

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
27. Dezember 2007 (27.12.2007)

PCT

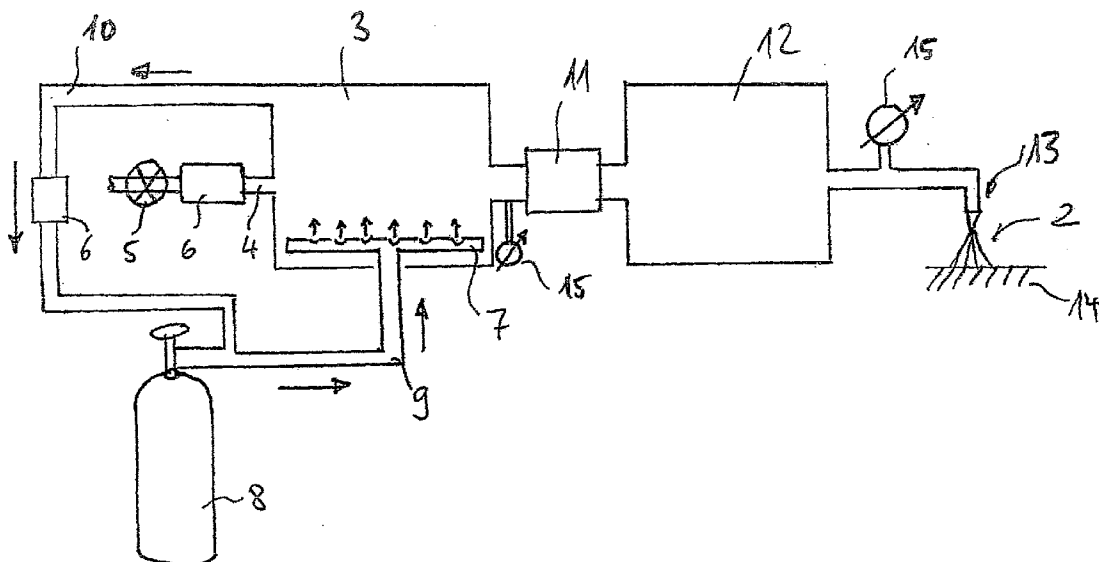
(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
WO 2007/147192 A2

- (51) Internationale Patentklassifikation:  
B24C 1/00 (2006.01) B24C 7/00 (2006.01)
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/AT2007/000307
- (22) Internationales Anmeldedatum:  
22. Juni 2007 (22.06.2007)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:  
A 1066/2006 23. Juni 2006 (23.06.2006) AT
- (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): UNIVERSITÄT INNSBRUCK [AT/AT]; Innrain 52, A-6020 Innsbruck (AT).
- (72) Erfinder; und
- (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): LOERTING, Thomas [AT/AT]; Mossweg 16, A-6063 Rum (AT). ERMINALD,
- Bertel [AT/AT]; Planötzenhofstr. 24D, A-6020 Innsbruck (AT).
- (74) Anwälte: SCHWARZ, Albin usw.; Wipplingerstrasse 32/22, A-1010 Wien (AT).
- (81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: DEVICE AND METHOD FOR MACHINING A SOLID MATERIAL USING A WATER JET

(54) Bezeichnung: VORRICHTUNG UND VERFAHREN ZUR BEARBEITUNG EINES FESTEN WERKSTOFFS MIT EINEM WASSERSTRAHL



(57) Abstract: A method of machining a solid material using a water jet discharging from a nozzle is specified, wherein the water jet contains ice crystals and strikes the solid material. In this case, a medium which is gaseous under standard conditions is dissolved in water in a mixing step under pressure (1-150 bar) and is then compressed to 1000-4500 bar and forced through a nozzle, under conditions which allow the dissolved gaseous medium to bubble out after leaving the nozzle, wherein the heat of solution is extracted from the water and the ice crystals are formed.

(57) Zusammenfassung: Es wird ein Verfahren zum Bearbeiten eines festen Werkstoffs mit einem aus einer Düse austretenden Wasserstrahl angegeben, wobei der Wasserstrahl Eiskristalle enthält und auf den festen Werkstoff auftrifft. Dabei wird ein unter Standardbedingungen gasförmiges Medium in einer Mischstufe unter Druck (1-150 bar) im Wasser gelöst, anschließend auf 1000-4500 bar komprimiert und durch eine Düse gepresst, unter Bedingungen, die ein Ausperlen des gelösten gasförmigen Mediums nach Verlassen der Düse gestatten, wobei dem Wasser die Lösungswärme entzogen wird und die Eiskristalle gebildet werden.

WO 2007/147192 A2



GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MT, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Veröffentlicht:**

— *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts*

*Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.*

## Vorrichtung und Verfahren zur Bearbeitung eines festen Werkstoffs mit einem Wasserstrahl

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zum Bearbeiten eines festen Werkstoffs mit einem aus einer Düse austretenden Wasserstrahl, welcher Eiskristalle enthält und auf den festen Werkstoff auftrifft.

Wasser- oder Luftstrahlen insbesondere unter hohem Druck werden in vielfältiger Art zur Bearbeitung von verschiedenen Materialien angewendet. Der Strahl wird üblicherweise durch eine schmale Düse auf Normaldruck expandiert und zur Oberflächenabtragung wie z.B. Grobreinigung, Polieren, Abgraten/Deburring, Entfernung von Beschichtungen/Decoating, Lackreinigung etc. oder zum Schneiden bzw. Bohren von Materialien bzw. Werkstücken verwendet. Auch künstlerische Tätigkeiten wie „negative graffiti“, also Zeichnen durch gezieltes Ablösen von Farbe durch den dünnen Wasser- oder Luftstrahl, sind möglich.

Beispiele für bekannte Vorrichtungen zur Materialbearbeitung gehen beispielsweise aus der DE 198 49 814 A1 sowie aus der DE 198 49 813 A1 unter Zuführung eines Abrasivmaterials hervor. Aus der DE 10 2004 046 030 A1 ist ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Schneiden einer Bahn bekannt, wobei im Wasserstrahl Eiskristalle gebildet werden. Die Bildung der Eiskristalle kann dadurch unterstützt werden, dass dem Wasser im Hochdruckbereich vor der Düse Kohlendioxid beigemischt wird, das nach dem Austritt verdampft, wobei die Verdampfungswärme des Kohlendioxids dem Wasser Energie entzieht.

Die bekannten Verfahren und Vorrichtungen zur schneidenden oder bohrenden Materialbearbeitung eignen sich jedoch nur für die Bearbeitung weicher Materialien. Harte Materialien wie Stahl können nur abrasiv bearbeitet werden, d.h., der Wasserstrahl muss feste Partikel wie beispielsweise Sand, Korund oder ähnliche Schleifmittel enthalten. Dabei ist insbesondere von Nachteil, dass die Werkstücke durch das Abrasivmaterial verschmutzt werden können, wenn beispielsweise Sand an der Oberfläche oder in Ritzen verbleibt und aufwändig wieder entfernt werden muss.

Weiterhin ist die Erzeugung von Eiskristallen in einem Luft- bzw. in einem Wasserstrahl bekannt, wobei die Eiskristalle den Sand oder andere Abrasivmaterialien im Luftstrahl bzw. im Wasserstrahl ersetzen. Eine Vorkühlung des Wassers durch eine Kryoflüssigkeit zur Erzeugung von Eiskristallen im Wasserstrahl geht dabei beispielsweise aus der US 5,341,608 hervor.

Nachteilig an diesem Verfahren ist jedoch, dass die Eiskristalle bereits vor der Düse gebildet werden und es dadurch häufig dazu kommt, dass die Düse erodiert wird bzw. verstopft oder durch die erhöhte Reibung überhitzt und die Eiskristalle dadurch wieder schmelzen.

Aufgabe der Erfindung ist es somit, ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Bearbeitung eines festen Werkstoffs mit einem Wasserstrahl anzugeben, welches eine einfache und kostengünstige Möglichkeit zur Bildung von Eiskristallen im Wasserstrahl nach dem Austritt des Wasserstrahls aus der Düse offeriert.

Erfindungsgemäß ist dabei vorgesehen, dass das Verfahren zum Bearbeiten eines festen Werkstoffs mit einem aus einer Düse austretenden Wasserstrahl, welcher Eiskristalle enthält und auf den festen Werkstoff auftrifft, dadurch gekennzeichnet ist, dass ein unter Standardbedingungen gasförmiges Medium bei einem Druck von 1-150 bar, vorzugsweise in einer Mischstufe, im Wasser gelöst wird. Danach wird die Lösung in einer Hochdruckstufe, z.B. einer kommerziellen Wasserstrahl-Schneidemaschine, auf 1000-4500 bar komprimiert und durch eine Düse gepresst unter Bedingungen, die ein Entmischen des Wassers und des gelösten Mediums nach Verlassen der Düse bewirken, wobei dem Wasser die Lösungswärme entzogen wird und Eiskristalle gebildet werden.

Dies ist vorteilhaft, weil dadurch die Eiskristalle einerseits mit wenig Aufwand und andererseits nach dem Durchströmen der Düse gebildet werden und somit eine Abnutzung der Düse, das Verstopfen der Düse durch die gebildeten Eiskristalle und ein Erwärmen der Düse durch die hohe Reibung und ein nachfolgendes Schmelzen der Eiskristalle unterbunden werden kann.

Weitere vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung gehen aus den Unteransprüchen hervor.

Vorteilhafterweise erfolgt das Lösen des gasförmigen Mediums im Wasser in einfacher und kostengünstiger Weise in der Mischstufe durch Durchleiten des gasförmigen Mediums aus Gasflaschen oder Druckpatronen unter Druck durch das Wasser.

Von Vorteil ist weiterhin, dass ein Abstimmen der Lösungskonzentration des gasförmigen Mediums und einer Vorkühlung des Wassers den Partikelanteil und die Partikelgröße der im Wasserstrahl gebildeten Eiskristalle steuert, da hierdurch eine einfache Anpassung der physikalischen Eigenschaften des Wasserstrahls an das zu bearbeitende Material ermöglicht wird.

Besonders vorteilhaft ist, dass das gasförmige Medium Kohlendioxid ist, da dieses einfach und kostengünstig herstellbar und vor allem in der Lebensmittelindustrie verwendbar ist.

Vorteilhafterweise umfasst eine bevorzugte Ausführungsform einer Vorrichtung zum Bearbeiten eines festen Werkstoffs mit einem aus einer Düse austretenden Wasserstrahl, welcher Eiskristalle enthält und auf den festen Werkstoff auftrifft, eine Zuleitung mit einem Einlassventil und einer Pumpe für Wasser in einen Mischbereich, in dem ein Druck von 1-150 bar herrscht, einen mit dem Mischbereich über eine Hochdruck-Pumpe verbundenen hochdruckfesten Behälter und eine an den Behälter angeschlossene Düse, wobei in dem über die Zuleitung in den Mischbereich eingespeisten Wasser im Mischbereich ein gasförmiges Medium unter Druck zuführbar und im Wasser lösbar ist, da diese Ausführungsform eine einfache und kostengünstige Möglichkeit zum Lösen eines Gases in Wasser ist.

Weiterhin ist vorteilhaft, dass das gasförmige Medium über eine in dem Mischbereich angeordnete Duschvorrichtung in das Wasser einbringbar ist, wobei die Duschvorrichtung insbesondere in Form eines Duschkopfes mit einer Vielzahl von Austrittsöffnungen ausgebildet ist, da dies eine gleichmäßige Verteilung des gasförmigen Mediums über ein großes Volumen ermöglicht.

Vorteilhafterweise ist das gasförmige Medium zuströmseitig des Mischbereichs unter einem Druck von 1-150 bar in das Wasser einbringbar, wodurch zusätzliche Vorrichtungen zum Einbringen des gasförmigen Mediums in das Wasser kostengünstigerweise vermieden werden.

Eine vorteilhafte Ausgestaltungsvariante sieht vor, dass das gasförmige Medium in dem Mischbereich unter einem Druck von 1-150 bar vorliegt und das Wasser durch Zerstäubung zugeführt wird, da dies eine sehr homogene Vermischung ermöglicht.

Eine ebenfalls sehr vorteilhafte Ausgestaltungsmöglichkeit sieht vor, dass das gasförmige Medium über Trockeneis-Pellets, die das gasförmige Medium enthalten, in das Wasser einbringbar und das gasförmige Medium unter Druck in dem Wasser lösbar ist, da hierdurch Tankvorrichtungen und Zuleitungen für das gasförmige Medium vermieden werden können.

Weiter ist von Vorteil, dass das gasförmige Medium einer Mischstufe zur Mischung mit dem Wasser in einem mittleren Druckbereich (1-150 bar) zugeführt wird. Dadurch ist es in

einfacher Weise möglich, handelsübliche Vorratsbehälter für gasförmige Medien insbesondere in Form einer Gasflasche oder Gaskartusche zu verwenden.

Zudem ist von Vorteil, dass der Mischbereich mit einer Rücklaufleitung verbunden ist, über welche überschüssiges gasförmiges Medium in die Zuleitung rückspeisbar ist, da hierdurch überschüssiges gasförmiges Medium recyclebar ist.

Weiterhin ist von Vorteil, dass das Wasser unter einem Druck von 1000-4500 bar durch die Düse gepresst wird, da dies bei Expansion des Wasserstrahls auf Normaldruck einen großen Temperatursprung und dadurch die zuverlässige Bildung von Eiskristallen ermöglicht.

Nachfolgend wird ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel für eine zur Ausführung des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Bearbeitung eines festen Werkstoffs mit einem Wasserstrahl geeignete Vorrichtung anhand der Figuren näher beschrieben. In der Zeichnung zeigen:

Fig. 1 eine stark schematisierte Ansicht eines bevorzugten Ausführungsbeispiels einer erfindungsgemäß ausgeführten Vorrichtung zur Bearbeitung eines festen Werkstoffs mit einem Wasserstrahl, und

Fig. 2A-D vier Ausführungsbeispiele für Mischbereiche der erfindungsgemäßen Vorrichtung gemäß Fig. 1.

Wie bereits weiter oben erwähnt, ist die Beimischung von Abrasivmaterial zum Wasserstrahl zur Bearbeitung fester Werkstoffe notwendig, wenn härtere Materialien oder Oberflächen bearbeitet werden sollen, wobei vorzugsweise Sand zur Anwendung kommt, welcher jedoch eine Reihe von Nachteilen aufweist. Sand und andere feststoffliche Abrasivmaterialien bleiben am behandelten Material liegen und müssen wieder entfernt werden. Ein Hauptvorteil des Einsatzes von Eiskristallen statt Sand als Abrasivmaterial ist die Verhinderung von Verschmutzung. Die Eiskristalle schmelzen nach der Bearbeitung, und das zurückbleibende Wasser kann z.B. durch einfaches Trocknen entfernt werden, wodurch das behandelte Material während des ganzen Prozesses sauber bleibt. Zusätzlich stellt der Einsatz einen Umweltvorteil dar, da auch kein Sand-Abfall anfällt, der beseitigt bzw. recycled werden muss. Ein mit Eiskristallen als Abrasivmaterial versetzter Wasserstrahl kann daher etwa bedenkenlos in den Branchen Elektronik, (Bio-)Medizin, Lebensmittel, Autolacke, Raumfahrt etc. eingesetzt werden. Auch die Kosten sind geringer, da Eis im Gegensatz zu anderen

Abrasivmaterialien wie Sand nicht geliefert und gelagert werden muss, sondern z.B. aus dem Leitungswasser durch Einsatz von Elektrizität hergestellt werden kann.

Bekannt Maßnahmen zur Beimengung von Eis in den Wasserstrahl sind jedoch mit einer Reihe von Nachteilen behaftet. Insbesondere die Bildung der Eiskristalle in Strömungsrichtung vor der Düse führt dazu, dass die Düse erodiert wird bzw. verstopft oder durch die erhöhte Reibung so heiß wird, dass die Eiskristalle wieder schmelzen. Aufgrund dieser sog. ex-situ Mischprozedur wird ein Minimaldurchmesser des Wasserstrahls benötigt, der letztlich dazu führt, dass der Maximaldruck und die Energieeffizienz limitiert sind. Die hohen Kosten für die Produktion der Eiskristalle bzw. der technische Aufwand und der Platzbedarf sind weitere Nachteile dieser Methode.

Um die Eiskristalle in situ zu erzeugen, ist es hingegen nötig, bei Temperaturen von 243 K oder tiefer zu arbeiten, da Wasser z.B. bei einem Druck von 200 MPa erst bei 253 K friert (also um 20 K tiefer als bei Atmosphärendruck) und zusätzlich noch die Tendenz zeigt, zu unterkühlen. Weiters wird das Sintern der Eisteilchen erst unterhalb von 243 K effektiv unterbunden, da oberhalb von 243 K ein dünner Flüssigkeitsfilm (in der Größenordnung von Nanometern) an der Eisoberfläche zum Sintern führt. Um das Unterkühlen zu unterbinden, kann man im Prinzip Nukleatoren zusetzen. Dies sind feste organische oder anorganische Stoffe, die Keime für das Eiskristallwachstum darstellen. Allerdings bringt der Einsatz von Nukleatoren, die kontinuierlich über einen Ansaugstutzen zugeführt werden müssen, wieder das Problem der schlechten Umweltverträglichkeit mit sich, wodurch ein Einsatz in der Lebensmittelindustrie nicht mehr möglich ist.

Erfindungsgemäß ist zur Vermeidung der genannten Nachteile vorgesehen, die Abkühlung des Wassers und damit die Erzeugung von Eispartikeln im Wasserstrahl dadurch zu erzielen, dass ein gasförmiges Medium, beispielsweise Kohlendioxid, bei einem Druck von 1-150 bar in einer Mischvorrichtung im Wasser gelöst und dann die Mischung mittels einer Hochdruckpumpe einer Düse zugeführt wird. Aufgrund des Druckabfalles nach der Düse erfolgt eine Entmischung. Das Freisetzen des gasförmigen Mediums entzieht dem Wasser zusätzlich zu der Abkühlung durch Expansion die Lösungswärme des gasförmigen Mediums, so dass es nach der Düse zu einer spontanen Abkühlung und zur Bildung von Eiskristallen im Wasserstrahl kommt. Die so erreichte Abkühlung liegt im Bereich mehrerer Grad Celsius, so dass ein wesentlich geringerer Aufwand in die Kühlführung der Vorrichtung investiert werden muss. Auch die Probleme der Abnutzung der Düse sowie deren Verstopfung können dadurch umgangen werden. Der beschriebene Lösungsansatz ist prinzipiell mit einer Vielzahl von gasförmigen Medien möglich, da viele Gase in Wasser sehr gut löslich sind. Aufgrund

der Möglichkeit des Einsatzes von Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) in der Trinkwasserindustrie bzw. wegen des umfassenden Kenntnisstands bezüglich der physikalischen und chemischen Eigenschaften wie Löslichkeit in Wasser und Lösewärme wird die Erfindung im Folgenden am Beispiel von  $\text{CO}_2$  näher beschrieben.

Fig. 1 zeigt in einer stark schematisierten Ansicht ein Ausführungsbeispiel einer Vorrichtung 1 zur Bearbeitung von festen Werkstoffen mittels eines Wasserstrahls 2, vorzugsweise eines Hochdruckwasserstrahls, welcher eine Gasbeimischung enthält. Die Vorrichtung 1 umfasst dabei im Wesentlichen einen Mischbereich 3, in welchem das Wasser und ein gasförmiges Medium, im Ausführungsbeispiel Kohlendioxid, miteinander vermischt werden. Das Wasser wird dabei unter Niederdruck (i.e. beispielsweise Betriebsdruck des Wasserleitungsnetzes) über eine Zuleitung 4 mit einem Einlassventil 5 und einer Pumpe 6 in den Mischbereich 3 eingeleitet. Das Kohlendioxid wird beispielsweise über eine Duschkonstruktion 7 aus einem Tank 8, beispielsweise einer Gasflasche, über eine Zuleitung 9 in den Mischbereich 3 eingebracht. Die Duschkonstruktion 7 ist dabei beispielsweise in Form eines Duschkopfes mit einer Vielzahl von Ausströmöffnungen ausgebildet, durch welchen das gasförmige Medium in das im Mischbereich 3 befindliche Wasser einströmt. Eine Rücklaufleitung 10 mit einer weiteren Pumpe 6 erlaubt die Rückspeisung von überschüssigem gasförmigem Medium in die Zuleitung 9. Der Druck im Mischbereich 3 beträgt dabei ungefähr 200 bar, was im Folgenden als Mitteldruck bezeichnet wird.

Nach dem Lösen des gasförmigen Mediums im Wasser wird dieses durch eine Pumpe 11 auf einen Druck von ca. 4000 bar gebracht, welcher im Folgenden als Hochdruck bezeichnet wird, und in einen Behälter 12 weitergeleitet, um von dort aus zu einer Düse 13 zu strömen. Mit dem dort austretenden Wasserstrahl 2, welcher unter Hochdruck durch die Düse 13 gepresst wird, wird der Werkstoff 14 bearbeitet. Die Kontrolle des Drucks und der Durchflussmenge des Wassers erfolgt mit geeigneten Messgeräten 15, welche an verschiedenen geeigneten Stellen der Vorrichtung 1 angeordnet sein können.

Die Bildung der Eiskristalle erfolgt erfindungsgemäß erst nach der Düse 13. Die Kristallbildung wird durch die Expansion bzw. durch die Zerstäubung des Wasserstrahls 2 angeregt, die zu einem plötzlichen Ausperlen unter Freisetzung des gelösten Kohlendioxids aus der nun übersättigten Wasser-Gas-Lösung führt. Eine Lösungswärmemenge von  $-20.54 \text{ kJ/mol}$  wird dabei dem Wasser entzogen. Dies führt abhängig vom Ausgangsdruck des Wassers zu einer augenblicklichen, sehr starken Abkühlung und der spontanen Bildung von Eiskristallen im expandierten Wasserstrahl 2. Somit können Probleme wie Verstopfung, Abnutzung oder Überhitzung der Düse 13 verhindert werden. Eine geeignete Abstimmung

von CO<sub>2</sub>-Lösungskonzentration und Vorkühlung erlaubt dabei eine Steuerung des Partikelanteils und der Partikelgröße im Wasserstrahl 2, so dass dieser auf die jeweiligen Anforderungen des zu bearbeitenden Werkstoffs 14 abgestimmt werden kann, beispielsweise mit vielen großen Eiskristallen zur schnellen, eher groben Reinigung großer Flächen oder mit vielen kleinen Eiskristallen zum Polieren einer Oberfläche. Auch harte Werkstoffe 14 können sauber bearbeitet werden.

Die Beimischung des Kohlendioxids im Mischbereich 3 kann, wie in den Fig. 2A bis 2D schematisch ausschnittsweise dargestellt, direkt in dem Mischbereich 3 erfolgen, wie bereits in Fig. 1 dargestellt und in Fig. 2A vergrößert gezeigt.

Auch indem man im Mischbereich 3 ein auf ca. 200 bar komprimiertes gasförmiges Medium vorlegt und dann Wassertröpfchen zerstäubt in dieses System einbringt, wie in Fig. 2C dargestellt, ist es möglich, eine effektive Vermischung und Lösung des Gases zu erzielen.

Weiterhin ist es möglich, wie in Fig. 2D schematisch dargestellt, Wasser im Mischbereich 3 vorzulegen, Trockeneis-Pellets 16 bzw. gefrorene Kohlendioxid-Pellets 16 mit einer Temperatur von ca. -78°C in den Mischbereich 3 einbringt und anschließend Druck anlegt. In dem im Vergleich zu den Pellets 16 relativ warmen Wasser schmelzen die Pellets 16 sofort unter starker Bläschenbildung, wobei das Kohlendioxid durch den Druck in Lösung geht. Nebenbei kühlt sich auch noch das Wasser dabei ab, was in Hinblick auf die Eiskristallbildung im weiteren Verlauf vorteilhaft ist.

In allen Fällen verlässt ein gesättigtes Gemisch aus Wasser und Kohlendioxid den Mischbereich 3 in Richtung auf den Behälter 12.

Im Mischbereich 3 wird zunächst das Wasser mit Kohlendioxid durch Lösen des CO<sub>2</sub> im Wasser versetzt, z.B. durch Durchleiten von CO<sub>2</sub> aus dem Tank 8, der in dem in Fig. 1 dargestellten Ausführungsbeispiel als Gasflasche ausgebildet ist. Auch die Verwendung von Druckpatronen, wie sie für Mineralwasser bekannt sind, ist möglich. Der Prozess des Lösens von Kohlendioxid in Wasser kann durch die Überwachung des pH-Wertes über einen geeigneten Sensor kontrolliert werden, da aufgrund des Reaktionsgleichgewichts von CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O mit HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>/H<sup>+</sup> gesättigte Lösungen mit CO<sub>2</sub> sauer sind; z.B. liegt bei 298 K ein pH-Wert von 3,9 vor. Die Temperatur der Vorrichtung 1 steigt durch die Lösewärme des Kohlendioxids leicht an, so dass eine Wärmeabfuhr im Mischbereich 3 beispielsweise durch eine Wasserkühlung angezeigt ist.

Der Wasserstrahl 2 wird erzeugt, indem das Wasser-Kohlendioxid-Gemisch durch die Pumpe 11, welche hochdruckgeeignet ausgestaltet sein muss, in den Behälter 12 gepumpt und dann zur Düse 13 weitergeleitet und durch diese durchgepresst wird. Dafür können vorhandene Pumpen 11 und Düsen 13 ohne weitere technische Modifikationen verwendet werden. Es müssen auch keinerlei weitere Materialien von außen zugeführt werden, es ist also kein zusätzlicher Ansaugstutzen notwendig.

Als Anhaltspunkt, wie groß die erzielbare Abkühlung ist, kann die im Folgenden angegebene Abschätzung dienen. Der erzielbare Temperaturunterschied errechnet sich über die Stoffmenge des gelösten Kohlendioxids ( $n_{\text{CO}_2}$ ), die Stoffmenge des Wassers ( $n_{\text{H}_2\text{O}}$ ), die isobare Wärmekapazität von flüssigem Wasser ( $c_{p\text{H}_2\text{O}}=75,3 \text{ J}/(\text{K mol})$ ) sowie die Lösungsenthalpie von Kohlendioxid in Wasser ( $\Delta H=-20,54 \text{ kJ/mol}$ ). Bis zu einem Druck von ca. 300 bar  $\text{CO}_2$  lässt sich der Molenbruch von Kohlendioxid  $n_{\text{CO}_2}/n_{\text{total}}$ , also der Anteil der im Wasser gelösten  $\text{CO}_2$ -Moleküle, über das Henry-Gesetz linear mit dem  $\text{CO}_2$ -Partialdruck ausdrücken. Die Proportionalitätskonstante des Henry-Gesetz ist für  $\text{CO}_2$   $k_{\text{CO}_2}=1650 \text{ bar}$ . Solange der  $\text{CO}_2$ -Partialdruck  $p_{\text{CO}_2}$  viel kleiner als  $k_{\text{CO}_2}$  ist, ergibt sich für die Abkühlung eine in  $p_{\text{CO}_2}$  lineare Beziehung mit einer Proportionalitätskonstante von  $\Delta H/(c_{p\text{H}_2\text{O}} k_{\text{CO}_2})$ , was bei Einsetzen bekannter Werte eine Proportionalitätskonstante von 0,165 K/bar ergibt. Pro bar gelöstem  $\text{CO}_2$  sinkt die Temperatur also um 0,165 K, bei 100 bar demnach bereits um 16,5 K.

Beginnt man bei kaltem Leitungswasser von ca.  $10^\circ\text{C}$ , so würde ein Entweichen von bei 100 bar gelöstem  $\text{CO}_2$  bereits ausreichen, um Temperaturen unter dem Gefrierpunkt zu erreichen. Dabei ist die Abkühlung durch die Expansion des Wasserstrahls 2 vom Behälter 12 bei 4000 bar auf 1 bar nach der Düse 13 noch nicht berücksichtigt. Bei Normaldruck sind bei 273K 3,4g bzw. bei 298K 1,5g  $\text{CO}_2$  in einem Liter Wasser löslich. Das entspricht 1,93 bzw. 0,85 Litern  $\text{CO}_2$  (0,077 mol bzw. 0,034 mol) pro Liter Wasser. Bei erhöhtem Druck, z.B. in mit Kohlensäure versetztem Mineralwasser, sind erheblich größere Mengen löslich.

Das freigesetzte Kohlendioxid kann bei Bedarf recycled oder abgesaugt werden. Es muss jedoch dafür gesorgt werden, dass die Beimischung von Kohlendioxid zur Umgebungsluft nicht zu hoch wird, da sonst Erstickungsgefahr besteht, etwa durch Lüften oder entsprechend große Räume.

Die Erfindung ist nicht auf das dargestellte Ausführungsbeispiel beschränkt, sondern beispielsweise auch mit anderen gasförmigen Medien durchführbar.

Patentansprüche:

1. Verfahren zum Bearbeiten eines festen Werkstoffs mit einem aus einer Düse austretenden Wasserstrahl, welcher Eiskristalle enthält und auf den festen Werkstoff auftrifft, dadurch gekennzeichnet, dass ein unter Standardbedingungen gasförmiges Medium bei einem Druck von 1-150 bar im Wasser gelöst, anschließend auf 1000-4500 bar komprimiert und durch eine Düse gepresst wird, unter Bedingungen, die ein Ausperlen des gelösten gasförmigen Mediums nach Verlassen der Düse gestatten, wobei dem Wasser die Lösungswärme entzogen wird und die Eiskristalle gebildet werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Lösen des gasförmigen Mediums im Wassers in einer Mischstufe durch Durchleiten von gasförmigem Medium aus Gasflaschen oder Druckpatronen bei einem Druck von 1-150 bar durch das Wasser oder durch Einbringen von das gasförmige Medium enthaltenden Trockeneis-Pellets in das Wasser erfolgt.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass ein Abstimmen der Lösungskonzentration des gasförmigen Mediums und der Temperatur des Wassers den Partikelanteil und die Partikelgröße der im Wasserstrahl gebildeten Eiskristalle steuert.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass das gasförmige Medium Kohlendioxid ist.
5. Vorrichtung zum Bearbeiten eines festen Werkstoffs (14) mit einem aus einer Düse (13) austretenden Wasserstrahl (2), welcher Eiskristalle enthält und auf den festen Werkstoff (14) auftrifft, umfassend eine Zuleitung (4) mit einem Einlassventil (5) und einer Pumpe (6) für Wasser in einen Mischbereich (3), einen mit dem Mischbereich (3) über eine Pumpe (11) verbundenen Behälter (12) und eine an den Behälter (12) angeschlossene Düse (13), dadurch gekennzeichnet, dass in dem über die Zuleitung (4) in den Mischbereich (3) eingespeisten Wasser vor oder im Mischbereich (3) ein gasförmiges Medium unter Druck zuführbar und im Wasser lösbar ist.
6. Vorrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass das gasförmige Medium über eine in dem Mischbereich (3) angeordnete Duschkabine (7) in das Wasser einbringbar ist, wobei die Duschkabine (7) insbesondere in Form eines Duschkopfes mit einer Vielzahl von Austrittsöffnungen ausgebildet ist.

7. Vorrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass das gasförmige Medium zuströmseitig des Mischbereichs (3) unter einem Druck von 1-150 bar in das Wasser einbringbar ist.
8. Vorrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass das gasförmige Medium in dem Mischbereich (3) unter einem Druck von 1-150 bar vorliegt und das Wasser durch Zerstäubung zugeführt wird.
9. Vorrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass das gasförmige Medium über Trockeneis-Pellets (16), die das gasförmige Medium enthalten, in das Wasser einbringbar und das gasförmige Medium unter Druck in dem Wasser lösbar ist.
10. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 5 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass das gasförmige Medium in einem Tank (8) bereitgestellt ist, welcher insbesondere in Form einer Gasflasche oder Gaskartusche ausgebildet ist und aus welchem das gasförmige Medium über eine Zuleitung (9) der Vorrichtung (1) zuleitbar ist.
11. Vorrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass der Mischbereich (3) mit einer Rücklaufleitung (10) verbunden ist, über welche überschüssiges gasförmiges Medium in die Zuleitung (9) rückspeisbar ist.
12. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 5 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass das Wasser unter einem Druck von 1000-4500 bar durch die Düse (13) gepresst wird.
13. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 5 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass das gasförmige Medium Kohlendioxid ist.

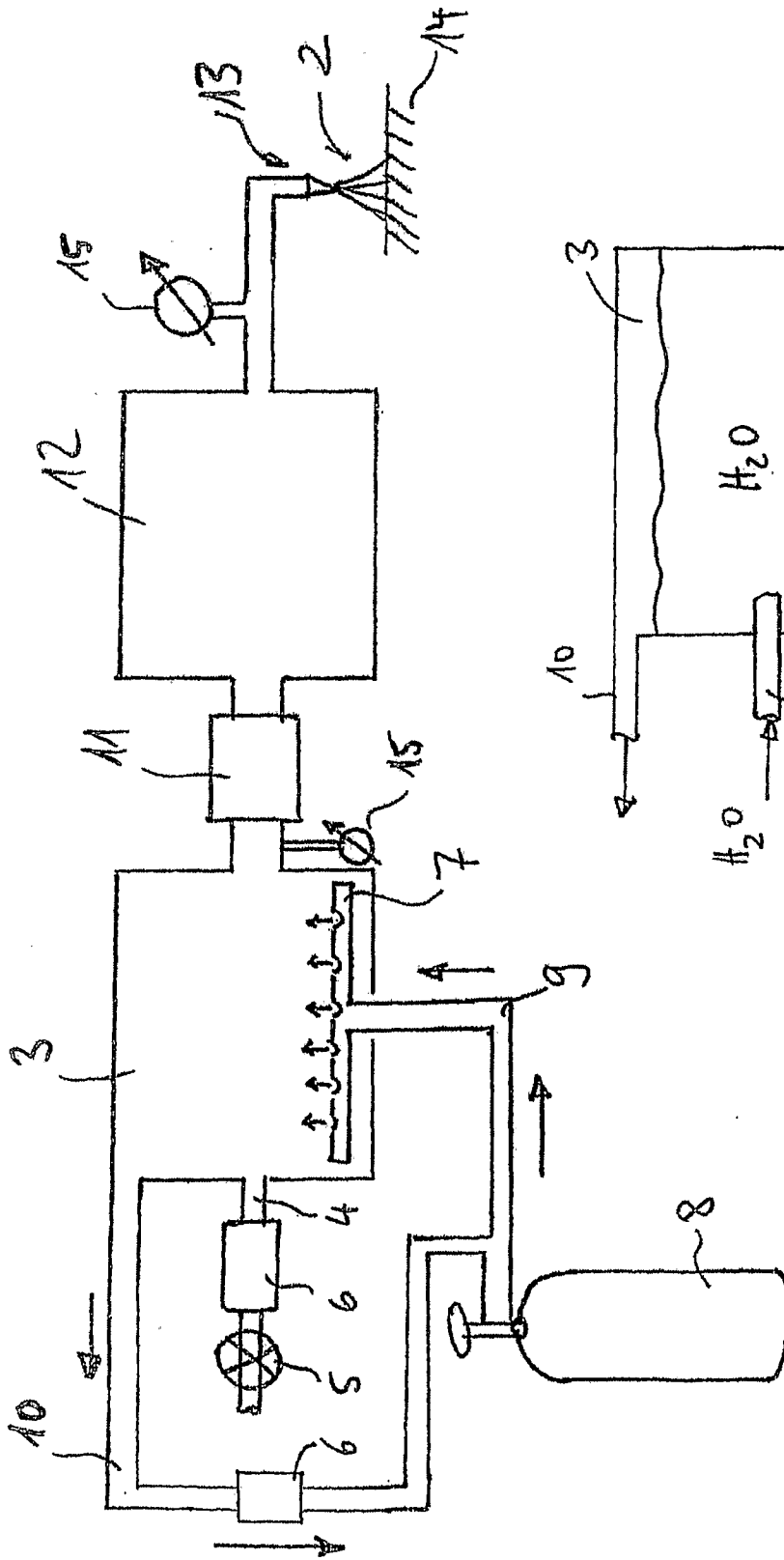


Fig. 1

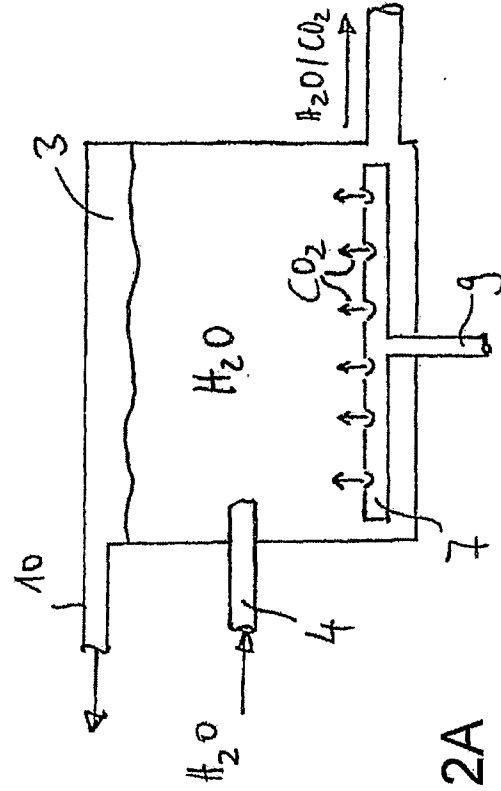


Fig. 2A

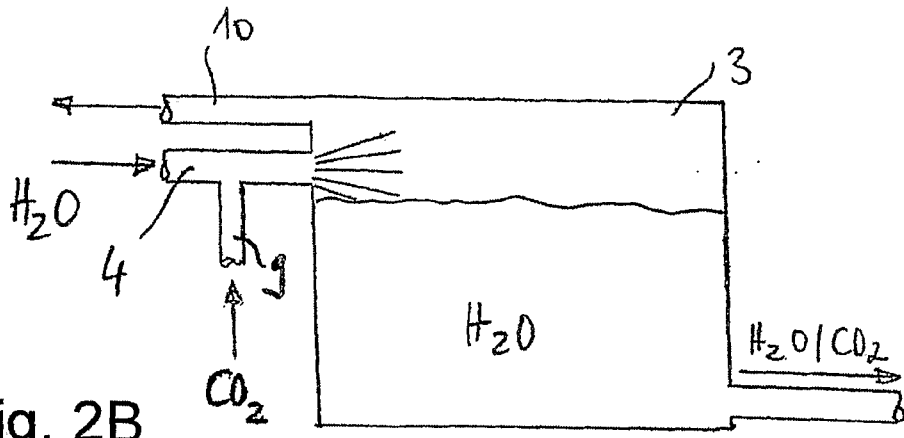


Fig. 2B

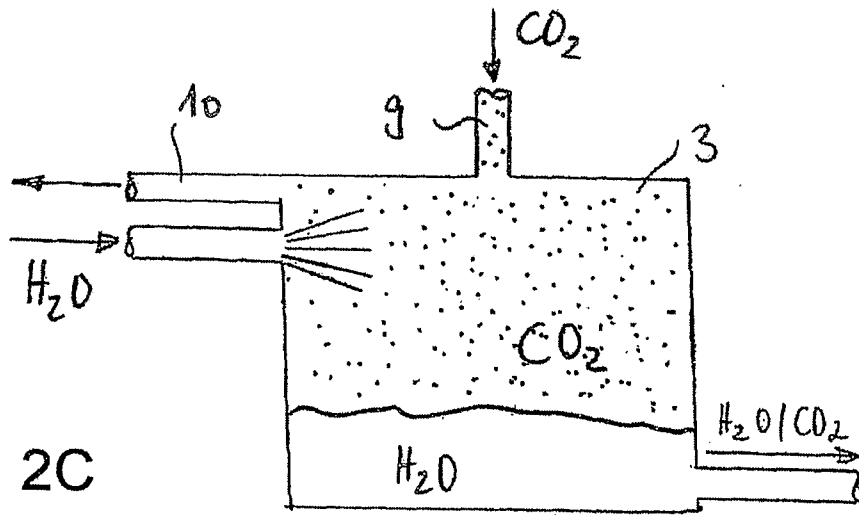


Fig. 2C

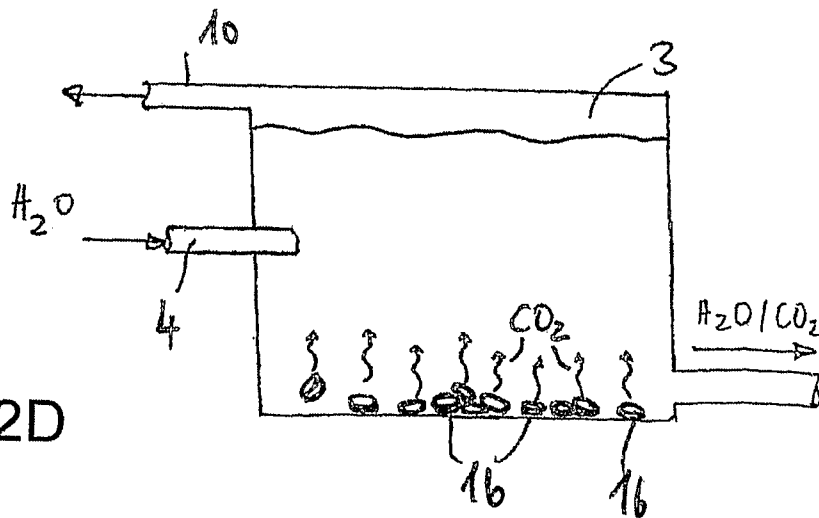


Fig. 2D