(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 452 925**

(51) Int. CI.:

B01D 63/02 (2006.01)
B01D 63/04 (2006.01)
A61M 1/16 (2006.01)

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.08.2010 E 10744927 (4)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **18.12.2013 EP 2470291**

(54) Título: **Módulo de fibra hueca entrelazada tridimensional para procesos de intercambio de sustancias y energía**

(30) Prioridad:

24.08.2009 DE 102009038673

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
03.04.2014

(73) Titular/es:

DRITTE PATENTPORTFOLIO BETEILIGUNGSGESELLSCHAFT MBH & CO. KG (100.0%)
Berliner Strasse 1
12529 Schönefeld / Waltersdorf, DE

(72) Inventor/es:

KASHEFI, ALI

(74) Agente/Representante:

BLANCO JIMÉNEZ, Araceli

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

Módulo de fibra hueca entrelazada tridimensional para procesos de intercambio de sustancias y energía

[0001] La invención se refiere a un haz de fibras huecas para su inclusión en un dispositivo de intercambio de sustancias según el preámbulo de la reivindicación 1, y un dispositivo de intercambio de sustancias para recibir al menos uno de tales haces de fibras huecas, así como un método para la fabricación de un haz de fibras huecas para su inclusión en un dispositivo de intercambio de sustancias según el preámbulo de la reivindicación 11.

[0002] El campo de aplicación de los dispositivos de intercambio de sustancias va desde las aplicaciones industriales generales de la química o la física a las aplicaciones en la tecnología médica. Los dispositivos de intercambio de sustancias se refieren, en el sentido de la presente invención, al intercambio de una sustancia, que puede estar en fase gaseosa o líquida, entre la primera fase y una segunda fase separada de aquella por una membrana permeable. Aquí, el intercambio de sustancias se debe a una concentración o diferencia de presión entre la primera y la segunda fase. Dependiendo de la sustancia o sustancias o cada fase en la que estas sustancias están presentes que se quieran intercambiar, el diseño de la membrana requiere requisitos técnicos básicos para poder garantizar un intercambio de sustancias deseado.

[0003] Aunque la presente invención no se limita a aplicaciones médicas, esta se considerará en lo sucesivo principalmente para una aplicación médica, en base a la cual se explican los principios esenciales de la invención.

[0004] En aplicaciones médicas, el intercambio de sustancias se utiliza, por lo general, para la eliminación de sustancias perjudiciales para la salud del cuerpo del paciente, o la transferencia de sustancias beneficiosas o vitales para la salud en el cuerpo del paciente prioritariamente. Así, mediante la hemodiálisis, lo que se desea es limpiar la sangre de un paciente de sustancias de descomposición o toxinas peligrosas para la salud. En el caso de oxigenadores, lo prioritario es, por un lado, suministrar suficiente oxígeno a la sangre de un paciente y, por el otro lado, limpiar también la sangre del anhídrido carbónico producido. Se pueden realizar otros dispositivos de intercambio de sustancias típicos de la medicina, por ejemplo, para la separación de plasma (separación de la sangre) o en órganos híbridos, como el hígado artificial.

[0005] Si se produce un intercambio de sustancias entre la sangre de un paciente y otra fase de transferencia, como una mezcla de gas con oxígeno, hay que garantizar que la sangre del paciente sea tratada adecuadamente, es decir, que se produzca un intercambio de sustancias suficiente. En los oxigenadores, por lo tanto, es importante asegurarse de que se introduzca suficiente oxígeno de la fase de intercambio a través de la membrana en la sangre del paciente. También hay que tener en cuenta que se elimine el anhídrido carbónico producido en cantidades suficientes de la sangre del paciente. Dependiendo de la cantidad de intercambio de sustancias, se puede utilizar oxigenadores sólo para apoyar la función pulmonar natural o para sustituirla completamente. A este respecto, es posible, por ejemplo, proporcionar oxigenadores tanto externos como internos en el torrente sanguíneo de un paciente para reemplazar su función pulmonar durante una intervención quirúrgica.

[0006] Dependiendo de los requisitos, las membranas correspondientes presentan propiedades de materiales y geometrías específicas para permitir el intercambio de sustancias deseado. Muchos dispositivos de intercambio de sustancias modernos en medicina utilizan membranas de fibras huecas, cuyas paredes de las fibras tienen una permeabilidad predeterminada para el material que va a ser transferido. Tales membranas se pueden hacer de plásticos poliméricos adecuados así como polipropilenos poliméricos, polimetilpentenos poliméricos o también de silicona. Así, según el estado de la técnica, se combina una pluralidad de fibras huecas alineadas en paralelo normalmente en un tejido, con el fin de obtener una superficie de transferencia total superior. Estos tejidos pueden ser utilizados de una manera sencilla y en varias capas. En una capa con una pluralidad de tejidos, se prevé normalmente la observancia de un cierto ángulo de divergencia de los ejes de extensión longitudinal de las fibras huecas de los distintos tejidos unos con respecto de los otros, para evitar el deslizamiento de las fibras huecas individuales una dentro de la otra. En un oxigenador estas capas de tejidos se disponen sustancialmente en forma de un cilindro hueco para que la sangre, que fluye en la dirección radial de dicho cilindro, al pasar a través de las fibras huecas individuales sea sometida a un intercambio de sustancias. En la patente EP 0621047 B1, se hace referencia a una técnica representativa de esta tecnología, ampliamente utilizada en medicina, en la que se describen unas fibras huecas extendidas en tejidos dobles cruzados de fibras huecas, teniendo cada uno una pluralidad de fibras huecas dispuestas en paralelo. Las fibras huecas de un tejido de fibras huecas se cosen juntas, en este caso con urdimbres paralelas perpendiculares al eje longitudinal de la extensión de las fibras huecas individuales de un tejido de fibras huecas, con el fin de limitar el movimiento relativo de las fibras huecas individuales entre sí. La orientación de las fibras huecas del primer tejido de fibras huecas con respecto al segundo tejido de fibras huecas se realiza, por ejemplo, en un ángulo de 22°. Además, los tejidos individuales de fibras huecas se superponen, y en su caso, se enrollan, para formar un haz, en el que los extremos de las fibras huecas son embebidos por medio de una resina en un tubo para fijarlas de ese modo.

[0007] Como disposiciones de fibras huecas conocidas, hay que señalar, por otra parte, las que se indican en las publicaciones EP 1 360 984 A2, JP 2002833 A, DE 24 26 591 A1 y CA 1 094 462 A1, que describen disposiciones de fibras huecas bidimensionales, cuyas fibras pueden realizarse también parcialmente como hilos retorcidos.

[0008] Además de las limitaciones geométricas, los dispositivos de intercambio de sustancias tienen que satisfacer normalmente una variedad de requisitos de prestaciones, que surgen de los problemas de seguridad de la atención al paciente, así como de las consideraciones médicas. Aquí se debe observar el volumen de llenado de sangre así como una caída de presión en el lado de la fase de transferencia (tal como un gas con oxígeno en un oxigenador), así como en la fase del lado de la sangre, la tensión de cizallamiento de las células de la sangre, así como las propiedades de la superficie de la membrana y los efectos de la superficie superior en la interacción con la sangre. Para considerar la variedad de influencias, se proponen soluciones en tecnología médica que siempre intentan conseguir una mejora en el cumplimiento de ciertos requisitos, a expensas de un deterioro en el cumplimiento de otros requisitos. Unos parámetros importantes para la eficiencia, y por lo tanto para la cantidad de material transferido en un dispositivo de intercambio de sustancias, son también las temperaturas locales y las diferencias locales de temperatura entre la fase sanguínea y la fase de intercambio. Así, los oxigenadores modernos comprenden, por ejemplo, intercambiadores de calor integrados, que deben compensar en gran parte, utilizando materiales térmicamente conductores diseñados en forma de placa, las diferencias de temperatura dentro del dispositivo de intercambio de sustancias durante el intercambio de sustancias.

[0009] Con el fin de mejorar el intercambio de sustancias en los dispositivos de intercambio de sustancias, en particular, el intercambio de oxígeno en el oxigenador, se puede utilizar la siguiente ecuación 1 para la descripción matemática de la tasa de intercambio de gas en el oxigenador.

$$dV/dt = K \cdot A \cdot \Delta p_{ln} \quad (1)$$

[0010] Aquí, dV/dt es la tasa de intercambio de gas entre la fase de intercambio en forma de gas dentro de las fibras huecas y la fase sanguínea fuera de las fibras huecas. La tasa de intercambio de gas dV/dt se calcula aquí como el producto de un coeficiente de intercambio de sustancias (K), el tamaño de la superficie de la membrana (A) y la media logarítmica de la presión parcial de gas (ΔP_{ln}), que es la fuerza de impulsión del intercambio de sustancias. El coeficiente global de intercambio de sustancias K puede describirse como una función, que no se ejecutará aquí, de los coeficientes de intercambio de sustancias individuales para el gas en la fase gaseosa, la membrana y la fase sanguínea.

[0011] A partir de la ecuación anterior se puede ver que, en teoría, se pueden tomar numerosas medidas para mejorar el intercambio de sustancias en el dispositivo de intercambio de sustancias. Sin embargo, la práctica técnica demuestra que muchas medidas para optimizar un parámetro van asociadas al deterioro de otro parámetro. Especialmente en el uso de fibras huecas en los dispositivos de intercambio de sustancias, los esfuerzos técnicos se han centrado principalmente en la optimización del diseño de la forma de la carcasa de los dispositivos de intercambio de sustancias, la colocación de fibras huecas individuales en la carcasa, y el control del flujo de la fase sanguínea en el dispositivo de intercambio de sustancias. A pesar de estos esfuerzos, sin embargo, se observa que muchos dispositivos de intercambio de sustancias conocidos en el estado de la técnica presentan graves inconvenientes que hacen que el intercambio de sustancias sea reducido. Estos incluyen, por ejemplo, la marcha por encima de la pared de la fase sanguínea, entre la pared interior de la carcasa y las fibras huecas exteriores, la formación de canales, corrientes de cortocircuito, así como zonas muertas, todos los cuales presentan el efecto de un intercambio de sustancias significativamente reducido entre la fase de intercambio en las fibras huecas y la fase sanguínea.

[0012] Precisamente en la disposición de una pluralidad de fibras huecas en un tejido de fibras huecas o una pluralidad de estos tejidos en un haz de fibras huecas, los fenómenos descritos arriba pueden presentarse cuando los tejidos de fibras huecas o el haz de fibras huecas son enrollados alrededor de un cilindro dispuesto en el centro en el dispositivo de intercambio de sustancias. Esto no sólo produce corrientes de cortocircuito de la sangre que fluye radialmente, que prácticamente puede fluir desde el interior del cilindro directamente a su pared interior sin ponerse en contacto de intercambio interactivo de sustancias con una fibra hueca. Además ocurren a veces, en estas configuraciones, grandes marchas por encima de las paredes entre el tejido de fibras huecas y la pared interior del cilindro, de modo que el intercambio de sustancias se reduce en gran medida.

[0013] Según los inconvenientes descritos anteriormente, se puede considerar, por tanto, necesario proponer una disposición de fibras huecas, o un haz de fibras huecas, que esté destinado a ser colocado en un dispositivo de intercambio de sustancias, que reduzca los inconvenientes descritos anteriormente que reducen el intercambio de sustancias del dispositivo de intercambio de sustancias. En particular, un objeto de la presente invención es proporcionar un haz de fibras huecas que permita un intercambio de sustancias mejorado para colocarlo en un dispositivo de intercambio de sustancias. Otro objeto de la presente invención es proporcionar un dispositivo de

intercambio de sustancias para recibir al menos un haz de fibras huecas, y un método para la fabricación de dicho haz de fibras huecas.

[0014] Según la invención, este objeto se consigue mediante un haz de fibras huecas para colocarlo en un dispositivo de intercambio de sustancias según la reivindicación 1. Además, el objeto se consigue mediante un dispositivo de intercambio de sustancias según la reivindicación 10 y un método para la fabricación de un haz de fibras huecas para colocarlo en un dispositivo de intercambio de sustancias según la reivindicación 11.

[0015] En particular, el objeto se consigue mediante un haz de fibras huecas para colocarlo en un dispositivo de intercambio de sustancias, caracterizado por el hecho de que el haz de fibras huecas comprende tres grupos de hilos de fibras huecas orientados sustancialmente, al menos localmente, a lo largo de una dirección preferida para un intercambio de sustancias y/o transferencia de calor, que se disponen entre sí, en relación a sus direcciones locales preferidas, de tal manera que un primer grupo de hilos de fibras huecas está orientado sustancialmente en una primera dirección preferida, un segundo grupo de hilos de fibras huecas está orientado sustancialmente en una segunda dirección preferida, y un tercer grupo de hilos de fibras huecas está orientado sustancialmente en una tercera dirección preferida, en el que dichas tres direcciones preferidas son independientes y sustancialmente perpendiculares entre sí.

[0016] Por otra parte, el objeto se consigue mediante un dispositivo de intercambio de sustancias para la recepción de al menos un haz de fibras huecas, en el que al menos un haz de fibras huecas está configurado de forma correspondiente a un haz de fibras huecas según la invención.

[0017] Un aspecto de la invención es proporcionar una pluralidad de hilos de fibras huecas en un haz de fibras huecas, en donde los diferentes hilos de fibras huecas tienen diferentes direcciones preferidas en el espacio, de modo que formen una estructura tridimensional. Los hilos de fibras huecas, en el sentido de la invención, pueden ser tanto fibras huecas individuales como una pluralidad de fibras huecas. La dirección preferida de los hilos de fibras huecas, en el caso de fibras huecas individuales es definida por la dirección longitudinal de las fibras huecas, y en el caso de un hilo de fibras huecas que comprenda una pluralidad de fibras huecas, a través de la dirección longitudinal sustancialmente central del hilo. Por consiguiente, las fibras huecas siempre están conectadas entre sí de tal manera que se pueda definir una dirección preferida.

[0018] Además, puesto que las fibras huecas individuales, así como los hilos de fibras huecas pueden tener a veces, en el haz de fibras huecas, curvas, el haz de fibras huecas está caracterizada por una estructura tridimensional que comprende, al menos localmente, fibras huecas o hilos de fibras huecas que tienen tres direcciones espaciales independientes entre sí. La independencia de las direcciones preferidas individuales en este caso se debe entender en el sentido matemático, de manera que a partir de tres fibras huecas o hilos de fibras huecas con direcciones preferidas independientes se forme una estructura tridimensional. Además aquí una dirección preferida independiente equivale a una dirección preferida diferente.

[0019] A través de la disposición tridimensional de los hilos de fibras huecas en el haz de fibras huecas, se puede lograr, por un lado, un uso óptimo del espacio y, por otro lado, se puede presentar una estructura de fibras huecas geométrica que condiciona el flujo dinámico de la fase más fluida que fluye sobre la superficie exterior de las paredes de fibra hueca. Por ejemplo, en los oxigenadores, es de crucial importancia que la fase sanguínea realice, al menos por regiones, un flujo turbulento apropiado, por lo que el contacto con las superficies de las paredes de las fibras huecas, por un lado, mejora estadísticamente, y por el otro, también produce un mezclado adecuado de la fase sanguínea. En particular, en el caso de los tejidos de fibras huecas conocidos del estado de la técnica, que definen localmente por lo general sólo una estructura de dos dimensiones o una estructura con sólo dos direcciones preferidas, el grado de turbulencia en la fase sanguínea suele ser muy baja.

[0020] Otro aspecto principal de la presente invención es también el hecho de combinar un hilo de fibras huecas mediante el entrelazado de una pluralidad de fibras huecas, con lo cual, por un lado, se forma una estructura autoestabilizante, y por otra parte, esta estructura tiene una topografía de la superficie, que, debido al entrelazado de las fibras huecas individuales en forma conjunta (vínculos) consiguen localmente otra mejora del flujo turbulento de la fase que se mueve por la superficie del hilo de fibras huecas. Además, hacer hilos individuales de fibras huecas a partir de una pluralidad de fibras huecas representa un modo muy adecuado de combinar haces de fibras huecas más grandes mediante la conexión o puesta en común con una construcción modular.

[0021] De la explicación anterior, así como de la que sigue, debe entenderse un entretejido de fibras huecas individuales una con la otra en el sentido de un entrelazado de las fibras huecas individuales unas con otras. Aquí, sin embargo, el entrelazado se lleva a cabo de tal manera que las fibras huecas entrelazadas forman una estructura estable, con el fin de evitar que las fibras huecas se suelten de esta estructura. También hay que señalar que un entrelazado de fibras huecas individuales tiene al menos dos fibras huecas que no se extienden en ángulo recto una con respecto a la otra. Por lo tanto, un entrelazado es fundamentalmente diferente de un tejido o cruzado, en el que las fibras huecas se extienden esencialmente en dos grupos zigzagueantes cruzados de fibras huecas. En consecuencia, también es comprensible que un entrelazado permita un espectro geométrico mucho

mayor de opciones de combinación de los haces de fibras huecas debido a la relativamente pequeña restricción en la disposición de los hilos de fibras huecas individuales o de las fibras huecas una con respecto a otra.

[0022] En una forma de realización preferida, el haz de fibras huecas se caracteriza por que al menos uno de los hilos de fibras huecas se compone de una pluralidad de fibras huecas. Así, la estabilidad mecánica de un hilo de fibras huecas a partir de una pluralidad de fibras huecas es mejor en comparación con las fibras huecas individuales, dando como resultado una mejora de la estabilidad mecánica de todo el haz de fibras huecas. En particular, esta mejora se produce cuando la pluralidad de fibras huecas se fija entre sí con el fin de reducir el deslizamiento de las fibras huecas individuales una con respecto a la otra. Este tipo de fijación puede obtenerse, por ejemplo, mediante la concatenación adecuada con elementos de retención o hilos de sujeción, o incluso simplemente por adhesión. En lugar de las superficies de sujeción o elementos de sujeción, la fijación se puede conseguir mediante otras fibras huecas que se extiendan transversalmente.

[0023] En una forma de realización adicional de la presente invención está previsto que la pluralidad de fibras huecas de el al menos un hilo de fibras huecas estén entrelazadas. Debido al entrelazado, las superficies de las fibras huecas se orientan una hacia la otra de tal manera que las fibras huecas están enredadas unas con otras de manera que es imposible o casi imposible que las fibras huecas individuales, en un hilo de fibras huecas, se escapen o se deslicen. Por consiguiente, se obtiene una estructura mecánicamente estable en comparación con una fibra hueca individual. Además, entrelazando apropiadamente las fibras huecas, las superficies totales de un hilo de fibras huecas están condicionadas de tal manera que se puede ejercer una influencia beneficiosa sobre el flujo de la corriente de la fase que pasa en contacto con la superficie superior de las fibras huecas.

[0024] En otra forma de realización, un haz de fibras huecas presenta al menos un hilo de fibras huecas para un intercambio de sustancias o una transferencia de calor y sustancias, que, preferiblemente, comprende una pluralidad de fibras huecas que se entrelazan. En el caso de una transferencia de calor y de sustancias, se proporciona al menos una fibra hueca para un intercambio de sustancias y al menos una fibra hueca para un intercambio de calor.

[0025] En otra forma de realización del haz de fibras huecas según la invención, el entrelazamiento de las fibras huecas es tal que se estabilizan entre sí. En consecuencia, también se obtiene una estructura estable del haz de fibras huecas, cuando se entrelazan al menos tres grupos de hilos de fibras huecas que tienen, al menos localmente, diferentes direcciones preferidas. Así el entrelazado permite combinar el haz de fibras huecas en un conjunto aplicando el trenzado adecuado. La estabilización mecánica del haz de fibras huecas es principalmente necesaria incluso cuando la fase que entra en contacto con la superficie superior exterior de la fibra hueca ejerce sobre esta una presión de flujo cuando se emplea el dispositivo de intercambio de sustancias. Según la forma de realización, la estabilización resultante del entrelazado de las fibras huecas es suficiente para soportar esta presión de flujo sin que la estructura del haz de fibras huecas se altere significativamente.

[0026] En otra forma de realización, el al menos un hilo de fibra hueca del haz de fibras huecas se conecta con respecto a al menos otro hilo de fibras huecas en el haz de fibras huecas para un intercambio de sustancias o intercambio de calor y sustancias con una pluralidad de fibras huecas que se entrelazan entre sí. El haz de fibras huecas puede combinarse de este modo mediante un número de hilos de fibras huecas que están formados a su vez a partir de una pluralidad de fibras huecas. La conexión de hilos de fibras huecas individuales entre sí se puede hacer por medios adecuados tales como hilos, nudos o elementos de conexión. Además es posible una unión por encolado o trenzando de unos con otros.

[0027] Al disponer haces de fibras huecas individuales con diferentes direcciones preferidas también se puede obtener ventajosamente la presentación relativamente flexible de las estructuras tridimensionales de un haz de fibras huecas.

[0028] Según la invención, el haz de fibras huecas comprende exactamente tres grupos de hilos de fibras huecas que están orientados en una dirección preferida, que es independiente de las otras direcciones preferidas. Por lo tanto, un haz de fibras huecas adecuado de acuerdo con las dimensiones especificadas puede constituir a su vez la carcasa de un dispositivo de intercambio de sustancias.

[0029] Las tres direcciones preferidas se disponen sustancialmente perpendiculares entre sí. Mediante la disposición mutuamente perpendicular se pueden formar estructuras particularmente estables de un haz de fibras huecas, ya que las fuerzas de flujo se pueden distribuir esencialmente por igual en los haces de fibras huecas en las tres direcciones espaciales. Particularmente en los haces de fibras huecas en los que se establece, al menos parcialmente, un flujo turbulento de una de las fases, puede haber, por lo tanto, una transferencia adecuada de las fuerzas en todas las direcciones espaciales.

[0030] Además se proporciona, como una forma de realización, que el primer grupo de hilos de fibras huecas, el segundo grupo de hilos de fibras huecas y el tercer grupo de hilos de fibras huecas estén entrelazados. Una conexión por entrelazado se forma, por un lado, de forma relativamente simple y, por otro lado, también da como resultado una estructura estable del haz de fibras huecas.

[0031] En otro perfeccionamiento, el entrelazado del primer grupo de hilos de fibras huecas, el segundo grupo de hilos de fibras huecas y el tercer grupo de hilos de fibras huecas es tal que se obtiene una estructura autoportante y mecánicamente resistente. La resistencia de esta estructura es al menos suficiente para soportar la presión del flujo que se produce en el haz de fibras huecas.

[0032] Según otra forma de realización de la presente invención, el entrelazado forma una estructura regular con respecto a los hilos de fibras huecas. Una estructura regular es particularmente importante para un mezclado uniforme de la fase que entra en contacto con la superficie exterior de la fibra hueca. Por consiguiente, se puede evitar en gran media o prevenir por completo eficiencias diferentes por regiones de intercambio de sustancias, flujos perturbadores o flujos muertos o incluso volúmenes muertos. Preferiblemente, la estructura regular tiene una simetría que también puede, opcionalmente, corresponder a la simetría de la forma de la carcasa del dispositivo de intercambio de sustancias.

[0033] Según otra forma de realización del haz de fibras huecas según la invención, se proporciona el primer grupo de hilos de fibras huecas y el segundo grupo de hilos de fibras huecas para un intercambio de sustancias y el tercer grupo de hilos de fibras huecas para el intercambio de calor. En consecuencia, los gradientes de temperatura pueden estar dentro del haz de fibras localmente bien equilibrados. En particular, para los dispositivos de intercambio de sustancias que deben garantizar una alta uniformidad del nivel de calor en el haz de fibras huecas, por ejemplo en el caso de los oxigenadores, el calor se suministra y se retira prácticamente en todo el volumen del haz de fibras huecas. En consecuencia, se puede asegurar que la fase que entra en contacto con las superficies exteriores de las fibras huecas presenta una temperatura sustancialmente constante en todo el volumen del haz de fibras huecas. Al cambiar esta temperatura con la eliminación o transferencia correspondiente del calor también se puede ajustar adecuadamente la tasa de intercambio de sustancias y calor en el haz de fibras huecas.

[0034] Además, en una forma de realización del haz de fibras huecas según la invención, se prevé que el primer grupo de hilos de fibras huecas y el segundo grupo de hilos de fibras huecas sustancialmente a lo largo de la dirección preferida del tercer grupo de hilos de fibras huecas formen uno o más canales. Por medio de los canales puede alcanzarse un acondicionamiento apropiado del flujo de la fase que entra en contacto con las superficies exteriores de las fibras huecas. En consecuencia, se puede influir de nuevo específicamente en toda la tasa de intercambio de sustancias.

[0035] En otra forma de realización del haz de fibras huecas según la invención, las fibras huecas de al menos un hilo de fibras huecas se puede colocar al menos por regiones a través de los agujeros de uno o más discos perforados. Por este medio, las fibras huecas se pueden conectar fácilmente a un sistema de suministro de fluido, en el que se fijan mecánicamente en la zona de los discos perforados. Los discos perforados están en este caso adaptados para recibir fibras huecas individuales o hilos de fibras huecas de una pluralidad de fibras huecas.

[0036] Se deducen otras formas de realización de la invención de las reivindicaciones dependientes.

[0037] La invención se describirá ahora por medio de ejemplos de realización, que se explican con más detalle con referencia a las ilustraciones. En este sentido muestran:

la Fig. 1 una vista en sección esquemática a través de una forma de realización de un haz de fibras huecas según la invención;

la Fig. 2 una vista en sección esquemática a través de otra forma de realización de un haz de fibras huecas según la invención;

la Fig. 3 es un diagrama esquemático para la disposición de hilos de fibras huecas en una forma hexagonal según otra forma de realización de la presente invención;

la Fig. 4 es una representación matemática de la distribución longitudinal S_l así como de la porosidad ε de un haz de fibras huecas según la forma de realización indicada en la Fig. 3;

la Fig. 5 es una ilustración ejemplar de una forma de realización de un hilo de fibras huecas según la invención compuesto por tres fibras huecas;

la Fig. 6 es una ilustración ejemplar de otra forma de realización de un hilo de fibras huecas de la presente invención;

la Fig. 7 es una ilustración ejemplar de otra forma de realización de un hilo de fibras huecas de la presente invención;

la Fig. 8 es una vista en sección lateral a través de una forma de realización de un dispositivo de intercambio de sustancias para colocar un haz de fibras huecas según una forma de realización de la presente invención.

[0038] En la siguiente descripción, se utilizan los mismos números de referencia para las partes que son idénticas y similares.

[0039] La Figura 1 muestra una vista en sección esquemática a través de una primera forma de realización de un haz de fibras huecas 1 según la invención, que muestra un total de tres grupos de distintos hilos de fibras huecas 10a, 10b y 10c, cuyas respectivas direcciones preferidas V1, V2 y V3 son independientes unas de otras. En particular, las direcciones preferidas están dispuestas de modo que el primer grupo de hilos de fibras huecas 10a presenta la dirección preferida V1, el segundo grupo de hilos de fibras huecas 10b presenta la dirección preferida V2 y el tercer grupo de hilos de fibras huecas 10c, presenta la dirección preferida V3. Para mayor claridad se muestran solamente dos hilos de fibras huecas 10a, que están formados cada uno de dos fibras huecas 11, así como dos hilos de fibras huecas 10b formados asimismo de dos fibras huecas 11. A este respecto, los dos hilos de fibras huecas 10a están dispuestos cada uno en un plano y los dos hilos de fibras huecas 10b están en un plano inmediatamente superior. Aquí no se proporcionan números de referencia a los planos, pero se pueden entender fácilmente por las representaciones gráficas. La dirección preferida de V1 del primer grupo de hilos de fibras huecas 10a y la dirección preferida V2 del segundo grupo de hilos de fibras huecas 10b están, a este respecto, perpendiculares entre sí. Las dos fibras huecas 11 de cada hilo de fibras huecas 10a y 10b están entrelazadas por entrelazamiento con los hilos de fibras huecas 10c del tercer grupo de hilos de fibras huecas 10c. El primer y el segundo grupo de hilos de fibras huecas 10a y 10b se pueden distinguir mejor en la representación porque son más finos que las fibras huecas 11 del tercer grupo de hilos de fibras huecas 10c. Todas las fibras huecas 11 de los tres grupos de hilos de fibras huecas 10a, 10b y 10c, sin embargo, pueden tener, en este caso, un diámetro exterior idéntico.

[0040] Aquí, el tercer grupo de hilos de fibras huecas 10c presenta, en la vista en sección del lado del borde del haz de fibras huecas 1, tres fibras huecas 11 que están dispuestas, en la sección transversal que se muestra en la Figura 1, en una configuración triangular entre sí. Los otros hilos de fibras huecas 10c dispuestos según la vista en sección de la Figura 1 en el interior del haz de fibras huecas 1, muestran sólo una fibra hueca 11, y están dispuestos de tal manera, según la vista en sección transversal ilustrada, en la extensión de uno de los hilos de fibras huecas 10c periféricos, que se alinean entre sí con una disposición lineal en el plano del papel. Por lo tanto, los hilos de fibras huecas interiores 10c señalados están dispuestos de tal manera que tres hilos de fibra hueca 10c, cada uno compuesto de una fibra hueca 11, están dispuestos entre dos hilos de fibras huecas 10c, cada uno de los cuales comprende tres fibras huecas 11. De esta manera es posible entrelazar las fibras huecas 11 en un plano dispuesto perpendicular a la dirección preferida V3 con cada uno de los hilos de fibra hueca 10c sustancialmente paralelos entre sí. Aquí, para el entrelazado de una fibra hueca 11, por ejemplo, del primer grupo de hilos de fibras huecas 10a, se guía una fibra hueca entre dos fibras huecas 11 de los hilos de fibra hueca 10c dispuestos lateralmente en el haz de fibras huecas 1, con el fin de envolver a continuación los hilos de fibra hueca 10c más internos indicados arriba del haz de fibras huecas 1, y por lo tanto entrelazarse con ellos.

[0041] La presente ilustración ofrece una vista esquemática de una posible primera forma de realización del haz de fibras huecas según la invención 1, pero donde sólo se ilustran dos planos de los hilos de fibras huecas 10a y 10b. Para una mejor comprensión, la representación según la Figura 1 también presenta numerosas líneas auxiliares, que permiten reconocer con mayor facilidad la disposición relativa de los hilos de fibras huecas 10c individuales. Según la forma de realización de la presente invención, sin embargo, sólo los tres grupos diferentes entre sí de hilos de fibras huecas 10a, 10b y 10c forman la parte física del haz de fibras huecas. El experto en la técnica también deducirá que puede disponerse cualquier número de hilos de fibras huecas 10a y 10b en un plano de una manera alternante a lo largo de la dirección preferida V3 por entrelazado con los hilos de fibra hueca 10c individuales. En consecuencia, se pueden formar, por ejemplo, un haz de fibras huecas 1 cúbico o paralelepipédico, cuya dimensión a lo largo de la dirección preferida V3 esté definida por la extensión longitudinal de los hilos de fibra hueca 10c. A través del entrelazado de los hilos de fibras huecas 10a con los hilos de fibra hueca 10c y el entrelazado de los hilos de fibras huecas 10b con los hilos de fibra hueca 10c, así como por la secuencia alternante de estas disposiciones a lo largo de la dirección preferida V3 se crea un haz de fibras huecas 1 mecánicamente estable.

[0042] Preferiblemente, los hilos de fibra hueca 10c también se proporcionan para el intercambio de calor en el haz de fibras huecas 1, mientras que los dos hilos de fibras huecas de los grupos de hilos de fibras huecas 10a y 10b se proporcionan para el intercambio de sustancias. En el caso de usar el haz de fibras huecas 1 en un oxigenador, los primeros y segundos grupos de hilos de fibras huecas 10a y 10b serían atravesados por lo tanto por el oxígeno con el fin de intercambiarlo con la fase sanguínea (que no se muestra aquí). Además, también se produciría un intercambio de CO_2 entre la fase sanguínea y la fase gaseosa que fluye en la fibras huecas 11. Por el contrario, los hilos de fibra hueca 10c del tercer grupo podrían ser atravesados por un fluido de intercambio de calor, que asegure una distribución de temperatura esencialmente uniforme en el haz de fibras huecas 1. Según la forma de realización, las fibras huecas 11 de los hilos de fibra hueca 10c pueden realizarse de forma comparable a los dos grupos de hilos de fibras huecas 10a y 10b o ser distintas a estos. En particular, debe tenerse en cuenta que las fibras huecas 11 individuales pueden tener un diámetro interno típico de 200 µm a 280 µm y un diámetro exterior típico de 300 µm a 380 µm.

[0043] Para que cada grupo de hilos de fibras huecas 10a, 10b y 10c se llene con el respectivo fluido, se les puede aplicar una presión de fluido adecuada a través de unas conexiones a las que están pegados o sellados. En consecuencia, también se puede ajustar selectivamente un flujo definido de un fluido en los grupos individuales de hilos de fibras huecas 10a, 10b y 10c.

[0044] La Figura 2 muestra, en comparación con la Figura 1, otra posible forma de realización de un haz de fibras huecas 1 de la invención en una vista en sección transversal. Aquí, los hilos de fibra hueca 10c individuales, que consisten cada uno en una fibra hueca 11, forman, en sección transversal, un punto de entrelazado del tercer grupo de hilos de fibra hueca a lo largo de la dirección preferida V3 para las fibras huecas 11 del primer grupo de hilos de fibras huecas 10a y del segundo grupo de hilos de fibras huecas 10b entrelazadas con ellos. El punto de entrelazado define esencialmente el punto de intersección, que se muestra en esta vista en sección transversal, de dos fibras huecas 11, que forman un hilo de fibras huecas 10a o 10b. Para ello, los hilos de fibra hueca 10c, que están formados cada uno a partir de una fibra hueca 11, no deben constituir, en comparación con la forma de realización ilustrada en la Figura 1, ningún punto de entrelazado. Más bien, sólo dos de las tres fibras huecas 11 de un grupo de hilos de fibra hueca 10c constituyen un punto de entrelazado. Dependiendo de la forma del entrelazado se puede constituir una estructura entrelazada más densa o más sólida del haz de fibras huecas 1. En particular las diferente formas de entrelazado permiten establecer una porosidad diferente del haz de fibras huecas 11, que se obtiene de la relación del volumen libre en el haz de fibras huecas 1 con el volumen total del haz de fibras huecas 1.

[0045] La Figura 3 muestra una vista esquemática en sección transversal a través de un haz de fibras huecas 1 separado (no mostrado aquí), que está previsto para ser recibido en un carcasa con forma hexagonal de un dispositivo de intercambio de sustancias 2 (no mostrado aquí). Aquí se compara la vista en sección transversal mostrada en la Figura 3 con la vista en sección transversal mostrada en las Figuras 1 y 2. El primer y el segundo grupo de hilos de fibras huecas 10a y 10b no se muestran, sin embargo, en la Figura 3. El tercer grupo de hilos de fibra hueca 10c se muestra sólo esquemáticamente a través de un hilo de fibras huecas 10c que comprende tres fibras huecas 11. La forma de la carcasa, que está diseñada en este caso hexagonal, está representada por una línea periférica de la carcasa 3.

[0046] Según la forma de realización, la disposición de tres fibras huecas 11 del hilo de fibras huecas 10c representado puede ser optimizada con respecto al ángulo de inclinación ß para constituir un entrelazado de las fibras huecas individuales 11 con la geometría y la porosidad deseadas del haz de fibras huecas 1. El ángulo ß está definido aquí por el ángulo entre las líneas límites laterales idealizadas del patrón de referencia cuadrado y la línea que conecta los respectivos puntos centrales de estas dos líneas límite en las fibras huecas 11 más próximas del hilo de fibras huecas 10c. En consecuencia, dependiendo de la disposición de las tres fibras huecas 11 entre sí, es decir, dependiendo también del ángulo ß mostrado, se crea un haz de fibras huecas 1 con una porosidad predeterminada. La porosidad también se puede constituir en función de la distribución transversal S_q y la distribución longitudinal S_l de las fibras huecas 11. La distribución longitudinal S_l se define aquí en términos de la distancia entre dos fibras huecas en la dirección axial (a lo largo de la longitud de las fibras huecas 11). La distribución transversal S_q se obtiene de la distancia entre dos fibras huecas 11 en la dirección radial (perpendicular a la dirección longitudinal de las fibras huecas 11). El cálculo de un ángulo ß apropiado permite aquí, por un lado, la marcha por encima de la pared cuando se usa el haz de fibras huecas en un dispositivo de intercambio de sustancias 2, y por otro lado, determinar el grado del flujo alrededor del haz de fibras huecas compuesto de fibras huecas 1. Aquí, de nuevo, se entiende que las fibras huecas se pueden proporcionar en grupos para diferentes tareas (intercambio de sustancias, intercambio de calor).

[0047] En la Figura 4 se puede ver el ejemplo de un cálculo de la distribución longitudinal S_l y la porosidad ε en función del ángulo ß para la configuración mostrada en la Figura 3. Para ello se pueden fijar los parámetros de la distribución transversal S_q en 150 µm y del diámetro exterior de una fibra hueca 11 en 380 µm. Los cálculos presentados ilustran que al aumentar el ángulo ß aumentan tanto la distribución longitudinal S_l como la porosidad ε del haz de fibras huecas 1. De acuerdo con las dos formas de onda ilustradas, ahora es posible establecer una distribución longitudinal S_l adecuada y una porosidad ε adecuada del haz de fibras huecas 1 para un dispositivo de intercambio de sustancias 2 predefinido. También hay que señalar una vez más que la porosidad ε es la relación del volumen libre del haz de fibras huecas 1 con respecto al volumen total de haz de fibras huecas 1.

[0048] A través de una disposición adecuada, en particular, mediante la disposición oblicua de las fibras huecas 11 en el dispositivo de intercambio de sustancias 2 se puede garantizar que se escurra el agua condensada que se puede formar normalmente en una fase gaseosa que fluya a través del dispositivo de intercambio de sustancias 2. En consecuencia, no se forman bloqueos ni depósitos no deseados.

[0049] Mediante el entrelazado adecuado de las fibras huecas individuales 11 y los hilos de fibras huecas 10a ,10b y 10c individuales en un haz de fibras huecas 1 se pueden ajustar no sólo diferentes geometrías de la empaquetadura, sino también diferentes porosidades. Esta propiedad es particularmente significativa, especialmente en el diseño de haces de fibras huecas 1 para su inclusión en órganos artificiales (órganos híbridos), tales como en un hígado artificial.

[0050] La Figura 5 muestra una posible forma de realización de un hilo de fibras huecas 10a de la presente invención que consiste en tres fibras huecas individuales 11. Mediante el entrelazado adecuado de las tres fibras huecas 11 unas con otras se puede constituir un hilo de fibras huecas 10a, que tiene una estabilidad mecánica mejorada en comparación con las fibras huecas individuales 11. Además, el hilo de fibras huecas 10a presenta una topografía de la superficie característica, que puede condicionar el flujo de una fase que entre en contacto con la superficie superior de las fibras huecas 11 individuales con respecto a su flujo adecuado. Así, se desea la formación de una turbulencia local particularmente en los oxigenadores para aumentar la probabilidad estadística de contacto de los componentes sanguíneos individuales con las superficies superiores de las fibras huecas 11 individuales.

[0051] La Figura 6 muestra, en comparación con la Figura 5, una interconexión alternativa de las fibras huecas 11 individuales, pero en la Figura 6 se proporcionan dos grupos diferentes de hilos de fibras huecas 10a y 10c perpendiculares entre sí. El entrelazado de las fibras huecas 11 individuales del hilo de fibras huecas 10a se puede efectuar en planos bien definidos, o también de tal manera que las fibras huecas 11 individuales no se extiendan en planos claramente definidos. En la Figura 7 se muestra una forma de realización de este tipo, en la que sólo las fibras huecas 11 individuales que se extienden perpendiculares al plano del papel están en un plano claramente definido, pero no lo están las fibras huecas 11 entrelazadas con ellas del hilo de fibras huecas 10a.

[0052] Dependiendo de los requisitos, por lo tanto, mediante el entrelazado adecuado de las fibras huecas 11 individuales y de los hilos de fibras huecas 10a, 10b y 10c, se puede lograr un agrupamiento apropiado en un haz de fibras huecas 1. Aquí, se entiende que los hilos de fibras huecas 10a y 10c que se muestran en las Figuras 5 a 7 son típicamente subunidades de un gran haz de fibras huecas 1, que se puede constituir mediante la disposición de una pluralidad de estructuras similares. El experto en la técnica entenderá también que se pueden utilizar cualquier otra forma de entrelazamiento, en particular usando cualquier número de fibras huecas.

[0053] La Figura 8 muestra una vista en sección transversal lateral de una forma realización de un dispositivo de intercambio de sustancias 2 de la invención, en el que se incluye una forma de realización del haz de fibras huecas 1 de la invención. Aquí, el haz de fibras huecas 1 se muestra solamente de forma esquemática. En particular, el haz de fibras huecas 1 de la ilustración presenta sólo un primer grupo de hilos de fibras huecas 10a y un tercer grupo de hilos de fibras huecas 10c. Se puede disponer un segundo grupo de hilos de fibras huecas 10b en una dirección preferida V2, perpendicular al plano del papel.

[0054] Las fibras huecas 11 del haz de fibras huecas 1 están conectadas por medio de piezas de conexión adecuadas con las entradas y salidas necesarias del dispositivo de intercambio de sustancias 2. Concretamente, el dispositivo de intercambio de sustancias 2 presenta una entrada 41 de un medio de intercambio, en el caso de un oxigenador una entrada de sangre 41, a través de la cual el medio de intercambio fluye introduciéndose en perpendicular a la dirección preferida V1 del primer grupo de hilos de fibras huecas 10a y en perpendicular a la dirección preferida V2 del segundo grupo de hilos de fibras huecas 10b en el dispositivo de intercambio de sustancias 2. Después de pasar a través del dispositivo de intercambio de sustancias 2, el medio de intercambio sale por una salida 42, una salida de sangre 42 en el caso de la oxigenador. Para el suministro del primer grupo de hilos de fibras huecas 10a con una fase de intercambio adecuada se proporciona una entrada de gas 43, en el caso de un oxigenador una entrada de O_2 43, a través de la cual puede entrar oxígeno en los hilos de fibras huecas 10a y después de la finalización del intercambio de sustancias y el flujo a través del dispositivo de intercambio de sustancias 2 a lo largo de la dirección preferida V1 se descarga de nuevo desde una salida de gas 44, en el caso de un oxigenador de una salida de O_2/CO_2 44 del dispositivo de intercambio de sustancias 2. Para el suministro de los segundos grupos de hilos de fibras huecas 10b que están dispuestos en la dirección preferida V2, se pueden proporcionar más entradas y salidas. En particular, se puede prever cualquier número de entradas y salidas.

[0055] El presente dispositivo de intercambio de sustancias 2 incluye, además, un tercer grupo de hilos de fibras huecas 10c, que están previstos para el intercambio de calor o para la regulación del calor. Aquí, los hilos de fibras huecas 10c se proporcionan con puertos adecuados, a través de los cuales se puede alimentar o descargar un medio de calentamiento. La presente forma de realización tiene, de forma correspondiente, una entrada 45 para un medio de calentamiento y una salida 46 para un medio de calentamiento.

[0056] Cabe señalar que todas las partes descritas anteriormente se consideran, por sí mismas y en cualquier combinación, en particular los detalles que se muestran en los dibujos, esenciales para la invención. Los expertos en la técnica deducirán sus modificaciones.

Números de referencia

[0057]

1	Haz de fibras huecas
2	Dispositivo de intercambio de sustancias
3	Carcasa
10a	Hilo de fibras huecas
10b	Hilo de fibras huecas
10c	Hilo de fibras huecas
11	Fibra hueca
20	Canal
41	Entrada del medio de intercambio/entrada de sangre
42	Salida del medio de intercambio/salida de sangre
43	Entrada de la fase de intercambio/entrada de O_2
44	Salida de la fase de intercambio/salida de O_2/CO_2
45	Entrada del medio de calentamiento
46	Salida del medio de calentamiento
V1	Dirección preferida
V2	Dirección preferida
V3	Dirección preferida
ß	Ángulo de inclinación
ε	Porosidad
s_l	Distribución longitudinal
s_q	Distribución transversal
d_a	Diámetro exterior

REIVINDICACIONES

1. Haz de fibras huecas para su inclusión en un dispositivo de intercambio de sustancias, caracterizado por el hecho de que el haz de fibras huecas (1) comprende una pluralidad de hilos de fibras huecas (10a, 10b, 10c) orientados sustancialmente, al menos localmente, a lo largo de una dirección preferida, para un intercambio de sustancias y opcionalmente un intercambio de calor, que se disponen entre sí, en cuanto a sus direcciones preferidas (V1, V2, V3) locales, de tal manera que al menos un primer grupo de hilos de fibras huecas (10a) está orientado sustancialmente en una primera dirección preferida (V1), al menos un segundo grupo de hilos de fibras huecas (10b) está orientado sustancialmente en una segunda dirección preferida (V2) y al menos un tercer grupo de hilos de fibras huecas (10c) está orientado sustancialmente en una tercera dirección preferida (V3), en el que las tres direcciones preferidas (V1, V2, V3) son independientes entre sí, en el que el haz de fibras huecas comprende exactamente tres grupos de hilos de fibras huecas (10c 10a, 10b), orientados cada uno en una dirección preferida (V1, V2, V3), que es independiente de las otras direcciones preferidas (V1, V2, V3), caracterizado por el hecho de que exactamente las tres direcciones preferidas (V1, V2, V3) están dispuestas sustancialmente perpendiculares entre sí.

2. Haz de fibras huecas según la reivindicación 1, caracterizado por el hecho de que al menos uno de los hilos de fibras huecas (10a, 10b, 10c) se compone de una pluralidad de fibras huecas (11).

3. Haz de fibras huecas según la reivindicación 2, caracterizado por el hecho de que la pluralidad de fibras huecas (11) del al menos un hilo de fibras huecas (10a, 10b, 10c) están entrelazadas.

4. Haz de fibras huecas según la reivindicación 3, caracterizado por el hecho de que el al menos un hilo de fibras huecas (10) está conectado con respecto a al menos otro hilo de fibras huecas (10b) en el haz de fibras huecas (1) para un intercambio de sustancias o intercambio de calor y sustancias con una pluralidad de fibras huecas (11), que están entrelazadas.

5. Haz de fibras huecas según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por el hecho de que el primer grupo de hilos de fibras huecas (10a), el segundo grupo de hilos de fibras huecas (10b) y el tercer grupo de hilos de fibras huecas (10 c) están entrelazados.

6. Haz de fibras huecas según una cualquiera de las reivindicaciones 3 a 5 anteriores, caracterizado por el hecho de que el entrelazado de los hilos de fibras huecas (10a, 10b, 10c) forma una estructura regular.

7. Haz de fibras huecas según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por el hecho de que el primer grupo de hilos de fibras huecas (10a) y el segundo grupo de hilos de fibras huecas (10b) se proporcionan para un intercambio de sustancia y el tercer grupo de hilos de fibras huecas (10c) se proporciona para el intercambio de calor.

8. Haz de fibras huecas según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por el hecho de que el primer grupo de hilos de fibras huecas (10a) y el segundo grupo de hilos de fibras huecas (10b) forman, sustancialmente a lo largo de la dirección preferida del tercer grupo de hilos de fibras huecas (10c), un canal o varios canales (20).

9. Haz de fibras huecas según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por el hecho de que las fibras huecas (11) de al menos un hilo de fibras huecas (10a, 10b, 10c) se colocan, al menos parcialmente, a través de los agujeros de uno o más discos perforados (31).

10. Dispositivo de intercambio de sustancias con al menos un haz de fibras huecas, caracterizado por el hecho de que al menos un haz de fibras huecas (1) está formado según una de las reivindicaciones anteriores.

11. Método para fabricar un haz de fibras huecas (1) según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por las siguientes etapas:

- preparación de al menos una pluralidad de fibras huecas (11), que están formadas para el intercambio de calor o el intercambio de sustancias y calor;

- disposición de al menos una pluralidad de dichas fibras huecas (11) en al menos un hilo de fibras huecas (10a, 10b, 10c) mediante entrelazado.

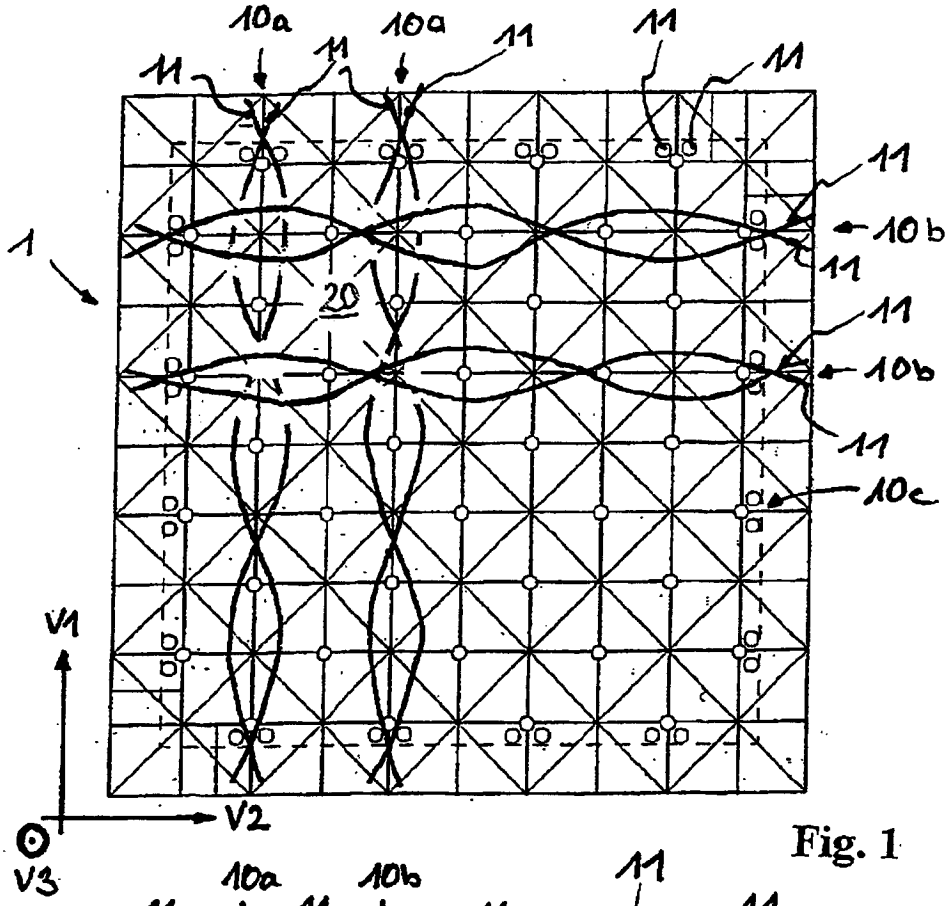
10a
10a
11
11
11
11
11
11
10b
11
11
10b
11
10c
1
20
V1
V2
V3

Fig. 1

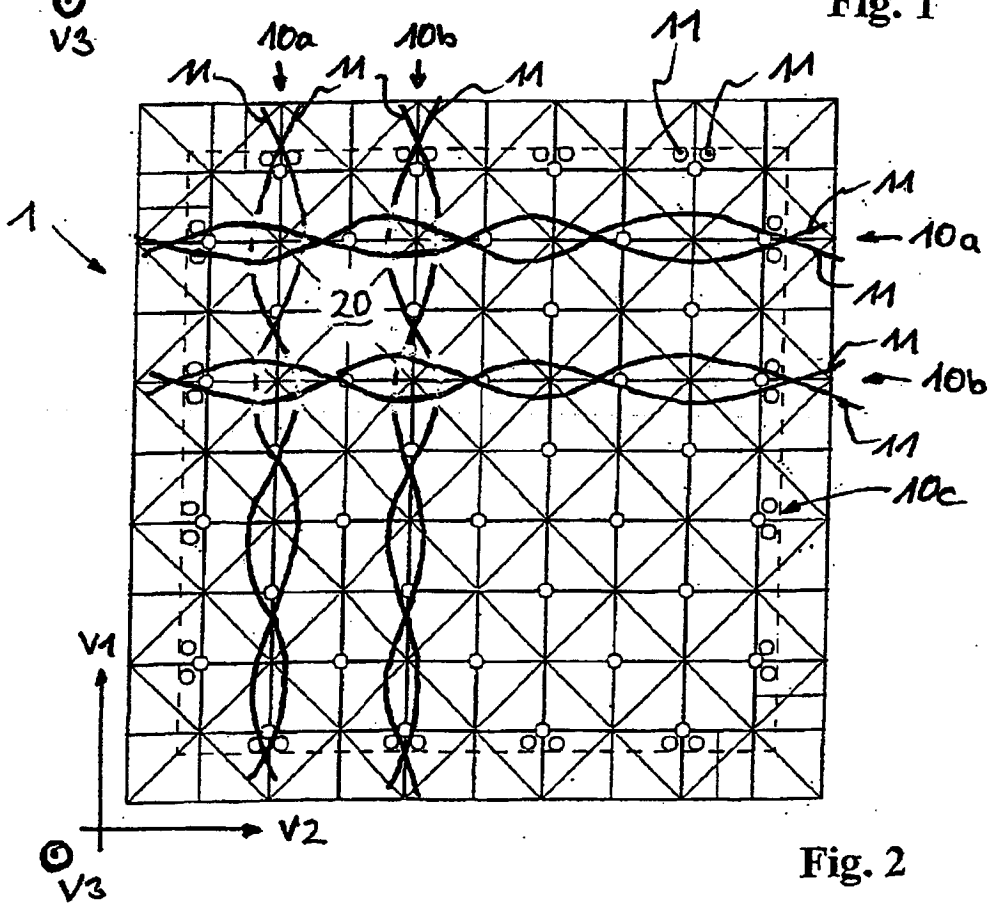
10a
10b
11
11
11
11
11
11
10a
11
11
10b
11
10c
1
20
V1
V2
V3

Fig. 2

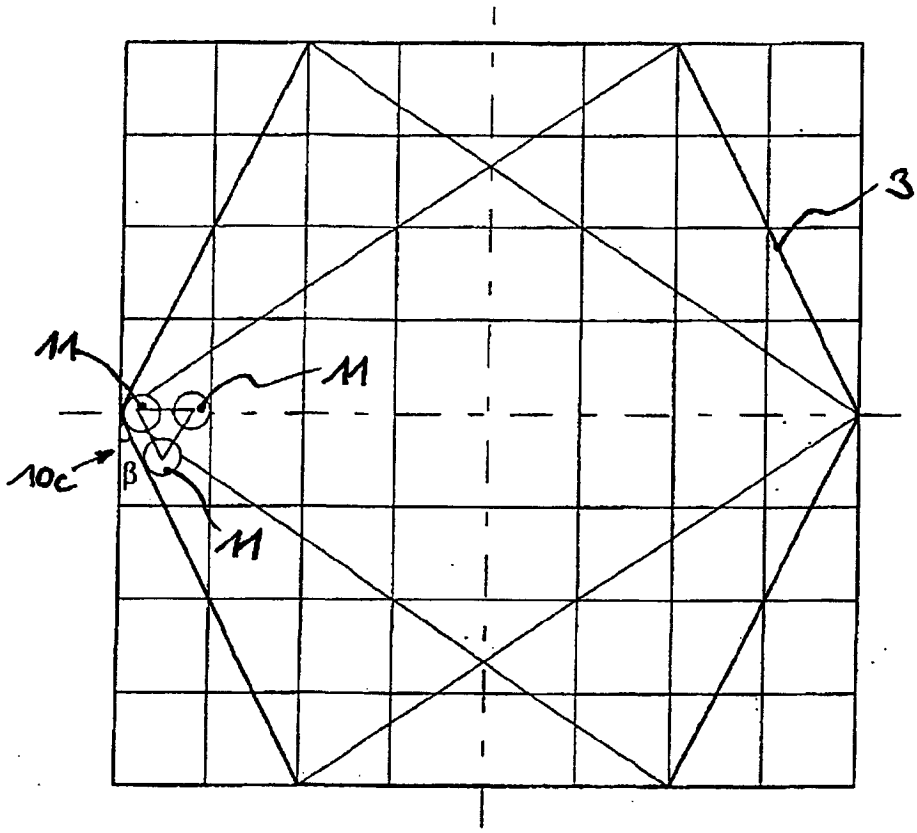
3
11
11
10c
β
11

Fig. 3

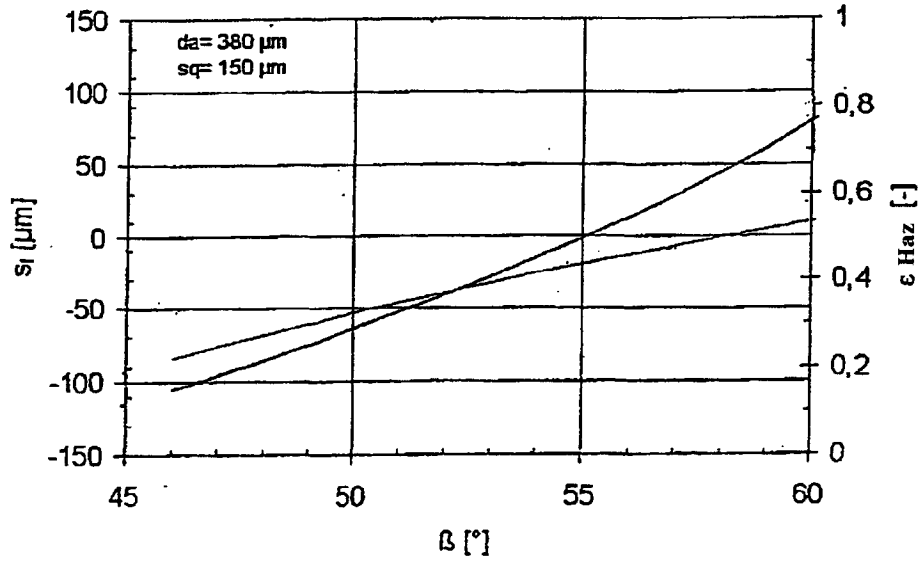
da= 380 µm
sq= 150 µm
150
100
50
0
-50
-100
-150
45
50
55
60
ß [°]
sl [µm]
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
ε Haz [-]

Fig. 4

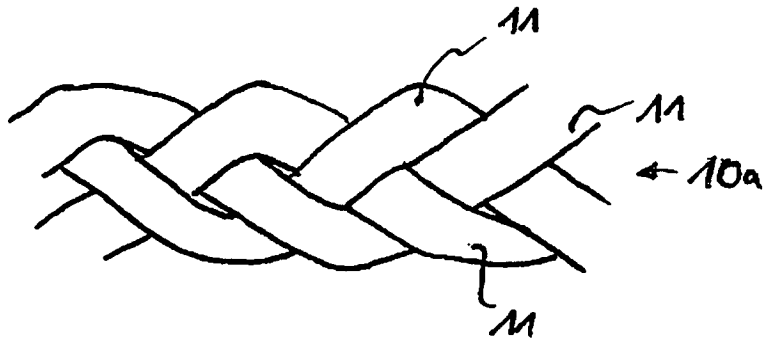

Fig. 5

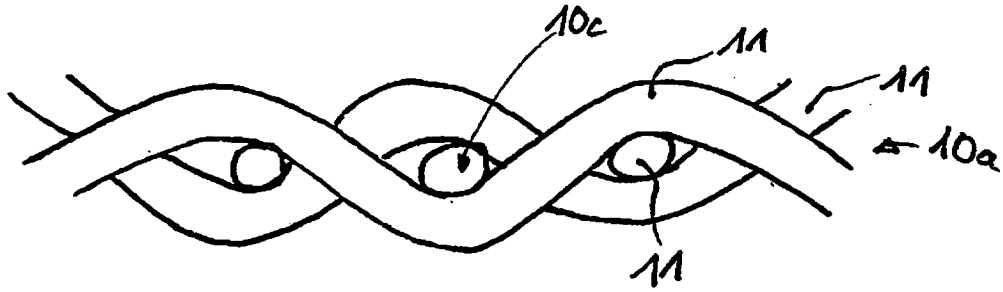

Fig. 6

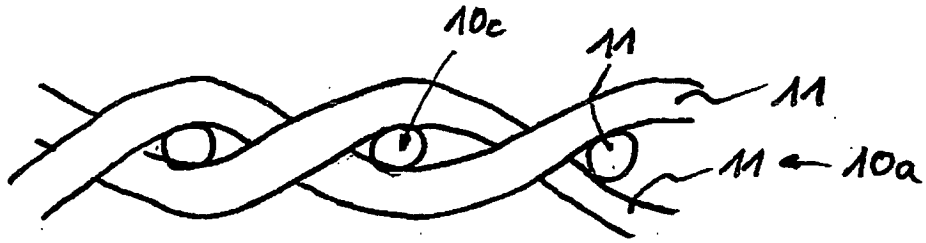

Fig. 7

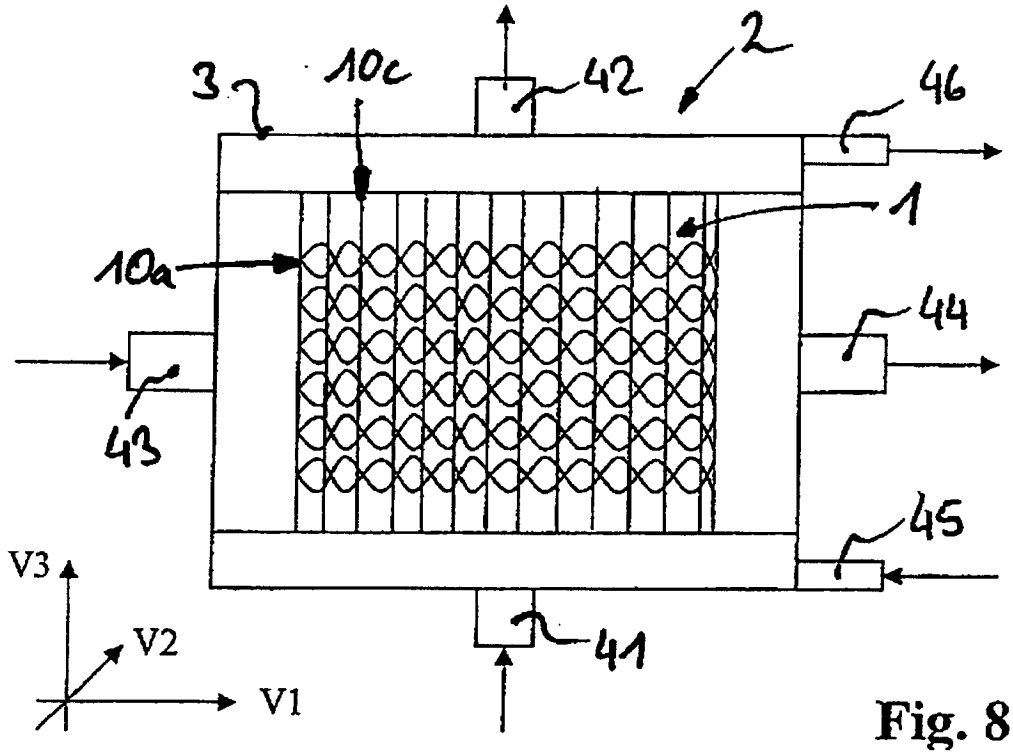

Fig. 8