleados influye mucho en la realización práctica de la invención. Preferentemente, el espesor de capa d de la membrana hidrófoba 3 debe ser muy pequeño. Los valores numéricos se nombraron anteriormente. La membrana hidrófila 5 es preferentemente al menos 10 veces más espesa, de forma particularmente preferente al menos 100 veces más espesa que la membrana hidrófoba 3, ascendiendo el valor absoluto del espesor de la membrana hidrófila 5 preferentemente a al menos 0,1 mm, de forma particularmente preferente al menos 1 mm. En conjunto, la conducción térmica por unidad de superficie a través de la membrana hidrófoba 3 debe ser como mínimo 3 veces superior a la conducción térmica por unidad de superficie a través de la membrana hidrófila 5.

Para la eficacia práctica de la invención es además significativo que la membrana hidrófoba 3 tenga una permeabilidad a vapor lo suficientemente elevada. Ésta debe preferentemente ascender al menos a 100 litros/(h·m<sup>2</sup>) con una diferencia de presión de 6 MPa (60 bar). El tamaño de poros de la membrana hidrófoba 3 debe ascender preferentemente como máximo a 100 µm, de forma particularmente preferente como máximo a 5 µm.

Tal como se ha explicado, otra característica importante para la función de la invención consiste en que la diferencia de presión de vapor entre el agua salada y el agua dulce, necesaria para la destilación por membrana, se mantiene mediante el efecto del bombeo. En la realización representada en las figuras, ésta ocurre mediante un procedimiento de microbombeo que está realizado como un procedimiento de bombeo electro-osmótico. Con este fin se emplea una membrana hidrófila, cuya superficie interna presenta una carga superficial positiva o negativa. Esta condición se puede cumplir mediante una selección adecuada del material. Particularmente entra en consideración una membrana cuya superficie interna está revestida con un material intercambiador de iones. Mediante los dos electrodos 4, 6, que se extienden paralelos a las superficies límites 10, 11 de la membrana hidrófila 5, a los que se aplica una tensión adecuada durante el funcionamiento, se genera un campo eléctrico dentro de la membrana 5. Es adecuada en general una tensión continua. Sin embargo, existen también procedimientos en los que se utiliza una tensión pulsante o una tensión alterna modificada. El procedimiento de bombeo electro-osmótico se basa en que dentro de los poros, como consecuencia de los portadores de carga eléctricos disponibles en sus paredes, se forma una doble capa difusa y los iones dentro del líquido se aceleran en el campo eléctrico de acuerdo con su polarización y a la polaridad de su carga. Se pueden extraer informaciones más detalladas sobre procedimientos de bombeo electro-osmóticos de las publicaciones citadas a continuación en la descripción de un ejemplo. En el marco de la invención, el primer electrodo 4 puede estar cargado tanto positiva como negativamente (y el segundo electrodo 6, respectivamente negativa o positivamente). Cuál de estas polaridades se escoge en un caso concreto depende de la polaridad de la carga en la superficie interna de la membrana hidrófila. En todo caso, la polaridad de los electrodos se debe escoger de tal manera, que los iones se aceleren en sentido contrario a la membrana hidrófoba para que el agua se bombee de los poros 5a de la membrana hidrófila a la cámara de agua dulce 7.

Durante el funcionamiento, los poros 5a de la membrana hidrófila 5 están prácticamente del todo llenos, con lo que la condensación dentro de los poros 5a se realiza en proximidad directa con el área de interfase 10 de la membrana hidrófila 5, que está orientada hacia la membrana hidrófoba 3. Esto se origina por un efecto autorregulador que se puede explicar sobre la base del efecto de la condensación capilar como sigue. Al comienzo del procedimiento de destilación, el vapor de agua que atraviesa la membrana hidrófoba 3 se condensa en los poros 5a debido a sus propiedades capilares hidrófilas. A este respecto se llenan los poros 5a poco a poco hasta que el menisco del agua dulce en condensación se extiende cerca del área de la superficie límite 10. En este estado, la efectividad de la destilación depende del grado de la curvatura cóncava de la superficie de condensación (es decir, del menisco del agua en los poros 5a) que, por su parte, depende de la presión negativa resultante del efecto de bombeo. Por tanto, la curvatura cóncava del menisco aumenta con la presión negativa ascendente mediante el efecto del bombeo, por lo que se aumenta la eficacia de la condensación capilar. De este modo se alimenta más vapor de agua y la curvatura del menisco tiende a disminuir.

Este comportamiento autorregulador es importante para la función de la invención, porque de este modo el lugar de la condensación (el mencionado menisco) se encuentra muy cerca de la membrana hidrófoba 3 y (como consecuencia de su bajo espesor) también muy cerca del lugar de la evaporación. De este modo se consigue el desarrollo del procedimiento casi isotérmico explicado anteriormente, que a su vez conduce a un consumo de energía muy bajo.

La Figura 2 muestra una realización, en la que el primer electrodo 4 se extiende dentro de la membrana hidrófila 5, que se compone de dos capas 12 y 13. En principio, los electrodos 4 y 6 se pueden localizar de diferente manera dentro del dispositivo 1, siempre que se cumpla la condición de que el campo eléctrico existente entre los mismos (al aplicar una tensión) actúe sobre el líquido en los poros 5a de la membrana hidrófila. Por ejemplo, el segundo electrodo 6 puede

estar colocado también en el lado de la cámara de agua dulce 7 alejado de la membrana hidrófila 5. La posición de los electrodos 4, 6 influye, entre otras cosas, en el comportamiento autorregulador explicada en relación al menisco del agua dulce en condensación en los poros 5a. A este respecto, la disposición representada en la Figura 2 puede ser ventajosa.

5 Generalmente, al menos uno de los electrodos 4, 6 está unido de manera fija con la membrana hidrófila 5 o integrado en la misma. Tales electrodos han de considerarse componentes de la membrana hidrófila 5. Esto significa particularmente que en el caso de un electrodo integrado en la superficie límite 10 de la membrana hidrófila 5, la condensación puede tener lugar en la parte de la membrana 5 formada por el electrodo 4.

10 Tal como se ha mencionado, la membrana hidrófila 5 puede estar compuesta de diferentes materiales, que generalmente tienen poros aproximadamente con forma de esfera. Sin embargo, también están disponibles materiales de membrana, cuyos poros se extienden esencialmente justo entre las superficies límite 10 y 11, de modo similar a como se representa en las Figuras 1 y 2. Tales materiales se pueden emplear de manera ventajosa para la membrana hidrófila de la invención.

15 En la forma de realización representada en las figuras con un procedimiento de bombeo electro-osmótico se deben considerar efectos electroquímicos. Particularmente se puede producir el desarrollo de hidrógeno en el cátodo con tensiones de más de aproximadamente 1,8 V. Esto se puede aprovechar para, además del agua depurada, obtener hidrógeno. A este respecto, el electrodo orientado hacia la membrana hidrófoba es oportunamente el ánodo. Por otra parte, sin embargo, existe también la posibilidad de reducir o eliminar los efectos electroquímicos no deseados mediante la aplicación de membranas de intercambio de iones correspondientes, que obstaculicen el paso de iones o gases (por ejemplo, oxígeno), que conducen a reacciones electroquímicas no deseadas.

20 El siguiente ejemplo sirve para aclarar más la invención:

Para la descripción del procedimiento se deben considerar diferentes operaciones. Un caudal másico M de 30 l/h\*m<sup>2</sup> y una temperatura del agua marina de 17°C sirven de base para los cálculos del ejemplo.

1. Balance térmico alrededor del punto de la condensación

25 Tiene lugar una evaporación del agua a través de la membrana hidrófoba y la condensación posterior en la superficie de los poros llenos de agua de la membrana hidrófila. El transporte de calor asociado a esto se puede describir de forma matemática de la siguiente manera. La pérdida de calor en el ejemplo se toma en tanto por mil. El aumento de temperatura se toma con 0,14 K.

$$\text{Pérdidas de calor: } \frac{QW2 + QM2}{QM1} = \frac{1}{1000}$$

30  $\text{Aumento de la temperatura: } T2 = T1 + 0,14 \text{ K}$

$$\text{Balance térmico: } Q_{kon} = QW2 + QM2 + QM1 = M * H_v$$

con:

$$Q_{kon} = M * H_v$$

$$QM1 = \frac{\lambda_{M1}}{L_1} (A_1 - A_{e1})(T2 - T1)$$

35  $QM2 = \frac{\lambda_{M2}}{L_2} (A_2 - A_{e2})(T2 - T3)$

$$QW2 = \frac{\lambda_w}{L_{e2}} A_{e2}(T2 - T3) + M_{cp}(T2 - T3)$$

Qkon = calor de condensación

QM1 = conducción térmica a través de la membrana hidrófoba

QM2 = conducción térmica a través de la membrana hidrófila

QW1 = conducción y transporte del calor a través del agua

$\lambda$  = coeficiente de conductividad térmica

A = área de la sección transversal

L = espesor de la membrana

5 M = caudal másico

cp = capacidad térmica

Hv = calor de evaporación

T1 = temperatura en el lugar de la evaporación

T2 = temperatura en el lugar de la condensación

10 T3 = temperatura de la mayor parte del agua potable

La Tabla 1 muestra los resultados de los cálculos para un caudal másico predeterminado de 30 l/h\*m<sup>2</sup>. El aumento de temperatura en el agua marina se sitúa en 1°K. Esto muestra que se consigue el desarrollo casi isotérmico deseado del procedimiento.

Tabla 1:

Agua marina entrada			Agua marina salida			Agua potable salida		
T [°C]	M [kg/s]	Conc. [g/kg]	T [°C]	M [kg/s]	Conc. [g/kg]	T [°C]	M [kg/s]	Conc. [g/kg]
17	9,2*10 <sup>-3</sup>	36	18	8,3*10 <sup>-4</sup>	50	17	8,3*10 <sup>-3</sup>	-

15

## 2. Condensación capilar

En los poros de la membrana hidrófila se condensa el vapor de agua. En los capilares se configura una superficie curvada. Sobre esta superficie existe la presión de vapor pv. Esta presión de vapor pv está reducida en relación a la presión de vapor pv0 en una superficie plana y es, de este modo, la fuerza impulsora para la condensación del vapor de agua en los capilares. Con ayuda de la ecuación de Kelvin 2.a y de las ecuaciones 2.b y 2.c se puede calcular la presión de vapor pv disminuida. La presión capilar pk que se debe emplear para succionar agua de los capilares se calcula con la ecuación 2.b y debe ser al menos tan elevada como la presión negativa que se necesita para la disminución de la presión de vapor y que se puede calcular con la ecuación de Kelvin 2.a.

20

Ecuación 2.a:

$$p_K = \frac{RT}{V_L} \ln \frac{p_v^0}{p_v} \quad (\text{Ecuación de Kelvin})$$

25

Ecuación 2.b:

$$p_K = \frac{2\gamma_L \cos \delta}{r}$$

Ecuación 2.c:

$$\gamma_{H_2O} = 0,1179 \frac{N}{m} \left( 1 - \frac{T}{T_{krit.}} \right)^{\frac{4}{3}}$$

con:

30 pk = presión capilar

$V_L$  = volumen molar del líquido (agua: 18,05 cm<sup>3</sup>/mol)

$p_{v0}$  = presión de vapor con  $p_k = 0$

$p_v$  = presión de vapor

$R$  = constante universal de los gases 8,31441 J/molK

5

$T$  = temperatura

$T_{krit.}$  = temperatura crítica (agua: 647,3 K)

$\gamma_L$  = tensión superficial

$\delta$  = ángulo de humectación

$R$  = radio de los capilares

10

La tabla 2 muestra los valores determinados para el cálculo del ejemplo. La presión de vapor  $p_v$  está disminuida en relación a la presión de vapor  $p_{v0}$  de 2300 Pa en 170 Pa. Con un radio de poro de de 12 nm se alcanza una presión capilar de 120000 Pa. Esta presión capilar debe aplicarse al menos con la microbomba electro-osmótica.

Tabla 2

Condensación capilar		
$p_v$ [Pa]	$p_k$ [Pa]	$r$ [m]
2130	$120 \cdot 10^5$	$12 \cdot 10^{-9}$

### 3. Membrana hidrófoba

15

Con un caudal másico predeterminado y la diferencia de presión de vapor  $D_p$  derivada de la disminución de la presión de vapor mediante la condensación capilar se pueden determinar las propiedades de la membrana hidrófoba (ecuación 3.a).

Ecuación 3.a:

$$M = \frac{DM_w}{RT} \frac{A\Psi}{L\tau} \Delta P$$

20

con:

$M$  = caudal másico

$\Delta P$  = diferencia de presión

$R$  = constante universal de los gases 8,31441 J/molK

$T$  = temperatura

25

$D$  = coeficiente de difusión

$M_w$  = peso molecular

$\Psi$  = porosidad ( $\Psi = U_e/U$   $U_e$ : volumen vacío;  $U$ : volumen total del medio poroso)

$A$  = área de la sección transversal ( $A_e = \Psi A / \sqrt{\tau}$   $A_e$ : área de la sección transversal efectiva)

$\tau$  = factor de tortuosidad

30

$L$  = espesor del medio poroso ( $\tau = (L_e/L)^2$   $L_e$ : longitud efectiva de los poros)

En la tabla 3 está calculado el espesor de la membrana con la diferencia de presión correspondiente y la porosidad y tortuosidad predeterminadas. Se obtiene un valor de 1  $\mu$ m de espesor.



Tabla 3:

Membrana hidrófoba			
M	A	L	P
[kg/s]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[Pa]
8,3*10 <sup>-3</sup>	1	10 <sup>-6</sup>	170

4. Bomba electro-osmótica

5 Para mantener la fuerza impulsora para la condensación, es decir, la diferencia de presión de vapor, se debe transportar el agua condensada fuera de los capilares. Para ello se emplea el procedimiento de la microbomba electro-osmótica. Una descripción matemática de los procedimientos se encuentra en C. L. Rice y R. Whitehead (Electrokinetic Flow in a Narrow Cylindrical Capillary; J. Phys. Chem. 69 (1965) 4017-4024) y en S. Zeng, C.-H. Chen, J. C. Mikkelsen Jr. y J. G. Santiago (Fabrication and characterization of electroosmotic micropumps; Sensors and Actuators B 79 (2001) 107-114).  
 10 De las ecuaciones se obtiene el flujo de volumen máximo (caudal másico/espesor) 4.a, la presión de bomba máxima alcanzable 4.b y la tensión máxima 4.c.

Ecuación 4.a:

$$\text{Flujo de volumen máximo: } (P = 0) : V_{\text{máx}} = \frac{\lambda^2 i_{\text{EOF}}}{\epsilon \zeta} \frac{BF1}{BF2}$$

Ecuación 4.b:

$$\text{Presión máxima: } (V = 0) : \Delta P_{\text{máx}} = - \frac{8 \mu L \tau \lambda^2 i_{\text{EOF}}}{\epsilon \zeta A \Psi r^2} \frac{BF1}{BF2}$$

Ecuación 4.c:

$$\text{Tensión máxima: } (V = 0) : U_{\text{máx}} = \frac{\mu L \tau \lambda^2 i_{\text{EOF}}}{\epsilon^2 \zeta^2 A \Psi} \frac{1}{BF1}$$

El caudal volumétrico V esta relacionado a través de la ecuación 1.4.d con la diferencia de presión.

15

Ecuación 4.d:

$$V = V_{\text{máx}} \left( 1 - \frac{\Delta P}{\Delta P_{\text{máx}}} \right)$$

La potencia mínima en función de la presión y del flujo de volumen sin considerar las pérdidas irreversibles (conductividad de la superficie, conductividad bruta) se calcula según la ecuación 4.e.

Ecuación 4.e:

$$\text{Potencia} = U_{\text{máx}} i_{\text{EOF}} \left( 1 - \frac{\Delta P}{\Delta P_{\text{máx}}} \right) = \frac{\mu L \tau}{\lambda^2 A \Psi} \frac{BF2}{BF1^2} Q^2 + QP$$

20

Las siguientes abreviaturas se han empleado en las ecuaciones anteriores:

$$BF1 = \left( 1 - \frac{2 \lambda I_0(r)}{r I_0(r/\lambda)} \right)$$

$$BF2 = \left( 1 - \frac{2\lambda I_1(r/\lambda)}{r I_0(r/\lambda)} - \frac{I_1^2(r/\lambda)}{I_0^2(r/\lambda)} \right)$$

con  $I_n(x)$  = función de Bessel modificada de primera especie y orden n:

$$I_n(x) = i^{-n} J_n(ix) = \sum_{v=0}^{\infty} \frac{1}{v! \Gamma(n+v+1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{2v+n}$$

Significa:

- 5 V = caudal volumétrico
- $\Delta P$  = diferencia de presión (salida - entrada)
- $\Psi$  = porosidad ( $\Psi = V_e/U$   $V_e$ : volumen vacío;  $U$ : volumen total del medio poroso)
- A = área de la sección transversal ( $A_e = \Psi A/\tau$   $A_e$ : área de la sección transversal efectiva)
- r = radio de poro efectivo del medio poroso
- 10  $\mu$  = viscosidad dinámica
- $\tau$  = factor de tortuosidad
- L = espesor del medio poroso ( $\tau = (L_e/L)^2$   $L_e$ : longitud efectiva de los poros)
- $\epsilon$  = permitividad ( $\epsilon = \epsilon_0 * \epsilon_R$   $\epsilon_0$ : constante eléctrica de campo  $\epsilon_R$ : constante dieléctrica)
- $\zeta$  = potencial zeta
- 15 U = tensión
- U = espesor de la doble capa difusa (longitud de Debey)
- $I_1$  = función de Bessel modificada de primera especie y primer orden
- $I_0$  = función de Bessel modificada de primera especie y orden cero
- $\kappa$  = conductividad
- 20  $i_{EOF}$  = corriente a través de EOF

De las ecuaciones se obtienen las propiedades de la membrana hidrófila. La membrana tiene que poseer estas propiedades para que se pueda producir un flujo electro-osmótico con la fuerza de bombeo adecuada. De esta manera se obtienen los valores para el radio del poro, el espesor y la carga de superficie.

- 25 La tabla 4 muestra las propiedades de membrana mencionadas para el ejemplo calculado. Además, muestra de manera resumida los resultados positivos que se pueden obtener con el procedimiento según la invención. Además se especifican valores para la tensión máxima (7 voltios) y la corriente resultante (13A). El consumo de energía asciende a 92 W, lo que significa que por cada litro de agua potable se necesitan únicamente 3 Wh.

Tabla 4:

Flujo electro-osmótico											
Membrana hidrófila					Umáx	Mmáx	Pmáx	I <sub>EOF</sub>	i <sub>tol</sub>	PotenciaNC	
A	L	r	$\lambda$	$\zeta$							
[m]	[m]	[m]	[m]	[V]	[V]	[kg/s]	[Pa]	[A]	[A]	[W]	
1	10 <sup>-4</sup>	6*10 <sup>-9</sup>	6*10 <sup>-9</sup>	-0,1	7	2,3*10 <sup>-1</sup>	125*10 <sup>5</sup>	365	13	92	

## REIVINDICACIONES

- 5 1. Procedimiento para el tratamiento de agua, particularmente para la obtención de agua dulce a partir de agua salada, mediante destilación por membrana, en el que el agua a tratar se mantiene en una cámara de aportación (2), cuya pared está formada al menos parcialmente por una membrana hidrófoba (3) permeable al vapor de agua, paralela a la membrana hidrófoba (3) se extiende una membrana hidrófila (5), que en comparación con la membrana hidrófoba (3) tiene un espesor superior y una conducción térmica por unidad de superficie inferior y mediante efecto de bombeo se genera una diferencia de presión de vapor entre el agua a tratar y el agua dulce, de manera que la destilación por membrana se acciona por la diferencia de presión de vapor resultante del efecto de bombeo, condensándose el agua en los poros (3a) de la membrana hidrófila (5).
- 10 2. Procedimiento para el tratamiento de agua según la reivindicación 1, **caracterizado porque** la destilación se realiza de manera prácticamente isotérmica, siendo la temperatura del agua dulce en condensación superior a la temperatura del agua a tratar en evaporación y ascendiendo preferentemente la diferencia de temperatura a menos de 30°C, de forma particularmente preferente a menos de 10°C, aun más preferentemente a menos de 1°C.
- 15 3. Procedimiento para el tratamiento de agua según una de las reivindicaciones 1 ó 2, en el que la diferencia de presión de vapor se genera al menos parcialmente porque se extrae por bombeo el agua dulce de la membrana hidrófila (5) mediante un procedimiento de microbombeo con efecto de fuerza sobre las moléculas de agua que se encuentran en los poros de la membrana hidrófila.
4. Procedimiento para el tratamiento de agua según la reivindicación 3, en el que el procedimiento de microbombeo es un procedimiento de bombeo electro-osmótico.
- 20 5. Procedimiento para el tratamiento de agua según una de las reivindicaciones anteriores, en el que la diferencia de presión de vapor se genera al menos parcialmente porque se bombea el agua a tratar con sobrepresión al interior de la cámara de aportación.
- 25 6. Dispositivo para el tratamiento de agua, particularmente para la obtención de agua dulce a partir de agua a tratar, mediante destilación por membrana, que comprende una cámara de aportación (2), cuya pared está formada al menos parcialmente por una membrana hidrófoba (3) permeable al vapor de agua, una membrana hidrófila (5) que se extiende paralela a la membrana hidrófoba (3), que tiene en comparación con la membrana hidrófoba (3) un espesor mayor y una conducción térmica por unidad de superficie inferior, de modo que el agua se condensa en los poros (5a) de la membrana hidrófila cerca de la superficie límite con la membrana hidrófoba (3) y un dispositivo de bombeo, mediante el cual se genera una diferencia de presión de vapor entre el agua a tratar y el agua dulce, de forma que la destilación por membrana se acciona por la diferencia de presión de vapor resultante del efecto del bombeo, condensándose el agua en los poros de la membrana hidrófila.
- 30 7. Dispositivo según la reivindicación 6, en el que para la realización de un procedimiento de bombeo electro-osmótico están dispuestos dos electrodos planos (4, 6) paralelos a la membrana hidrófila (5) de tal manera, que al menos una capa de la membrana hidrófila (5) se extiende entre los dos electrodos, pudiendo ser los electrodos (4, 6) componentes de la membrana hidrófila y presentando la capa que se extiende entre los mismos una carga superficial eléctrica.
- 35 8. Dispositivo según una de las reivindicaciones 6 ó 7, en el que la cámara de aportación (2) es resistente a la sobrepresión y está provista una bomba mediante la que el agua se bombea con sobrepresión al interior de la cámara de aportación.
- 40 9. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 5 o dispositivo según una de las reivindicaciones de 6 a 8, en el que la permeabilidad al vapor de la membrana hidrófoba (3) asciende al menos a  $100 \text{ l}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$  con una diferencia de presión de 6 MPa (60 bar).
10. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 5 o dispositivo según una de las reivindicaciones 6 a 8, en el que el espesor de la membrana hidrófoba (3) asciende como máximo a 100  $\mu\text{m}$ , preferentemente como máximo a 10  $\mu\text{m}$ , de forma particularmente preferente como máximo a 1  $\mu\text{m}$ .
- 45 11. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 5 o dispositivo según una de las reivindicaciones 6 a 8, en el que el espesor de la membrana hidrófila (5) asciende al menos a 0,01 mm, preferentemente al menos a 0,1 mm, de forma particularmente preferente al menos a 1 mm.
- 50 12. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 5 o dispositivo según una de las reivindicaciones 6 a 8, en el que la membrana hidrófila (5) es al menos 10 veces más gruesa, preferentemente al menos 100 veces más gruesa que la membrana hidrófoba.
13. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 5 o dispositivo según una de las reivindicaciones 6 a 8, en el que la conducción térmica por unidad de superficie a través de la membrana hidrófoba (3) es al menos 3 veces superior a la conducción térmica por unidad de superficie a través de la membrana hidrófila.
14. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 5 o dispositivo según una de las reivindicaciones 6 a 8, en el

que la membrana hidrófoba (3) es porosa y el tamaño de sus poros asciende como máximo a 100  $\mu\text{m}$ , preferentemente como máximo a 5  $\mu\text{m}$ .

15. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 5 o dispositivo según una de las reivindicaciones 6 a 8, en el que la membrana hidrófila (5) está configurada con varias capas y las capas individuales tienen propiedades diferentes.

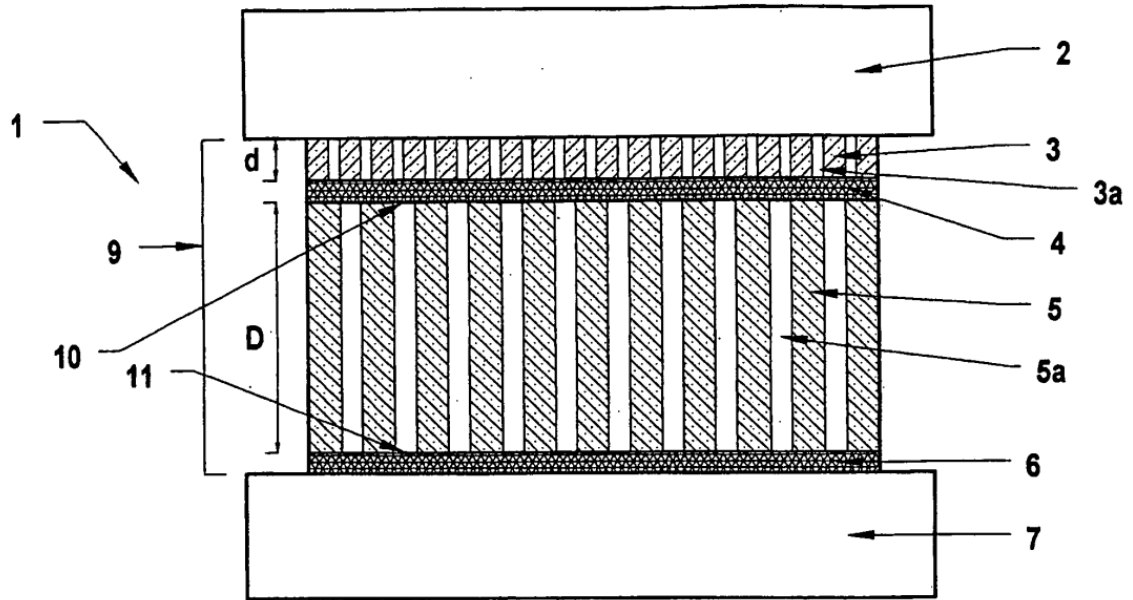


Fig.1

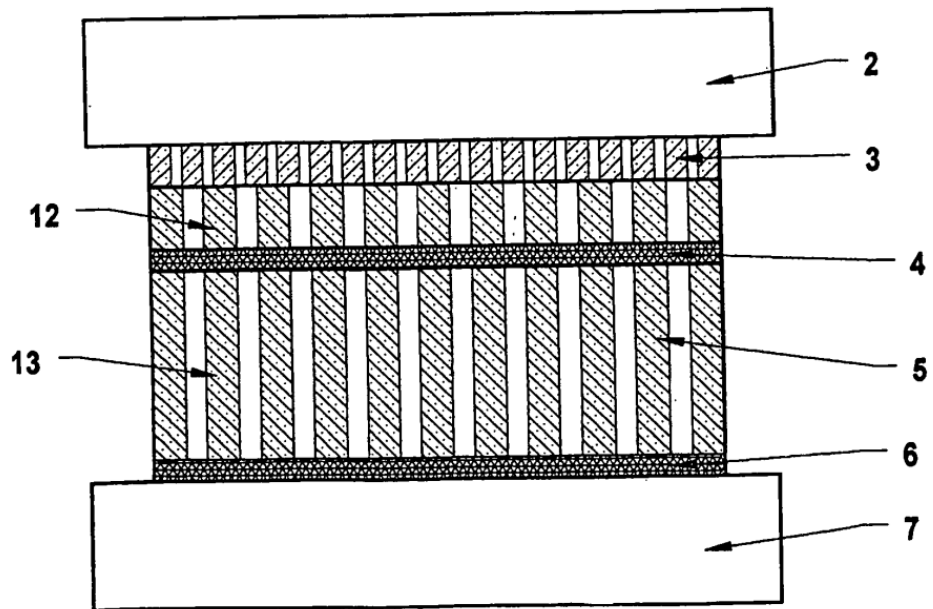


Fig.2