

(12) **Patentschrift**

(21) Anmeldenummer: A 50883/2018
(22) Anmeldetag: 10.10.2018
(45) Veröffentlicht am: 15.01.2020

(51) Int. Cl.: **E03B 3/28** (2006.01)
B01D 5/00 (2006.01)
B01D 53/14 (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:
EP 0477129 A1
WO 03025295 A1
WO 2011117841 A1
US 6960243 B1
US 2006130654 A1
US 2015053249 A1

(73) Patentinhaber:
Schelch Michael Dr.
8600 Oberaich (AT)
Staber Wolfgang Dr.
8600 Bruck an der Mur (AT)

(72) Erfinder:
Schelch Michael Dr.
8600 Oberaich (AT)
Staber Wolfgang Dr.
8600 Bruck an der Mur (AT)

(74) Vertreter:
Redl Gerda Dipl.Ing. Dr.
1220 Wien (AT)

(54) **Verfahren und Vorrichtung zur Gewinnung von Wasser aus Luft**

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Gewinnung von Wasser aus Luft (2, 2') mit folgenden nacheinander und parallel zueinander ablaufenden Schritten:

a) Gaswäsche der Luft (2, 2') in einem Gaswäscher (1) mit einer gekühlten wässrigen Kaliumcarbonatlösung, welche derart gekühlt ist, dass die Luft (2, 2') im Gaswäscher (1) unter ihren Taupunkt abgekühlt wird,

b) Ableiten der Kaliumcarbonatlösung aus dem Gaswäscher (1),

c) Erwärmen der abgeleiteten Kaliumcarbonatlösung über zumindest eine Wärmepumpe (3a, 3b),

d) Verdampfen von Wasser aus der erwärmten Kaliumcarbonatlösung und Kondensieren des gebildeten Wasserdampfes sowie Sammeln des Wassers,

e) Kühlen von zumindest einem Teilstrom (TS₁) der nach Schritt d) zurückbleibenden Kaliumcarbonatlösung über die zumindest eine Wärmepumpe (3a, 3b) gemäß Schritt c),
– wobei die in Schritt e) erhaltene, gekühlte Kaliumcarbonatlösung in Schritt a) verwendet wird.

		φ[%]																	
		40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%					
p_{w2} [g/m ³]	T ₂	-5°C	1.30	1.48	1.62	1.78	1.94	2.21	2.27	2.43	2.59	2.75	2.92	3.09	3.24	p_{w2} [g/m ³]			
		-4°C	1.40	1.58	1.76	1.93	2.11	2.28	2.46	2.63	2.81	2.98	3.16	3.34	3.52				
		-3°C	1.52	1.72	1.91	2.09	2.29	2.48	2.67	2.86	3.05	3.24	3.43	3.62	3.81				
		-2°C	1.65	1.86	2.07	2.27	2.48	2.68	2.89	3.10	3.30	3.51	3.72	3.92	4.13				
		-1°C	1.79	2.02	2.24	2.47	2.68	2.92	3.13	3.35	3.58	3.80	4.02	4.25	4.47				
		0°C	1.94	2.18	2.42	2.66	2.90	3.14	3.39	3.63	3.87	4.11	4.36	4.60	4.84				
		+1°C	2.09	2.34	2.60	2.86	3.12	3.38	3.64	3.90	4.16	4.42	4.68	4.94	5.20				
		+2°C	2.24	2.52	2.80	3.08	3.36	3.64	3.92	4.20	4.48	4.76	5.04	5.32	5.60				
		+3°C	2.40	2.70	3.00	3.30	3.60	3.90	4.20	4.50	4.80	5.10	5.40	5.70	6.00				
		+4°C	2.56	2.88	3.20	3.52	3.84	4.16	4.48	4.80	5.12	5.44	5.76	6.08	6.40				
p_{w1} [g/m ³]	T ₁	+5°C	2.72	3.06	3.40	3.74	4.08	4.42	4.76	5.10	5.44	5.78	6.12	6.46	6.80	p_{w1} [g/m ³]			
		+6°C	2.92	3.29	3.65	4.02	4.38	4.74	5.11	5.48	5.84	6.20	6.57	6.94	7.30				
		+7°C	3.12	3.51	3.90	4.29	4.68	5.07	5.46	5.85	6.24	6.63	7.02	7.41	7.80				
		+8°C	3.32	3.74	4.15	4.57	4.98	5.40	5.81	6.23	6.64	7.06	7.47	7.88	8.30				
		+9°C	3.52	3.96	4.40	4.84	5.28	5.72	6.16	6.60	7.04	7.48	7.92	8.36	8.80				
		+10°C	3.76	4.23	4.70	5.17	5.64	6.11	6.58	7.05	7.52	7.99	8.46	8.93	9.40				
		+11°C	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00				
		+12°C	4.28	4.82	5.35	5.89	6.42	6.96	7.49	8.03	8.56	9.10	9.63	10.16	10.70				
		+13°C	4.56	5.13	5.70	6.27	6.84	7.41	7.98	8.55	9.12	9.69	10.26	10.83	11.40				
		+14°C	4.84	5.45	6.05	6.66	7.26	7.87	8.47	9.08	9.68	10.29	10.89	11.50	12.10				
p_{w1} [g/m ³]		+15°C	5.12	5.76	6.40	7.04	7.68	8.32	8.96	9.60	10.24	10.88	11.52	12.16	12.80	p_{w1} [g/m ³]			
		+16°C	5.44	6.12	6.80	7.48	8.16	8.84	9.52	10.20	10.88	11.56	12.24	12.92	13.60				
		+17°C	5.80	6.53	7.25	7.98	8.70	9.42	10.15	10.88	11.60	12.32	13.05	13.77	14.50				
		+18°C	6.16	6.93	7.70	8.47	9.24	10.00	10.78	11.55	12.32	13.09	13.86	14.63	15.40				
		+19°C	6.52	7.34	8.15	8.97	9.78	10.60	11.42	12.23	13.04	13.85	14.67	15.48	16.30				
		+20°C	6.92	7.79	8.65	9.52	10.38	11.25	12.11	12.98	13.84	14.70	15.57	16.44	17.30				
		+21°C	7.44	8.24	9.15	10.07	10.98	11.89	12.81	13.72	14.64	15.55	16.47	17.38	18.30				
		+22°C	7.78	8.73	9.70	10.67	11.64	12.61	13.58	14.56	15.52	16.49	17.46	18.41	19.40				
		+23°C	8.24	9.27	10.30	11.33	12.36	13.39	14.42	15.45	16.48	17.51	18.54	19.54	20.60				
		+24°C	8.92	9.81	10.90	11.99	13.06	14.17	15.26	16.35	17.44	18.53	19.62	20.71	21.80				
p_{w1} [g/m ³]		+25°C	9.29	10.35	11.50	12.65	13.80	14.95	16.10	17.25	18.40	19.55	20.70	21.85	23.00	p_{w1} [g/m ³]			
		+26°C	9.78	10.99	12.20	13.42	14.64	15.86	17.08	18.30	19.42	20.74	21.96	23.18	24.40				
		+27°C	10.32	11.61	12.90	14.19	15.48	16.77	18.06	19.35	20.64	21.93	23.21	24.52	25.80				
		+28°C	10.88	12.24	13.60	14.96	16.32	17.68	19.04	20.40	21.76	23.12	24.48	25.82	27.20				
		+29°C	11.48	12.91	14.35	15.78	17.22	18.66	20.09	21.53	22.96	24.40	25.83	27.23	28.70				
		+30°C	12.12	13.64	15.15	16.66	18.18	19.70	21.21	22.73	24.24	25.76	27.27	28.80	30.30				

Fig. 1

Beschreibung

VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR GEWINNUNG VON WASSER AUS LUFT

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Gewinnung von Wasser aus Luft.

[0002] Ein derartiges Verfahren und eine derartige Vorrichtung sind beispielsweise aus der US 2006 013 065 4 A1 bekannt. Beim dem aus dieser Druckschrift bekannten Verfahren wird Luft in einen Gaswäscher eingesaugt und in diesem mit einer hygroskopischen Sorptionsflüssigkeit in Kontakt gebracht, welche Wasser aus der Luft aufnimmt. Die Sorptionsflüssigkeit ist beispielsweise eine wässrige Lösung aus einem Salz, vorzugsweise einem Chlorid, welches ein Element der 1. oder 2. Hauptgruppe des Periodensystems enthält. Besonders bevorzugt wird als Sorptionsflüssigkeit eine Lithiumchloridlösung eingesetzt. Die aus dem Gaswäscher austretende Sorptionsflüssigkeit wird in den Desorptionskessel (Verdampfer) geleitet, welcher unter Vakuum betrieben wird. Das angelegte Vakuum sorgt dafür, dass die Sorptionsflüssigkeit vom Gaswäscher über entsprechende Leitungen in den Desorptionskessel gezogen wird. Der Desorptionskessel wird mit einem von einer Wärmequelle stammenden Abluftstrom, beispielsweise von einem Abluftstrom eines Dieselmotors, erwärmt. Im Desorptionskessel wird Wasser aus der Waschflüssigkeit verdampft, wobei der Wasserdampf in einem Kondensator kondensiert und derart Wasser gewonnen wird. Die erhaltene, regenerierte Waschflüssigkeit wird vom Desorptionskessel zum Gaswäscher zurückgeleitet.

[0003] Die eingesetzte Lithiumchloridlösung ist thermodynamisch bestrebt, während der Gaswäsche in der Luft die von der Konzentration des Lithiumchlorids abhängige „relative Gleichgewichtsfeuchtigkeit“ in der Luft einzustellen (genauere Erläuterungen zur Wirkungsweise siehe weiter unten „Zweites Wirkprinzip: Sorption mittels eines wässrigen flüssigen Sorptionsmittels“). Die zu einer gesättigten Lithiumchloridlösung gehörende relativ Gleichgewichtsfeuchtigkeit beträgt ca. 11,3 % und ist somit im Vergleich zu anderen Sorptionsmitteln sehr gering, sodass eine Lithiumchloridlösung Luft besonders viel Wasser entziehen kann und daher eine besonders „starke“ Sorptionsflüssigkeit ist. Auch andere Chloridlösungen sind besonders starke Sorptionsflüssigkeiten. Die starke dampfdrucksenkende Wirkung dieser Chloridlösungen hat zur Folge, dass der Energiebedarf zur Desorption, also zur Wassergewinnung aus der Chloridlösung, sehr hoch ist. Im Rahmen der US 2006 013 065 4 A1 ist dies von untergeordneter Bedeutung, da die Wärmequelle ein anfallender, also kostenloser, Abluftstrom ist. Zusätzlich wird jedoch, wie erwähnt, unter Vakuum desorbiert. Das aus der US 2006 013 065 4 A1 bekannte Verfahren ist daher nur mit Hilfe kostenloser Abwärme wirtschaftlich betreibbar.

[0004] Aus der US 2013 000 819 6 A1 sind ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Gewinnung von Wasser aus Luft mittels Kondensation bekannt (genauere Erläuterungen zur Wirkungsweise siehe weiter unten „Erstes Wirkprinzip: Abkühlung von Luft unter den Taupunkt“). Die Vorrichtung umfasst ein Gebläse zur Erzeugung eines Luftstroms, einen Wärmetauscher mit einem Wärmetauschermedium und einem Kompressor. Die Temperatur des Wärmetauschermediums ist geringer als jene des Luftstroms. Der Luftstrom wird über den Wärmetauscher geleitet, sodass in der Luft enthaltener Wasserdampf am Wärmetauscher kondensiert, wobei das Wärmetauschermedium erwärmt und verdampft wird. Das am Wärmetauscher anfallende Wasser wird aufgefangen. Das Wärmetauschermedium wird unter anderem über einen Kompressor und einen Kondensator geleitet und derart regeneriert. Nachfolgend strömt das Wärmetauschermedium wieder in den Wärmetauscher. Aufgrund von möglichen in der Luft enthaltenen Schmutz-, Staubpartikel und dergleichen ist es im Allgemeinen notwendig, den Luftstrom durch einen vor dem Wärmetauscher positionierten zusätzlich Filter zu leiten. Solche Filter funktionieren häufig nicht einwandfrei und müssen regelmäßig getauscht werden. Etwaige nicht filterbare Feinstäube bzw. Gase, wie beispielsweise Stickoxide, müssen durch eine Nachbehandlung des Wassers entfernt werden. Um Wasser mit guter Qualität zu erhalten, ist daher vorgesehen, das aus der Luft erhaltene Wasser durch mehrere Filter zu leiten. Zu diesen Filtern gehören beispielsweise ein Sedimentfilter, ein Aktivkohlefilter und eine Ultrafiltrationsmembran. Ferner ist

vorzugsweise eine Umkehrosmose vorgesehen, mittels welcher im Allgemeinen ein Großteil an Verunreinigungen aus dem Wasser entfernt werden kann. Bei der Umkehrosmose fällt allerdings ein „Schmutzwasserstrom“ an, dessen „Masse“ üblicherweise 25% bis 45% der Masse des „Ausgangswasserstromes“ beträgt. Der Schmutzwasserstrom hat daher eine beträchtliche Masse, sodass ein Teil des Wassers, welches zuvor aus der Luft gewonnen wurde, wieder verworfen wird. Das in der US 2013 000 819 6 A1 beschriebene Verfahren ist daher nicht für die Gewinnung von Wasser hoher Qualität (Trinkwasserqualität) geeignet.

[0005] Aus der WO 03/025295 A1 sind ein weiteres Verfahren und eine weitere Vorrichtung zur Gewinnung von Wasser aus Luft bekannt. Mittels eines Gebläses wird die Luft über bzw. auf gebettetes Sorptionsmaterial, beispielsweise aus Zeolithen, Kieselgel oder Kupfersulfat, geleitet, welches der Luft Wasser entzieht, sodass die Luft getrocknet wird. Nachfolgend wird das Sorptionsmaterial erwärmt, wodurch Wasser aus Wasserdampf freigesetzt wird. Der Wasserdampf wird kondensiert und gesammelt.

[0006] Ferner offenbart die US 6 436 172 B1 ein Verfahren, welches mittels Kapillarkondensation in einem porösen Material Wasser aus der Luft gewinnt. Ein weiteres auf Kapillarkondensation basierendes Verfahren zur Wassergewinnung aus Luft ist beispielsweise aus der US 6 960 243 B1 bekannt, wobei bei diesem Verfahren die Benetzungsfähigkeit des Sorptionsmittels verändert und derart die Desorption von Wasser erreicht wird. Dabei kann mit Hilfe eines elektrischen Feldes die Oberfläche des Sorptionsmittels zwischen einem hydrophilen Zustand für die Sorption und einem hydrophoben Zustand für die Desorption verändert werden. Als poröses Material wird beispielsweise Polyethylenglycol eingesetzt. Bei auf Kapillarkondensation basierenden Verfahren ist die Gewinnung des Wassers aus dem porösen Material mit einem hohen Energieaufwand verbunden, da starke Kapillarkräfte überwunden werden müssen, sodass auch häufig keine vollständige Regeneration des porösen Materials gelingt. Zusätzlich können sich in den Poren Partikel anlagern, sodass dadurch die Poren verstopft werden. Der „Wirkungsgrad“, also die Sorptionsfähigkeit, poröser Materialien lässt daher bereits häufig nach kurzer Einsatzzeit nach, sodass die porösen Materialien meist bald erneuert werden müssen.

[0007] Es ist somit bekannt, zur Gewinnung von Wasser aus Luft flüssige Sorptionsmittel (US 2006 013 065 4 A1) oder feste Sorptionsmittel (WO 03/025295 A1, US 6 436 172 B1, US 6 960 243 B1) einzusetzen, welche nach dem Sorptionsvorgang regeneriert und erneut eingesetzt werden.

[0008] Feste Sorptionsmittel, welche eine hohe Wasseraufnahmekapazität aufweisen, zeichnen sich im Allgemeinen durch große Oberflächen aus und sind insbesondere poröse Materialien. Der Energieaufwand zur Regeneration bzw. zur Desorption des Wassers aus solchen Materialien ist erheblich (Kapillareffekte). Ferner verläuft die Regeneration häufig nicht optimal, sodass auch etwaige adsorbierte Schmutzreste in den festen Sorptionsmitteln verbleiben, sodass die Aufnahmekapazität der Sorptionsmittel bereits nach wenigen Regenerationen deutlich nachlässt. Sie eignen sich daher auch nicht zur Gewinnung von Wasser mit hoher Qualität, insbesondere von Trinkwasser. Ferner ist das „Handling“, also der Transport bzw. die Weiterleitung von festen Sorptionsmitteln problematisch, insbesondere nach der Wasseraufnahme sind diese häufig klebrig und verklumpen. Für technische Verfahren, insbesondere im großen Maßstab, sind sie daher kaum geeignet.

[0009] Flüssige Sorptionsmittel weisen gegenüber festen Sorptionsmittel einige Vorteile auf. Insbesondere weisen flüssige Sorptionsmittel meistens eine deutliche höhere, insbesondere um das 15- bis 100-fach höhere, Wasseraufnahmekapazität als feste Sorptionsmittel auf. Auch bei mit flüssigen Sorptionsmittel arbeitenden Verfahren zur Wassergewinnung ist darauf zu achten, dass der Energieaufwand möglichst gering gehalten wird, da andernfalls die Wassergewinnung nur aus sehr feuchter Luft auf wirtschaftliche Weise möglich ist. Im Hinblick auf das Energiemanagement besteht bei diesen Verfahren weiter Verbesserungsbedarf. Bei dem aus der US 2006 013 065 4 A1 bekannten Verfahren liefert beispielsweise nahezu ausschließlich ein Abluftstrom eines externen Dieselmotors die erforderliche Energie zur Desorption.

[0010] Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zu Grunde, ein Verfahren und eine Vorrichtung

der eingangs genannten Art zur Verfügung zu stellen, mittels welchem bzw. welcher deutlich energieeffizienter als bisher möglichst sauberes Wasser aus Luft gewonnen werden kann.

[0011] Was das Verfahren betrifft, wird die gestellte Aufgabe erfindungsgemäß durch folgende nacheinander und parallel zueinander ablaufende Schritte gelöst:

[0012] a) Gaswäsche der Luft in einem Gaswäscher mit einer gekühlten wässrigen Kaliumcarbonatlösung, welche derart gekühlt ist, dass die Luft im Gaswäscher unter ihren Taupunkt abgekühlt wird,

[0013] b) Ableiten der Kaliumcarbonatlösung aus dem Gaswäscher,

[0014] c) Erwärmen der abgeleiteten Kaliumcarbonatlösung über zumindest eine Wärmepumpe,

[0015] d) Verdampfen von Wasser aus der erwärmten Kaliumcarbonatlösung und Kondensieren des gebildeten Wasserdampfes sowie Sammeln des Wassers,

[0016] e) Kühlen von zumindest einem Teilstrom der nach Schritt d) zurückbleibenden Kaliumcarbonatlösung über die zumindest eine Wärmepumpe gemäß Schritt c),

[0017] - wobei die in Schritt e) erhaltene, gekühlte Kaliumcarbonatlösung in Schritt a) verwendet wird.

[0018] Die gestellte Aufgabe wird erfindungsgemäß mit einer Vorrichtung gelöst, die Folgendes umfasst:

[0019] a) einen Gaswäscher zur Durchführung einer Gaswäsche von Luft mit einer Kaliumcarbonatlösung,

[0020] b) einen Regenerationskreislauf zur Regeneration der Kaliumcarbonatlösung und zur Rückführung der regenerierten Kaliumcarbonatlösung zum Gaswäscher, wobei der Regenerationskreislauf Folgendes aufweist:

[0021] b1) eine Destillationseinheit mit einem Verdampfer zur Abtrennung von Wasser aus der Kaliumcarbonatlösung und einem Kondensator zur Kondensation des Wassers,

[0022] b2) zumindest eine Wärmepumpe zum Erwärmen der aus dem Gaswäscher austretenden Kaliumcarbonatlösung und zum Abkühlen der aus der Destillationseinheit austretenden Kaliumcarbonatlösung.

[0023] Beim erfindungsgemäßen Verfahren wird daher bei der Gaswäsche einerseits eine Sorptionslösung (Kaliumcarbonatlösung) eingesetzt und gleichzeitig unter den Taupunkt der Luft abgekühlt. Es werden daher zwei Wirkprinzipien (Abkühlung von Luft unter den Taupunkt und Sorption mittels flüssiger Sorptionsmittel) miteinander kombiniert. Durch die Unterschreitung des Taupunktes gelingt es, die absolute Feuchtigkeit der Luft während der Gaswäsche sprunghaft zu erhöhen (siehe Fig. 3 sowie zugehörige Erläuterungen in der Figurenbeschreibung). Dieser abgekühlten Luft entzieht die Kaliumcarbonatlösung innerhalb kurzer Zeit - im Vergleich zu einer Luft, welche nicht unter den Taupunkt abgekühlt wurde - deutlich mehr Wasser. Die Kaliumcarbonatlösung zeichnet sich - beispielsweise im Gegensatz zu Chloridlösungen - durch eine sehr gute Verträglichkeit mit den gängigen Vorrichtungsmaterialien (Werkstoffen) sowie durch einen starken Rückhalt von sauren Luftschadstoffen aus. Die in der US 2006 013 065 4 A1 bevorzugt eingesetzte Lithiumchloridlösung wirkt stark korrosiv, eine solche Lösung beschädigt beispielsweise sogar Beton. Durch den hohen pH-Wert der Kaliumcarbonatlösung entkeimt sie das der Luft entzogene Wasser, sodass sehr reines (bakterienarmes bzw. bakterienfreies) Wasser gewonnen wird. Außerdem ist durch den hohen pH-Wert auch eine hygienische Zwischenspeicherung der Kaliumcarbonatlösung nach Verfahrensschritt b) möglich. Um das Wasser aus der Kaliumcarbonatlösung zu verdampfen (Schritt c) ist - im Vergleich zu Lithiumchloridlösung - deutlich weniger Energie erforderlich, da der Dampfdruck des Wassers in einer Kaliumcarbonatlösung weniger stark gesenkt wird. Die erforderliche Wärmemenge in Schritt d) (Verdampfen von Wasser) ist daher deutlich geringer, wodurch es möglich ist, die zum

Verdampfen erforderliche Wärme mittels einer Wärmepumpe (Schritt c) bereitzustellen, wobei die Wärmepumpe - bedingt durch die geringe zu überwindende Temperaturdifferenz - mit einem hohen Wirkungsgrad betrieben wird. Das erfindungsgemäße Verfahren bzw. die erfindungsgemäße Vorrichtung lassen sich daher deutlich energieeffizienter betreiben als die bisher bekannten Verfahren und Vorrichtungen zur Gewinnung von Wasser aus Luft.

[0024] Im Hinblick auf das Verfahren ist es bevorzugt, wenn die Kaliumcarbonatlösung, welche nach Schritt d) zurückbleibt und in Schritt a) verwendet wird, mindestens 1000g Kaliumcarbonat pro Liter Wasser enthält und vorzugsweise Kaliumcarbonat in einer derartigen Menge enthält, dass die Kaliumcarbonatlösung gesättigt ist. Mittels einer solchen Kaliumcarbonatlösung können der Luft beträchtliche Mengen Wasser entzogen werden.

[0025] Ferner ist es bevorzugt, wenn die Kaliumcarbonatlösung, welche nach Schritt d) zurückbleibt und in Schritt a) verwendet wird, einen pH-Wert von mindestens 12,0 aufweist. Dadurch wird insbesondere das Wachstum von Keimen und dergleichen im Gaswäscher unterdrückt. Der Gaswäscher wird daher steril oder zumindest im Wesentlichen steril gehalten.

[0026] Das Verfahren ist besonders effektiv, wenn die Kaliumcarbonatlösung in Schritt e) derart gekühlt wird, dass ihre Temperatur in Schritt a) um mindestens 3°, insbesondere um mindestens 5°, geringer ist als der Taupunkt der in Schritt a) in den Gaswäscher eingebrachten Luft. Dadurch wird der Taupunkt der in den Gaswäscher einströmenden Luft bereits nach kurzer Zeit unterschritten.

[0027] Es ist ferner bevorzugt, wenn die Kaliumcarbonatlösung in Schritt c) über zumindest zwei, insbesondere über bis zu sechs, aufeinanderfolgend angeordnete Wärmepumpen erwärmt wird. Dies ist vor allem im Hinblick auf den Wirkungsgrad der Wärmepumpen von Vorteil (siehe auch Gleichung 1).

[0028] Das Verfahren lässt sich „energetisch“ weiter optimieren, wenn in Schritt d) durch die Kondensation Wärme auf einen Kühlkreislauf übertragen wird, wobei die Wärme vom Kühlkreislauf über zumindest eine weitere Wärmepumpe unmittelbar vor Schritt d) zurück auf die Kaliumcarbonatlösung übertragen wird. Derart wird die „anfallende“ Kondensationswärme in das Verfahren eingespeist.

[0029] Ferner ist es bevorzugt, wenn aus dem Kühlkreislauf Wärme über einen Wärmeüberträger, insbesondere über ein Kühlregister, abtransportiert wird. Dadurch kann etwaige „Überschusswärme“ abtransportiert werden.

[0030] Gemäß einer weiteren bevorzugten Variante wird der Wärmeüberträger mit Luft, welche gemäß Schritt a) aus dem Gaswäscher austritt, oder mit Umgebungsluft gekühlt. Da die Luft in Schritt a) gekühlt wird, ist deren nachfolgender Einsatz zum Kühlen des Wärmeüberträgers energetisch besonders vorteilhaft.

[0031] Gemäß einer weiteren bevorzugten Variante wird zwischen Schritt d) und Schritt e) zumindest ein Teilstrom der nach Schritt d) zurückbleibenden Kaliumcarbonatlösung zu der aus Schritt c) stammenden Kaliumcarbonatlösung geleitet. Derart wird ein „innerer Regenerationskreislauf“ geschaffen. Vor allem bei sehr feuchter Luft kann es von Vorteil sein, zumindest einem Teilstrom der Kaliumcarbonatlösung vor dem Zurückleiten in den Gaswäscher nochmals Wasser zu entziehen bzw. aus diesem weiteres Wasser zu gewinnen. Genauso wäre es aber beispielsweise möglich, die Kaliumcarbonatlösung „mehrfach“ durch den inneren Regenerationskreislauf zu leiten.

[0032] Bevorzugter Weise wird in Schritt c) die Kaliumcarbonatlösung auf eine Temperatur von 45°C bis 75°C, insbesondere von mindestens 55°C, erwärmt. Etwaiges sich bildendes Kaliumhydrogencarbonat zersetzt sich ab einer Temperatur von zirka 55°C unter Freisetzung von Kohlenstoffdioxid. Ferner lässt sich aus einer bereits derart erwärmten Kaliumcarbonatlösung im nachfolgenden Schritt d) mit energetisch geringem Aufwand Wasser verdampfen.

[0033] Gemäß einer weiteren bevorzugten Variante werden in Schritt a) die Luft und die Kaliumcarbonatlösung im Gegenstrom zueinander durch den Gaswäscher geführt.

[0034] Im Hinblick auf die Vorrichtung ist es vorteilhaft, wenn die Destillationseinheit ein Membrandestillationsmodul, ein Vakuumverdampfer oder ein Infrarotverdampfer ist.

[0035] Um die Vorrichtung bzw. das in ihr ablaufende Verfahren möglichst optimal zu regeln, ist es von Vorteil, wenn entsprechende Messgeräte zur Aufzeichnung von Verfahrensparametern vorgesehen sind. Dabei ist es insbesondere von Vorteil, wenn die Vorrichtung ein Konzentrationsmessgerät zum Messen der Konzentration einer Kaliumcarbonatlösung und/oder ein Feuchtigkeitsmessgerät zum Messen der Luftfeuchtigkeit der in den Gaswäscher eintretenden Luft aufweist.

[0036] Vorzugsweise wird eine bzw. werden Kompressions-Wärmepumpe(n) und/oder Peltier-Wärmepumpe(n) eingesetzt. Peltier-Wärmepumpen lassen sich vorteilhafter Weise ohne Kältemittel betreiben.

[0037] Weitere Merkmale, Vorteile und Einzelheiten der Erfindung werden nun anhand der Zeichnung näher erläutert. Dabei zeigen

[0038] Fig. 1 eine an sich bekannte Umrechnungstabelle für die Luftfeuchtigkeit (Quelle: <http://www.bglerchenfeld.at/physik/abbildungen/luftfeuchte-tabelle.pdf>, aufgerufen am 24.09.2018),

[0039] Fig. 2 eine an sich bekannte Taupunkttafel (Quelle: <https://www.bauchemie24.de/taupunkttafel>, aufgerufen am 24.09.2018),

[0040] Fig. 3 ein Liniendiagramm,

[0041] Fig. 4 ein weiteres Liniendiagramm,

[0042] Fig. 5 ein schematisches Fließbild eines Verfahrens gemäß einer ersten Ausführungsvariante der Erfindung und

[0043] Fig. 6 ein schematisches Fließbild eines Verfahrens gemäß einer zweiten Ausführungsvariante der Erfindung.

[0044] Die Erfindung befasst sich mit einem Verfahren zur Gewinnung von Wasser aus Luft, bei welchem die nachfolgend kurz erläuterten Wirkprinzipien auf eine energetisch sehr vorteilhafte Weise kombiniert werden.

ERSTES WIRKPRINZIP: ABKÜHLUNG VON LUFT UNTER DEN TAUPUNKT

[0045] Zunächst werden einige zur Erläuterung dieses Wirkprinzips erforderliche, an sich bekannte Definitionen kurz wiedergegeben und erläutert.

[0046] Relative Luftfeuchtigkeit φ :

[0047] Die relative Luftfeuchtigkeit φ ist das prozentuale Verhältnis zwischen dem momentanen Dampfdruck des Wassers und dem Sättigungsdampfdruck desselben (bei der gegebenen Lufttemperatur) über einer reinen und ebenen Wasseroberfläche. Die relative Luftfeuchtigkeit lässt unmittelbar erkennen, mit welchem Grad die Luft mit Wasserdampf gesättigt ist. Beispielsweise enthält Luft mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50% die Hälfte der Wasserdampfmenge, die die Luft bei der vorherrschenden Temperatur maximal enthalten könnte.

[0048] Absolute Luftfeuchtigkeit ρ_w :

[0049] Die absolute Luftfeuchtigkeit ρ_w ist die Masse von Wasserdampf in einem bestimmten Luftvolumen. Sie wird üblicherweise in Gramm Wasser pro Kubikmeter Luft angegeben (im Nachfolgenden: g/m^3).

[0050] Taupunkt τ (Taupunkttemperatur τ):

[0051] Der Taupunkt ist diejenige Temperatur, die bei Luft mit einer bestimmten Luftfeuchtigkeit und bei konstantem Druck unterschritten werden muss, damit sich Wasserdampf als Tau oder Nebel aus der Luft abscheiden kann. Am Taupunkt (bzw. unterhalb des Taupunktes) beträgt die relative Luftfeuchtigkeit φ 100%.

[0052] Anhand des nachfolgend beschriebenen Beispiels und des zu diesem gehörenden, in Fig. 3 gezeigten Liniendiagramms werden die Zusammenhänge zwischen den genannten Größen verdeutlicht. Fig. 1 und Fig. 2 zeigen an sich bekannte Tabellen, welche das Verständnis der Zusammenhänge erleichtern. Fig. 1 zeigt eine Umrechnungstabelle, welche den Zusammenhang zwischen der relativen Luftfeuchtigkeit ϕ [%], der Lufttemperatur T [°C] und der absoluten Luftfeuchtigkeit ρ_w [g/m³] wiedergibt. Fig. 2 zeigt eine Taupunkttafel, welche Taupunkte t für unterschiedliche Kombinationen der relativen Luftfeuchtigkeit ϕ [%] und der Lufttemperatur T [°C] enthält.

[0053] Bei dem in Fig. 3 gezeigten Liniendiagramm ist auf der vertikalen Achse die absolute Luftfeuchtigkeit ρ_w [g/m³] und auf der horizontalen Achse die Lufttemperatur T [°C] aufgetragen. Die Linie $\phi = 50\%$ zeigt die Abhängigkeit der absoluten Luftfeuchtigkeit ρ_w von der Lufttemperatur T für eine Luft mit der relativen Luftfeuchtigkeit von 50%. Die Linie $\phi' = 100\%$ zeigt die Abhängigkeit der absoluten Luftfeuchtigkeit ρ_w von der Temperatur T für eine Luft mit der relativen Luftfeuchtigkeit von 100%. Die Linien ϕ und ϕ' lassen sich unmittelbar aus der in Fig. 1 gezeigten Taupunkttafel ableiten.

[0054] Es sei nun angenommen, dass eine Luft eine Temperatur T_1 von 20°C und eine relative Luftfeuchtigkeit ϕ von 50% aufweist. Aus Fig. 3 folgt, dass diese Luft eine absolute Luftfeuchtigkeit ρ_{w1} von ca. 9 g/m³ aufweist (genauer: $\rho_{w1} = 8,65$ g/m³, siehe Fig. 1). Aus Fig. 2 kann ferner abgelesen werden, dass der Taupunkt t_1 dieser Luft 9,3°C beträgt.

[0055] Wird diese Luft nun, wie in Fig. 3 durch eine Vielzahl an Pfeilen angedeutet, ausgehend von ihrer Temperatur T_1 (20°C) auf eine Temperatur T_2 von 5°C abgekühlt, wird ihr Taupunkt T_1 (9,3°C) unterschritten, sodass die relative Luftfeuchtigkeit dieser Luft auf 100% (ϕ') steigt (vergleiche Definition des Taupunktes oben). Die derart abgekühlte Luft ($T_2 = 5^\circ\text{C}$, $\phi' = 100\%$) weist eine absolute Luftfeuchtigkeit ρ_{w2} von ca. 7 g/m³ auf (genauer: $\rho_{w2} = 6,80$ g/m³, siehe Fig. 1).

[0056] Durch die Abkühlung der Luft gemäß diesem Beispiel sinkt daher die absolute Luftfeuchtigkeit der Luft von ρ_{w1} (ca. 9 g/m³) auf ρ_{w2} von (ca. 7 g/m³). Aus der Luft wird daher eine Wassermenge von ca. 2 g/m³ ($= 9 \text{ g/m}^3 - 7 \text{ g/m}^3$) abgeschieden (Kondensation).

ZWEITES WIRKPRINZIP: SORPTION MITTELS EINES WÄSSRIGEN FLÜSSIGEN SORPTIONSMITTELS

[0057] Flüssige Sorptionsmittel haben eine dampfdrucksenkende Wirkung auf das sie umgebende Gas. Der Dampfdruck ist bekannter Weise jener Druck, der sich einstellt, wenn sich in einem abgeschlossenen System ein Dampf mit der zugehörigen flüssigen Phase im thermodynamischen Gleichgewicht befindet. Die dampfdrucksenkende Wirkung eines flüssigen Sorptionsmittels sorgt dafür, dass Wassermoleküle aus dem umgebenden Dampf (bei der Erfindung der Luft) vom flüssigen Sorptionsmittel aufgenommen werden, es findet daher ein Phasenübergang statt (gasförmig $\rightarrow$ flüssig), wobei Kondensationswärme (also Energie) frei wird, durch welche die Temperatur des flüssigen Sorptionsmittels zumindest theoretisch erhöht wird. Bei entsprechend großer Menge an Sorptionsmittel, wie es auch bei der gegenständlichen Erfindung der Fall, ist die Kondensationswärme zumindest weitgehend vernachlässigbar.

[0058] Ein flüssiges Sorptionsmittel ist nun thermodynamisch bestrebt, zwischen dem Vorgang des Verdampfens des Sorptionsmittels (flüssiges Wasser wird zu Wasserdampf) und der Kondensation der sie umgebenden Phase (Wasserdampf in der umgebenden Luft wird zu Wasser, welches vom Sorptionsmittel aufgenommen wird) ein Gleichgewicht einzustellen. Bei Gleichgewichtseinstellung weist die Luft die sogenannte „relative Gleichgewichtsfeuchtigkeit“ auf. Die relative Gleichgewichtsfeuchtigkeit ist für unterschiedliche Sorptionsmittel verschieden. Flüssige Sorptionsmittel wirken dabei hygroskopisch, also wasseranziehend, und erschweren den Wassermolekülen das Verdampfen bzw. Verdunsten, also das Verlassen der Oberfläche des flüssigen Sorptionsmittels, wodurch die Verdunstungsrate gering ist.

AUSFÜHRUNGSVARIANTEN DER ERFINDUNG

[0059] Nachfolgend wird unter Bezugnahme auf Fig. 5 und Fig. 6 jeweils eine Variante des

erfindungsgemäßen Verfahrens erläutert. Fig. 5 und Fig. 6 zeigen die wesentlichen Bestandteile einer Vorrichtung, mittels welcher das erfindungsgemäße Verfahren zur Gewinnung von Wasser aus Luft durchführbar ist. Entlang der Fließlinien der in Fig. 5 und Fig. 6 gezeigten Darstellungen sind zum besseren Verständnis des Verfahrens Pfeile, welche Strömungsrichtungen andeuten, sowie einige exemplarische Temperaturangaben angebracht.

ERSTE AUSFÜHRUNGSVARIANTE (FIG. 5)

[0060] Bei der ersten Variante gemäß Fig. 5 wird im Zuge des Verfahrens Luft 2, insbesondere Luft aus der Umgebung bzw. dem Freien, in einen Gaswäscher 1, welcher insbesondere als Füllkörperkolonne ausgeführt ist, eingesaugt. Die eingesaugte Luft 2 durchströmt den Gaswäscher 1 und wird im Gaswäscher 1 mit einer zuvor gekühlten, gesättigten oder im Wesentlichen gesättigten wässrigen Kaliumcarbonatlösung (K_2CO_3 - Lösung) in Kontakt gebracht. Diese Kaliumcarbonatlösung ist das flüssige Sorptionsmittel.

[0061] Unter einer im Wesentlichen gesättigten Kaliumcarbonatlösung wird dabei eine solche verstanden, welche eine Konzentration von mindestens 1000g Kaliumcarbonat pro Liter Wasser enthält. Die Kaliumcarbonatlösung weist einen pH-Wert von vorzugsweise mindestens 12,0 auf, wodurch das Wachstum von Keimen in der Vorrichtung unterdrückt wird.

[0062] Stellt sich zwischen einer gesättigten Kaliumcarbonatlösung und der sie umgebenden Luft ein Gleichgewicht ein, weist die Luft die zur gesättigten Kaliumcarbonatlösung gehörende relative Gleichgewichtsfeuchtigkeit auf, welche ca. 43% beträgt. Ist die Kaliumcarbonatlösung nicht gesättigt und weist daher eine etwas geringere Konzentration an Kaliumcarbonat auf, ist die zugehörige relative Gleichgewichtsfeuchtigkeit höher. Dies ist für die gegenständliche Erfindung jedoch nicht maßgebend.

[0063] Anhand von Fig. 4 und des zugehörigen Beispiels werden nun die im Gaswäscher 1 stattfindenden Vorgänge erläutert. Folgende Annahmen werden für dieses Beispiel getroffen:

[0064] - Es wird eine gesättigten Kaliumcarbonatlösung verwendet, wobei sich in der Luft im Gaswäscher eine relative Luftfeuchtigkeit ϕ von 50% einstellt (Anmerkung: Die gesättigten Kaliumcarbonatlösung ist zwar „thermodynamisch bestrebt“ die erwähnte relative Gleichgewichtsfeuchtigkeit von ca. 43% einzustellen, dies würde aber sehr lange Verweilzeiten der Luft und der Kaliumcarbonatlösung im Gaswäscher 2 voraussetzen. Es wird daher angenommen, dass sich in der die gesättigten Kaliumcarbonatlösung umgebenden Luft eine relative Luftfeuchtigkeit von 50% einstellt. Die Luft tritt also mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50% aus dem Gaswäscher 1 aus);

[0065] - Die in den Gaswäscher 1 eingeleitete Luft weist folgende Eigenschaften auf:

[0066] o Lufttemperatur $T_1 = 20^\circ\text{C}$

[0067] o Relative Luftfeuchtigkeit $\phi = 50\%$

[0068] o Absolute Luftfeuchtigkeit $\rho_{w1} = \text{ca. } 9 \text{ g/m}^3$ (siehe Fig. 1, genauer: $\rho_{w1} = 8,85 \text{ g/m}^3$)

[0069] o Taupunkt $\tau_1 = 9,3^\circ\text{C}$ (siehe Fig. 2);

[0070] - Abkühlung der Luft im Gaswäscher auf eine Lufttemperatur $T_2 = 5^\circ\text{C}$ (Lufttemperatur am Austritt aus dem Gaswäscher 1)

[0071] Durch eine Vielzahl von Pfeilen sind in Fig. 4 die im Gaswäscher 2 stattfindenden Vorgänge angedeutet. Die Luft mit Lufttemperatur T_1 (20°C) und relativer Luftfeuchtigkeit ϕ (50%) (Punkt p) wird bis auf eine Lufttemperatur T_2 (5°C) abgekühlt. Dabei wird der Taupunkt τ_1 ($9,3^\circ\text{C}$) unterschritten. Sobald der Taupunkt τ_1 erreicht ist, steigt die relative Luftfeuchtigkeit der Luft auf 100% (ϕ'), sodass Wasser aus der Luft kondensiert, Wasserdampf wird zu flüssigem Wasser. Am Taupunkt τ_1 weist die Luft eine absolute Luftfeuchtigkeit ρ_{w1} von ca. 9 g/m^3 auf. Die gesättigte Kaliumcarbonatlösung beginnt der Luft nun Wasser zu entziehen, denn sie ist bestrebt, die relative Gleichgewichtsfeuchtigkeit von 43% in der Luft einzustellen. Unter der eingangs ge-

troffenen Annahme wird durch die Kaliumcarbonatlösung eine relative Luftfeuchtigkeit von 50% (ϕ) eingestellt. Die Kaliumcarbonatlösung senkt daher die relative Luftfeuchtigkeit von $\phi' = 100\%$ auf $\phi = 50\%$, wobei sie die Luft gleichzeitig auf $T_2 = 5^\circ\text{C}$ abkühlt. Bei $\phi = 50\%$ und $T_2 = 5^\circ\text{C}$ weist die Luft eine absolute Luftfeuchtigkeit p_{w2}^* von ca. 3 g/m^3 auf (siehe Fig. 1, genauer: $p_{w2}^* = 3,4 \text{ g/m}^3$). Das bedeutet, dass die Kaliumcarbonatlösung der Luft im Zuge der „Gaswäsche“ bei diesem Beispiel ca. $6 \text{ g Wasser / m}^3 \text{ Luft}$ entzieht ($p_{w1} - p_{w2}^* = 9 \text{ g/m}^3 - 3 \text{ g/m}^3 = 6 \text{ g/m}^3$). Bei der gegenständlichen Erfindung wird daher das bereits beschriebene Wirkprinzip (Abkühlung von Luft unter den Taupunkt) mit dem bereits beschriebenen Wirkprinzip (Sorption mittels eines flüssigen Sorptionsmittels) kombiniert.

[0072] Wie Fig. 5 zeigt, weist die in den Gaswäscher 1 eingebrachte Kaliumcarbonatlösung beispielsweise eine Temperatur von 10°C auf, wobei die Temperatur der Kaliumcarbonatlösung derart gewählt wird, dass der jeweilige Taupunkt (gemäß Fig. 1) der eingesaugten Luft 2 im Zuge der Gaswäsche unterschritten wird. Die Luft 2 und die Kaliumcarbonatlösung werden vorzugsweise im Gegenstrom durch den Gaswäscher 1 geführt, wobei die Kaliumcarbonatlösung von oben in den Gaswäscher 1 eingebracht wird, insbesondere in Form von fein verteilten Tropfen in diesen eingesprüht wird. Alternativ können die feinen Tröpfchen auch über einen insbesondere in bekannter Weise ausgeführten Flüssigkeitsverteiler erzeugt werden. In der Luft 2 enthaltener Wasserdampf geht während der „Gaswäsche“ im Gaswäscher 1, wie beschrieben, in die Kaliumcarbonatlösung über.

[0073] Die aus dem Gaswäscher 1 austretende Luft, in Fig. 1 als Luft 2' bezeichnet, weist gegenüber der angesaugten Luft 2 eine geringere Temperatur (10°C) und eine geringere absolute und relative Luftfeuchtigkeit auf. Die Kaliumcarbonatlösung wird während der Gaswäsche erwärmt und zwar einerseits dadurch, dass sie der Luft 2 Wärme entzieht (durch den Temperaturunterschied übertragene Energie), und andererseits dadurch, dass bei der Kondensation des aus der Luft 2 stammenden Wasserdampfes Energie frei wird („Kondensationsenthalpie“). Die aus dem Gaswäscher 1 austretende Kaliumcarbonatlösung weist beispielsweise eine Temperatur von 20°C auf. Ferner weist die aus dem Gaswäscher 1 austretende Kaliumcarbonatlösung - bedingt durch die Wasseraufnahme - eine geringere Konzentration an Kaliumcarbonat auf als die in den Gaswäscher 1 eingebrachte Kaliumcarbonatlösung.

[0074] Die aus dem Gaswäscher 1 austretende, verdünnte Kaliumcarbonatlösung durchläuft einen Regenerationskreislauf k_r , welcher in Fig. 1 durch mehrere „Vollpfeile“ angedeutet ist und wird dabei kontinuierlich regeneriert und anschließend zum Gaswäscher 1 rückgeführt. Bei dieser Regeneration wird Wasser aus der Kaliumcarbonatlösung gewonnen.

[0075] Zunächst wird die Kaliumcarbonatlösung über zumindest eine Wärmepumpe, beim gezeigten Ausführungsbeispiel über zwei kaskadenartig, unmittelbar hintereinander in Serie geschaltete Wärmepumpen 3a, 3b geleitet. Jede Wärmepumpe 3a, 3b weist eine Kaltseite 3' und eine Warmseite 3'' auf, wobei die Wärmepumpen 3a, 3b durch Zuführung entsprechender Energie (Antriebsenergie, Arbeit) Wärme von der Kaltseite 3' auf die Warmseite 3'' übertragen. Die durch die zugeführte Energie eingetragene Wärme wird ebenfalls an der Warmseite 3'' abgegeben.

[0076] Die Kaltseiten 3' der Wärmepumpen 3a, 3b werden von bereits regenerierter Kaliumcarbonatlösung und die Warmseiten 3'' der Wärmepumpen 3a, 3b werden von der aus dem Gaswäscher 1 austretenden, verdünnten Kaliumcarbonatlösung durchströmt. Die aus dem Gaswäscher 1 austretende, verdünnte Kaliumcarbonatlösung wird über die Warmseiten 3'' schrittweise erwärmt, beim gezeigten Ausführungsbeispiel über die Wärmepumpe 3a zunächst auf 40°C und anschließend über die Wärmepumpe 3b auf 60°C . Die bereits regenerierte Kaliumcarbonatlösung wird über die Kaltseiten 3' schrittweise, beim gezeigten Ausführungsbeispiel über die Wärmepumpe 3b zunächst auf 40°C und anschließend über die Wärmepumpe 3a auf 10°C , abgekühlt. Die auf 10°C gekühlte, regenerierte Kaliumcarbonatlösung ist jene, welche in den Gaswäscher 1 aufgegeben wird.

[0077] Die kaskadenartige Anordnung mehrerer Wärmepumpen 3a, 3b ist insbesondere im Hinblick auf den Wirkungsgrad der Wärmepumpen 3a, 3b von Vorteil, welcher sich bekannter-

maßen wie folgt ergibt:

$$\eta = \frac{T_{\text{warm}}}{T_{\text{warm}} - T_{\text{kalt}}} \quad \text{Gleichung 1}$$

[0078] Der Wirkungsgrad einer Wärmepumpe ist daher umso höher, je kleiner die Temperaturdifferenz zwischen der Warmseite und der Kaltseite ist. Die schrittweise Erwärmung bzw. Abkühlung durch eine kaskadenartige Anordnung der Wärmepumpen ist daher bevorzugt, wobei beim beschriebenen Ausführungsbeispiel insbesondere bis zu sechs kaskadenartig hintereinander geschaltete Wärmepumpen vorgesehen sein können.

[0079] Die auf 60°C erwärmte, aus der Wärmepumpe 3b austretende Kaliumcarbonatlösung wird beim gezeigten Ausführungsbeispiel einem Membrandestillationsmodul 4 zugeleitet. Das Membrandestillationsmodul 4 ist beim gezeigten Ausführungsbeispiel ein für das Air Gap - Membrandestillationsverfahren vorgesehenes Modul, welches insbesondere in bekannter Weise aufgebaut sein kann und daher einen Verdampfer 5 und einen Kondensator 6 umfasst, welche durch einen Luftspalt 7 voneinander beabstandet sind. Der Verdampfer 5 ist Teil des Regenerationskreislaufes k_r und der Kondensator 6 ist Teil eines äußeren Kühlkreislaufes k_k , welcher durch mehrere schmale Pfeile andeutet ist. Der Verdampfer 5 weist eine dem Luftspalt 7 zugewandte Membran 5a und der Kondensator 6 weist eine dem Luftspalt 7 zugewandte Kondensationsfläche 6a auf.

[0080] Die selektive Eigenschaft der Membran 5a beruht in bekannter Weise auf dem Rückhalt von flüssigem Wasser bei gleichzeitiger Permeabilität für freie Wassermoleküle, also für Wasserdampf. Die Transportrichtung T_1 durch die Membran 5a ist durch einen Pfeil angedeutet. Die treibende Kraft, die den Wasserdampf durch die Membran 5a hindurch fördert, ist eine Wasserdampf-Partialdruckdifferenz zwischen der bezogen auf die Transportrichtung T_R „vor“ der Membran 5a befindlichen Phase P_1 und der bezogen auf die Transportrichtung T_R „hinter“ der Membran 7a befindlichen Phase (sogenanntes „Permeat“ P). Diese Partialdruckdifferenz ist dabei Folge einer Temperaturdifferenz zwischen der Phase P_1 und dem Permeat P.

[0081] Im äußeren Kühlkreislauf k_k wird Wasser kontinuierlich im Kreis und daher auch kontinuierlich durch den Kondensator 6 geleitet, wobei das Wasser außerhalb des Kondensators 6 einen Wärmeüberträger 8, beispielsweise ein Kühlregister, passiert. Der Wärmeüberträger 8 entzieht dem Wasser Wärme, sodass das Wasser die Kondensationsfläche 6a des Kondensators 6 fortlaufend kühlt. Mittels eines Gebläses 9 wird ein den Wärmeüberträger 8 überströmender Luftstrom erzeugt, welcher überschüssige Wärme des im äußeren Kühlkreislaufes k_k geführten Wassers abführt. Die den Wärmeüberträger 8 überströmende Luft ist beispielsweise Umgebungsluft oder die aus dem Gaswäscher i austretende Luft 2'. Das in den Kondensator 6 eintretende Wasser weist beispielsweise eine Temperatur von 20°C und das aus dem Kondensator 6 austretende Wasser weist beispielsweise eine Temperatur von 40°C auf.

[0082] Die aus der Wärmepumpe 3b austretende Kaliumcarbonatlösung wird in den Verdampfer 5 eingeleitet und bildet daher den sogenannten „Feed“ F sowie die vor der Membran 5a befindliche Phase P_1 . Innerhalb des Membrandestillationsmoduls 4 wird der Kaliumcarbonatlösung (Phase P_1) über die Membran 5a Wasser als Wasserdampf entzogen, welcher über den Luftspalt 7 zur Kondensationsfläche 6a transportiert wird und an dieser kondensiert. Das sich an der Kondensationsfläche 6a bildende Kondensat (Permeat P) wird, wie in Fig. 1 angedeutet, von der Kondensationsfläche 6a abgeleitet und bildet ein Produkt des Verfahrens. Das Kondensat eignet sich als Trinkwasser, da etwaige Verunreinigungen von der Membran 5a zurückgehalten werden, also in der Kaliumcarbonatlösung (im sogenannten Retentat R) verbleiben. Das Kondensat kann entweder unmittelbar verwendet werden, zum Beispiel getrunken werden, oder insbesondere in einem Behälter, beispielsweise in einem Intermediate Bulk Container oder dergleichen, gesammelt und in diesem zwischengespeichert werden. Ist eine längerfristige Lagerung des Kondensates vorgesehen, ist es von Vorteil, wenn das Kondensat beispielsweise durch Bestrahlen mittels UV-Strahlen oder mittels einer elektrochemischen Zelle keimfrei gehalten wird.

[0083] Die von der Membran 5a zurückgehaltene Kaliumcarbonatlösung (Retentat R) tritt aus

dem Verdampfer 5 aus. Die Konzentration an Kaliumcarbonat in der Kaliumcarbonatlösung ist durch die Membrandestillation erhöht worden. Diese Kaliumcarbonatlösung wird über die Wärmepumpen 3a, 3b geleitet und dort, wie bereits beschriebenen, abgekühlt und anschließend wieder in den Gaswäscher 1 aufgegeben.

ZWEITES AUSFÜHRUNGSBEISPIEL (FIG.6)

[0084] Dieses unterscheidet sich vom ersten Ausführungsbeispiel insbesondere dadurch, dass der äußere Kühlkreislauf k_k über eine unmittelbar vor dem Membrandestillationsmodul 4 angeordnete Wärmepumpe 3c an den Regenerationskreislauf k_r gekoppelt ist, wobei die Kaltseite 3' der Wärmepumpe 3c Teil des Kühlkreislauf k_k und die Warmseite 3'' der Wärmepumpe 3c Teil des Regenerationskreislaufes k_r ist. Ferner ist beim zweiten Ausführungsbeispiel zusätzlich eine Bypassleitung 10 vorgesehen, mittels welcher aus dem Verdampfer 5 austretende Kaliumcarbonatlösung erneut zum und durch den Verdampfer 5 leitbar ist.

[0085] Die Bypassleitung 10 verläuft zwischen einer Zuleitstelle 11, welche sich zwischen der Warmseite 3'' der Wärmepumpe 3b und der Warmseite 3'' Wärmepumpe 3c befindet, und einer Ableitstelle 12, welche sich zwischen dem Ausgang des Verdampfers 5 und der Kaltseite 3' der Wärmepumpe 3b befindet. Durch die Bypassleitung 10 wird ein innerer Regenerationskreislauf k_i gebildet, welcher in Fig. 1 durch vier „Hohlpfeile“ angedeutet ist, und welcher, mit Ausnahme der Bypassleitung 10, Teil des Regenerationskreislaufes k_r ist. Da die Wärmepumpe 3c beim gezeigten Ausführungsbeispiel unmittelbar vor dem Membrandestillationsmodul 4 angeordnet ist, erfolgt die Kopplung des Regenerationskreislauf k_r an den äußeren Kühlkreislauf k_k im Bereich des inneren Regenerationskreislaufes k_i .

[0086] Im inneren Regenerationskreislauf k_i passiert die Kaliumcarbonatlösung nacheinander die Zuleitstelle 11, die Warmseite 3'' der Wärmepumpe 3c, den Verdampfer 5 des Membrandestillationsmodules 4 und die Ableitstelle 12. Über das Membrandestillationsmodul 4 wird die Kaliumcarbonatlösung, wie bereits beim ersten Ausführungsbeispiel beschrieben, regeneriert. An der Ableitstelle 12 kann die regenerierte Kaliumcarbonatlösung in einen Teilstrom TS_1 und einen Teilstrom TS_2 geteilt werden.

[0087] Der Teilstrom TS_1 fließt über den Regenerationskreislaufes k_r und daher über die Kaltseiten 3' der Wärmepumpen 3a, 3b und liefert derart kontinuierlich „neue“ gekühlte Kaliumcarbonatlösung für die Gaswäsche im Gaswäscher 1. Der Teilstrom TS_2 fließt über die Bypassleitung 10 des inneren Regenerationskreislaufes k_i und derart zur Zuleitstelle 11, an welcher er kontinuierlich mit von der Wärmepumpe 3b kommender, noch nicht regenerierter Kaliumcarbonatlösung vermischt wird.

[0088] Die Regelung der Teilströme TS_1 und TS_2 ist insbesondere an die Luftfeuchtigkeit der Luft und/oder an die Konzentration der aus dem Verdampfer 5 austretenden Kaliumcarbonatlösung angepasst. Insbesondere wird der Teilstrom TS_1 umso kleiner gewählt, je feuchter die in den Gaswäscher 1 eingeleitete Luft 2 ist. An der Ableitstelle 12 ist vorzugsweise ein regelbares Dreiwegeventil 12a vorgesehen, mittels welchem die Größe der Teilströme TS_1 und TS_2 auf einfache Weise regelbar ist.

[0089] Im äußeren Kühlkreislauf k_k wird Wasser kontinuierlich im Kreis und daher auch kontinuierlich durch den Kondensator 6 geleitet. Das Wasser wird dabei außerhalb des Kondensators 6 fortlaufend über die Kaltseite 3' der Wärmepumpe 3c und den Wärmeüberträger 8 geleitet. An der Wärmepumpe 3c wird vom im äußeren Kühlkreislauf k_k fließenden Wasser (Kaltseite 3') Wärme auf die im Regenerationskreislauf k_r , beim gezeigten Ausführungsbeispiel auf die im inneren Regenerationskreislauf k_i , fließende Kaliumcarbonatlösung übertragen. Die Kaliumcarbonatlösung wird dadurch beispielsweise von 60°C auf 70°C erwärmt. Das Wasser im äußeren Kühlkreislauf k_k wird über die Wärmepumpe 3c und über das Kühlregister 8 beispielsweise auf 40°C gekühlt.

[0090] Das beschriebene Verfahren (erstes und zweites Ausführungsbeispiel) wird derart betrieben, dass in der Kaliumcarbonatlösung die Sättigungskonzentration des Kaliumcarbonates

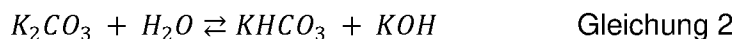
nicht überschritten wird.

ERGÄNZENDE ANMERKUNGEN UND WEITERE AUSFÜHRUNGSBEISPIELE:

[0091] Der Taupunkt der angesaugten Luft 2 wird, insbesondere kontinuierlich, vor dem Eintreten der Luft 2 in den Gaswäscher 1 gemessen. Die Messung des Taupunktes erfolgt vorzugsweise über eine indirekte Methode, bei welcher die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit gemessen werden. Ferner kann der Taupunkt auch über eine direkte Messung ermittelt werden, insbesondere mittels eines Taupunktspiegelhygrometers.

[0092] Bei der Gaswäsche nimmt die Kaliumcarbonatlösung neben Wasser etwaige in der angesaugten Luft 2 enthaltene Verbindungen auf, zu welchen beispielsweise Stickstoffoxide oder Schwefelverbindungen gehören können. Diese bilden in der Kaliumcarbonatlösung wasserlösliche Salze, insbesondere Sulfate und Nitrate. Solche Salze sind sehr gut wasserlöslich und lösen sich daher in der Kaliumcarbonatlösung. Sollten sich derartige Salze im Laufe der Zeit, z.B. nach 100 Betriebsstunden, in der Kaliumcarbonatlösung anreichern, kann die Kaliumcarbonatlösung ausgetauscht werden.

[0093] Ferner reagiert das Kaliumcarbonat der Kaliumcarbonatlösung in bekannter Weise weiter zu Kaliumhydrogencarbonat:



[0094] Auf Grund des erwähnten, hohen pH-Werts der Kaliumcarbonatlösung liegt das Gleichgewicht vorteilhafterweise auf der Seite des Kaliumcarbonates, wodurch die Löslichkeitsgrenze des Kaliumhydrogencarbonates meistens nicht überschritten wird. Etwaiges sich bildendes Kaliumhydrogencarbonat zersetzt sich ab einer Temperatur von zirka 55°C unter Freisetzung von Kohlenstoffdioxid. Im Fall des beschriebenen Ausführungsbeispiels wird diese Temperatur überschritten, wobei sich aus dem Kaliumhydrogencarbonat bildendes Kohlenstoffdioxid im Gaswäscher 1 gemeinsam mit der austretenden Luft 2' ausgetragen wird.

[0095] Bevorzugter Weise ist an geeigneten Stellen eine Vielzahl von Messgeräten vorgesehen, mit deren Hilfe das Verfahren überwacht werden kann. Zu diesen Messgeräten zählen insbesondere ein Konzentrationsmessgerät, welches die Konzentration der Kaliumcarbonatlösung fortlaufend an einer geeigneten Stelle misst, beispielsweise unmittelbar vor dem Eintritt in den Gaswäscher 1, ein Feuchtigkeitsmessgerät zur kontinuierlichen Messung der Luftfeuchtigkeit der in den Gaswäscher 1 eintretenden Luft 2, Temperaturmessgeräte, Füllstandmessgeräte und Durchflussmessgeräte.

[0096] Das Membrandestillationsmodul kann auch ein für das Direct Contact - Membrandestillationsverfahren vorgesehenes Modul sein. Im Gegensatz zum beschriebenen Membrandestillationsmodul 4 für das Air Gap - Membrandestillationsverfahren weist das Membrandestillationsmodul für das Direct Contact - Membrandestillationsverfahren keinen Luftspalt auf, wobei der Verdampfer und der Kondensator ausschließlich durch die Membran voneinander getrennt sind. Die Kondensation des durch die Membran hindurchfließenden Dampfes findet direkt in dem im Kühlkreislauf k_k geführten Wasser statt. Wird im Kühlkreislauf k_k Wasser mit Trinkwasserqualität im Kreis geführt, kann aus dem Kühlkreislauf k_k Wasser mit Trinkwasserqualität abgezweigt werden. Anstelle von Membrandestillationsmodulen kann eine beliebige Destillationseinheit mit einem Verdampfer und einem Kondensator vorgesehen sein, beispielsweise ein Vakuumverdampfer oder ein Infrarotverdampfer.

[0097] Die beschriebene Vorrichtung kann unterschiedlich dimensioniert sein, beispielsweise als Haushaltsgerät (Gewinnung von bis zu ca. 10 Liter Wasser pro Tag), als Gemeinschaftsanlage für mehrere Haushalte (Gewinnung von bis zu ca. 200 Liter Wasser pro Tag) oder als Großanlage (Gewinnung von einigen m^3 Wasser pro Tag).

[0098] Aufgrund des hohen pH-Werts der Kaliumcarbonatlösung ist es ferner möglich, die nach der Gaswäsche erhaltene verdünnte Kaliumcarbonatlösung über einen gewissen Zeitraum, insbesondere bis zu einer Woche, zumindest im Wesentlichen steril zu lagern. Aus der Kaliumcarbonatlösung kann bei Bedarf, entsprechend des beschriebenen Verfahrens, Wasser

gewonnen werden.

[0099] Ein vollautomatischer Ablauf des erfindungsgemäßen Verfahrens ist durch eine entsprechende Rechnersteuerung sichergestellt. Insbesondere wird das Verfahren in einer auf die gemessenen Parameter der Umgebungsluft energetisch optimal abgestimmten Weise betrieben. Die dazu erforderliche Hard- und Software sind nicht Gegenstand der Erfindung.

BEZUGSZIFFERNLISTE

1	Gaswäscher
2, 2'	Luft
3a, 3b, 3c	Wärmepumpe
3'	Kaltseite
3''	Warmseite
4.....	Membrandestillationsmodul
5.....	Verdampfer
5a	Membran
6.....	Kondensator
6a	Kondensationsfläche
7.....	Luftspalt
8.....	Wärmeüberträger
9.....	Gebälse
10.....	Bypassleitung
11.....	Zuleitstelle
12.....	Ableitstelle
12a	Dreiwegventil
F.....	Feed
k_i	innerer Regenerationskreislauf
k_k	äußerer Kühlkreislauf
k_r	Regenerationskreislauf
p	Punkt
P	Permeat
P_1	vor der Membran befindliche Phase
R	Retenat
T_R	Transportrichtung
TS_1, TS_2	Teilstrom

Patentansprüche

1. Verfahren zur Gewinnung von Wasser aus Luft (2, 2') mit folgenden nacheinander und parallel zueinander ablaufenden Schritten:
 - a) Gaswäsche der Luft (2, 2') in einem Gaswäscher (1) mit einer gekühlten wässrigen Kaliumcarbonatlösung, welche derart gekühlt ist, dass die Luft (2, 2') im Gaswäscher (1) unter ihren Taupunkt abgekühlt wird,
 - b) Ableiten der Kaliumcarbonatlösung aus dem Gaswäscher (1),
 - c) Erwärmen der abgeleiteten Kaliumcarbonatlösung über zumindest eine Wärmepumpe (3a, 3b),
 - d) Verdampfen von Wasser aus der erwärmten Kaliumcarbonatlösung und Kondensieren des gebildeten Wasserdampfes sowie Sammeln des Wassers,
 - e) Kühlen von zumindest einem Teilstrom (TS₁) der nach Schritt d) zurückbleibenden Kaliumcarbonatlösung über die zumindest eine Wärmepumpe (3a, 3b) gemäß Schritt c),
 - wobei die in Schritt e) erhaltene, gekühlte Kaliumcarbonatlösung in Schritt a) verwendet wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Kaliumcarbonatlösung, welche nach Schritt d) zurückbleibt und in Schritt a) verwendet wird, mindestens 1000g Kaliumcarbonat pro Liter Wasser enthält, vorzugsweise Kaliumcarbonat in einer derartigen Menge enthält, dass die Kaliumcarbonatlösung gesättigt ist.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Kaliumcarbonatlösung, welche nach Schritt d) zurückbleibt und in Schritt a) verwendet wird, einen pH-Wert von mindestens 12,0 aufweist.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Kaliumcarbonatlösung in Schritt e) derart gekühlt wird, dass ihre Temperatur in Schritt a) um mindestens 3°, insbesondere um mindestens 5°, geringer ist als der Taupunkt der in Schritt a) in den Gaswäscher (1) eingebrachten Luft (2).
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Kaliumcarbonatlösung in Schritt c) über zumindest zwei, insbesondere über bis zu sechs, aufeinanderfolgend angeordnete Wärmepumpen (3a, 3b) erwärmt wird.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass in Schritt d) durch die Kondensation Wärme auf einen Kühlkreislauf (k_k) übertragen wird, wobei die Wärme vom Kühlkreislauf (k_k) über zumindest eine weitere Wärmepumpe (3c) unmittelbar vor Schritt d) zurück auf die Kaliumcarbonatlösung übertragen wird.
7. Verfahren nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass aus dem Kühlkreislauf (k_k) Wärme über einen Wärmeüberträger (8), insbesondere über ein Kühlregister, abtransportiert wird.
8. Verfahren nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Wärmeüberträger (8) mit Luft (2'), welche gemäß Schritt a) aus dem Gaswäscher (1) austritt, oder mit Umgebungsluft gekühlt wird.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass zwischen Schritt d) und Schritt e) zumindest ein Teilstrom (TS₂) der nach Schritt d) zurückbleibenden Kaliumcarbonatlösung zu der aus Schritt c) stammenden Kaliumcarbonatlösung geleitet wird.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass in Schritt c) die Kaliumcarbonatlösung auf eine Temperatur von 45°C bis 75°C, insbesondere von mindestens 55°C, erwärmt wird.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass in Schritt a) die Luft und die Kaliumcarbonatlösung im Gegenstrom zueinander durch den Gaswäscher (1) geführt werden.

12. Vorrichtung zur Gewinnung von Wasser aus Luft (1) umfassend:
 - a) einen Gaswäscher (1) zur Durchführung einer Gaswäsche von Luft (2) mit einer Kaliumcarbonatlösung,
 - b) einen Regenerationskreislauf (k_r) zur Regeneration der Kaliumcarbonatlösung und zur Rückführung der regenerierten Kaliumcarbonatlösung zum Gaswäscher (2), wobei der Regenerationskreislauf (k_r) folgendes aufweist:
 - b1) eine Destillationseinheit (4) mit einem Verdampfer (5) zur Abtrennung von Wasser aus der Kaliumcarbonatlösung und einem Kondensator (6) zur Kondensation des Wassers,
 - b2) zumindest eine Wärmepumpe (3a, 3b, 3c) zum Erwärmen der aus dem Gaswäscher (1) austretenden Kaliumcarbonatlösung und zum Abkühlen der aus der Destillationseinheit (4) austretenden Kaliumcarbonatlösung.
13. Vorrichtung nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Destillationseinheit (4) ein Membrandestillationsmodul (4), ein Vakuumverdampfer oder ein Infrarotverdampfer ist.
14. Vorrichtung nach Anspruch 12 oder 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass sie ein Konzentrationsmessgerät zum Messen der Konzentration einer Kaliumcarbonatlösung aufweist.
15. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 12 bis 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass sie ein Feuchtigkeitsmessgerät zum Messen der Luftfeuchtigkeit der in den Gaswäscher (1) eintretenden Luft (2) aufweist.
16. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 12 bis 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Wärmepumpe(n) (3a, 3b, 3c) eine Kompressions-Wärmepumpe ist bzw. Kompressions-Wärmepumpen sind.
17. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 12 bis 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Wärmepumpe(n) (3a, 3b, 3c) eine Peltier-Wärmepumpe ist bzw. Peltier- Wärmepumpen sind.

Hierzu 5 Blatt Zeichnungen

1/5

		ϕ [%]												
		40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
ρ_{w2} [g/m ³]	-5°C	1.30	1.46	1.62	1.78	1.94	2.21	2.27	2.43	2.59	2.75	2.92	3.09	3.24
	-4°C	1.40	1.58	1.76	1.93	2.11	2.28	2.46	2.63	2.81	2.98	3.16	3.34	3.52
	-3°C	1.52	1.72	1.91	2.09	2.29	2.48	2.67	2.86	3.05	3.24	3.43	3.62	3.81
	-2°C	1.65	1.86	2.07	2.27	2.48	2.68	2.89	3.10	3.30	3.51	3.72	3.92	4.13
	-1°C	1.79	2.02	2.24	2.47	2.68	2.92	3.13	3.35	3.58	3.80	4.02	4.25	4.47
	0°C	1.94	2.18	2.42	2.66	2.90	3.14	3.39	3.63	3.87	4.11	4.36	4.60	4.84
	+1°C	2.08	2.34	2.60	2.86	3.12	3.38	3.64	3.90	4.16	4.42	4.68	4.94	5.20
	+2°C	2.24	2.52	2.80	3.08	3.36	3.64	3.92	4.20	4.48	4.76	5.04	5.32	5.60
	+3°C	2.40	2.70	3.00	3.30	3.60	3.90	4.20	4.50	4.80	5.10	5.40	5.70	6.00
	+4°C	2.56	2.88	3.20	3.52	3.84	4.16	4.48	4.80	5.12	5.44	5.76	6.08	6.40
T_2	+5°C	2.72	3.06	3.40	3.74	4.08	4.42	4.76	5.10	5.44	5.78	6.12	6.46	6.80
	+6°C	2.92	3.29	3.65	4.02	4.38	4.74	5.11	5.48	5.84	6.20	6.57	6.94	7.30
	+7°C	3.12	3.51	3.90	4.29	4.68	5.07	5.46	5.85	6.24	6.63	7.02	7.41	7.80
	+8°C	3.32	3.74	4.15	4.57	4.98	5.40	5.81	6.23	6.64	7.06	7.47	7.88	8.30
	+9°C	3.52	3.96	4.40	4.84	5.28	5.72	6.16	6.60	7.04	7.48	7.92	8.36	8.80
	+10°C	3.76	4.23	4.70	5.17	5.64	6.11	6.58	7.05	7.52	7.99	8.46	8.93	9.40
	+11°C	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00
	+12°C	4.28	4.82	5.35	5.89	6.42	6.96	7.49	8.03	8.56	9.10	9.63	10.16	10.70
	+13°C	4.56	5.13	5.70	6.27	6.84	7.41	7.98	8.55	9.12	9.69	10.26	10.83	11.40
	+14°C	4.84	5.45	6.05	6.66	7.26	7.87	8.47	9.08	9.68	10.29	10.89	11.50	12.10
ρ_{w1} [g/m ³]	+15°C	5.12	5.76	6.40	7.04	7.68	8.32	8.90	9.60	10.24	10.88	11.52	12.26	12.80
	+16°C	5.44	6.12	6.80	7.48	8.16	8.84	9.52	10.20	10.88	11.56	12.24	12.92	13.60
	+17°C	5.80	6.53	7.25	7.98	8.70	9.42	10.15	10.88	11.60	12.32	13.05	13.77	14.50
	+18°C	6.16	6.93	7.70	8.47	9.24	10.00	10.78	11.55	12.32	13.09	13.86	14.63	15.40
	+19°C	6.52	7.34	8.15	8.97	9.78	10.60	11.42	12.23	13.04	13.85	14.67	15.48	16.30
	+20°C	6.92	7.79	8.65	9.52	10.38	11.25	12.11	12.98	13.84	14.70	15.57	16.44	17.30
	+21°C	7.44	8.24	9.15	10.07	10.98	11.89	12.81	13.72	14.64	15.55	16.47	17.38	18.30
	+22°C	7.76	8.73	9.70	10.67	11.64	12.61	13.58	14.56	15.52	16.49	17.46	18.41	19.40
	+23°C	8.24	9.27	10.30	11.33	12.36	13.39	14.42	15.45	16.48	17.51	18.54	19.54	20.60
	+24°C	8.92	9.81	10.90	11.99	13.08	14.17	15.26	16.35	17.44	18.53	19.62	20.71	21.80
T_1	+25°C	9.20	10.35	11.50	12.65	13.80	14.95	16.10	17.25	18.40	19.55	20.70	21.85	23.00
	+26°C	9.76	10.98	12.20	13.42	14.64	15.86	17.08	18.30	19.42	20.74	21.96	23.18	24.40
	+27°C	10.32	11.61	12.90	14.19	15.48	16.77	18.06	19.35	20.64	21.93	23.21	24.52	25.80
	+28°C	10.88	12.24	13.60	14.96	16.32	17.68	19.04	20.40	21.76	23.12	24.48	25.82	27.20
	+29°C	11.48	12.91	14.35	15.78	17.22	18.66	20.09	21.53	22.96	24.40	25.83	27.23	28.70
	+30°C	12.12	13.64	15.15	16.68	18.18	19.70	21.21	22.73	24.24	25.76	27.27	28.80	30.30

Fig. 1

2/5

	Taupunkt τ [°C] bei einer relativen Luftfeuchte (ϕ [%]) von										
	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%
2	-7,70	-6,56	-5,43	-4,40	-3,16	-2,48	-1,77	-0,98	-0,26	0,47	1,20
4	-6,11	-4,88	-3,69	-2,61	-1,79	-0,88	-0,09	0,78	1,62	2,44	3,20
6	-4,49	-3,07	-2,10	-1,05	-0,08	0,85	1,86	2,72	3,62	4,48	5,38
8	-2,69	-1,61	-0,44	0,67	1,80	2,83	3,82	4,77	5,66	6,48	7,32
10	-1,26	0,02	1,31	2,53	3,74	4,79	5,82	6,79	7,65	8,45	9,31
12	0,35	1,84	3,19	4,46	5,63	6,74	7,75	8,69	9,60	10,48	11,33
14	2,2	3,76	5,10	6,40	7,58	8,67	9,70	10,71	11,64	12,55	13,36
15	3,12	4,65	6,07	7,36	8,52	9,63	10,70	11,69	12,62	13,52	14,42
16	4,07	5,59	6,98	8,29	9,47	10,61	11,68	12,66	13,63	14,58	15,54
17	5,00	6,48	7,62	9,18	10,39	11,48	12,54	13,57	14,50	15,36	16,19
18	5,90	7,43	8,83	10,12	11,33	12,44	13,48	14,56	15,41	16,31	17,25
19	6,80	8,33	9,75	11,09	12,26	13,37	14,49	15,47	16,4	17,37	18,22
20	7,73	9,30	10,72	12,00	13,22	14,40	15,48	16,46	17,44	18,36	19,18
21	8,60	10,22	11,59	12,92	14,21	15,36	16,40	17,44	18,41	19,27	20,19
22	9,54	11,16	12,52	13,89	15,19	16,27	17,41	18,42	19,39	20,28	21,22
23	10,44	12,02	13,47	14,87	16,04	17,29	18,37	19,37	20,37	21,34	22,23
24	11,34	12,93	14,44	15,73	17,06	18,21	19,22	20,33	21,37	22,32	23,18
25	12,20	13,83	15,37	16,69	17,99	19,11	20,24	21,35	22,27	23,30	24,22
26	13,15	14,84	16,26	17,67	18,90	20,09	21,29	22,32	23,32	24,31	25,16
27	14,08	15,68	17,24	18,57	19,83	21,11	22,23	23,31	24,32	25,22	26,10
28	14,96	16,61	18,14	19,38	20,86	22,07	23,18	24,28	25,25	26,20	27,18
29	15,85	17,58	19,04	20,48	21,83	22,97	24,20	25,23	26,21	27,26	28,18
30	16,79	18,44	19,96	21,44	23,71	23,94	25,11	26,10	27,21	28,19	29,09
32	18,62	20,28	21,90	23,26	24,65	25,79	27,08	28,24	29,23	30,16	31,17
34	20,42	22,19	23,77	25,19	26,54	27,85	28,94	30,09	31,19	32,13	33,11
36	22,23	24,08	25,50	27,00	28,41	29,65	30,88	31,97	33,05	34,23	35,06
38	23,97	25,74	27,44	28,87	30,31	31,62	32,78	33,96	35,01	36,05	37,03
40	25,79	27,66	29,22	30,81	32,16	33,48	34,69	35,86	36,98	38,05	39,11
45	30,29	32,17	33,86	35,38	36,85	38,24	39,54	40,74	41,87	42,97	44,03
50	34,76	36,63	38,46	40,09	41,58	42,99	44,33	45,55	46,75	47,90	48,98

Fig. 2

3/5

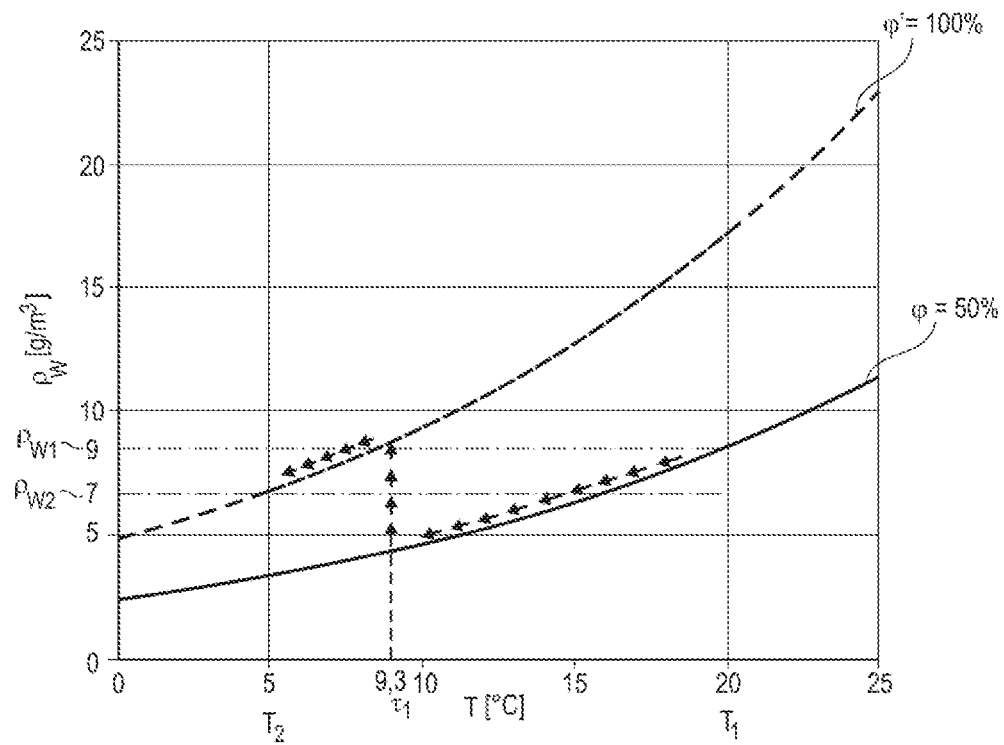


Fig. 3

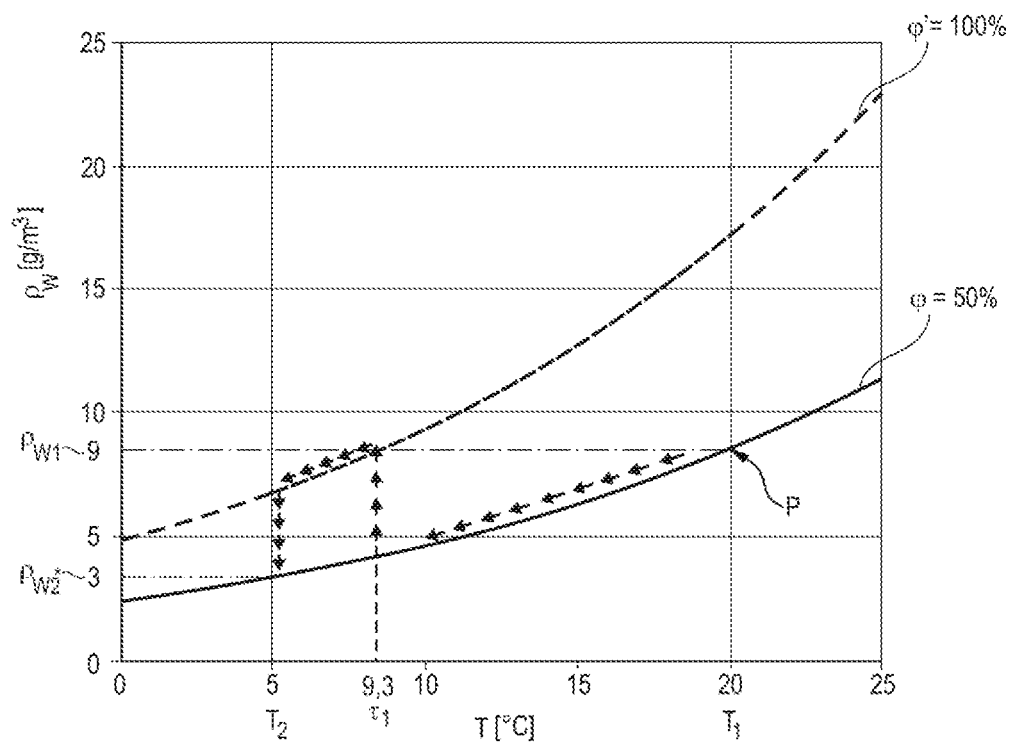


Fig. 4

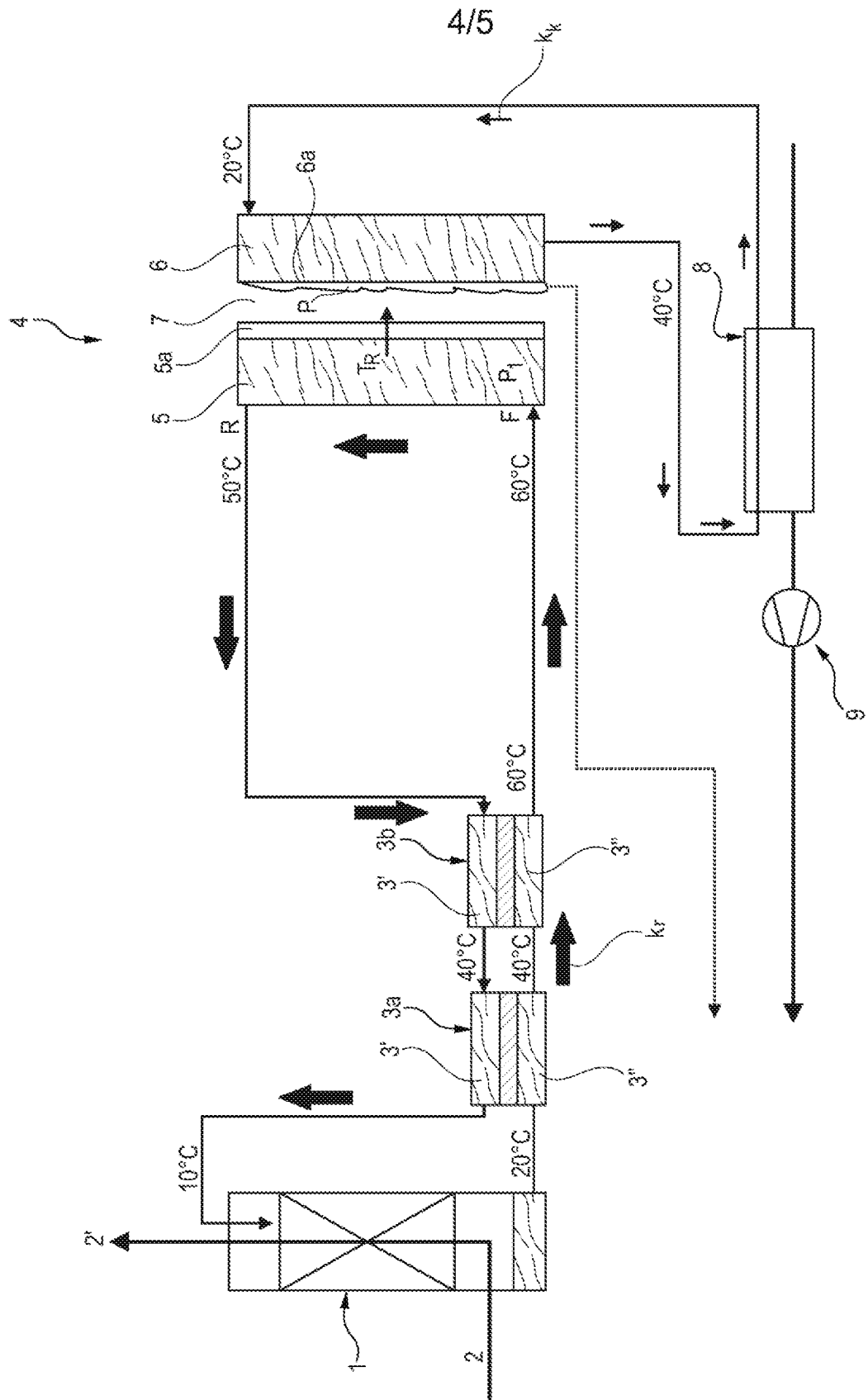


Fig. 5

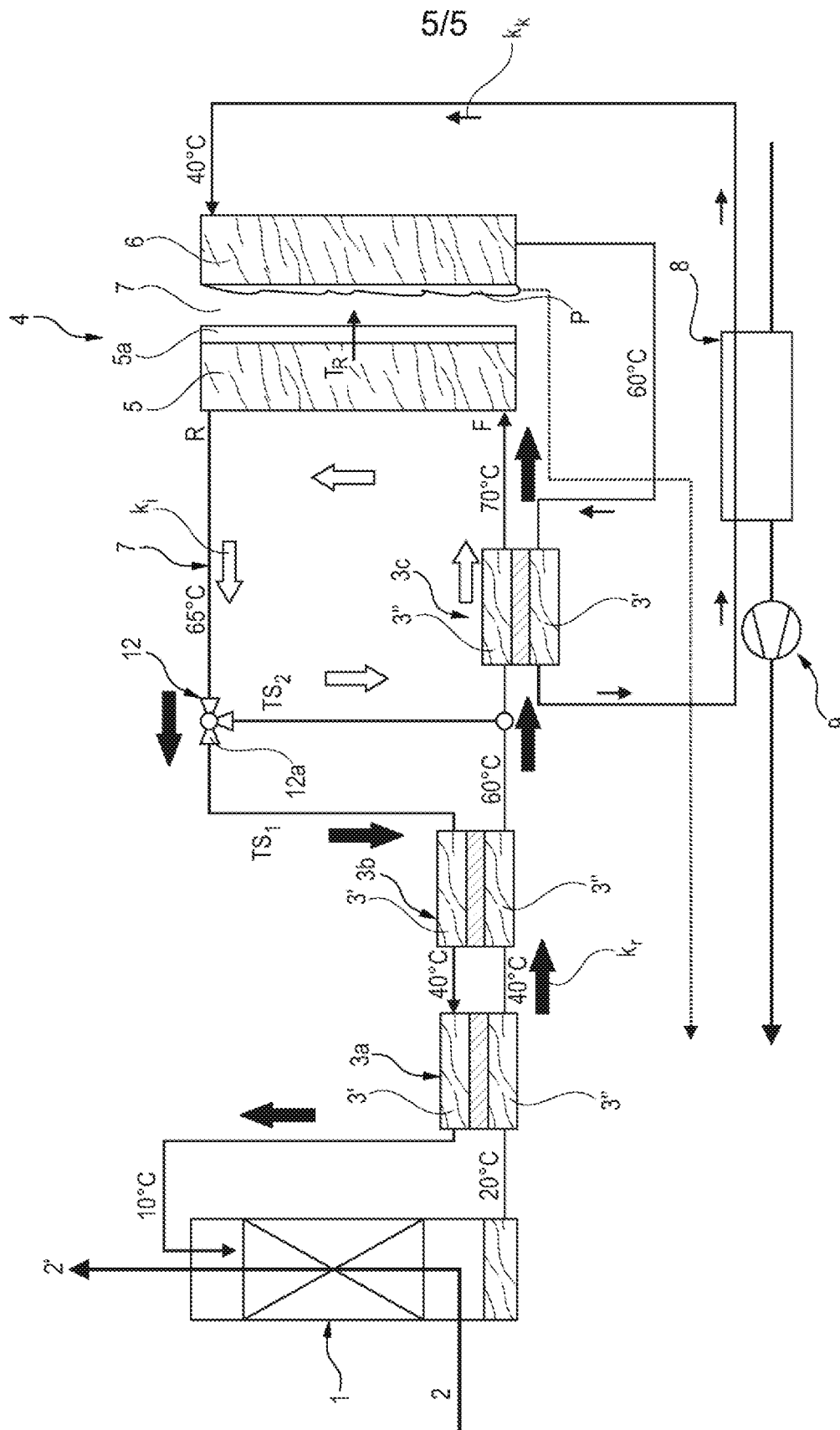


Fig. 6